

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

**Mémoire de fin d'Etude**  
**De MASTER ACADEMIQUE**  
Domaine : Sciences et technologies  
Filière : Génie électrique  
Spécialité : Machines électriques

*Présenté par*  
**Kamel Mokhtari**  
**Youcef Larabi**

Mémoire dirigé par M<sup>r</sup> **Hamid Seddiki**

Thème  
**Etude et simulation d'un système  
photovoltaïque.**

*Mémoire soutenu publiquement le 02 juillet 2018 devant le jury composé de :*

**M Tahar OTMANE CHERIF**  
Professeur, UMMTO, Président

**M Hamid SEDDIKI**  
Professeur, UMMTO, Encadreur

**M Ali BECHOUCHE**  
MCA, UMMTO, Examineur

**M Yacine TRIKI**  
Doctorant, UMMTO, Examineur

## *Remerciements*

*Tout d'abord nous tenons à remercier Dieu tout puissant, de nous avoir donné la force et le courage d'accomplir ce travail, ainsi que nos parents qui nous ont soutenus tout au long de nos études*

*Nous tenons à exprimer nos plus vifs remerciements à Mr.Seddiki Hamid pour l'encadrement qu'il nous a assuré et ses précieux et judicieux conseils qu'il n'a cessé de nous prodiguer tout au long de ce projet, sa confiance témoignée, sans oublier ses qualités humaines. Il trouvera ici notre gratitude et notre reconnaissance profondes.*

*Nous remercions les membres du jury, qui nous ont fait l'honneur de participer au jugement de ce travail.*

*Nous adressons notre sympathie à toutes les personnes que nous avons pu côtoyer amicalement ces deux dernières années et qui ont toujours su maintenir une ambiance d'étude chaleureuse.*

# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail en premier lieu à mes parents,  
Qui m'ont tant donné sans jamais rien demander en retour, qui m'ont soutenu, aidé  
tout au long de mon parcours et sans qui je ne serais pas ou j'en suis.  
Que Dieu me les garde le plus longtemps possible et me donne la force de les servir.*

*À mon frère Hakîm et à mes sœurs Lisa, Katia et son mari samir ainsi que ma petite  
nièce Lyna*

*À tous mes amis, particulièrement dyhia, lamia, djidji, ghilas, josef, mouhamed arab  
qui m'ont beaucoup soutenu et sur lesquels j'ai toujours pu compter et à tous ceux  
qui m'aiment.*

*Et à toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce  
travail. À tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science  
et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la*

*Prosperité de l'humanité.*

*M.KAMEL*

## *Dédicace*

*Je dédier ce modeste travail*

*A la mémoire de mon père et mon oncle.*

*A ma chère mère pour tout les sacrifices et la confiance qu'elle  
m'accorde et tout l'amour dont elle ma entourer*

*A mes frères Amirouche et idir*

*A ma sœur Naima et ces petits enfants (Lilia et Boussad)*

*A tous mes amis pour leur sympathie, leur humeur et leur  
Solidarités envers moi.*

*Et finalement à ma chère copine Milifa qui n'a jamais cessée de me  
soutenir.*

*Larabi Youcef*

**Liste des figures**

**Chapitre I**

**Figure (I.1) :** Spectre du rayonnement solaire.

**Figure (I.2) :** rayonnement solaire globale sur un collecteur photovoltaïque.

**Figure (I.3) :** Schéma illustratif de l'effet photovoltaïque.

**Figure (I.4) :** Représentation schématique d'une cellule solaire.

**Figure (I.5) :** fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

**Figure (I.6) :** Cellule solaire de type mono- cristalline.

**Figure (I.7) :** cellule solaire de type poly-cristalline.

**Figure (I.8) :** cellule solaire de type amorphe.

**Figure (I. 9) :** modèle de la cellule photovoltaïque réel.

**Figure (I.10) :** caractéristique  $I-V$  de la cellule photovoltaïque.

**Figure (I.11) :** modèle simplifié de la cellule photovoltaïque.

**Figure (I.12):** Modèle de la cellule photovoltaïque réelle.

**Figure(I.13) :** caractéristique  $I . V$  courbe d'un dispositif photovoltaïques pratique et les trois points remarquables.

**Figure (I.14):** Caractéristique courant tension de  $N_s$  cellule en série.

**Figure (I.15):** Caractéristique courant tension de  $(N_p)$  cellule en parallèle.

**Figure (I. 16) :** schéma bloc de simulation du module PV KC200GT

**Figure (I. 17):** Caractéristique  $P(V)$  d'une cellule photovoltaïque.

**Figure (I.18) :** Caractéristique  $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque.

**Figure (I. 19) :** L'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I=f(V)$ .

**Figure (I.20) :** L'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $P=f(V)$ .

**Figure (I.21) :** L'influence de la température sur la caractéristique  $I=f(V)$ .

**Figure (I.22) :** L'influence de la température sur la caractéristique  $P=f(V)$ .

**Figure (I.23) :** Influence de résistance  $R_s$  sur la caractéristique courant-tension.

caractéristiques  $I(V)$ et  $P(V)$  du générateur photovoltaïque.

**Figure (I.24) :** Influence de résistance série  $R_s$  sur la caractéristique puissance-tension.

**Figure (I.25) :** Influence de résistance  $R_p$  sur la caractéristique courant-tension d'un GPV.

**Figure (I.26) :** Influence de résistance  $R_p$  sur la caractéristique puissance-tension d'un GPV.

## Chapitre II

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

**Figure (II.2) :** Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe, en fonction de la charge.

**Figure (II.3) :** Caractéristique I-V pour une charge résistive variable.

**Figure (II.4) :** Étage d'adaptation entre un GPV et une charge.

**Figure (II.5) :** Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque à base d'une transformation DC Contrôler par une commande MPPT

**Figure (II.6) :** Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage

**Figure(II.7) :** périodes fermeture et ouverture d'un commutateur.

**Figure (II.8) :** Circuit électrique de base du hacheur Buck

**Figure (II.9) :** Circuits équivalents du convertisseur Buck, (A) : k fermé, (B) : k ouvert.

**Figure (II.10) :** Allure des variables dynamiques  $i_L$ .

**Figure (II.11) :** Circuit électrique du convertisseur Boost.

**Figure (II.12) :** Circuits équivalents du convertisseur Boost, (A) : k fermé, (B) : k ouvert.

**Figure (II.13) :** Le rapport de conversion  $M(D)$  pour un convertisseur boost

**Figure (II.14) :** Circuit électrique d'un convertisseur Buck-Boost.

**Figure (II.15) :** Circuits équivalents de Buck-Boost, (A) : k fermé, (B) : k ouvert.

**Figure (II.16) :** Rapport de conversion  $M(D)$  pour un convertisseur Buck – Boost.

**Figure (II .17) :** schéma bloc de simulation du convertisseur boost .

**Figure (II .18) :** tension de sortie du convertisseur Boost.

**Figure(II.19) :** courant de sortie du convertisseur Boost.

**Figure (II.20) :** La caractéristique P-V et la trajectoire de PPM.

**Figure (II.21):** La caractéristique I-V et la trajectoire de PPM.

**Figure (II.22):** Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.

**Figure (II.23):** Schéma de converge vers le PPM par P&O.

**Figure (II.24):** Algorithme de MPPT a base de la méthode P&O.

**Figure (II.25) :** Trajectoire par Incrémentation de Conductance.

**Figure(II.26) :** Algorithme d'incrémentation de la conductance

### Chapitre III

**Figure (III.1) :** Schéma bloc de la simulation d'un système PV avec la commande MPPT

**Figure (III.2) :** Schéma bloc d'algorithme MPPT.

**Figure (III.3) :** Tension de sortie du GPV

**Figure (III.4) :** Puissance de sortie du GPV.

**Figure (III.5) :** tension de sortie a la sortie du convertisseur.

**Figure (III.6) :** Puissance de sortie du convertisseur.

**Figure (III.7) :** Variation de l'éclairement en fonction du temps (profil lent).

**Figure (III.8) :** tension de sortie du GPV pour un éclairement variable (profile lent).

**Figure (III.9) :** puissance de sortie du GPV pour un éclairement variable (profile lent).

**Figure (III.10) :** tension de sortie du convertisseur pour un éclairement variable (profile lent).

**Figure (III.11) :** puissance de sortie du convertisseur pour un éclairement variable (profile

**Figure (III.12) :** Variation de l'éclairement en fonction du temps (profil rapide).

**Figure (III.13) :** tension de sortie du GPV pour un éclairement variable (profil rapide).

**Figure (III.14) :** puissance de sortie du GPV pour un éclairement variable (profil rapide).

**Figure (III.15) :** tension de sortie du convertisseur pour un éclairement variable (profil rapide).

**Figure (III.16) :** puissance de sortie du convertisseur pour un éclairement variable (profil rapide).

**Figure (III.17)** : Variation de la température en fonction du temps (profil lent).

**Figure (III.18)** : tension de sortie du GPV pour une température variable (profil lent).

**Figure (III.19)** : puissance de sortie du GPV pour une température variable (profil lent).

**Figure (III.20)** : tension de sortie du convertisseur pour une température variable (profil lent).

**Figure (III.21)** : puissance de sortie du convertisseur pour une température variable (profil lent).

**Figure (III.22)** : Variation de la température en fonction du temps (profil rapide).

**Figure (III.23)** : tension de sortie du GPV pour une température variable (profil rapide).

**Figure (III.24)** : puissance de sortie du GPV pour une température variable (profil rapide).

**Figure (III.25)** : tension de sortie du convertisseur pour une température variable (profil rapide).

**Figure (III.26)** : puissance de sortie du convertisseur pour une température variable (profil rapide).

**Figure (III.27)** : Schéma bloc de connexion direct d'un GPV

**Liste des tableaux**

**Chapitre I**

**Tableau (I.1) :** Tableau représentant le rendement de chaque type de cellule.

**Tableau (I.2) :** Paramètres du module PV KC200GT aux conditions standards.

**Chapitre III**

**Tableau (III.1):** la variation de la puissance par rapport la charge (sans MPPT)

**Tableau (III.2) :** Variation l'éclairement.

**Tableau (III.3) :** Variation la température.

## Acronymes

**PV**: Photovoltaïque.

**GPV**: Générateur Photovoltaïque.

**FF**: Facteur de forme.

**Ns** : Nombre de cellules en série.

**Np** : Nombre de cellules en parallèle.

**MPP** : Maximum power point

**MPPT**: Maximum Power Point Tracking.

**P&O**: Perturbation et Observation.

**DC**: Courant Continu (Direct Current).

**AC**: Courant Alternatif (Alternative Current).

## Symboles

**h** : Constante de Planck ( $6.62 \cdot 10^{-34}$  j.s).

**Eg** : Energie de la bande interdite (eV).

**S** : Surface du module photovoltaïque ( $m^2$ ).

**E** : Eclairement ( $W/m^2$ ).

**I<sub>ph</sub>** : Le photo-courant (A).

**I<sub>sat</sub>** : Courant de saturation (A).

**R<sub>p</sub>** : Résistances parallèle shunt. ( $\Omega$ )

**R<sub>S</sub>** : Résistance série ( $\Omega$ ).

**T<sub>c</sub>** : Température de jonction ( $^{\circ}K$ ).

**G** : L'éclairement de référence ( $1000 W/m^2$ ).

**T<sub>ref</sub>**: La température de référence ( $298^{\circ}K$ ).

**$\alpha$**  : Le coefficient de courant en fonction de température ( $A/^{\circ}C$ ).

**I<sub>cc</sub>** : Le courant de court-circuit (A).

**V<sub>co</sub>** : La tension de circuit ouvert (V).

**FF** : Facteur de forme.

**Ns** : Nombre de modules dans le panneau en série.

**Np** : Nombre de modules dans le panneau en parallèle.

**P<sub>max</sub>** : La puissance maximale produite PV (W).

**V<sub>max</sub>** : Tension qui correspond à la puissance maximale (V).

## Acronymes et symboles

---

**I<sub>max</sub>**: Courant qui correspond à la puissance maximale (A).

**V<sub>opt</sub>** : Tension optimale (V).

**I<sub>opt</sub>** : Courant optimum (A).

**V<sub>co</sub>** : Tension à circuit ouvert (V).

**I<sub>cc</sub>** : Courant de court-circuit (A)

**K** : coefficient de Boltzman ( $1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J / K}$ )

**T<sub>amb</sub>** : Température ambiante (C°)

**T<sub>c</sub>** : Température de la cellule (C°)

## Sommaire

Introduction générale.....	1
<b>CHAPITRE I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques.</b>	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Gisement solaire.....	3
I.2.1 les rayonnement solaire.....	3
I.2.2 Différents types de rayonnement.....	4
I.2.3 Durée d'insolation.....	5
I.3 L'effet photovoltaïque.....	5
I.4 Définition d'une cellule solaire.....	6
I.4.1 Fonctionnement d'une cellule solaire.....	7
I.4.2 différents types de cellules solaires.....	8
I.5 Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque.....	9
I.5.1.Paramètres d'une cellule photovoltaïque.....	10
I.5.2. Cellule PV simplifiée.....	12
I.5.3 .Cellule photovoltaïques réelle.....	14
I.5.4. Modèle amélioré.....	15
I.6 Les modules (ou panneaux).....	16
I.6.1 Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV).....	16
I.6.2 Regroupement des cellules.....	17
I.6.2.1 Regroupement en série.....	17
I.6.2.2 Regroupement en parallèle.....	17
I.6.2.3 Regroupement mixte (série et parallèle).....	18
I.7 Simulation du générateur photovoltaïque KC200GT.....	18
I.7.1 Caractéristique du Module photovoltaïque KC200GT utilisé.....	18
I.7.2 Schéma bloc de simulation du module PV KC200GT.....	19
I.7.3 Caractéristiques courant-tension et puissance-tension.....	19

I.8 Influence des paramètres internes et externes sur le GPV .....	20
I .8.1 Influence de l'éclairement sur le GPV .....	20
I .8.2 Influence de la température sur le GPV .....	21
I .8.3 Influence de la résistance série sur le GPV .....	23
I .8.4 Influence de la résistance shunt sur le GPV .....	24
I.9 Conclusion .....	25
<b>CHAPITRE II : les convertisseurs (DC-DC) et la commande MPPT.</b>	
II.1.Introduction .....	26
II.2 Connexion direct entre la source et la charge .....	26
II.3. Fonctionnement optimal du GPV .....	27
II.4. Étage d'adaptation entre un Générateur PV et une charge .....	28
II.5. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs) .....	30
II.5.1 Convertisseur Buck .....	31
II.5.1.1 Modèle mathématique équivalent .....	32
II.5.1.2 Modèle approximé du convertisseur Buck .....	33
II.5.1.3 Etude en régime permanent .....	35
II.5.1.4 Rapport de conversion $M(\alpha)$ .....	35
II.5.2 Convertisseur Boost .....	35
II.5.2.1 Modèle mathématique équivalent .....	36
II.5.2.2. Modèle approximé du convertisseur Boost .....	37
II.5.2.3 Etude en régime continu .....	37
II.5.2.4 Rapport de conversion $M(D)$ .....	38
II.5.3 Convertisseur Buck-Boost .....	38
II.5.3.1 Modèle Mathématique équivalent .....	39
II.5.3.2 Etude en régime continu .....	40
II.5.3.3 Rapport de conversion $M(D)$ .....	41
II.6. Simulation du hacheur parallèle .....	41

## Sommaire

---

II.7.Principe de fonctionnement de MPPT .....	43
II.8. Classification de l'algorithm de suiveur de la puissance max.....	45
II.8.1 Les méthodes indirectes .....	45
II.8.1.1 La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur.....	45
II.8.1.2 La méthode de court-circuit .....	45
II.8.2 Les méthodes directes .....	46
II.8.2.1 La méthode Perturbe & Observe (P&O) .....	46
II.8.2.2 La méthode de l'incrémentale conductance .....	48
II.9. Conclusion .....	50
<b>CHAPITRE III : simulation et évaluation des résultats.</b>	
III.1 introduction .....	51
III.2 Simulation du GPV avec MPPT et un convertisseur DC/DC .....	51
III.3 Fonctionnement dans des conditions environnementales stables.....	53
III.3.1 Résultats de la simulation a la sortie du GPV .....	53
III.3.2 Résultats a la sortie du convertisseur.....	54
III.4 Fonctionnement dans des conditions environnementales variables .....	55
III.4.1 Eclairage variable et température constante .....	55
III.4.1.1 Profil lent .....	55
III.4.1.1.1 Résultats de la simulation a la sortie du GPV .....	56
III.4.1.1.2 Résultats de la simulation a la sortie du convertisseur .....	57
III.4.1.2 Profil rapide .....	58
III.4.1.2.1 Résultats de la simulation a la sortie du GPV .....	58
III.4.1.2.2 Résultats de la simulation a la sortie du convertisseur .....	59
III.4.2 Température variable et éclairage fixe .....	60
III.4.2.1 Profil lent .....	60
III.4.2.1.1 Résultats de la simulation a la sortie du GPV .....	61
III.4.2.1.2 Résultats de la simulation a la sortie du convertisseur .....	62

## Sommaire

---

.III.4.2.2 Profil rapide .....	63
III.4.2.2.1 Résultats de la simulation a la sortie du GPV .....	64
III.4.2.2.1 Résultats de la simulation a la sortie du convertisseur .....	65
III.5 Connexion générateur PV – Charge .....	66
III.5.1 Variation de la puissance et de la tension en fonction de la charge .....	66
III.5.2 Eclairement variable et température constante .....	67
III.5.2 Température variable et éclairement constant : .....	67
III.6 Conclusion.....	68
Conclusion générale.....	69

# *Introduction générale*

## *Introduction générale*

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. Les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ainsi que les pays en voie de développement ne cessent de se multiplier. Cette production a triplé depuis les années 60 à nos jours. La totalité de production mondiale d'énergie provient de sources fossiles.

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 la consommation excessive de stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures.

Les énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie biomasse et l'énergie hydroélectrique, sont des solutions prometteuses pour concurrencer les sources d'énergies de masse telle que l'énergie fossile et nucléaire.

On entend par énergie renouvelable, des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les Energies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée.

Le rayonnement solaire est répartie sur toute la surface de la terre, sa densité n'est pas grande et ne cause aucun conflit entre les pays contrairement au pétrole. Les systèmes photovoltaïques semblent bien s'imposer comme moyen de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Un tel système se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adaptent l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs.

Dans ce mémoire, on analyse la modélisation et la simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque adapté par une commande numérique (commande MPPT : perturbation et observation) assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque. L'objectif de ce travail est de contribuer à une meilleure compréhension des performances de convertisseur DC-DC adapté par la commande numérique lors qu'il est couplé à un générateur photovoltaïque et améliorer sa tension de sortie afin d'obtenir une bonne source qu'on peu utiliser comme un générateur d'électricité.

- Ainsi, ce mémoire est présenté comme suit :

Le premier chapitre est consacré à la modélisation du générateur photovoltaïque. Ainsi, nous décrivons brièvement la structure et le fonctionnement des cellules et générateurs photovoltaïques. Par ailleurs l'influence des conditions météorologiques (température et éclairage) sur les caractéristiques électriques des générateurs photovoltaïques est présentée.

Le deuxième chapitre est dédié à l'étude des différents types de convertisseurs *DC/DC* et au développement de différents algorithmes les plus répandues pour la poursuite du point de puissance maximum.

Trois types de convertisseurs *DC/DC* sont étudiés, le hacheur abaisseur (*Buck*), élévateur (*Boost*) et abaisseur-élévateur (*Buck-Boost*).

Par ailleurs, la méthode *MPPT* étudiée est la méthode Perturbation et Observation (*P&O*) ; Avec une simulation du comportement de notre panneau photovoltaïque avec cette technique.

Dans le troisième et dernier chapitre, nous présentons une simulation complète avec et sans optimisation d'un système photovoltaïque alimentant une charge résistive.

Une conclusion et commentaire apportés sur les résultats obtenus et les perspectives de ce travail terminent notre présent mémoire.

*Chapitre I*  
*Généralités sur les*  
*systemes photovoltaïques.*

## I.1 Introduction

L'énergie photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette énergie est l'une des sources les plus importantes d'énergie renouvelable qui suscitait un intérêt croissant ces dernières années. Aujourd'hui les technologies photovoltaïques (PV) sont suffisamment mûres et métrisées pour prendre un véritable décollage dans le domaine des applications de puissance. Les éléments de base sont des cellules qui convertissent le rayonnement solaire en courant électrique (effet photovoltaïque), la réalisation et l'optimisation des systèmes photovoltaïques sont les problèmes d'actualités, la résolution de ces problèmes conduit sûrement à une meilleure exploitation de l'énergie solaire.

## I.2 Gisement solaire

Comme pour toutes les applications de l'énergie solaire, une bonne connaissance du gisement solaire est nécessaire à l'étude des systèmes photovoltaïques. Par gisement solaire, on entend ici les différentes caractéristiques du rayonnement solaire, susceptible d'influencer les performances d'un système en un lieu donné.

### I.2.1 Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est la lumière qui provient du soleil sous forme d'onde électromagnétique. Il est constitué de photons d'énergie :

$$E_{ph} = \frac{hc}{\lambda} \quad (I.1)$$

Avec :

$\lambda$  : Longueur d'onde,

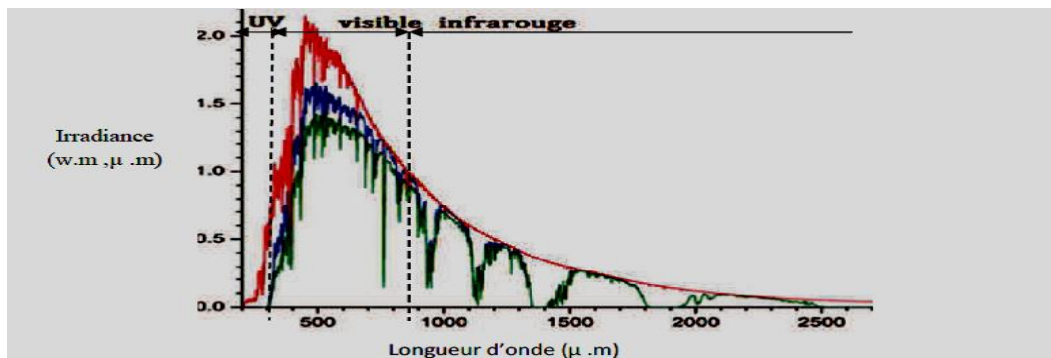
$h$  : Constante de Planck

$c$  : Célérité de la lumière.

D'après cette relation, l'énergie transportée par un photon est inversement proportionnelle à sa longueur d'onde. Il est à remarquer que le spectre de l'énergie solaire en atmosphère terrestre est décalé vers le rouge et l'infrarouge par rapport au spectre hors atmosphère. [1][2]

Les longueurs d'ondes du rayonnement solaire terrestre sont comprises entre **0,25µm** (*ultra-violet*) et **4µm** (*infrarouge*) avec un maximum d'énergie pour **0,5µm**. Les capteurs

d'énergie solaire doivent donc être compatibles avec ces longueurs d'ondes pour pouvoir piéger les photons et les restituer sous forme de chaleur ou d'électrons. [1]



**Figure I.1 :** Spectre du rayonnement solaire

### I.2.2 Différents types de rayonnement

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composantes :

#### **Rayonnement direct :**

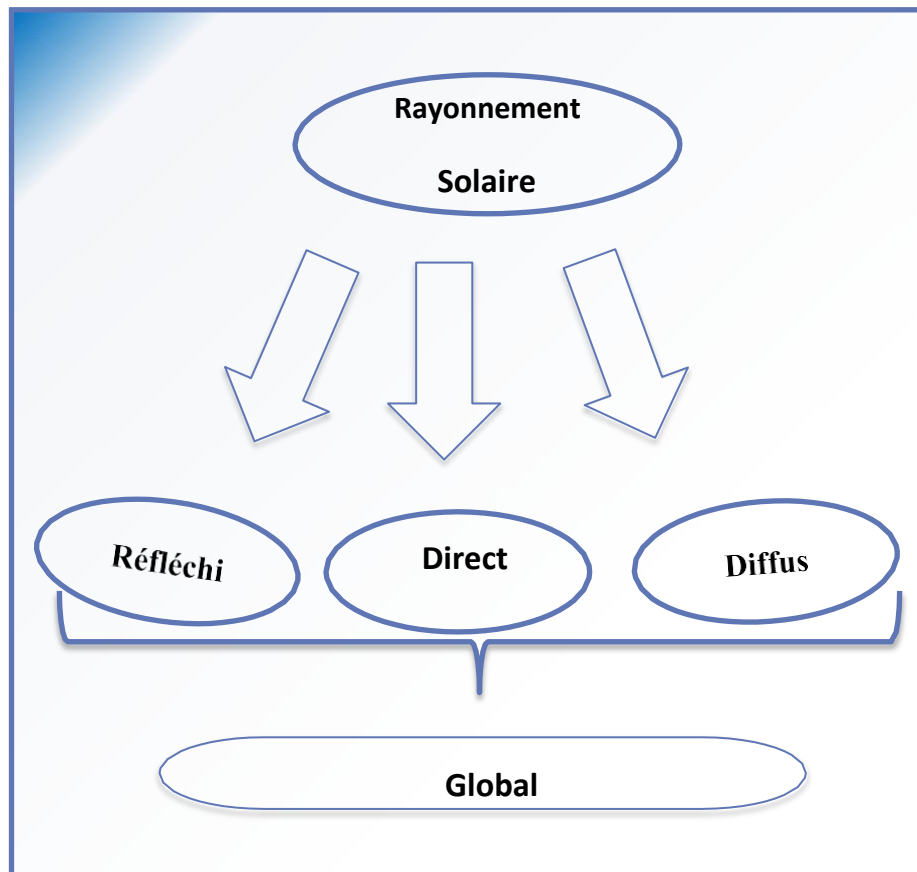
Le rayonnement direct est le rayonnement reçu directement du soleil. Il peut être mesuré par un pyréliomètre. [1]

#### **Rayonnement réfléchi ou un albédo :**

C'est la fraction d'un rayonnement incident diffusé ou réfléchi par un obstacle. Ce terme étant généralement réservé au sol et aux nuages, c'est une valeur moyenne de leur réflecteur pour le rayonnement considéré, et pour tous les angles d'incidences possibles. Par définition le corps noir possède un albédo nul. [1]

#### **Rayonnement global :**

Le rayonnement global au sol est donc fonction de la composition et de l'épaisseur de l'atmosphère traversée par les rayons lumineux au cours de la journée. Il se décompose en rayonnement direct et rayonnement diffus, et ce sont ces deux rayonnements qui sont exploités par les générateurs solaires. [1]



**Figure I.2 :** rayonnement solaire globale sur un collecteur photovoltaïque.

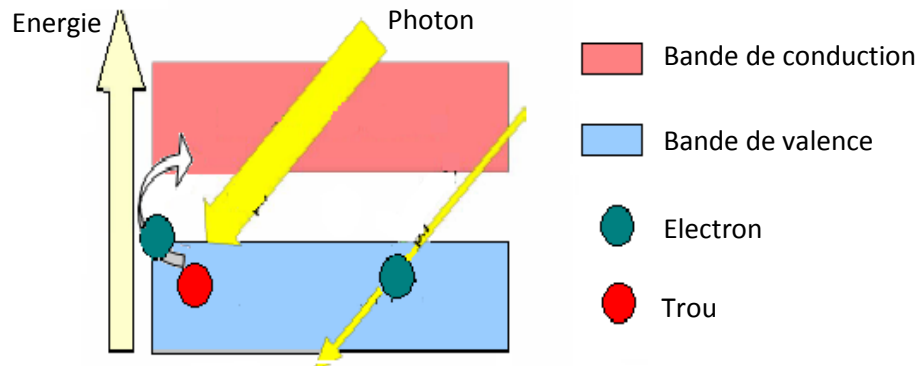
### I.2.3 Durée d'insolation

La durée d'ensoleillement ou durée d'insolation est un indicateur climatique qui mesure le temps pendant lequel un endroit, un lieu, est éclairé par le soleil sur une période donnée. Ceci exprime en quelque sorte la nébulosité et ne doit pas être confondu avec l'ensoleillement qui exprime la quantité d'énergie reçue par le rayonnement solaire sur une surface donnée et sur une certaine période. La durée d'ensoleillement est généralement exprimée en heures par an ou alors en une moyenne d'heures par jour. La mesure exprimée en heures/an indique le niveau d'ensoleillement d'un emplacement en comparaison avec les autres endroits de la terre alors que la dernière mesure exprimée en heures/jour permet la comparaison du niveau d'ensoleillement dans les différentes saisons au même endroit. Plus le nombre d'heures d'ensoleillement est élevé, plus il fera beau, et plus les nuages et les brouillards se feront rares.[3]

### I.3 L'effet photovoltaïque

Découvert par le physicien Becquerel en 1839, l'effet photovoltaïque est un phénomène physique qui permet la conversion directe du rayonnement solaire en électricité. Cet effet est

propre à certains matériaux appelés "semi-conducteurs". Le plus connu d'entre eux est le silicium utilisé pour les composants électroniques.



**Figure I.3** : Schéma illustratif de l'effet photovoltaïque.

Lorsque les "grains de lumière" (les photons) heurtent une surface mince de ces matériaux, ils transfèrent leur énergie aux électrons de la matière (Fig. I. 3)

Si cette énergie est supérieure ou égale à l'énergie de gap  $E_g$  de ce semi-conducteur ( $E_g = E_c - E_v$ ), avec  $E_c$  l'énergie de la bande de conduction et  $E_v$  l'énergie de la bande de valence), l'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction en laissant un trou derrière lui, d'où l'apparition des paires électrons-trou. [4]

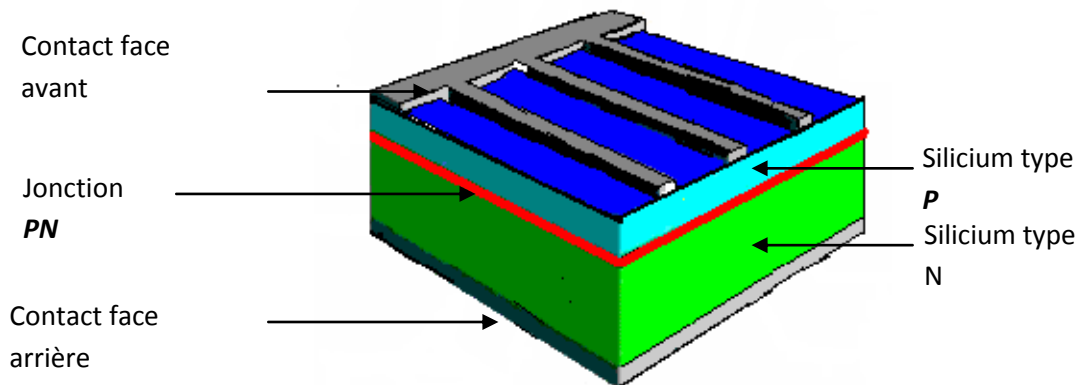
Si les photons ont une énergie très supérieure à  $E_g$ , ils passent de la bande de valence à un niveau instable de la bande de conduction. L'excès d'énergie sera transmis sous forme de photons au réseau cristallin puis perdu en chaleur et l'électron prendra un niveau stable dans la bande de conduction. [4]

Si les photons ont une énergie très inférieure à  $E_g$ , ils ne seront pas absorbés et leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque. [5]

#### **I.4 Définition d'une cellule solaire**

Une cellule solaire (cellule photovoltaïque) est un composant optoélectronique qui convertit directement le rayonnement solaire en une énergie électrique et cela grâce à un processus qui s'appelle l'effet photovoltaïque qui a été découverte par le physicien français Edmond Becquerel en 1839, le composant principale qui constitue la cellule solaire est le silicium qui est un semi-conducteur très utilisé dans l'industrie électronique (diode, thyristor, transistor ...) car c'est un matériau qui possède des propriétés intermédiaire entre le

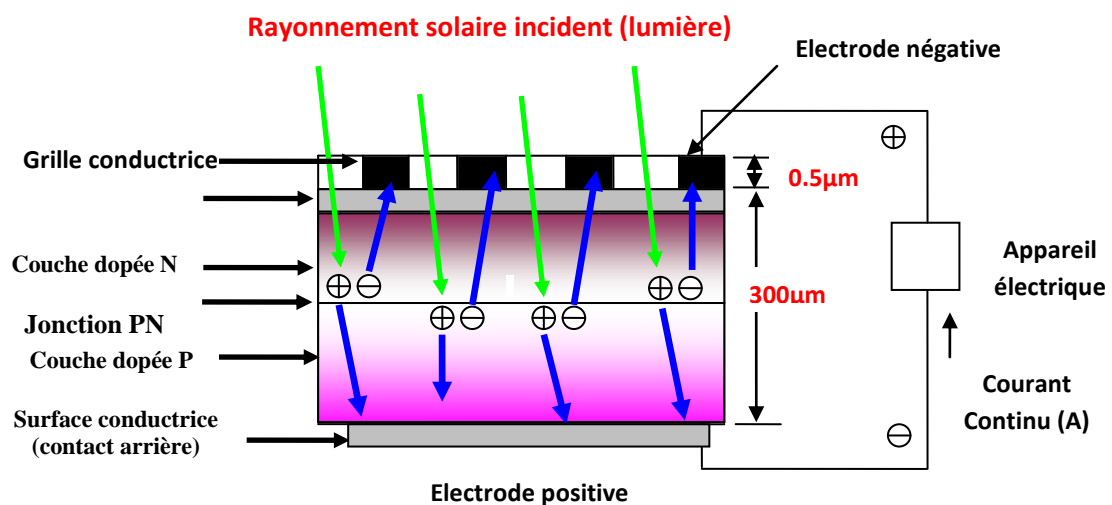
conducteur et l'isolant, la cellule solaire est constituée par trois zones : zone dopée N, zone dopée P, la zone de charge espace . [6]



**Figure I.4 :** Représentation schématique d'une cellule solaire.

#### I.4.1 Fonctionnement d'une cellule solaire

Lorsqu'une cellule photovoltaïque est soumise à une source de lumière, les photons vont bombarder les électrons de la zone N et cela pour libérer les électrons de leurs orbites, il y aura donc création des paires électron-trou. Cette opération va permettre à la zone N d'avoir une charge négative tandis que la zone P va se charger positivement donc il y'aura création d'une différence de potentielle .Lorsqu'on branche une charge à la cellule, les électrons vont se diffuser de la zone N vers P en traversant ainsi la charge .L'effet de champ électrique interne de la zone de charge d'espace va permettre aux électrons de passer de la zone P vers N et cela pour maintenir la différence de potentielle de la cellule solaire (circulation d'électron dans la charge).

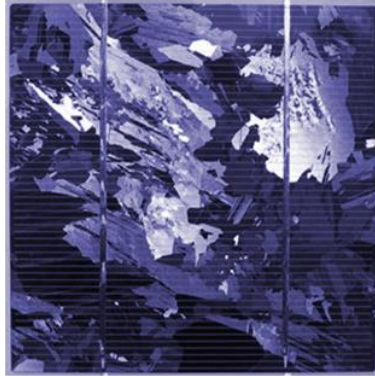


**Figure I.5 :** fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

### I.4.2 différents types de cellules solaires

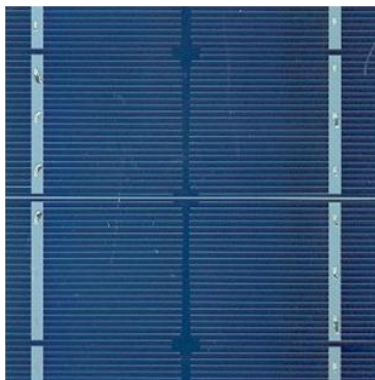
Il existe différents types de cellules solaires (ou cellules photovoltaïques), et chaque type de Cellule a un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible: de 8 à 23% de l'énergie qu'elles reçoivent. Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle [7] :

- **Les cellules monocristallines** : Ce sont celles qui ont le meilleur rendement mais aussi celle qui ont le coût le plus élevé, du fait d'une fabrication compliquée.



**Figure I.6** : Cellule solaire de type mono- cristalline.

- **Les cellules poly cristallines** : Leur conception étant plus facile, leur coût de fabrication est moins important, cependant leur rendement est plus faible.



**Figure I.7** : cellule solaire de type poly-cristalline.

- **Les cellules amorphes** : Elles ont un faible rendement, mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres.



**Figure I.8:** cellule solaire de type amorphe.

Type de cellule	Rendement en Laboratoire	Rendement de Production
Silicium amorphe (a-si)	13%	5 – 6%
Silicium monocristallin (m-si)	24.7%	13 – 17%
Silicium poly cristallin (p- si)	19.8%	11 – 15%

**Tableau.1** Tableau représentant le rendement de chaque type de cellule

### I.5 Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque a un comportement équivalent à une source de courant shuntée par une diode (Fig. I.9). Le modèle est complété par une résistance série  $R_s$  due à la contribution des résistances de base et de front de la jonction et des contacts face avant et arrière et une résistance parallèle ou shunt  $R_p$ . [8]

Le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension d'une cellule PV est donné par :

$$I = I_{pv} - I_0 \left( e^{\frac{qv}{akT}} - 1 \right) \quad (I.2)$$

$I_{pv}$  : Courant généré par la lumière incidente

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

$q$  : Charge de l'électron =  $1,60217646 \times 10^{-19}$  C.

$k$  : Constante de Boltzmann =  $1,3806503 \times 10^{-23}$  J/K.

$T$  : Température en kelvin.

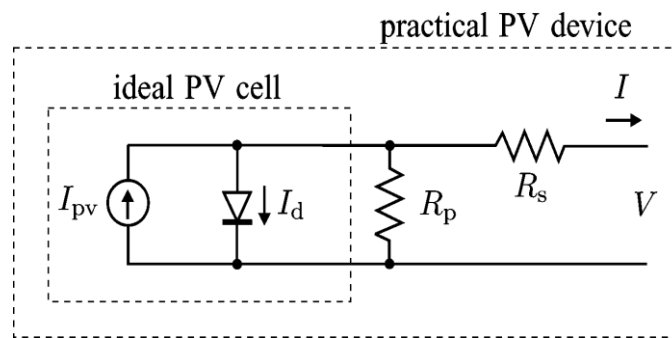


Figure I. 9 : modèle de la cellule photovoltaïque réel. [24]

### I.5.1. Paramètres d'une cellule photovoltaïque :

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser une cellule solaire, ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques.

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

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal  $R_s$  nulle et  $R_p$  infinie, ce courant se confond avec le photon courant  $I_{pv}$  en annulant la tension  $V$  dans l'équation.

- **Tension de circuit ouvert  $V_{co}$**

Comme son nom l'indique, c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie. Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN, jonction Schottky), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts de couche active-électrode.

$I_{on} = \frac{I_{sc,n}}{\exp(V_{oc,n}(\alpha V_{t,n})) - 1}$  Elle dépend de plus de l'éclairement de la cellule. L'expression de

$V_{co}$  est donnée par :

$$V_{co} = \frac{KT_c}{q} \log\left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1\right) \quad (I.3)$$

Deux régimes peuvent être observés suivant le degré d'éclairement :

- **Régime des faibles flux lumineux** : dans ce cas,  $I_{ph} \ll I_0$ , ce qui permet d'écrire :

$$\log\left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1\right) = \frac{I_{ph}}{I_0} \quad (I.4)$$

D'où :

$$V_{co} = \frac{KT_c}{q} \left( \frac{I_{ph}}{I_0} \right) \quad (I.5)$$

C'est la zone de comportement linéaire de la cellule. La formule précédente peut s'écrire aussi

$$V_{ico} = R_{ob} * I_p, \text{ en posant } R_o = \frac{KT_c}{q.I_0}, R_o \text{ est la résistance interne de la diode en polarisation}$$

externe nulle (circuit ouvert) et sous faible flux lumineux.

- **Régime des flux lumineux suffisamment intenses** pour que  $I_{ph} \gg I_s$ , soit :

$$\frac{I_{ph}}{I_s} \gg 1 \quad (I.6)$$

D'où:

$$V_{co} = \frac{KT_c}{q} \log\left(\frac{I_{ph}}{I_0}\right) \quad (I.7)$$

C'est le domaine du comportement logarithmique

- **Facteur forme  $FF$**

On appelle facteur de forme  $FF$ , facteur de remplissage (fill factor), le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule  $P_{max} = I_{opt} \cdot V_{opt}$  et le produit du courant de court-circuit  $I_{cc}$  par la tension de circuit-ouvert  $V_{co}$  (c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale). Le facteur de forme indique la qualité de la cellule ; plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante, Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes ; et diminue avec la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites  $R_s$  et  $R_p$ , il est défini par :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} = \frac{I_{opt} V_{opt}}{I_{cc} V_{co}} \quad (I.8)$$

- **Le rendement  $\eta$**

Le rendement, des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximal délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente.

$$\eta = \frac{\text{puissance délivrée par la cellule}}{\text{puissance captée par la cellule}} = \frac{V_{\max} * i_{\max}}{G * S} = \frac{FF * V_{co} * i_{cc}}{G * S} \quad (I. 9)$$

$G$  : L'irradiation solaire en  $W/m^2$

$S$  : Surface de la cellule solaire ( $m^2$ )

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert.

- **Le point de puissance maximale (PPM)**

C'est la puissance maximale qui doit générer un module photovoltaïque afin d'avoir un fonctionnement optimale. Cette puissance est définie par :

$$PPM = FF * V_{CO} * i_{cc} \quad (I.10)$$

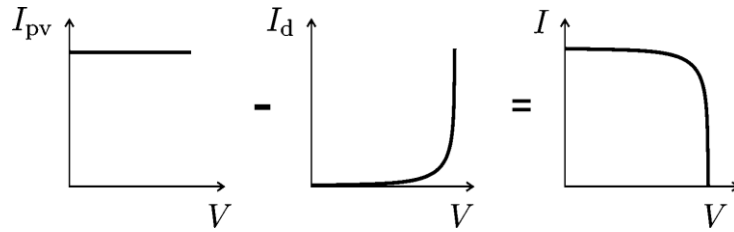
- **Le watt crête**

C'est l'unité servant à définir la puissance disponible aux bornes d'une cellule ou d'un assemblage de cellules (module, champ), sous l'éclairement de référence de  $1000 W/m^2$  et à  $T=25^\circ C$ .

### I.5.2. Cellule PV simplifiée

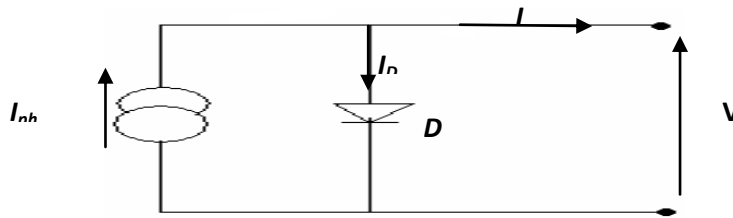
Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant  $I_{pv}$ , proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à l'aire de transition P-N de la cellule PV. Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode.

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (I.11)$$



**Figure I.10** : caractéristique  $I$ - $V$  de la cellule photovoltaïque .

Le schéma électrique équivalent de la cellule PV pour ce modèle est représenté sur la Fig.I.11.



**Figure I.11** : Modèle simplifié de la cellule PV utilisée.

La diode est un élément non linéaire, sa caractéristique  $I$ - $V$  est donnée par la relation :

$$I_d = I_0 \left( \frac{t_n}{T} \right)^3 \exp \left[ \frac{qE_g}{\alpha k} \left( \frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (I.12)$$

Avec:

$I_0$  = Le courant de saturation inverse de la diode.

$E_g$  : L'énergie de bande de semi conducteur

$V_t$  : La tension thermique

$T_n$  : Température nominal

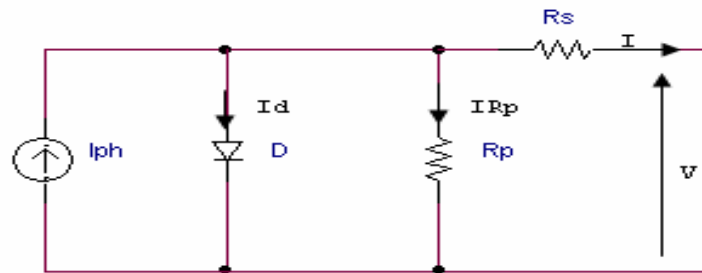
Donc la relation (I .10) sera :

$$I_{ph} = I_{ph} - I_0 \left( \frac{t_n}{T} \right)^3 \exp \left[ \frac{qE_g}{\alpha K} \left( \frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (I.13)$$

L'équation de base I.11 de la cellule photovoltaïque ne représente par la caractéristique réelle du générateur photovoltaïque. En pratique, ils sont composés de plusieurs cellules photovoltaïques connectées et l'observation des caractéristiques aux bornes de la matrice photovoltaïque exige l'inclusion des paramètres supplémentaires à l'équation de base.

### I.5.3 .Cellule photovoltaïques réelle :

Le model photovoltaïques précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite. On modalise donc cette perte de tension par une résistance en série  $R_s$  et les courants de fuite par une résistance en parallèle  $R_p$ .



**Figure I.12** : Modèle de la cellule photovoltaïque réelle.

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_p \quad (I.14)$$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I V est donné par la relation :

$$I_d = I_{0,cell} \left[ \exp\left(\frac{qV}{\alpha KT}\right) - 1 \right] \quad (I.15)$$

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante :

$$I = I_{pv} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + R_{st}}{V_t \alpha}\right) - 1 \right] \frac{V + R_{st}}{R_p} \quad (I.16)$$

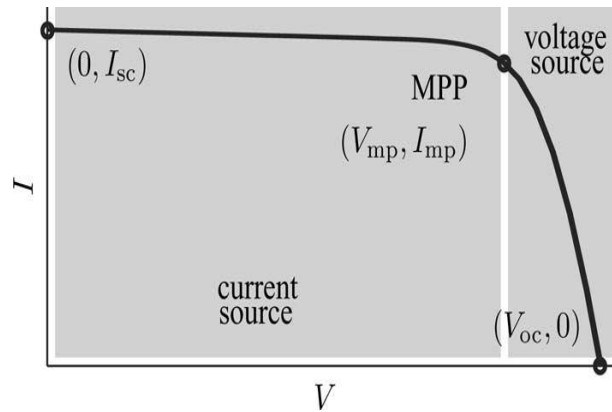
$I_{pv}, I_0$  = le courant de saturation pv

$V_t$  : Tension thermique de réseau,  $V_t = \frac{N_s KT}{q}$

$R_s$  : est la résistance équivalente en série.

$R_p$  : est la résistance équivalente en parallèle.

Cette équation est à l'origine de la courbe  $I$ - $V$  visible sur la Fig. I.13, ou trois points remarquables sont mis en évidence : court-circuit  $(0, I_{cc})$ , la puissance maximale, point  $(V_{mp}, I_{mp})$  et en circuit ouvert  $(V_{co}, 0)$ .



**Figure I.13** : caractéristique I.V courbe d'un dispositif photovoltaïques pratique et les trois points remarquables. [24]

#### I.5.4. Modèle amélioré

La cellule photovoltaïques réelle a une résistance série  $R_s$  dont l'influence est plus forte lorsque l'appareil fonctionne dans la région de source de tension, et une résistance parallèle  $R_p$  ayant une influence plus grande, dans la région de fonctionnement en source de courant.

La caractéristique  $I(V)$  de la cellule présentée sur la **Fig.I.13** dépend de ses paramètres internes et des facteurs externe comme l'irradiante et la température.

Dans les modèles photovoltaïques, on suppose généralement que  $I_{pv} \approx I_{cc}$  par ce que dans la photopile réelle, la résistance série est faible et la résistance parallèle est élevée.

le courant photonique de la cellule photovoltaïques dépend directement de l'irradiante solaire et proportionnelle à la température d'après l'équation suivante :

$$I_0 = \frac{I_{sc,n} + \Delta T}{\exp(V_{oc,n} + K_v) / \alpha V_t} - 1 \quad (I.17)$$

$V_t$  : La tension thermique des cellules connectées en série  $N_s$ .

$I_0$  : Le courant de saturation des cellule PV.

$K_v$  : Le coefficient de tension.

$\Delta T$  :  $T - T_n$  (  $T$  et  $T_n$  étant les températures réels et nominal )

$1 \leq \alpha \leq 1.5$  lechoisdependdautreparametreP.

Le courant de saturation inverse  $I_0$  de la diode peut être exprimé par l'équation donnée par l'expression suivante :

$$I_0 = I_{0,n} \left(\frac{T_n}{T}\right)^3 \exp\left[\frac{qEg}{qK} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (I.18)$$

Le courant de saturation  $I_0$  des cellules photovoltaïques qui composent le dispositif dépend de la densité de courant de saturation du semi-conducteur ( $J_0$  généralement en  $A.cm^{-2}$ ) et de la surface effective des cellules. La densité de courant  $J_0$  dépend de la caractéristique intrinsèque de la cellule photovoltaïque, qui dépend de plusieurs paramètres physique comme le coefficient de diffusion d'électrons dans le semi-conducteur, la durée de vie des porteurs minoritaires, la densité des porteurs intrinsèques, etc.

Le courant de saturation nominal  $I_{on}$  peut être exprimé par l'équation suivante :

$$I_{on} = \frac{I_{sc,n}}{\exp(V_{oc,n}(\alpha V_{t,n})) - 1} \quad (I.19)$$

## I.6 Les modules (ou panneaux) :

La cellule individuelle, unité de base d'un system photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt. 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, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. La puissance crête, obtenue sous un éclairage maximal sera proportionnelle à la surface du module. La rigidité de la face avant (vitre) et l'étanchéité sous vide offerte par la face arrière soudée sous vide confèrent à l'ensemble sa durabilité. [9]

### I.6.1 Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV) :

L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera. [10]

**I.6.2 Regroupement des cellules**

**I.6.2.1 Regroupement en série**

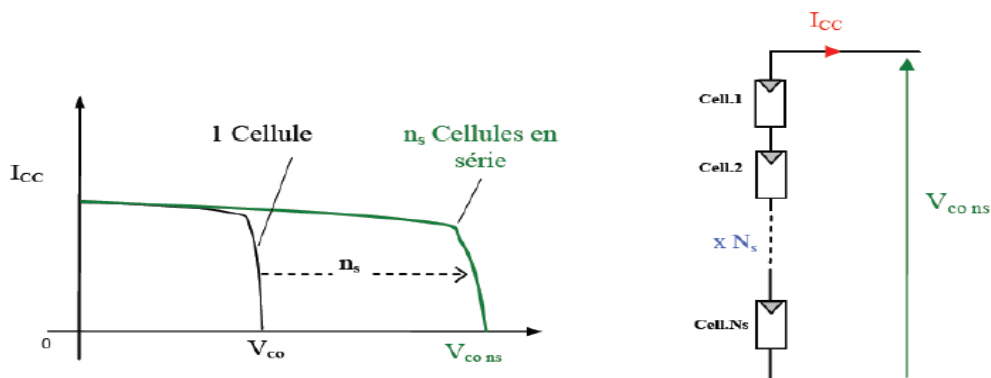
Une association de ( $N_s$ ) cellule en série figure (I.14) permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenues par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation résume les caractéristique électrique d'une association série de ( $N_s$ ) cellules. [3]

$$V_{co}N_s = N_s * V_{co} \tag{I.20}$$

$$I_{cc} = I \tag{I.21}$$

$V_{co}N_s$  : La somme des tensions en circuit ouvert de  $N_s$  cellules en série.

$I_{cc}N_s$  : Courant de court-circuit de  $N_s$  cellules en série.



**Figure 1.14** : Caractéristique courant tension de  $N_s$  cellule en série.

**I.6.2.2 Regroupement en parallèle :**

Une association parallèle de ( $N_p$ ) cellule figure (I.15) est possible et permet d'accroitre le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants. [11]

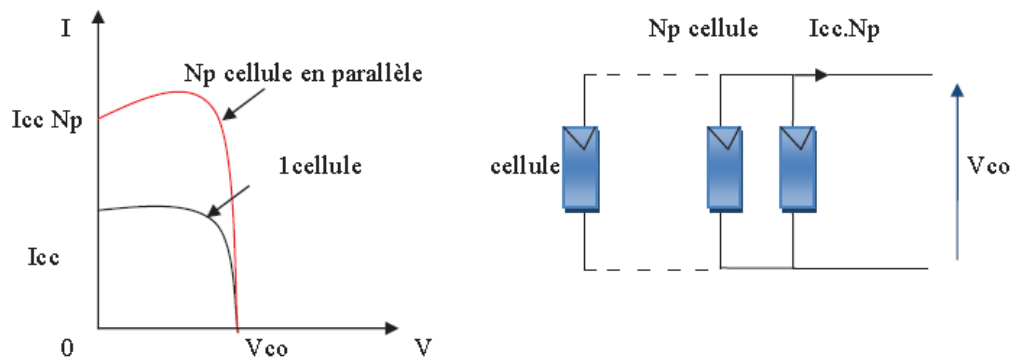
Avec:

$$I_{cc}N_p = N_p * I_0 \tag{I.22}$$

$$V_{co} = V_{co}N_p \tag{I.23}$$

$I_{cc}N_p$  : La somme des courants de cout circuit de ( $N_p$ ) cellule en parallèle.

$V_{co}N_p$  : Tension du circuit ouvert de ( $N_p$ ) cellules en parallèle.



**Figure I.15 :** Caractéristique courant tension de ( $N_p$ ) cellule en parallèle.

### I.6.2.3 Regroupement mixte (série et parallèle) :

On utilise généralement ce type d'association pour en tirer une tension importante puisque l'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule. La caractéristique d'un groupement de deux modules solaires, ce qui peut être généralisé sur une gamme de  $N_s$  modules solaires en série. Ce genre de groupement augmente le courant.

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque. [12]

## I.7 Simulation du générateur photovoltaïque KC200GT :

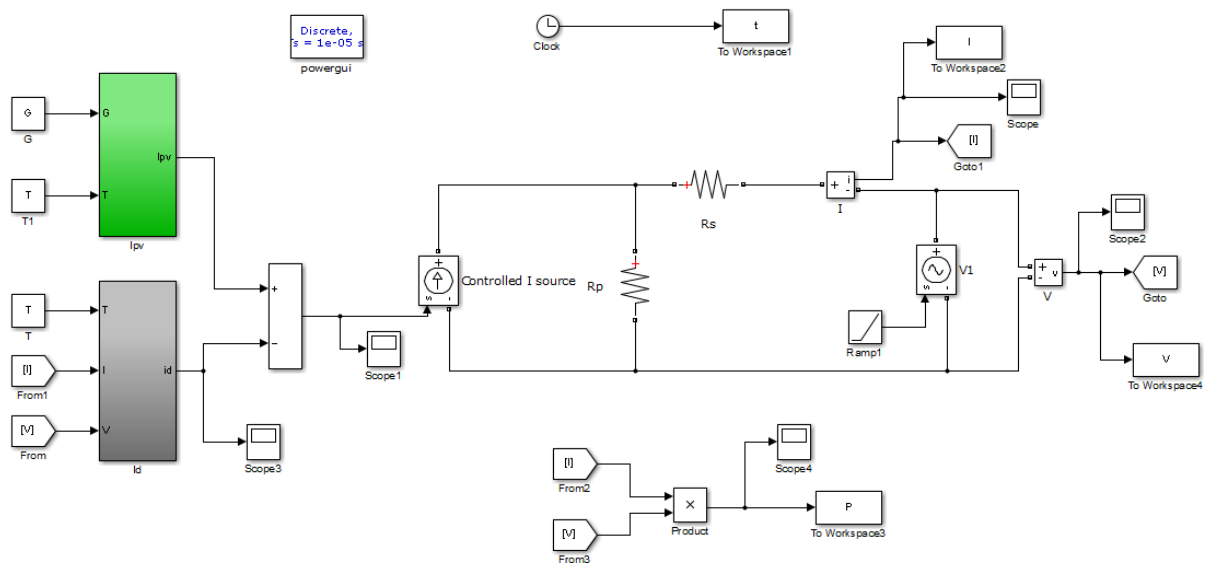
### I.7.1 Caractéristique du Module photovoltaïque KC200GT utilisé :

Nous avons choisi le module KC200GT composé de 54 cellules en silicium monocristallin connectées en série ayant une puissance maximal de 200.143w est considéré dans les conditions standards  $G=1000\text{w}/\text{m}^2$ ,  $T=25^\circ\text{C}$ . Pour réaliser la modélisation de ce module, nous avons utilisé MATLAB comme outil de tests et de simulation.

$I_{mp}$	7.61 A
$V_{mp}$	26.3 V
$P_{max,e}$	200.143 W
$I_{sc}$	8.21 A
$V_{oc}$	32.9 V
$K_V$	-0.1230 V/K
$K_I$	0.0032 A/K
$N_s$	54

**Tableau I.2 :** Paramètres du module PV KC200GT aux conditions standards

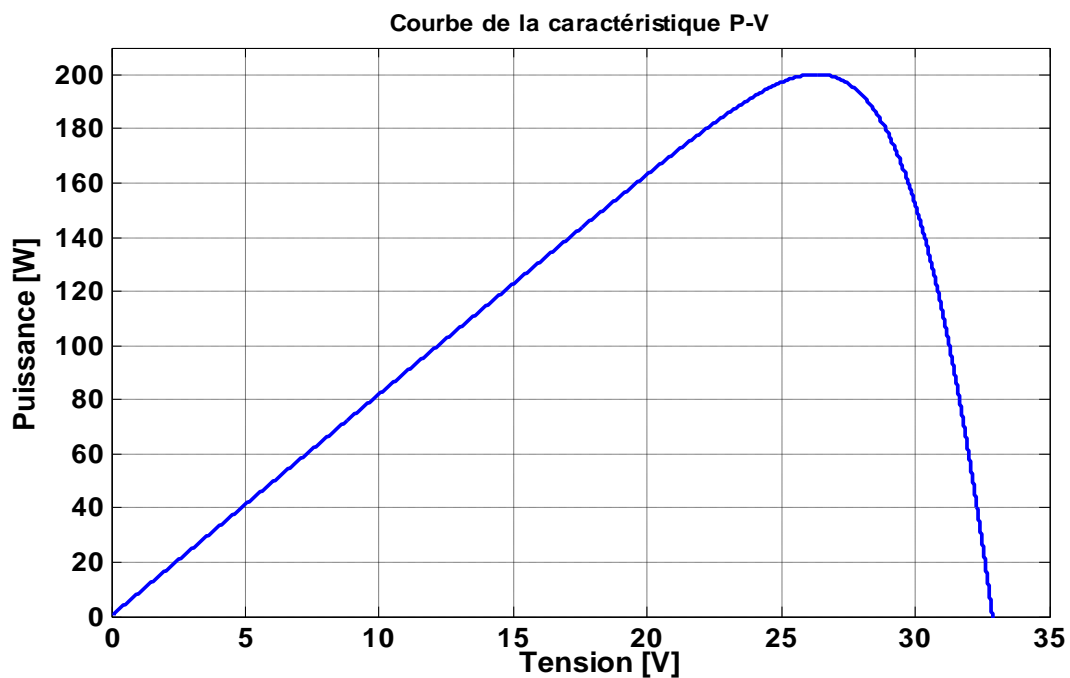
**I.7.2 Schéma bloc de simulation du module PV KC200GT :**



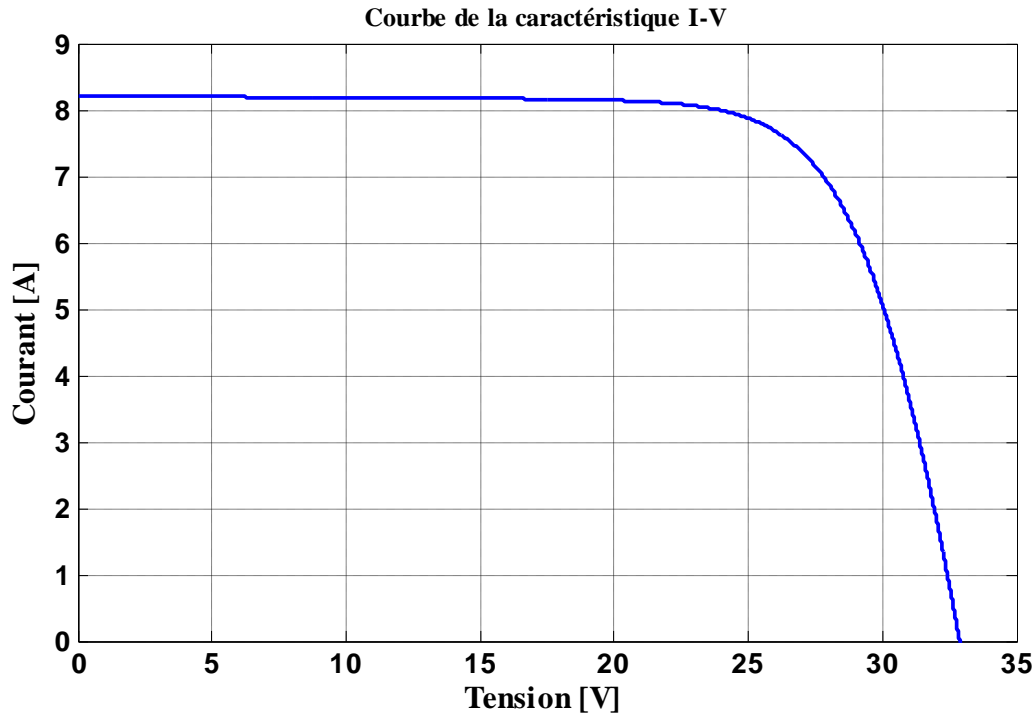
**Figure I.16 :** schéma bloc de simulation du module PV KC200GT

**I.7.3 Caractéristiques courant-tension et puissance-tension**

La Figure (I.17) et Figure (I.18) représentent la caractéristique courant-tension  $I(V)$  et puissance-tension  $P(V)$  d'une cellule photovoltaïque en utilisant le modèle sous conditions standards.



**Figure I. 17 :** Caractéristique  $P(V)$  d'une cellule photovoltaïque.

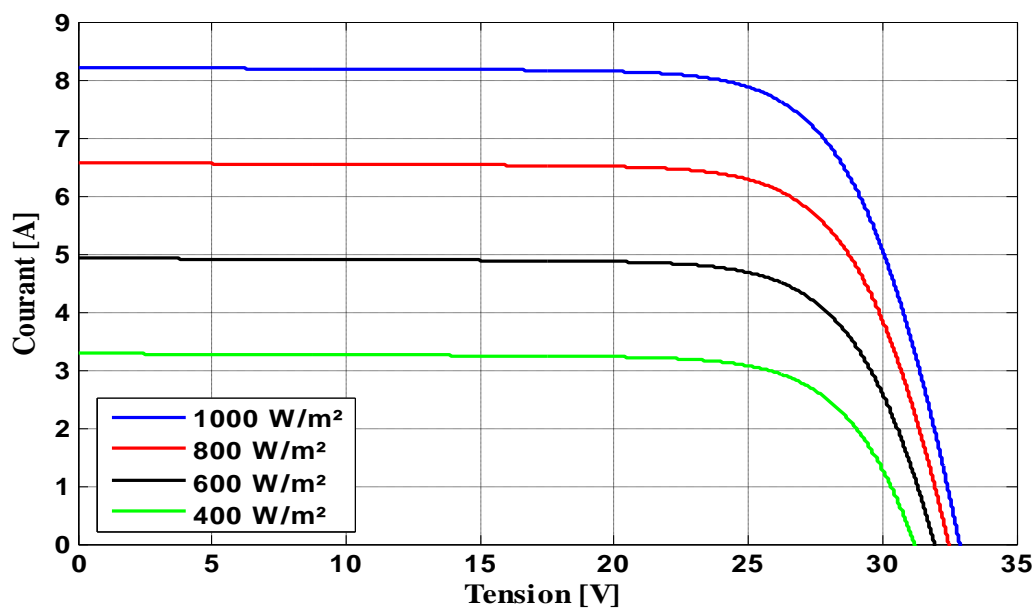


**Figure I.18 :** Caractéristique  $I(V)$  d'une cellule photovoltaïque.

## I.8 Influence des paramètres internes et externes sur le GPV :

### I.8.1 Influence de l'éclairement sur le GPV :

La figure (I.19) montre l'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I=f(V)$ . À température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement. Car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique.



**Figure I. 19 :** L'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I=f(V)$

La figure (I.20) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $P(V)$ .

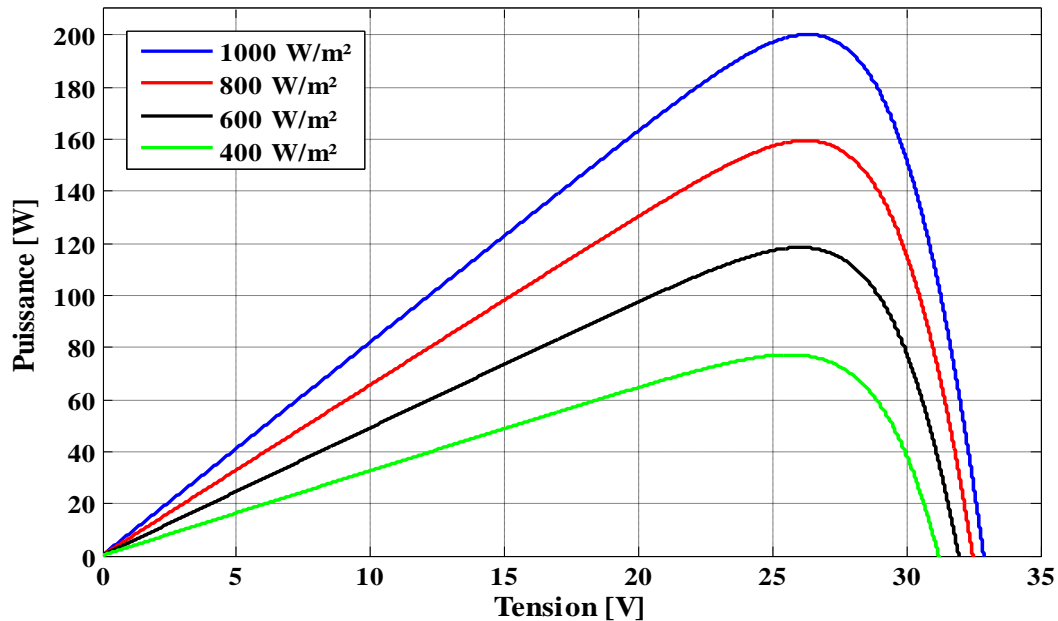
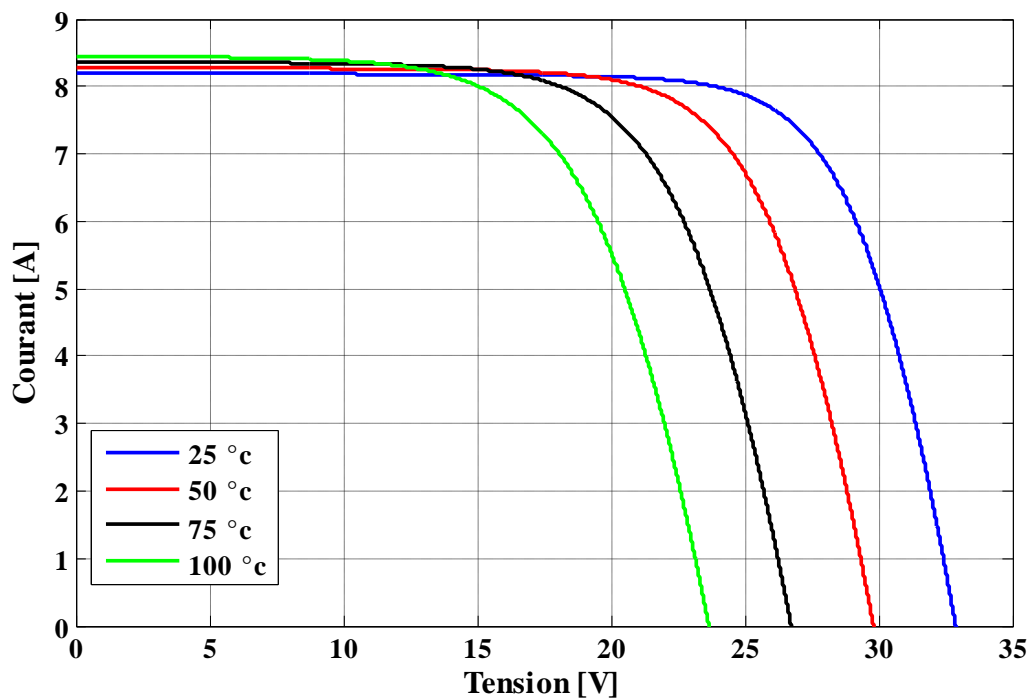


Figure I.20 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $P=f(V)$

### I.8.2 Influence de la température sur le GPV :

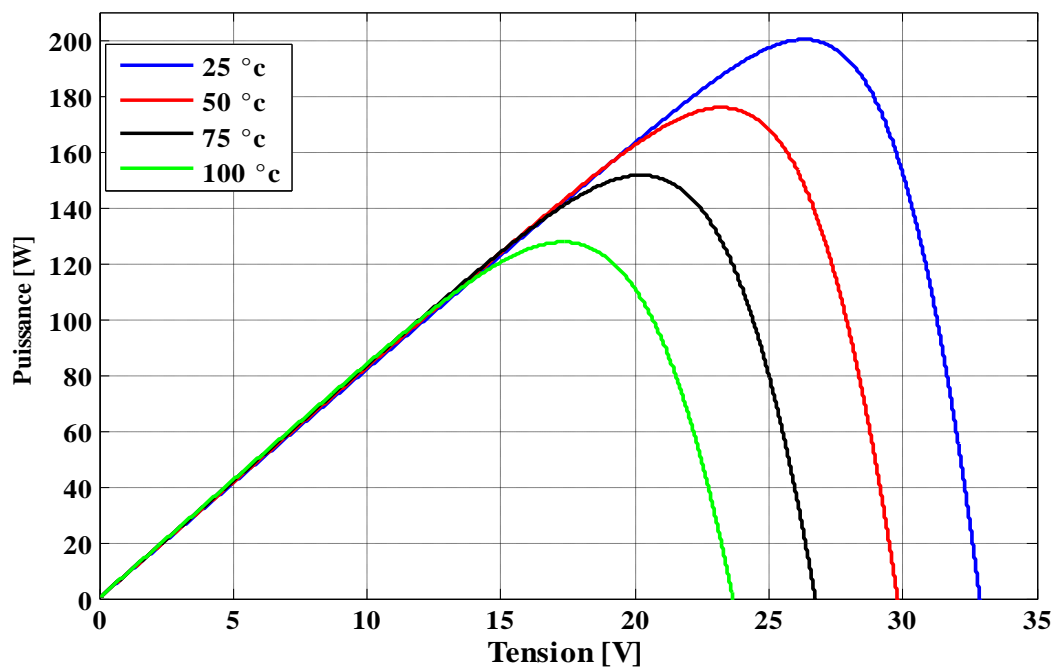
La figure (I.21) montre l'influence de la température sur la caractéristique  $I=f(V)$ . Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique  $I=f(V)$ .

Le courant de court-circuit dépend légèrement de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution.



**Figure I.21 :** L'influence de la température sur la caractéristique  $I=f(V)$

La figure (I.22) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température, ce qui nous permet de déduire l'influence de la température sur la caractéristique  $P=f(V)$ .



**Figure I.22 :** L'influence de la température sur la caractéristique  $P=f(V)$

### I.8.3 Influence de la résistance série sur le GPV :

La figure (I.23) et figure (I.24) représentent respectivement l'effet de la résistance série  $R_s$  sur les caractéristiques I(V) et P(V) du générateur photovoltaïque.

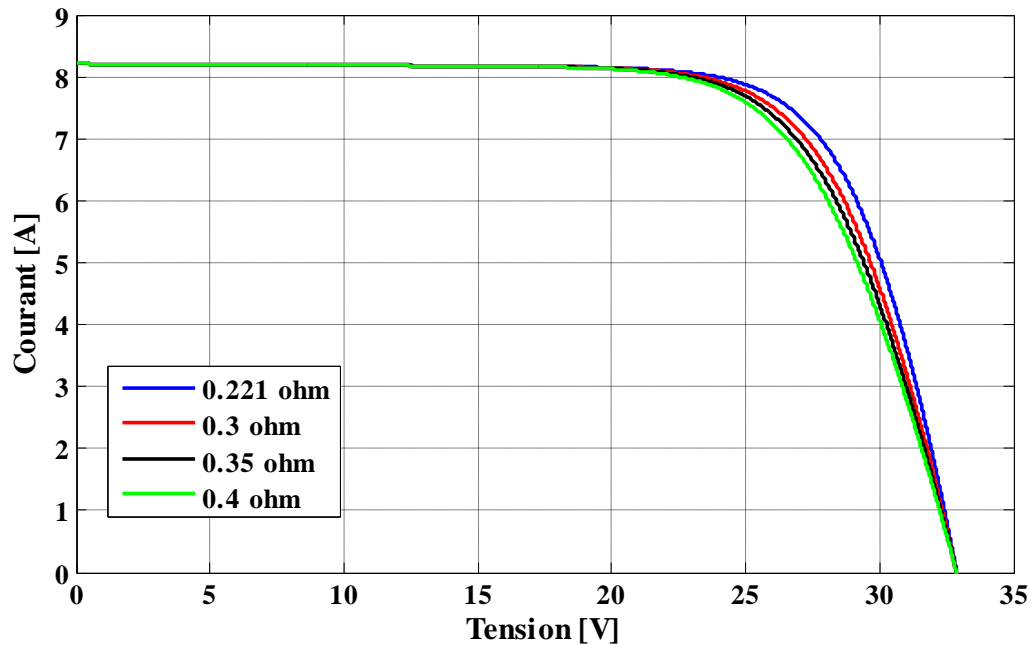


Figure I.23 : Influence de résistance  $R_s$  sur la caractéristique courant-tension

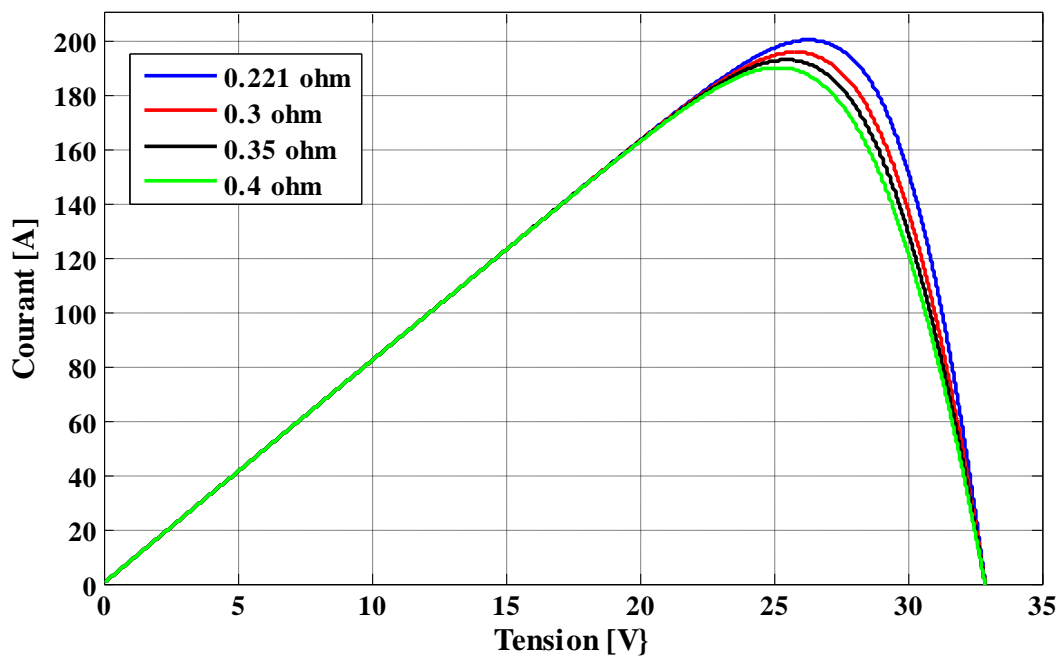


Figure I.24 : Influence de résistance série  $R_s$  sur la caractéristique puissance-tension

On constate que les performances des cellules PV diminuent considérablement avec l'augmentation de la résistance  $R_s$ . Cette résistance contrôle la localisation du point de puissance maximale. En effet, l'augmentation de la résistance série  $R_s$  déplacerait le point de puissance maximale en bas et vers la gauche.

#### I.8.4 Influence de la résistance shunt sur le GPV :

Les figure (I.25) et figure (I.26) présentent respectivement l'effet de la résistance shunt sur les caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  du générateur photovoltaïque.

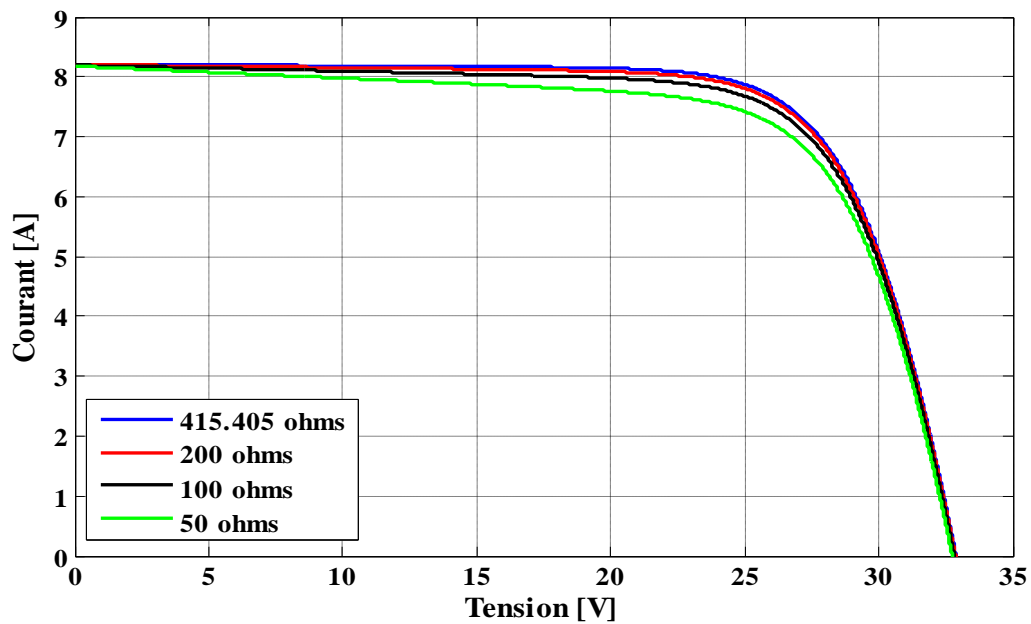


Figure I.25 : Influence de résistance  $R_p$  sur la caractéristique courant-tension d'un GPV

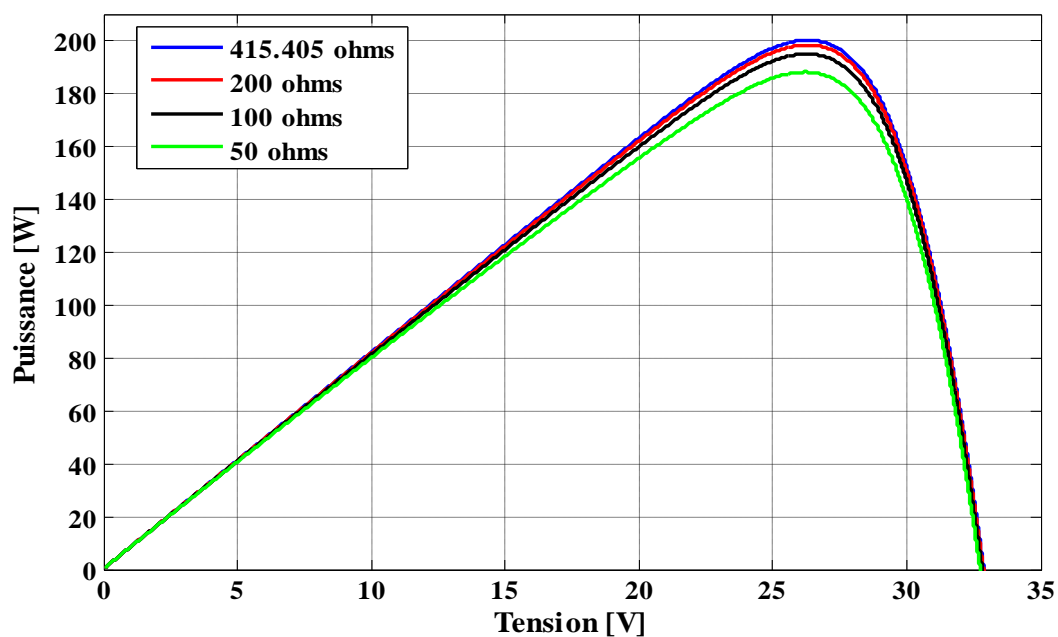


Figure I.26 : Influence de résistance  $R_p$  sur la caractéristique puissance-tension d'un GPV

On remarque que la résistance shunt  $R_p$  influe légèrement sur les caractéristiques du panneau photovoltaïque.

### **I.9 Conclusion :**

Ce chapitre est consacré à la modélisation d'un générateur photovoltaïque. Nous avons étudié le principe de l'effet photovoltaïque, la composition de la cellule PV et ses différents paramètres. En suite nous avons tracé les différentes caractéristiques d'un générateur photovoltaïque pour voir l'influence de certains paramètres sur les performances du générateur.

Dans le prochain chapitre, on présentera une étude sur les convertisseurs DC-DC et la commande MPPT pour chercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale.

# *Chapitre II*

*Les convertisseurs DC-DC  
et la commande MPPT.*

## II.1.Introduction

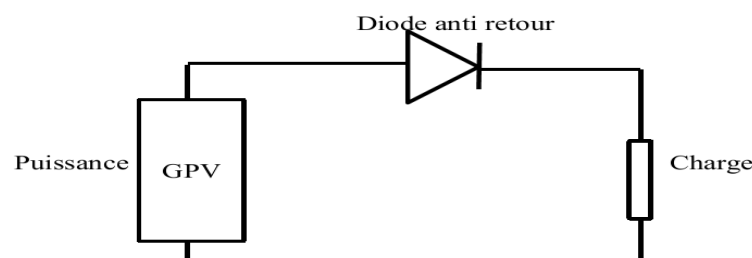
Un générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. En effet la caractéristique  $I(V)$  du générateur dépend de l'éclairement solaire et de la température. Ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale.

Pour faire fonctionner le générateur photovoltaïque en son point de puissance maximale, il est nécessaire d'insérer dans le système photovoltaïque un dispositif électronique intercalé entre le générateur photovoltaïque (GPV) et la charge qui a pour but la poursuite du point de puissance maximale du GPV quelle que soit les perturbations (température et éclairement).

Dans ce chapitre, nous allons étudier les différents types de convertisseurs DC/DC et les algorithmes les plus répandus pour la poursuite du point de puissance maximale.

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

Dans le cas d'une connexion directe qui est finalement aujourd'hui l'utilisation terrestre la plus répandue de l'énergie solaire, le point de fonctionnement du GPV dépend de l'impédance de la charge à laquelle il est connecté [13]. Ce choix est principalement lié à la simplicité, la fiabilité et le faible coût figure II.1.



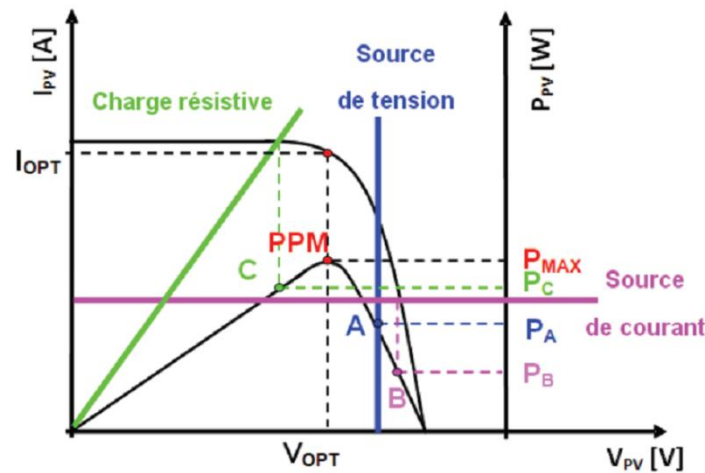
**Figure II.1 :** Connexion directe entre un GPV et une charge.

L'inconvénient de ce type de connexion, la puissance extraite d'un GPV connectée directement à une application est souvent très éloignée du maximum de puissance que peut délivrer le GPV comme l'illustre la figure II.2.

Comme le montre dans la figure II.2. Un GPV peut être connecté directement à trois types de charges :

- une charge de type source de tension continue.

- une charge de type source de courant continue.
- une charge purement résistive.



**Figure II.2.** : Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe, en fonction de la charge.

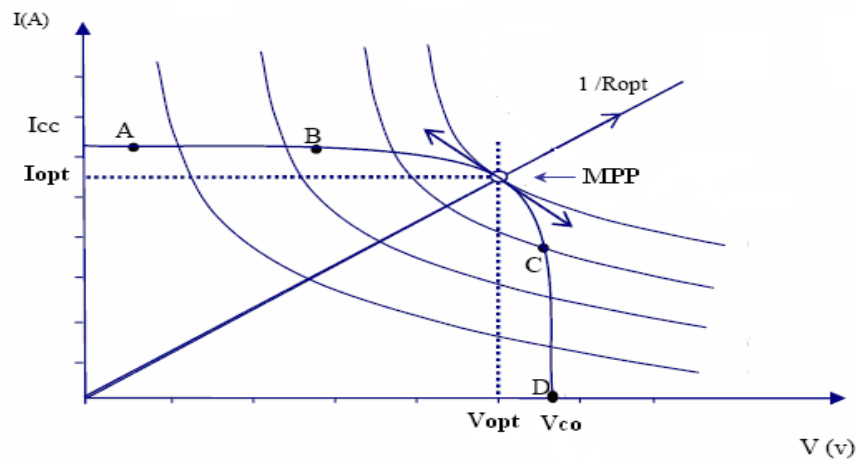
Comme illustré précédemment, il y a trois points de fonctionnement A, B, C respectifs qui peuvent être identifiés fournissant une puissance  $P_A$ ,  $P_B$  et  $P_C$ . Ces cas de figures montrent que le GPV est mal exploité et ne fournit pas la puissance maximale [12].

### II.3. Fonctionnement optimal du GPV [19,20]

La figure II.3 représente la caractéristique I-V d'un GPV pour un éclairement et une température donnés. On place une charge résistive variable aux bornes du générateur photovoltaïque. La puissance délivrée à cette charge dépendra seulement de la valeur de sa résistance  $R$ . Le point de fonctionnement optimal MPP de coordonnées  $(V_{opt}, I_{opt})$  du GPV est défini par l'intersection de sa caractéristique électrique I-V avec celle de la droite de charge de pente  $(1/R)$ .

Seule la charge dont la caractéristique passe par le point MPP  $(V_{opt}, I_{opt})$  permet d'extraire la puissance optimale, qu'on appelle  $R_{opt}$ . Sa valeur est donnée par la relation.

$$R_{opt} = \frac{V_{opt}}{I_{opt}} \quad (\text{II.1})$$



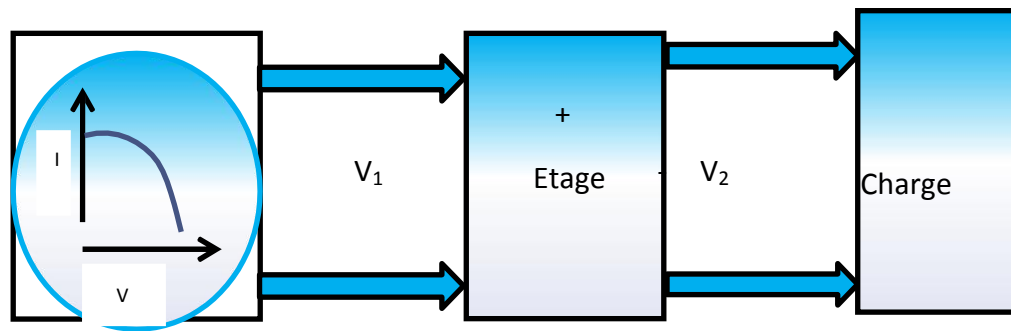
**Figure II.3 :** Caractéristique I-V pour une charge résistive variable

Si  $R$  est de valeur faible, le GPV travaillera dans la zone (AB), dans laquelle il se comporte comme une source de courant constant, de valeur égale au courant du court-circuit. Si  $R$  est élevée, le GPV travaillera dans la zone (CD), dans laquelle le GPV se comporte comme un générateur de tension, sa valeur est égale presque à la valeur de la tension du circuit ouvert.

Pour assurer le fonctionnement optimal du GPV, un équipement de commande doit être mis entre le GPV et la charge, dont le but est l'adaptation des deux équipements (générateur photovoltaïque/charge) pour un meilleur transfert d'énergie vers la charge. Ce dernier peut augmenter d'une manière significative le rendement en puissance du GPV, nous utilisons pour cela un convertisseur DC/DC (hacheur) doté d'une commande MPPT, qui permet la poursuite du point de puissance maximale.

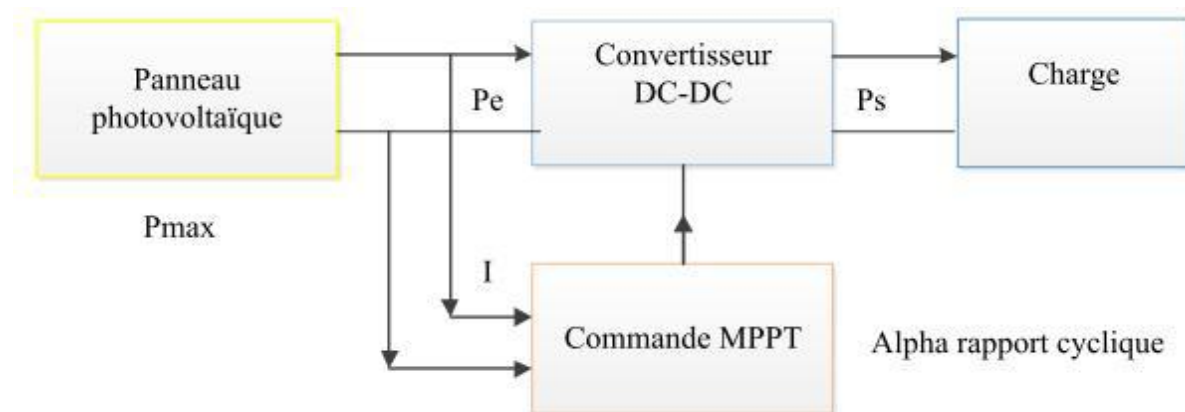
#### II.4. Étage d'adaptation entre un Générateur PV et une charge

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, on doit insérer un étage d'adaptation entre le GPV et la charge comme il est décrit dans la figure II.4. L'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  $P_{\max}$  disponible. [22]



**Figure II.4 :** Étage d'adaptation entre un GPV et une charge

Le circuit de base d'un système de poursuite du point de puissance maximale est un convertisseur DC/DC piloté par un circuit de commande, afin d'extraire la totalité de la puissance produite par le GPV.



**Figure II.5 :** Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque à base d'une transformation DC Contrôler par une commande MPPT

Ce dernier par le biais d'une commande spécifique est alors susceptible de permettre au générateur de délivrer sa puissance maximale notée ;  $p_{max}$  ( $p_{max} = V_{opt} * i_{opt}$ , où  $V_{opt}$  et  $i_{opt}$  représentent respectivement les tensions et les courants optimaux du générateur photovoltaïque, pour une courbe **I-V** donnée), tout en assurant que la tension ou bien le courant de la charge correspond bien aux caractéristiques de cette dernière. [22]

Pour que le générateur PV fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, la solution communément adoptée est alors d'introduire un convertisseur statique qui joue le rôle d'adaptateur source-charge.

Le choix de la structure de conversion est effectué en fonction de la charge DC à alimenter. Nous avons besoin de structurer les conversions survolteur ou dévolteur en fonction de la caractéristique de cette charge.

## II.5. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)

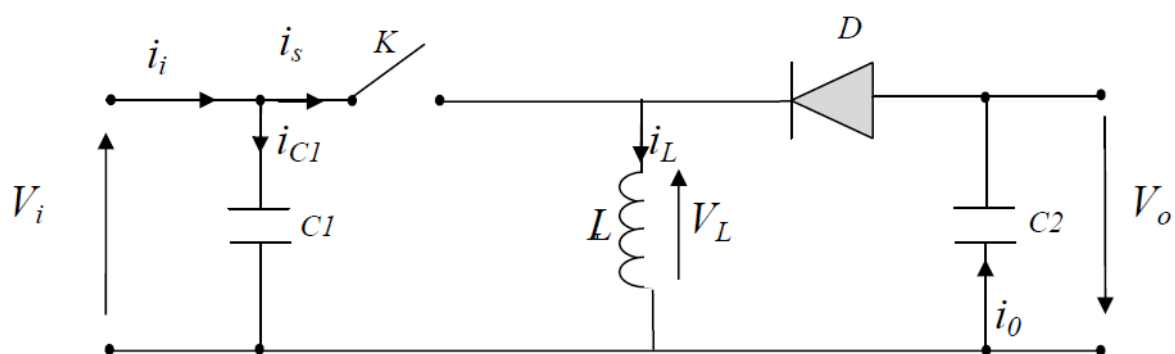
Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. [15]

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs. [15]

La technique du découpage, apparue dans les années soixante, a apporté une solution au problème du mauvais rendement et de l'encombrement des alimentations séries.

Dans une alimentation à découpage (Figure II.6), la tension d'entrée est "hachée" à une fréquence donnée par un transistor alternativement passant et bloqué.

Il en résulte une onde carrée de tension qu'il suffit de lisser pour obtenir finalement une tension continue. [15]

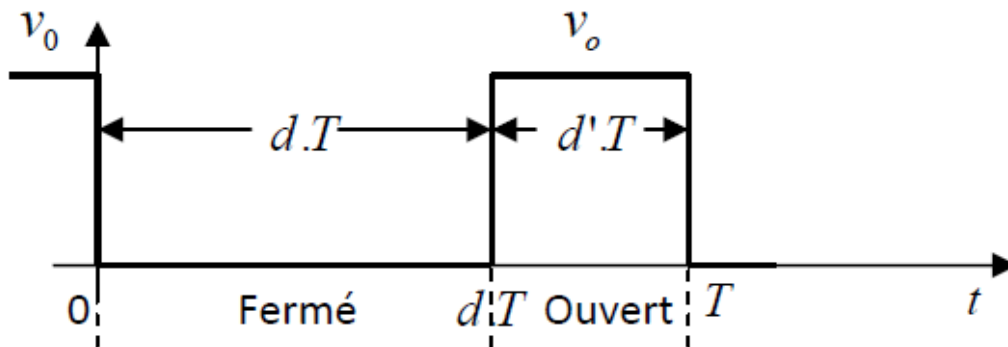


**Figure II.6** : Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage

La régulation de la tension de sortie à un niveau constant est réalisée par une action sur le "rapport cyclique", défini comme la fraction de la période de découpage où l'interrupteur est passant (figure II.7). L'interrupteur est un dispositif semi-conducteur en mode tout-rien (bloqué – saturé), habituellement un transistor MOSFET. Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est zéro et par conséquent sa dissipation de puissance est nulle. Si le dispositif est dans l'état saturé la chute de tension à ses bornes sera presque zéro et par conséquent la puissance perdue sera très petite. [15]

Pendant le fonctionnement du hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante  $f_s$  avec un temps de fermeture  $dT$  et un temps d'ouverture  $d'T = (1-d)T$  où :

- Test la période de commutation qui est égale à  $1/f_s$ .
- $d$  le rapport cyclique du commutateur  $d \in [0, 1]$ .



**Figure II.7 :** périodes de fermeture et d'ouverture d'un commutateur.

Il existe plusieurs types des convertisseurs DC-DC. Parmi les quels, on présente le principe des trois types des convertisseurs à découpage (dévolteur, survolteur et mixte), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux solaires avec les différentes charges.[15,16,17,18]

### II.5.1 Convertisseur Buck

Un convertisseur Buck est un transformateur statique qui transfère l'énergie électrique d'une source de tension continue (une capacité) vers une source de courant continue (la self).

Il est nommé aussi hacheur dévolteur car sa fonction principale est de diminuer la tension et d'augmenter le courant à sa sortie. La figure II.8 représente le circuit électrique d'un convertisseur Buck. Le transistor MOSFET travaille en régime de commutation avec une période  $T$ . Dans le premier laps de temps  $dT$ , le transistor est dans un état de saturation, alors l'inductance  $L$  se charge d'énergie avec augmentation du courant  $i_L$ . [15] Dans le deuxième laps de temps  $(1-d)T$  l'inductance  $L$  libère cette énergie à la charge avec une diminution de courant  $i_L$ , donc le circuit est décomposé en deux circuits linéaires qui correspondent à chaque état du transistor  $k$ . La figure II.9 donne les schémas équivalents du convertisseur Buck dans les deux laps de temps.

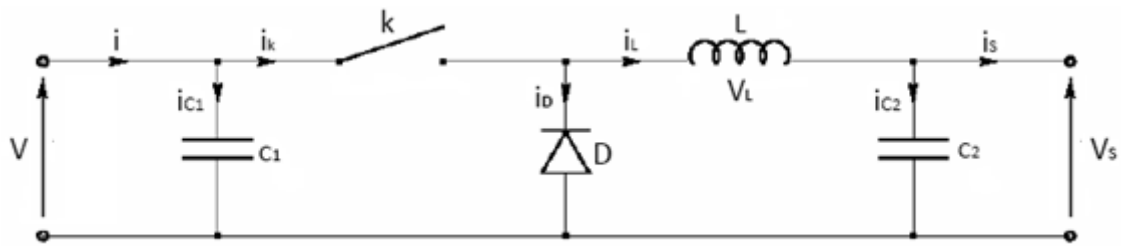


Figure II.8 : Circuit électrique de base du hacheur Buck

### II.5.1.1 Modèle mathématique équivalent

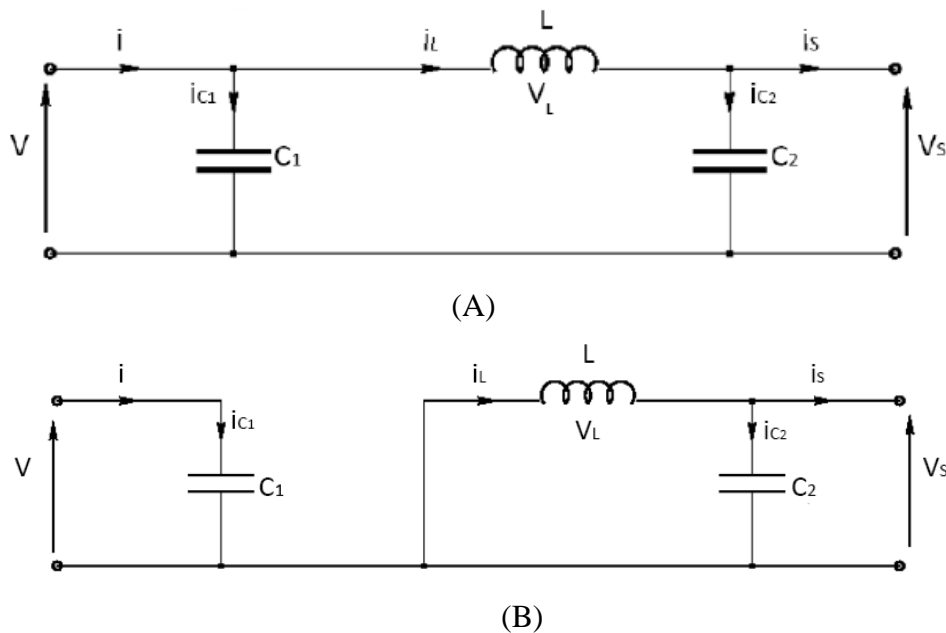


Figure II.9 : Circuits équivalents du convertisseur Buck, (A) : k fermé, (B) : k ouvert.

Pour extraire le modèle mathématique du convertisseur, il faut l'étudier dans les deux phases de fonctionnement (k fermé, et k ouvert), ensuite donner son modèle approximé qui englobe les différentes grandeurs moyennes d'entrée et de sortie du convertisseur.

Les variables dynamiques du circuit sont  $i_L$ ,  $v_{c1}$ ,  $v_{c2}$ , associée avec les composants  $L$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ . Les équations qui lient les dérivées aux variables d'entrée et de sortie ainsi que les composants du convertisseur et les variables dynamiques  $i_L$ ,  $v_c$  sont de la forme :

$$\frac{dV_c}{dt} = f(i_L, i_c, L, C)$$

$$\frac{dV_L}{dt} = g(i_L, i_c, V_c, L, C)$$

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les deux circuits précédents, on obtient les systèmes d'équations suivantes :

$$i_{c1} = c_1 \frac{dV}{dt} = i - i_L$$

$$i_{c2} = c_2 \frac{dV_S}{dt} = i_L - i_S \quad 0 < t < DT \quad (II.2)$$

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} = V - V_S$$

$$i_{C1} = c_1 \frac{dv}{dt} = i$$

$$V_l = L \frac{di_L}{dt} = V - V_S \quad DT < t < T \quad (II.3)$$

$$V_l = L \frac{di_L}{dt} = -V_S$$

### II.5.1.2 Modèle approximé du convertisseur Buck

Les systèmes d'équations de base (II.2) (II.3) représentent le convertisseur Buck pour une période  $DT$  et  $(1 - D)T$  respectivement. Le convertisseur oscille entre ces deux états avec une fréquence élevée, nous devons trouver une représentation dynamique approximée valable pour les deux intervalles de temps. Pour cela nous considérons que la variation des variables dynamiques  $i_L$ ,  $v_L$  est de forme linéaire, en d'autres termes nous pouvons faire une approche d'exponentielle par un segment ( $e^\varepsilon \approx 1 + \varepsilon$  si  $\varepsilon \ll 1$ ) et ainsi la dérivée de ces grandeurs sera constante.

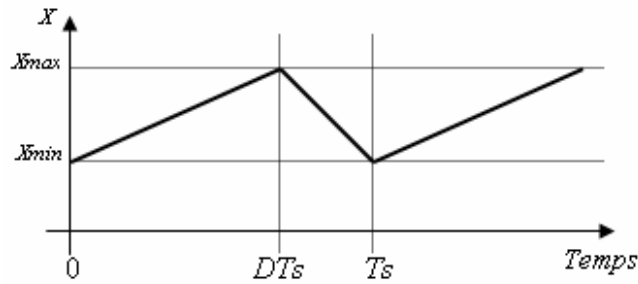
Cette approche nous permet de décomposer l'expression de la valeur moyenne de la dérivée de la variable dynamique  $x$  sur les deux laps de temps  $DT$  et  $(1 - D)T$  :

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle_T = \left( \frac{dx}{dt} \right)_{(DT)} \cdot DT + \left( \frac{dx}{dt} \right)_{(1-D)T} \cdot (1-D)T \quad (II-4)$$

Où  $\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle$  est la valeur moyenne de la dérivée de  $x$  sur une période  $T$ . Cette relation est

valable si  $\left( \frac{dx}{dt} \right)_{(DT)}$  et  $\left( \frac{dx}{dt} \right)_{(1-D)T}$  sont constants sur les périodes  $DT$  et  $(1-D)T$  respectivement.

Dans ce cas la forme du courant qui parcourt la self et la tension aux bornes de la capacité est de forme linéaire comme le montre la figure II.10.



**Figure II.10** : Allure des variables dynamiques  $i_L$ .

En appliquant la relation (II.4) sur les systèmes d'équations (II.2) et (II.3), on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière :

$$c_1 \frac{dv}{dt} T = DT(i - i_L) + T(1-D)i$$

$$c_2 \frac{V_s}{dt} T = DT(i_L - i_s) + (1-D)T(i_L - i_s) \quad (\text{II},5)$$

$$L \frac{di_L}{dt} T = DT(V - V_s) + (1-D)T(-V_s)$$

En arrangeant les termes des équations précédentes pour qu'on puisse interconnecter le convertisseur avec les autres blocs de simulation, on obtient la modélisation dynamique du convertisseur Buck :

$$i_L = \frac{1}{D} \left( i - c_1 \frac{dV}{dt} \right)$$

$$i_s = iL - c_2 \frac{dV_s}{dt} \quad (\text{II},6)$$

$$V = \frac{1}{D} \left( L \frac{di_L}{dt} - V_s \right)$$

### II.5.1.3 Etude en régime permanent

Le régime permanent est obtenu en éliminant les dérivées des variables dynamiques, et en remplaçant les variables dynamiques par leur valeur moyennes. Le système d'équation donne :

$$i_L = \frac{i}{D}$$

$$i_s = i_L \quad (\text{II.7})$$

$$V = \frac{V_s}{D}$$

#### II.5.1.4 Rapport de conversion $M(\alpha)$ :

Le rapport de conversion  $M$  est défini comme étant le rapport entre la tension de sortie et la tension d'entrée :

$$M(D) = \frac{V_s}{V} = D \quad (\text{II.8})$$

Le hacheur Buck est un abaisseur de tension car la tension de sortie est égale à la tension d'entrée multipliée par coefficient qui varie dans l'intervalle  $[0,1]$ .

#### II.5.2 Convertisseur Boost

Le convertisseur Boost est connu par le nom d'élévateur de tension, ce type de convertisseur permet de transférer l'énergie électrique d'une source de courant continu (une self) vers une source de tension continue (une capacité), le schéma de la figure II.12 représente le circuit électrique du Boost. Au premier temps  $DT$ , le transistor  $k$  est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période. Ensuite, le transistor ( $k$ ) s'ouvre et l'inductance ( $L$ ) s'opposant à la diminution de courant  $I_L$ , génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge à travers la diode. [15,21]

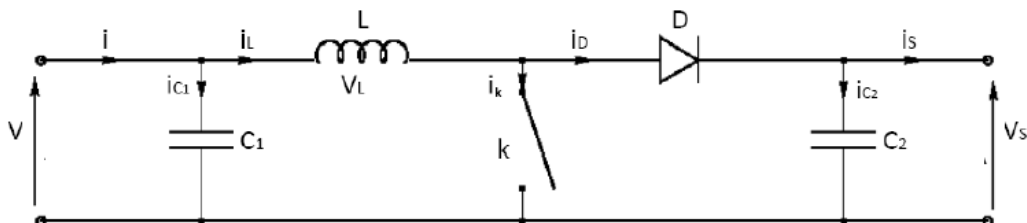
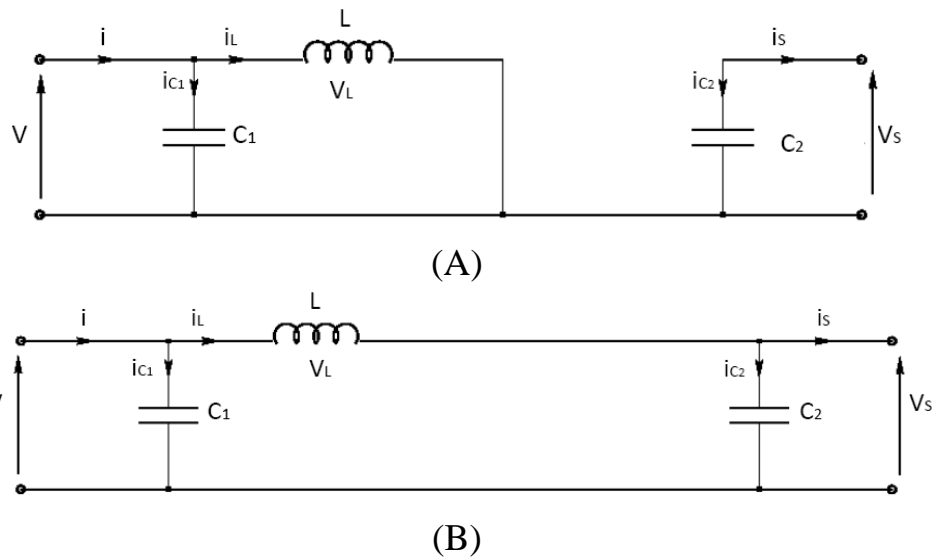


Figure II.11 : Circuit électrique du convertisseur Boost.

### II.5.2.1 Modèle mathématique équivalent



**Figure II.12 :** Circuits équivalents du convertisseur Boost, (A) :  $k$  fermé, (B) :  $k$  ouvert.

Comme pour le circuit Buck, l'application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne :

$$i_{c_1} = c_1 \frac{dv}{dt} = i - i_L$$

$$i_{c_2} = c_2 \frac{dv_s}{dt} = -i_s \quad (0 < t < DT) \quad (II.9)$$

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} = V$$

$$i_{c_1} = c_1 \frac{dv}{dt} = i - i_L$$

$$i_{c_2} = c_2 \frac{dv_s}{dt} = i_L - i_s \quad (DT < t < T) \quad (II.10)$$

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} = V - V_s$$

### II.5.2.2. Modèle approximé du convertisseur Boost

Comme pour le Buck, en appliquant la relation (II.4) sur les systèmes d'équations (II.9) et (II.10), on trouve le modèle approximé du convertisseur Boost :

$$\begin{aligned}c_1 \frac{dV}{dt} T &= DT(i - i_L) + (1-D)T(i - i_L) \\c_2 \frac{dV}{dt} T &= -DTi_s + (1-D)T(i_L - i_s) \\L \frac{di_L}{dt} T &= -DTV + (1-D)T(V - V_s)\end{aligned} \quad (II.11)$$

En arrangeant les termes des équations précédentes, (pour qu'on puisse interconnecter le Boost avec les autres blocs de simulation), on obtient la modélisation dynamique du convertisseur Boost :

$$\begin{aligned}i_L &= i - c_1 \frac{dV_s}{dt} \\V &= (1-D)i_L - c_2 \frac{dV}{dt} \\V &= (1-D)V_s - L \frac{di_L}{dt}\end{aligned} \quad (II.12)$$

### II.5.2.3 Etude en régime continu

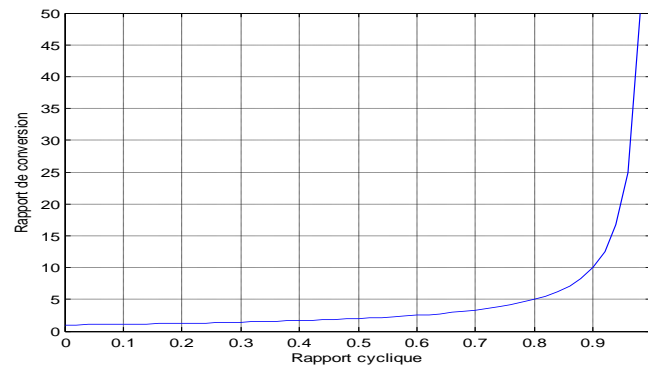
$$\begin{aligned}I_s &= (1-D)i_L \\i &= i_L \\V &= (1-D)V_s\end{aligned} \quad (II.13)$$

### II.5.2.4 Rapport de conversion M(D)

Le rapport de conversion M est défini comme étant le rapport entre la tension de sortie et la tension d'entrée :

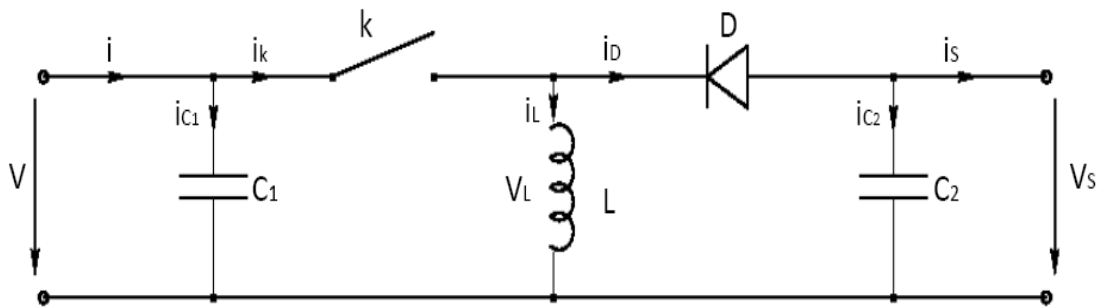
$$M(D) = \frac{V_s}{V} = \frac{1}{1-D} \quad (II.14)$$

Le hacheur Boost est un élévateur de tension.



**Figure II.13 :** Le rapport de conversion  $M(D)$  pour un convertisseur Boost .

### II.5.3 Convertisseur Buck-Boost

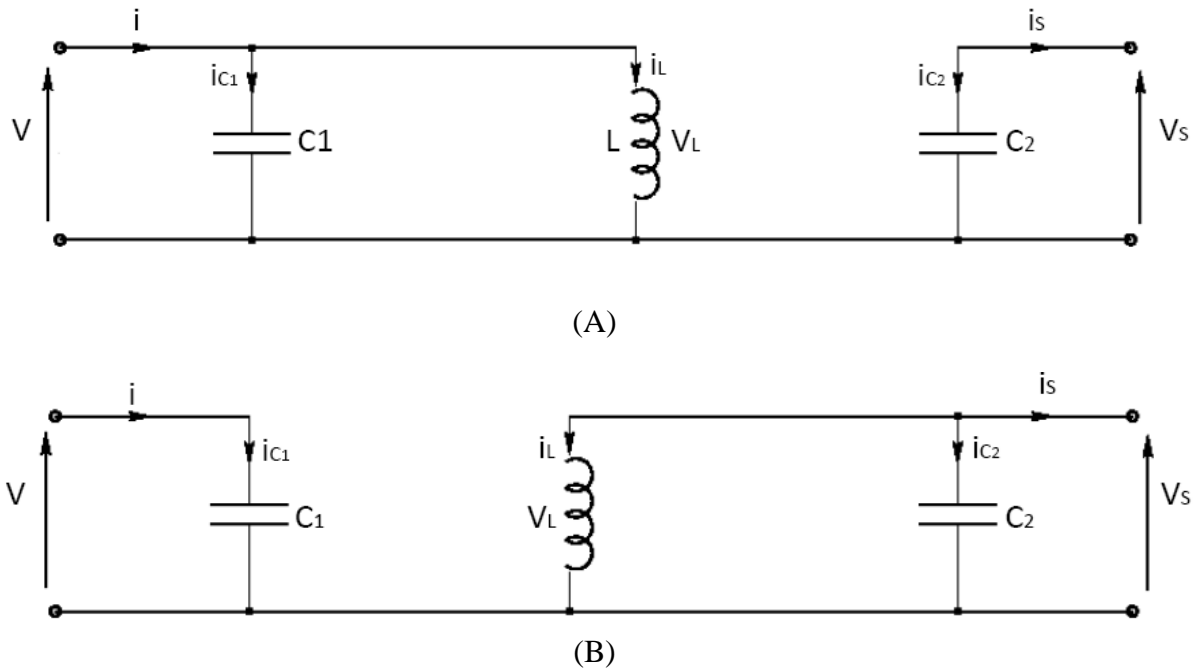


**Figure II.14 :** Circuit électrique d'un convertisseur Buck-Boost.

Le convertisseur Buck-Boost combine les propriétés des deux convertisseurs précédents. Il est utilisé comme un transformateur idéal qui pourrait s'appliquer à n'importe quelle tension d'entrée afin d'obtenir la tension de sortie désirée. [15]

En premier temps,  $k$  est fermé la tension de la source est appliquée aux bornes de l'inductance  $L$ , où elle se charge d'énergie jusqu'au début de la deuxième phase de fonctionnement, puis  $k$  s'ouvre et la tension de l'inductance se trouve appliquée à la charge, où son courant circule dans le sens inverse d'une aiguilles de montre et ainsi la tension de sortie sera négative.

## II.5.3.1 Modèle Mathématique équivalent :



**Figure II.15 :** Circuits équivalents de Buck-Boost, (A) : k fermé, (B) : k ouvert.

La figure II.16 montre les deux schémas équivalents du convertisseur Buck-Boost pour les deux périodes de fonctionnement.

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents précédents, on obtient :

$$i_{c1} = c_1 \frac{dV}{dt} = i - i_L$$

$$i_{c2} = c_2 \frac{dV_s}{dt} = -i_s \quad (0 < t < DT) \quad (II.15)$$

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} = V$$

$$i_{c1} = c_1 \frac{dV}{dt} = i$$

$$i_{c2} = c_2 \frac{dV_s}{dt} = -i_s - i_L \quad (DT < t < T) \quad (II.16)$$

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} = V_s$$

En appliquant la relation (II.4) sur les systèmes d'équations (II.15) et (II.16), on trouve le modèle approximé du convertisseur Buck-Boost :

$$\begin{aligned}c_1 \frac{dV}{dt} T &= DT(i - i_L) + (1-D)Ti \\c_2 \frac{dV_s}{dt} T &= -DTi_s + (1-D)T(-i_s - i_L) \\L \frac{di_L}{dt} T &= DTV + (1-D)TV_s\end{aligned} \quad (II.17)$$

En arrangeant les termes des équations précédentes, on obtient la modélisation dynamique du Buck- Boost :

$$\begin{aligned}i_L &= \frac{1}{D} \left( i - c_1 \frac{dV}{dt} \right) \\i_s &= -(1-D)i_L - c_2 \frac{dV_s}{dt} \\V &= \frac{1}{D} \left( L \frac{di_L}{dt} - (1-D)V_s \right)\end{aligned} \quad (II.18)$$

### II.5.3.2 Etude en régime continu :

$$\begin{aligned}i_s &= -(1-D)i_L \\i &= D.i\end{aligned} \quad (II.19)$$

$$V = \frac{-(1-D)}{D} V_s$$

### II.5.3.3 Rapport de conversion M(D) :

Le rapport de conversion M est défini comme étant le rapport entre la tension de sortie et la tension d'entrée :

$$M(\alpha) = \frac{-D}{1-D} \quad (II.20)$$

$0 < D < 0.5$ : Le hacheur est un abaisseur de tension.

$0.5 < D < 1$ : Le hacheur est un élévateur de tension.

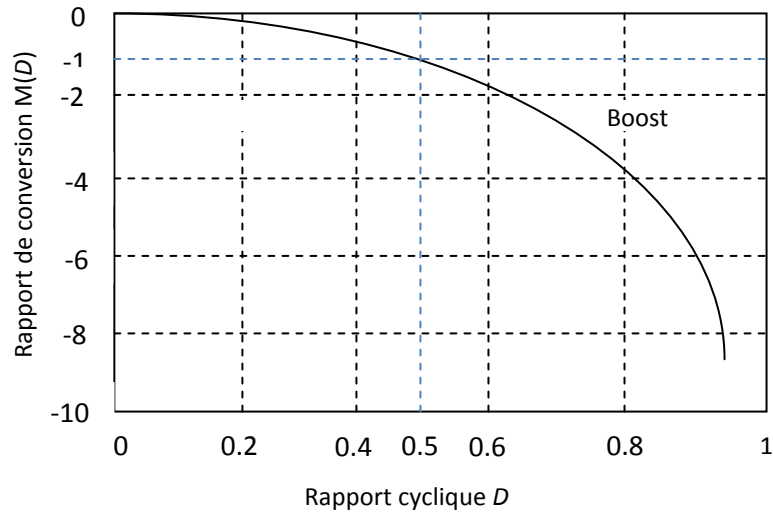


Figure II.16 : Rapport de conversion  $M(D)$  pour un convertisseur Buck – Boost

### II.6. Simulation du hacheur parallèle

- Schéma bloc de simulation du convertisseur élévateur :

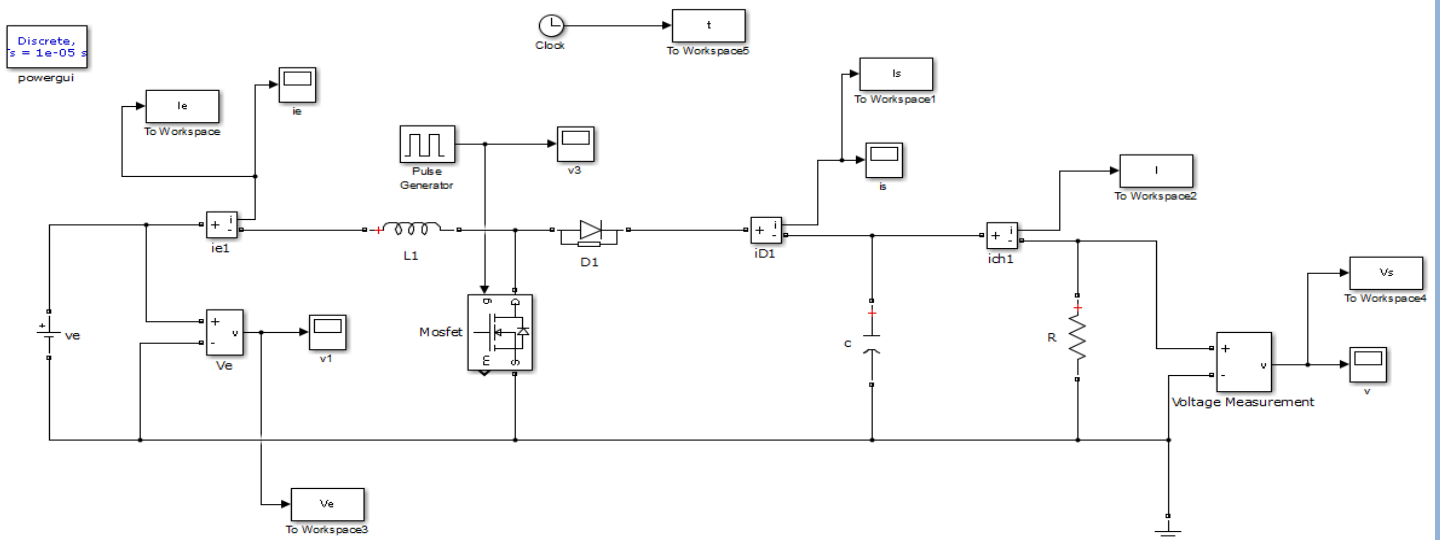


Figure (II .17) : schéma bloc de simulation du convertisseur Boost.

- Résultats de la simulation :

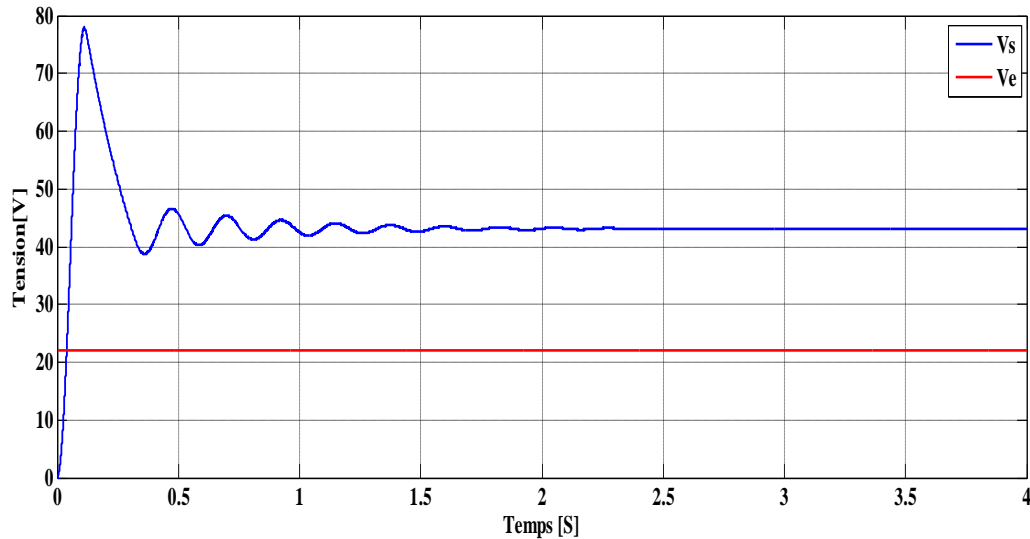


Figure (II .18) : tension de sortie du convertisseur Boost.

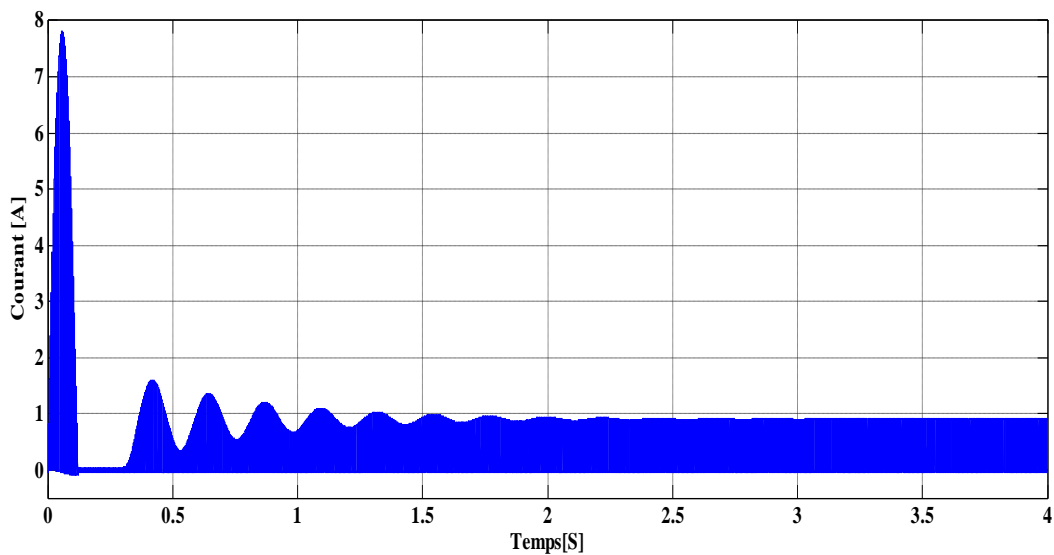


Figure (II .19) : courant de sortie de l'inductance.

### Interprétation des résultats :

Ces figures représentent les tensions d'entrée et de sortie d'hacheur survolteur ainsi le courant de sortie d'hacheur. Ces résultats montrent que la tension de sortie du hacheur

survolteur est supérieure à celle d'entrée. Donc l'hacheur survolteur effectue correctement son rôle.

### II.7.Principe de fonctionnement de MPPT

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 à chaque instant. Les figures (II.20, II.21) représentent la trajectoire du point de puissance maximale produite par le générateur.

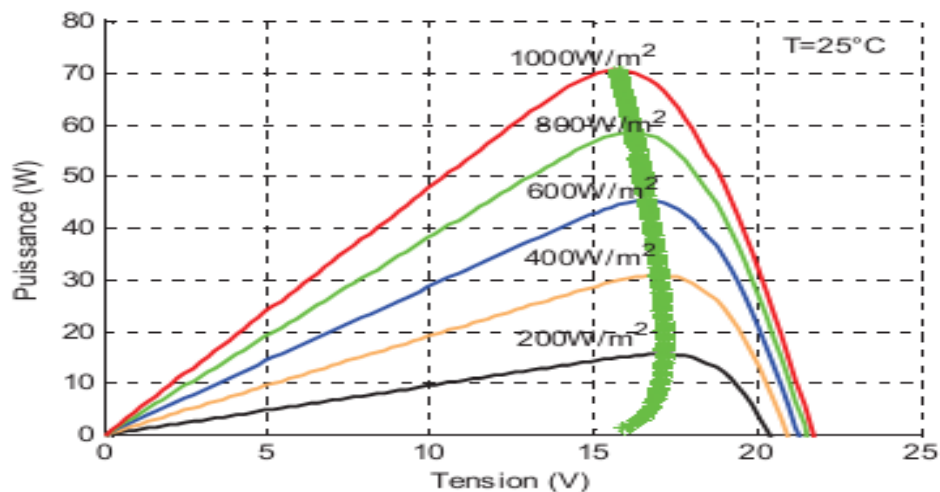


Figure II.20: La caractéristique P-V et la trajectoire de PPM.

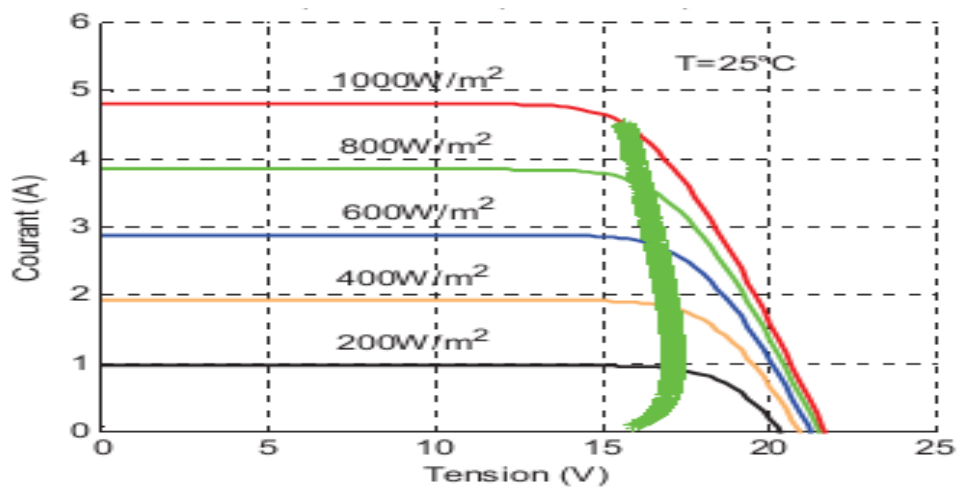
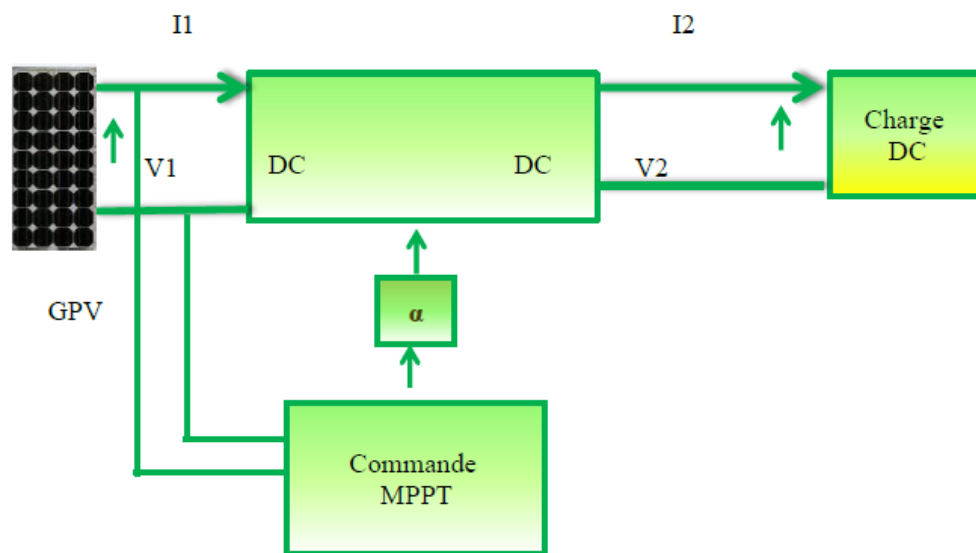


Figure II.21: La caractéristique I-V et la trajectoire de PPM.

La figure II.23 représente le schéma de principe d'un module photovoltaïque doté d'un étage d'adaptation DC-DC entre le GPV et la charge de sortie. Cette structure correspond à un système plus communément appelé système autonome. Il permet le plus souvent d'alimenter une batterie servant à stocker l'énergie pour une charge qui ne supporte pas les fluctuations de tension. Cet étage d'adaptation dispose d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui lui permet de rechercher le PPM que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisi et des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé. [7]



**Figure II.22 :** Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.

## II.8. Classification de l'algorithme de suiveur de la puissance max :

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

### II.8.1 Les méthodes indirectes :

Les méthodes indirectes utilisent des bases de données regroupant les caractéristiques des panneaux photovoltaïques (PV) dans différentes conditions climatiques (température, ensoleillement...) mais aussi des équations mathématiques empiriques permettant de déterminer le point de puissance maximum. Ces méthodes sont souvent propres à chaque type de panneau et donc difficile à généraliser : la méthode d'ajustement de courbe, la méthode «

look-up table », la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur, la méthode de court-circuit.

### II.8.1.1 La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur :

Cette méthode, est basée sur la tension du générateur PV au point de puissance maximale qui est approximativement proportionnelle à sa tension à circuit ouvert  $V_{oc}$ . La constante proportionnelle  $K_1$ , dépend de la technologie de cellules photovoltaïques, du facteur de forme et des conditions météorologiques.

$$K_1 = \frac{V_{MPP}}{V_{oc}} = Cte < 1 \quad (II.21)$$

La tension de circuit ouvert du générateur PV est mesurée et stockée en arrêtant le système, cette opération s'effectuant à une certaine fréquence. Le MPP est calculé suivant l'équation

(II.21), et la tension de fonctionnement est ajustée sur le point de puissance maximale. Bien que cette méthode soit apparemment simple, il est difficile de choisir une valeur optimale de  $K_1$ .

Cette méthode souffre donc d'inexactitude mais présente l'avantage d'être simple et à bas prix.

### II.8.1.2 La méthode de court-circuit :

Cette méthode est similaire à la précédente et est basée sur la proportionnalité existant entre le courant de court-circuit et le courant au point de puissance maximale (II.22) :

$$K_2 = \frac{I_{MPP}}{I_{sc}} \approx Cte < 1 \quad (II.22)$$

Cette méthode présente les mêmes avantages et inconvénients que ceux de la méthode de la tension de circuit ouvert.

### II.8.2 Les méthodes directes :

Les méthodes directes sont des méthodes qui utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures.

L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des panneaux PV. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode Perturbe & Observe (P&O), l'incrément de conductance...

### **II.8.2.1 La méthode Perturbe & 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 (II.24), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension  $V_{PV}$  engendre un accroissement de la puissance  $P_{PV}$ , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. 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.

La figure (II.24) 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. [14]

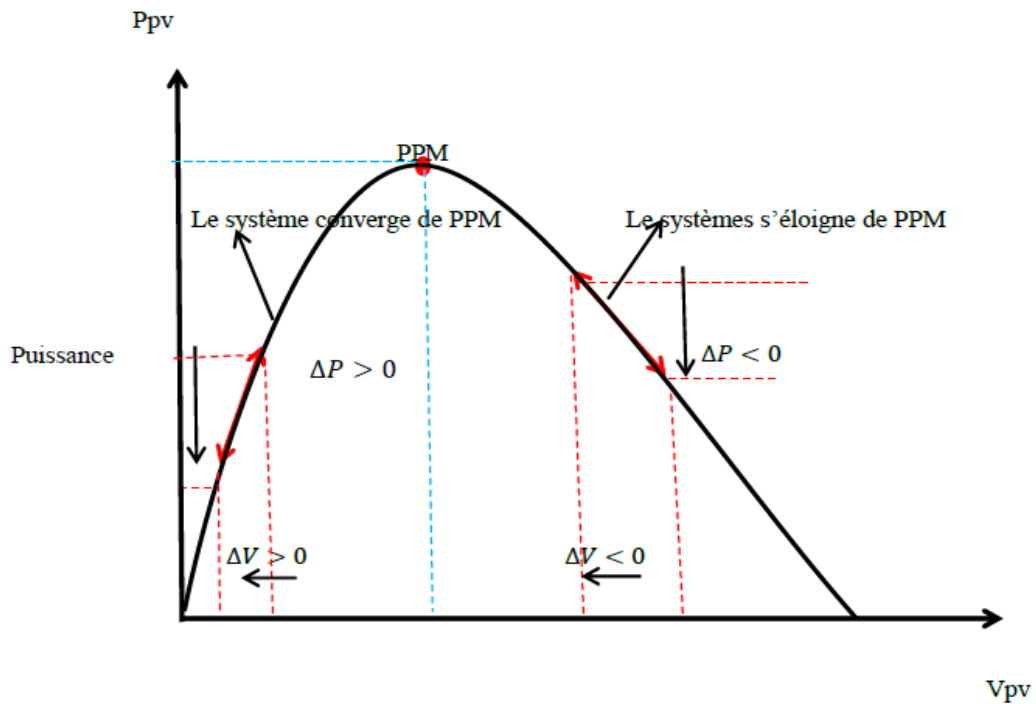


Figure II.23 : Convergence vers le PPM par P&O

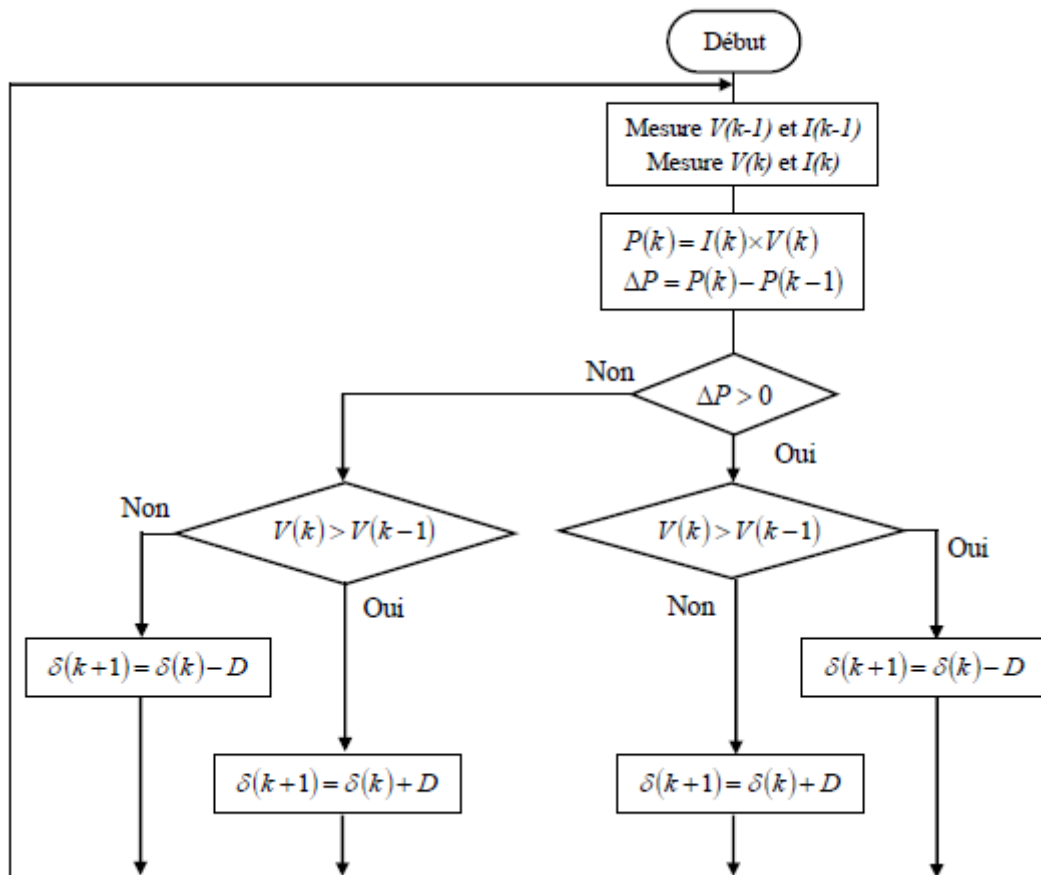


Figure II.24: Algorithme de MPPT à base de la méthode P&O.

Telle que :

$P_{pv_n}$  : La nouvelle puissance

$P_{pv_{n-1}}$  : L'ancienne puissance dans le temps ( $t-1$ )

$$\Delta V = V_{pv_n} - V_{pv_{n-1}} \quad (II.23)$$

$$\Delta P = P_{pv_n} - P_{pv_{n-1}} \quad (II.24)$$

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée de par 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. [14]

### II.8.2.2 La méthode de l'incrémentale conductance :

L'avantage de cet algorithme est la vitesse de recherche du point de puissance maximale quand les conditions atmosphériques changent rapidement ; la description de l'algorithme sera présentée par la suite. [23] La puissance produite par le générateur PV peut être exprimé par :

$$P_{pv} = I_{pv} \cdot V_{pv} \quad (II.25)$$

La conductance et l'incrémentale conductance peuvent être identifiées en dérivant l'équation par rapport à la tension  $V_{pv}$ :

$$\frac{1}{V_{pv}} \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} + \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (II.26)$$

Ainsi on a noté avec  $G$  la conductance et avec  $\Delta G$  l'incrément de la conductance :

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (II.27)$$

$$\Delta G = \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \quad (II.28)$$

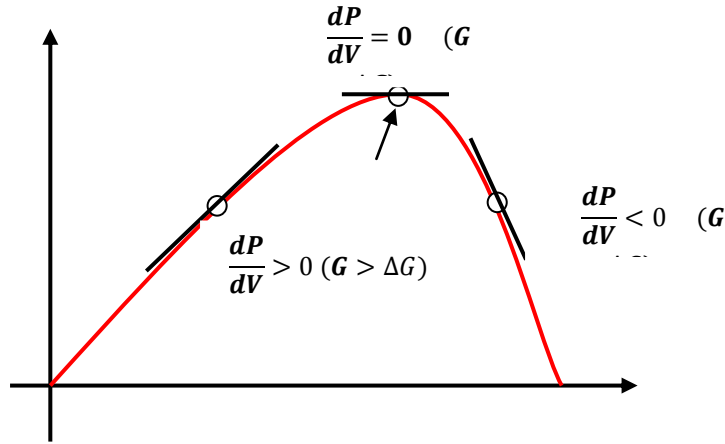


Figure II.25: Trajectoire par Incrémentation de Conductance

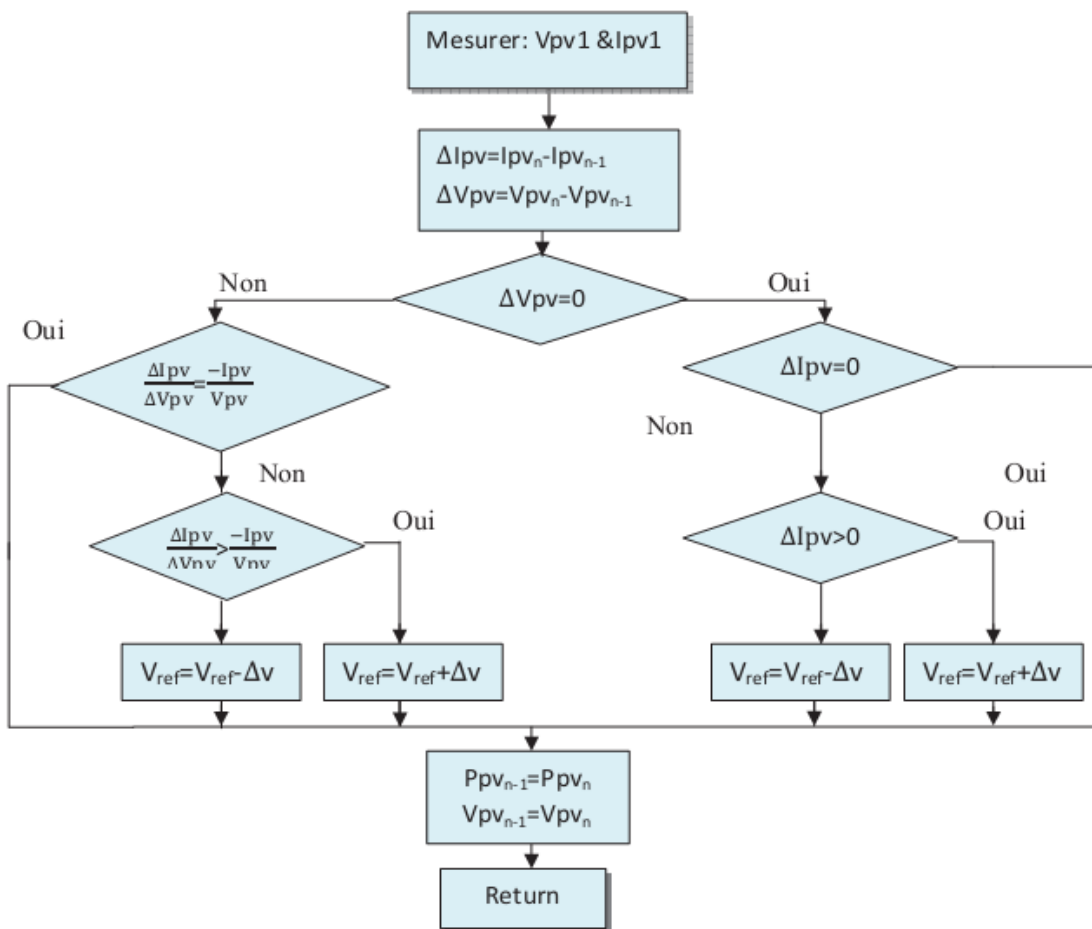


Figure II.26: Algorithme d'incrément de la conductance

On peut écrire aussi :

$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0$ : Le point de fonctionnement est à gauche du PPM.

$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$ : Le point de fonctionnement sur le PPM.

$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0$ : Le point de fonctionnement est droit de PPM.

### II.9. Conclusion :

L'inconvénient d'un générateur PV et le faible rendement de conversion, parmi les causes qui provoquent ce problème on a la mauvaise adaptation entre la source la charge.

Dans ce chapitre nous avons présenté les convertisseurs DC-DC puis nous avons expliqué plusieurs méthodes de poursuite du point de puissance maximale et nous avons détaillé relativement la méthode dite 'perturbation et observation' qui sera finalement la méthode utilisé par la suite dans la simulation de notre système.

Ces techniques force le générateur PV à produire en permanence le maximum de sa puissance, et cela grâce a l'insertion d'un convertisseur DC-DC contrôlé par un algorithme traqueur du point de puissance maximale (MPPT).

# *Chapitre III*

*Simulation et évaluation  
des résultats.*

**III.1 introduction**

Afin de valider l'étude abordée dans le chapitre précédent concernant l'optimisation de générateur PV et d'amélioration du rendement, ce présent chapitre a pour but de modéliser et simuler le système PV de moyenne puissance (200 W) fonctionnant en régime continu dans les conditions optimales indépendamment des conditions météorologiques (ensoleillement, température). Puis dans des conditions de fonctionnement à ensoleillement variable.

Le système simulé comprend les panneaux photovoltaïque, et l'étage d'adaptation représenté par le hacheur Boost. Pour cet effet nous avons utilisée logicielle MATLAB pour la simulation.

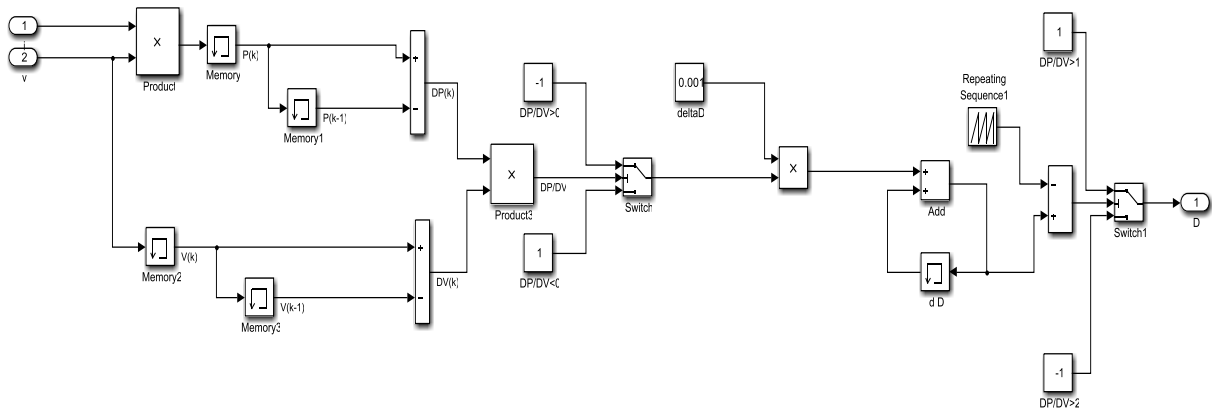
**III.2 Simulation du GPV avec MPPT et un convertisseur DC/DC :**

Pour réaliser cette simulation, nous avons utilisé les équipements suivants :

- Générateur PV **KC200GT**
- Convertisseur d'énergie DC-DC (Boost).
- Algorithme MPPT perturbe and observe(P&O).
- Charge résistive  $R_S = 200 \Omega$ .

Les figures (III.1) et (III.2) ci-dessous présentent le schéma bloc de la simulation d'un système PV et schéma bloc d'algorithme MPPT.

**●Schéma bloc de la commande MPPT (P&O) :**



**Figure III.2 : Schéma bloc d'algorithme MPPT.**

●Schéma bloc de simulation :

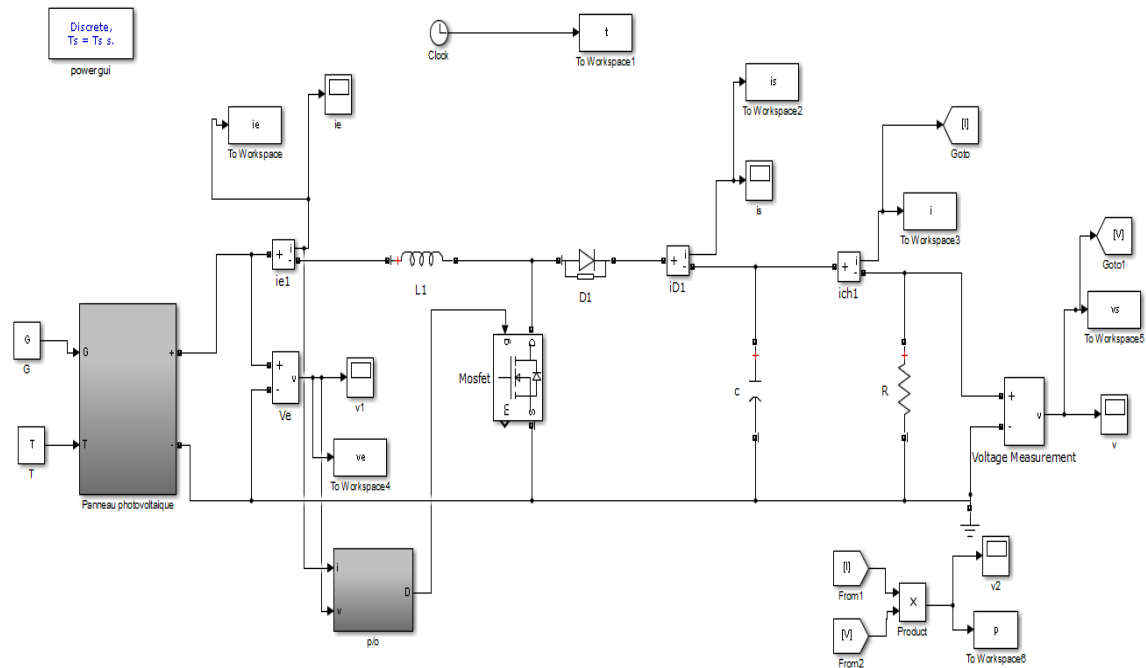


Figure III.1 : Schéma bloc de la simulation d'un système PV avec la commande MPPT.

III.3 Fonctionnement dans des conditions environnementales stables

Pour cette série de simulations, les paramètres température T et d'insolation G sont maintenus constamment égaux aux valeurs d'essais standards qui sont respectivement  $T=25^{\circ}\text{C}$  et  $G=1000\text{ W/m}^2$ . L'intérêt majeur sera focalisé sur les ondulations au niveau de la puissance et de la tension.

III.3.1 Résultats de la simulation a la sortie du GPV :

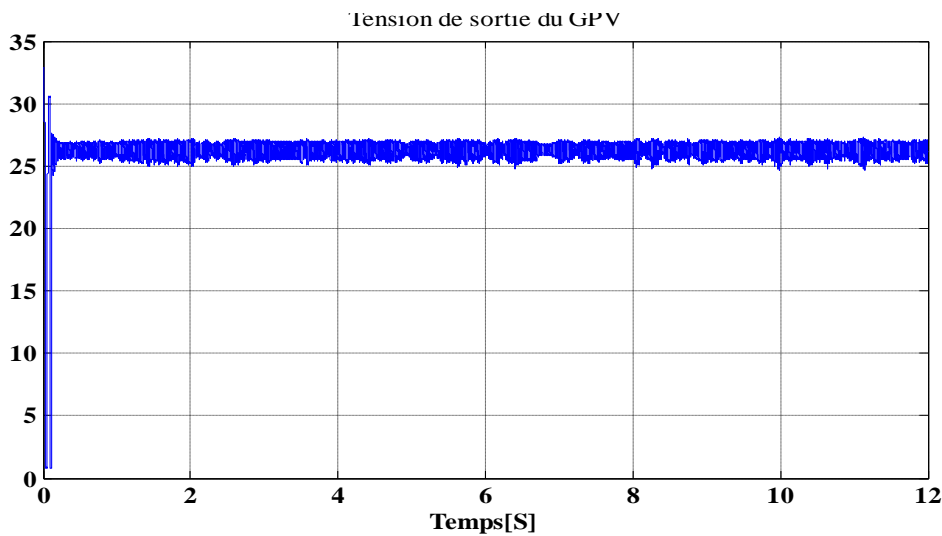


Figure III.3 : Tension de sortie du GPV.

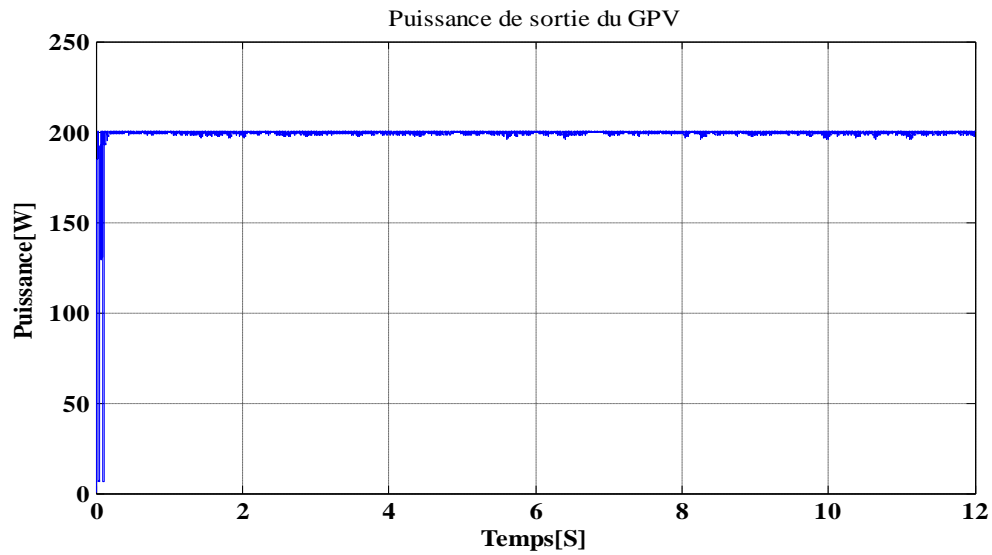


Figure III.4 : Puissance délivrée par le GPV.

### III.3.2 Résultats obtenus à la sortie du convertisseur :

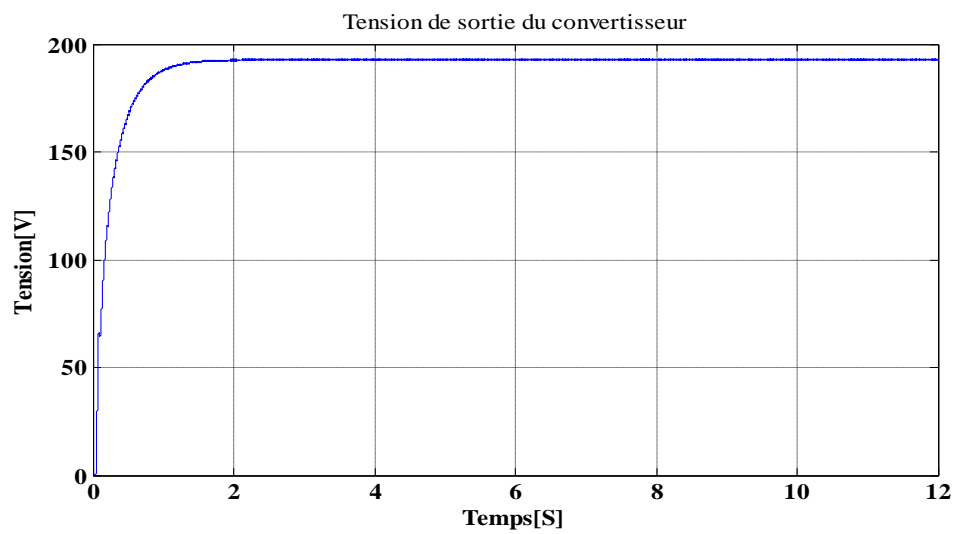
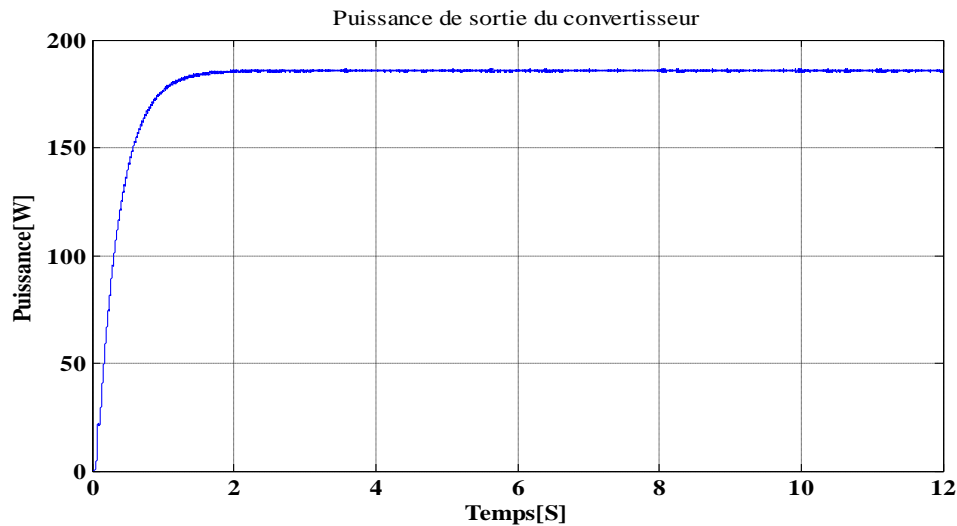


Figure III.4 : tension de sortie a la sortie du convertisseur.



**Figure III.5** : Puissance de sortie du convertisseur.

### Interprétation des résultats :

Les résultats typiques de simulation des grandeurs électriques à la sortie du panneau et à la sortie du hacheur de type élévateur contrôlé par la commande MPPT il apparaît que: Les différentes grandeurs électriques (puissances et tensions) se stabilisent autour des valeurs souhaitées:

Après un régime transitoire d'une durée de 0.8 s, la commande MPPT fait osciller le point de fonctionnement autour du point du PPM.

La puissance fournie par le générateur PV se stabilise autour de 200 W et celle fournie à la charge autour de 186.321 W, à la sortie du panneau, la tension se stabilise autour de 27.2 V ; au niveau de la charge, la tension de sortie du hacheur se stabilise autour de 193 V.

Notons que la différence entre la puissance à la sortie du panneau et celle fournie à la charge reste dans la limite de 14 W. Ces pertes sont attribuées aux pertes par commutation et par conduction dans le transistor Mosfet, dans la diode et dans les différents composants de la commande MPPT.

## III.4 Fonctionnement dans des conditions environnementales variables :

### III.4.1 Eclairage variable et température constante :

Pour présenter l'effet de l'éclairage  $G$  sur la puissance, on maintient la température à une valeur constante  $T=25^{\circ}\text{C}$  et on fait varier l'éclairage pour deux profils différents :

### III.4.1.1 Profil lent :

Pour une température interne fixée à 25°C, on simule une augmentation de l'éclairement de 300W/m<sup>2</sup> à 1000W/m<sup>2</sup> pendant 10 secondes. On refait l'expérience, dans l'autre sens, en diminuant l'éclairement de 1000W/m<sup>2</sup> à 300W/m<sup>2</sup> durant le même laps de temps.

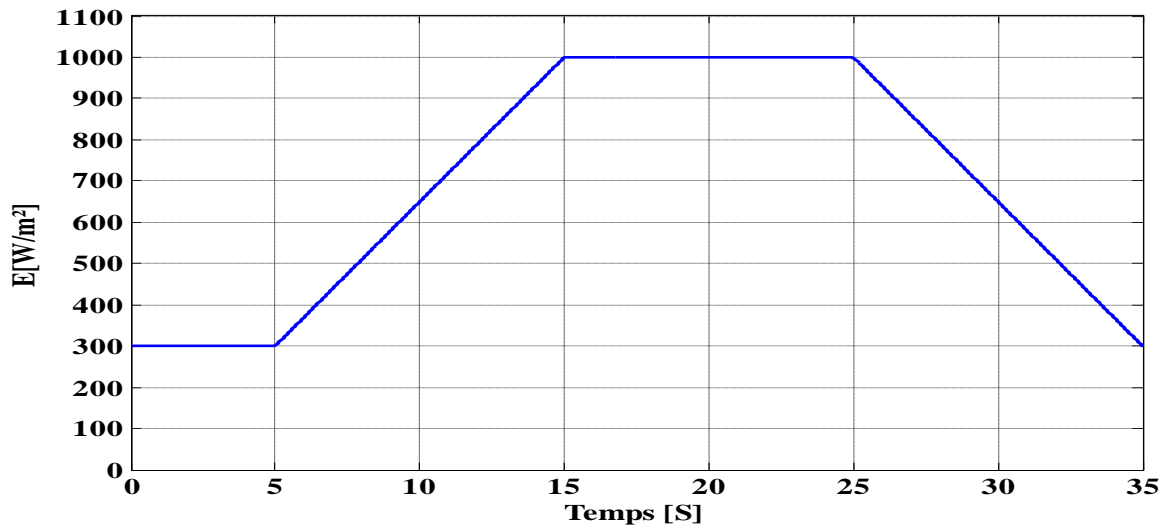


Figure III.6 : Variation de l'éclairement en fonction du temps (profil lent).

#### III.4.1.1.1 Résultats de simulation à la sortie du GPV :

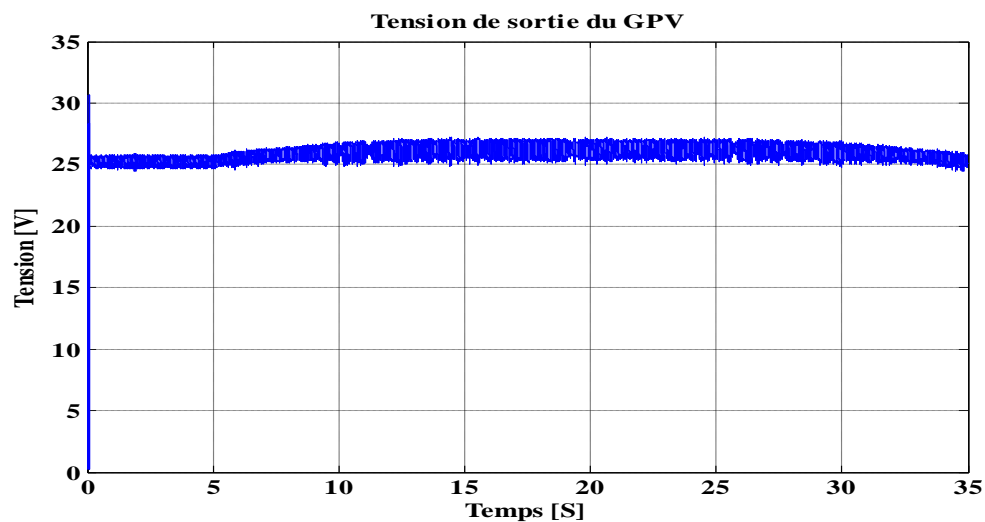


Figure III.7 : tension de sortie du GPV pour un éclairement variable (profil lent)

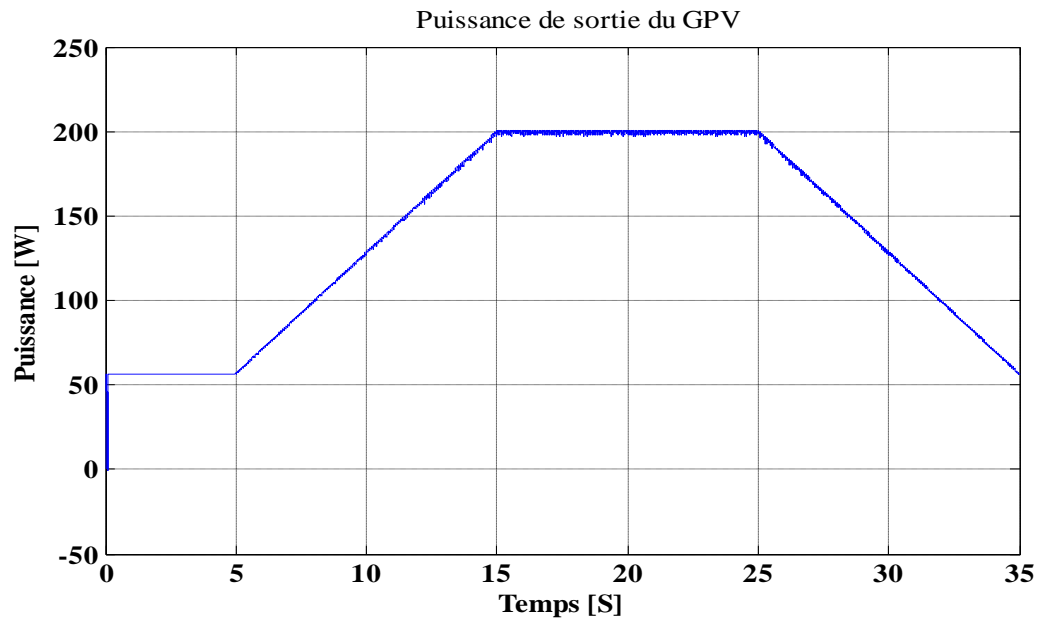


Figure III.8 : puissance de sortie du GPV pour un éclairage variable (profil lent).

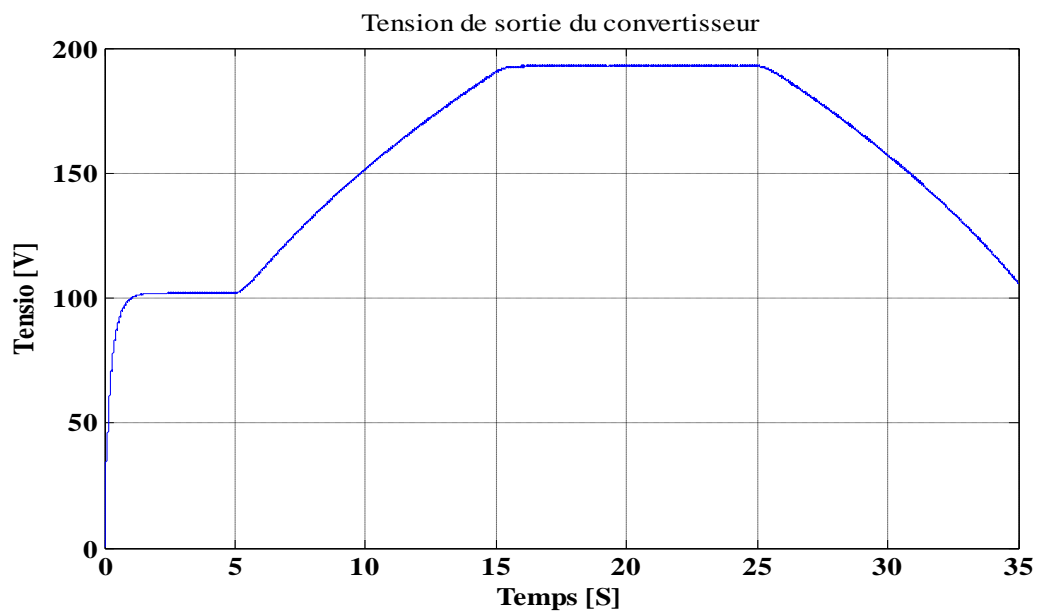
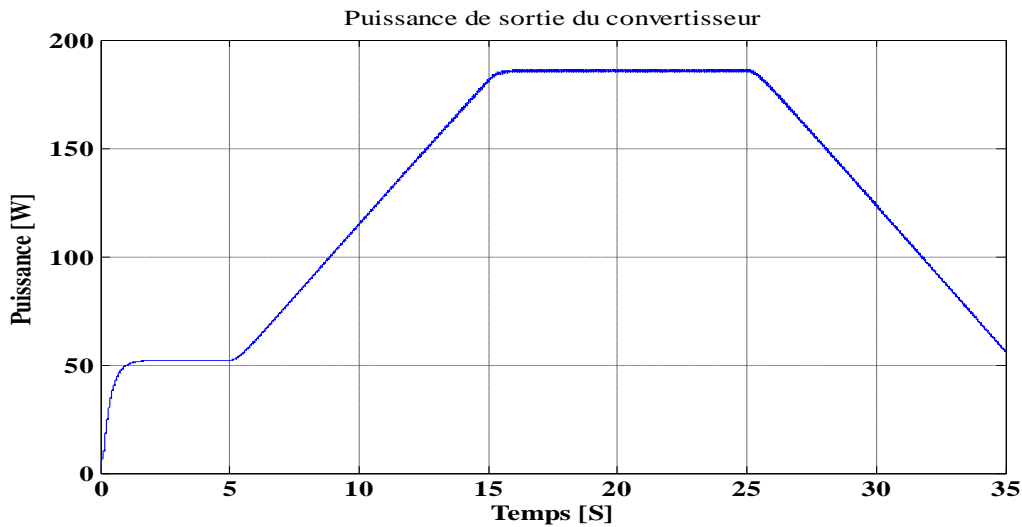


Figure III.9 : tension de sortie du convertisseur pour un éclairage variable (profil lent).

### III.4.1.1.2 Résultats de simulation à la sortie du convertisseur :



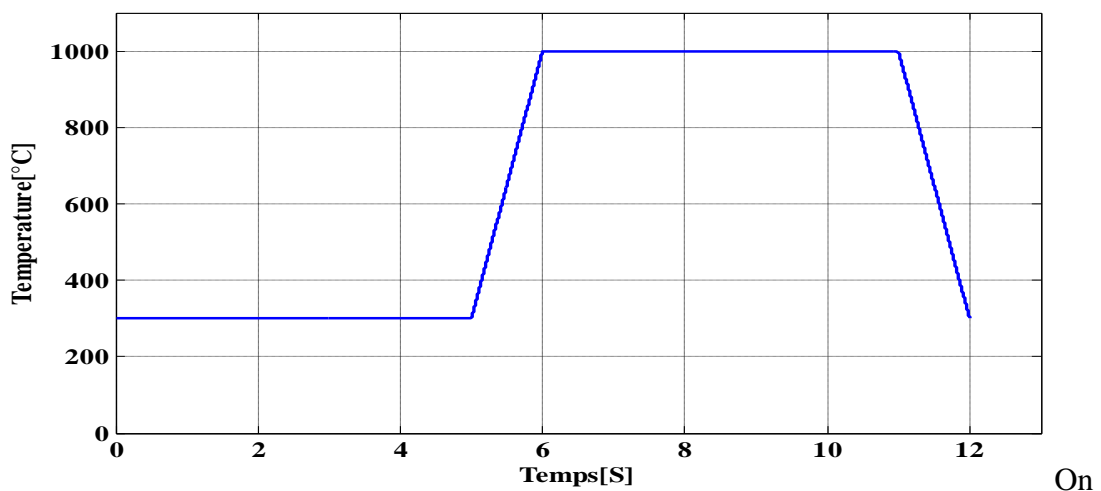
**Figure III.10** : puissance de sortie du convertisseur pour un éclairage variable (profil lent).

#### Interprétation des résultats :

D'après les résultats de simulation obtenus, on remarque qu'il existe une relation de proportionnalité entre la puissance et l'éclairage ; de ce fait on constate que le régulateur P&O poursuit parfaitement l'évolution du PPM imposé par le changement d'éclairage avec un temps de réponse très rapide. Mais on constate aussi que les courbes de la puissance et de la tension présentent de petites oscillations dans le régime permanent.

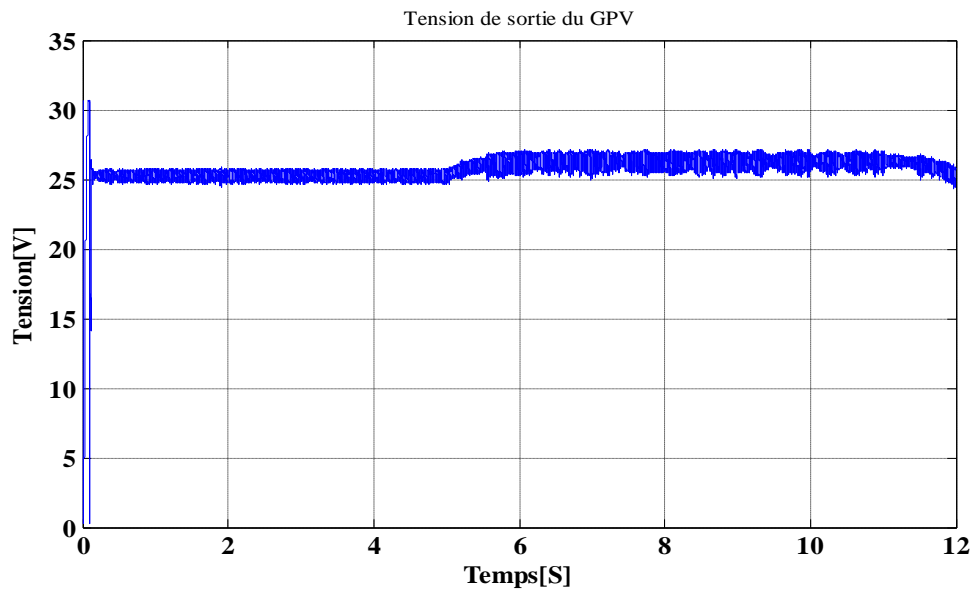
#### III.4.1.2 Profil rapide :

On fait subir au système la même variation précédente de l'ensoleillement mais dans un intervalle moins long de 1s avec une température constante 25°C.

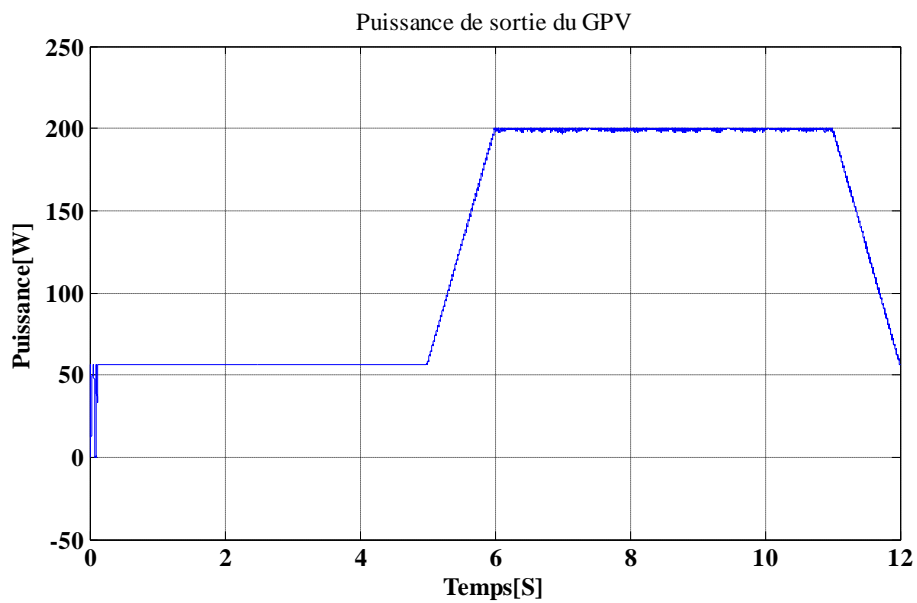


**Figure III.11** : Variation de l'éclairage en fonction du temps (profil rapide).

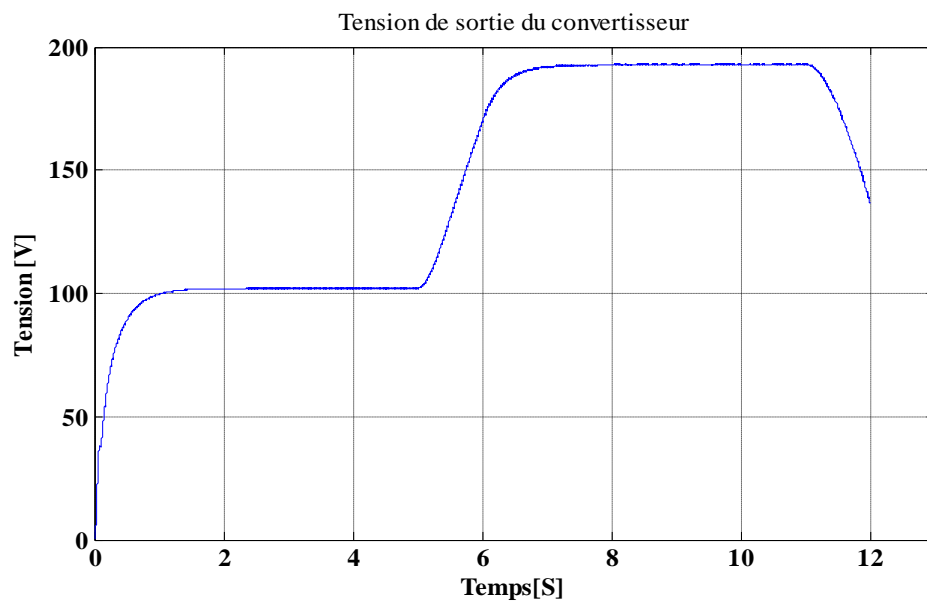
On

**III.4.1.2.1 Résultats de la simulation a la sortie du GPV :**

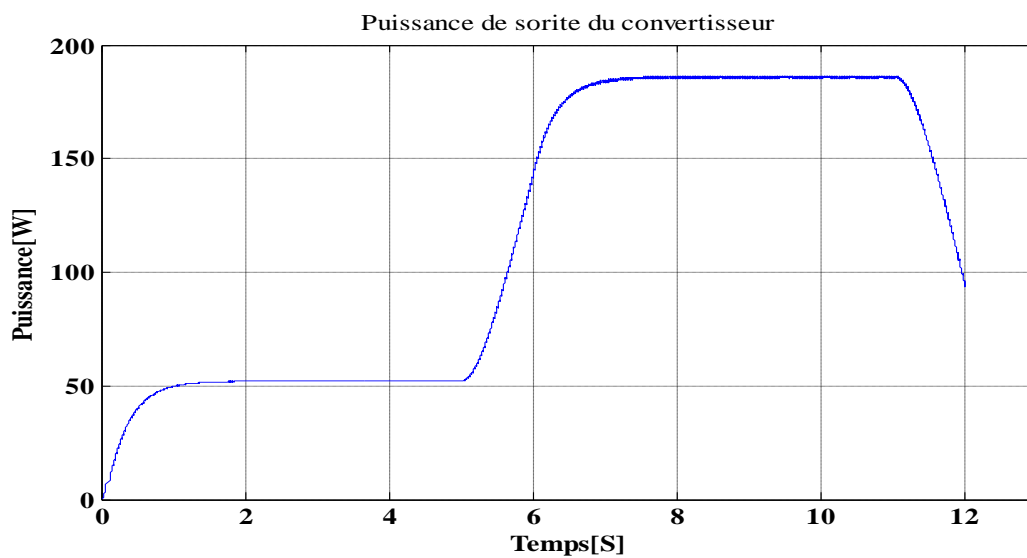
**Figure III.12 :** tension de sortie du GPV pour un éclairage variable (profil rapide).



**Figure III.13 :** puissance de sortie du GPV pour un éclairage variable (profil rapide).

**III.4.1.2.2 Résultats de la simulation a la sortie du convertisseur :**

**Figure III.14 :** tension de sortie du convertisseur pour un éclairage variable (profil rapide).



**Figure III.15 :** puissance de sortie du convertisseur pour un éclairage variable (profil rapide).

**Interprétation des résultats :**

Pour ce cas de figure nous remarquons que l'algorithme P&O n'a pas pu suivre exactement la pente de la variation de l'insolation, elle n'a rattrapé le PPM qu'après l'écoulement de 1.5s de variation de l'insolation ce qui est défavorable en terme de dissipation de puissance. Car une augmentation brutale de l'ensoleillement produit une augmentation de la puissance du panneau, l'algorithme considèrera cette augmentation comme étant dû à la perturbation introduite durant le dernier cycle donc, il continue à perturber le système dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qui engendre une déviation du point de fonctionnement du vrai PPM.

**III.4.2 Température variable et éclairement fixe :**

Pour présenter l'effet de la température  $T$  sur la tension, on fait maintenir l'éclairément à une valeur constante  $G= 1000 \text{ w/m}^2$  et on fait varier la température de  $(25, 40) ^\circ\text{C}$  pour deux profils différents.

**III.4.2.1 Profil lent :**

Pour un éclairément interne fixé à  $1000\text{W/m}^2$ , on simule une augmentation de l'éclairément de  $25^\circ\text{C}$  à  $40^\circ\text{C}$  pendant 10 secondes. On refait l'expérience, dans l'autre sens, en diminuant la température de  $40^\circ\text{C}$  à  $25^\circ\text{C}$  durant le même laps de temps.

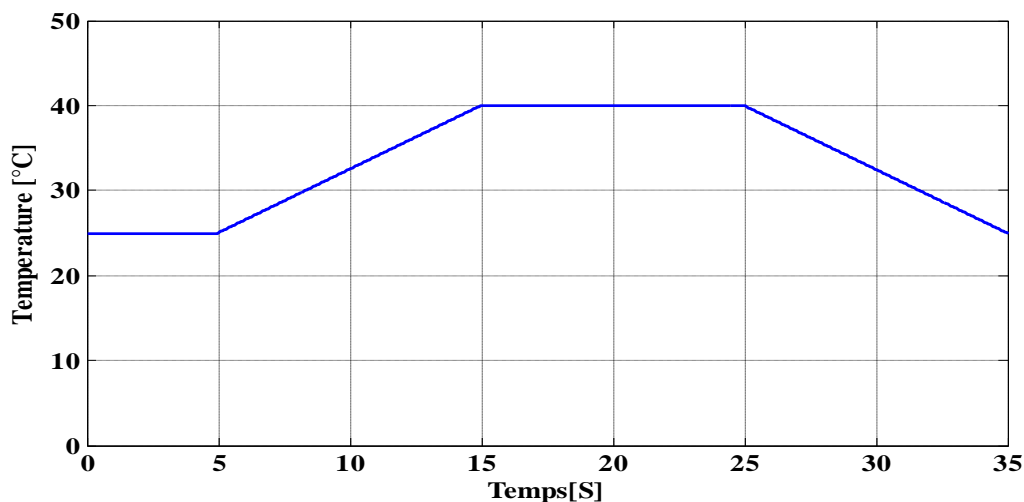
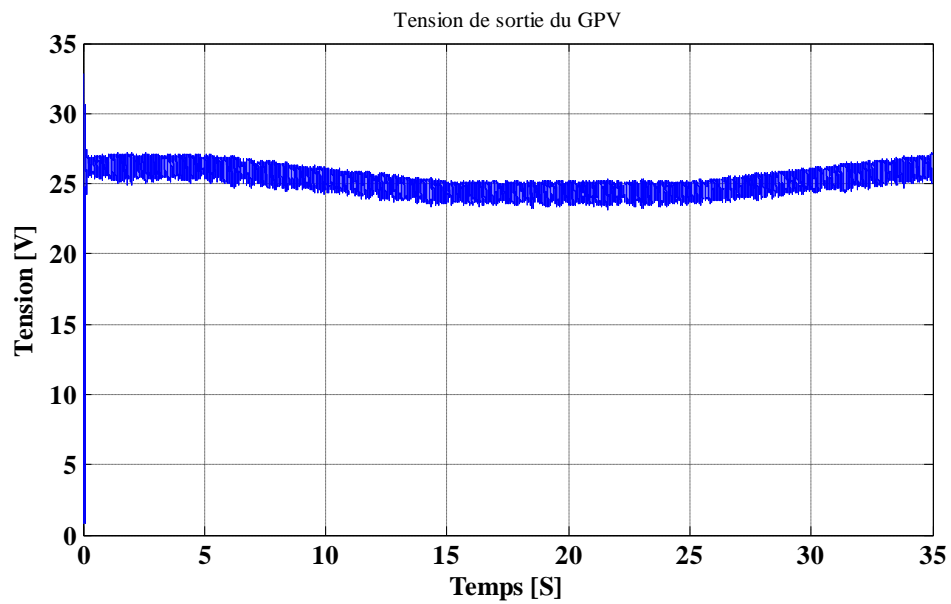
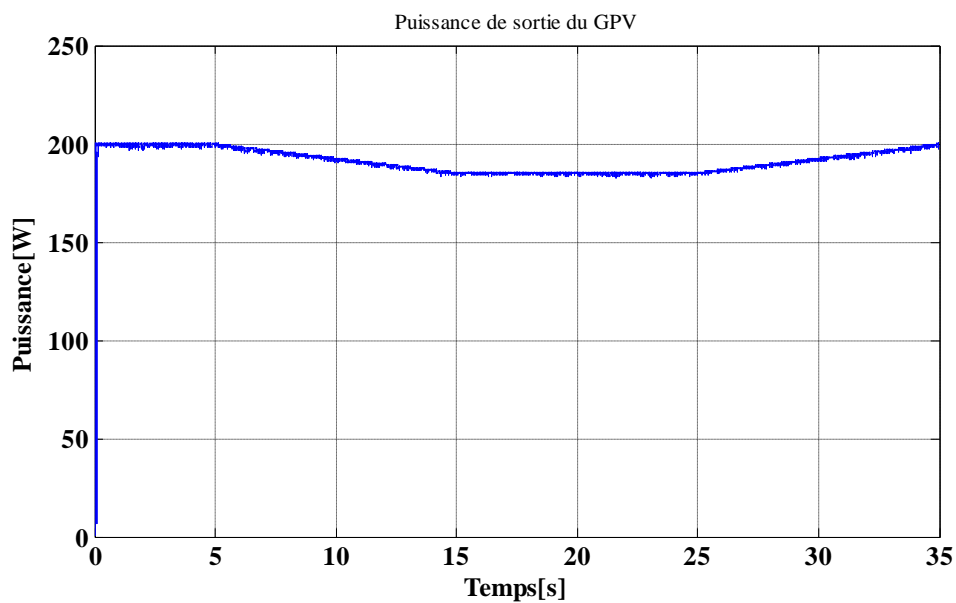


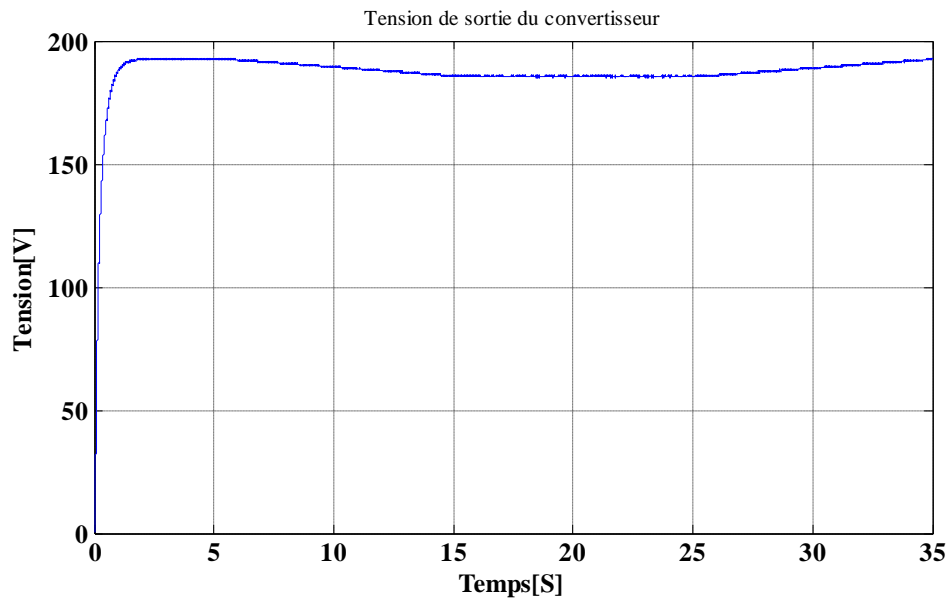
Figure III.16 : Variation de la température en fonction du temps (profil lent).

**III.4.2.1.1 Résultats de la simulation a la sortie du GPV :**

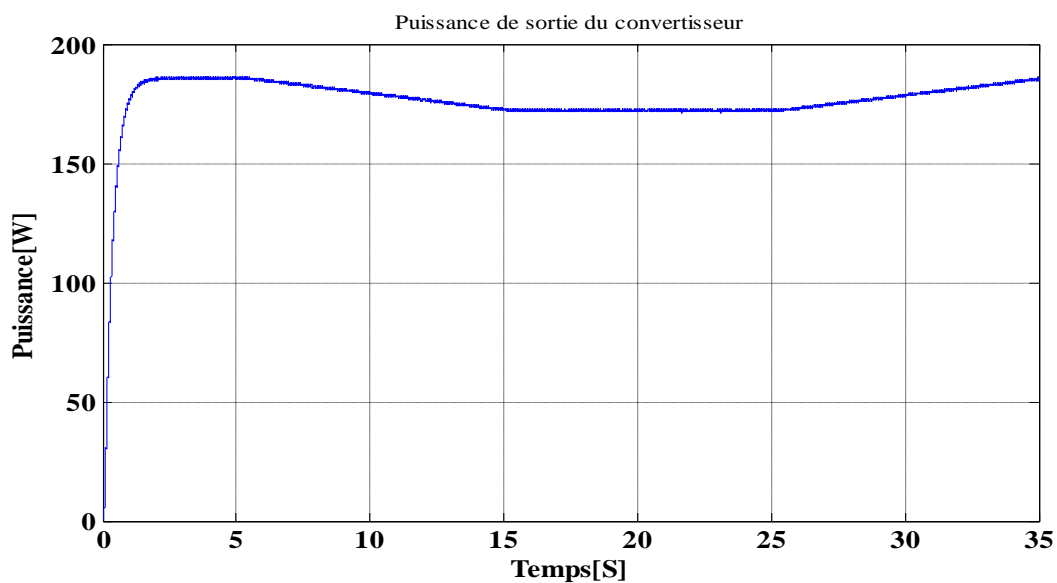
**Figure III.17 :** tension de sortie du GPV pour une température variable (profil lent).



**Figure III.18 :** puissance de sortie du GPV pour une température variable (profil lent).

**III.4.2.1.2 Résultats de la simulation a la sortie du convertisseur :**

**Figure III.19** : tension de sortie du convertisseur pour une température variable (profil lent).



**Figure III.20** : puissance de sortie du convertisseur pour une température variable (profil lent).

**Interprétation des résultats :**

D'après les résultats de simulation obtenus, on remarque qu'il existe une relation d'inversement proportionnel entre la puissance et température, on remarque également qu'une variation de la température provoque une variation considérable de la tension ( $V_{pv}$ ), par

ailleurs notre commande MPPT se comporte parfaitement vis-à-vis de ce changement. Dès que la température se perturbe, le système trouve un nouveau point de stabilité.

#### III.4.2.2 Profil rapide:

On fait subir au système la même variation précédente de l'insolation mais dans un intervalle moins long de 1s avec un éclairement constant  $1000\text{W/m}^2$ .

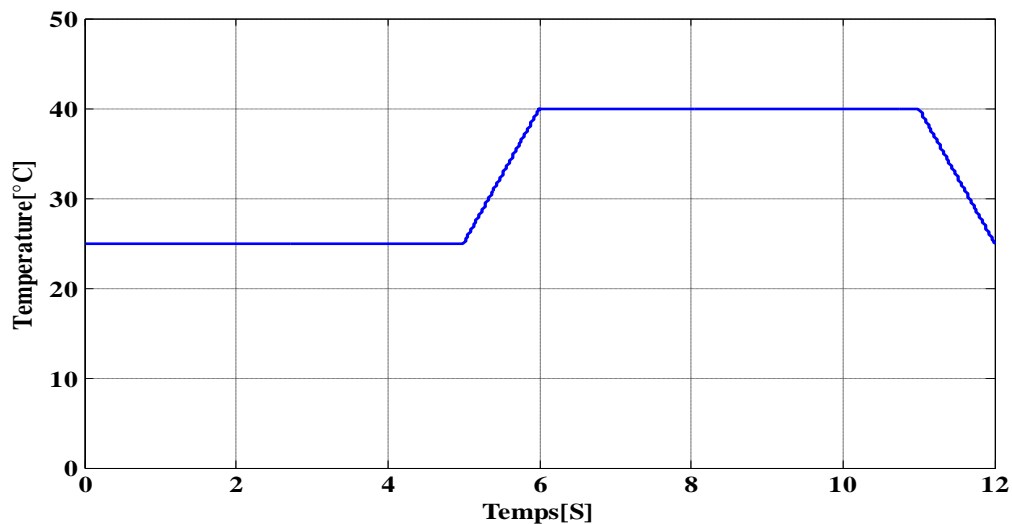


Figure III.21 : Variation de la température en fonction du temps (profil rapide).

#### III.4.2.2.1 Résultats de la simulation a la sortie du GPV :

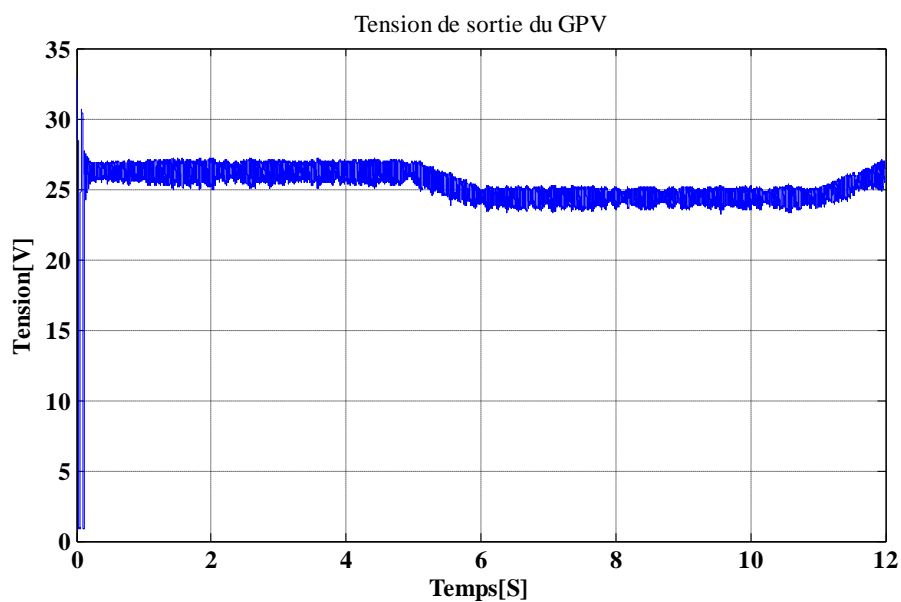


Figure III.22 : tension de sortie du GPV pour une température variable (profil rapide).

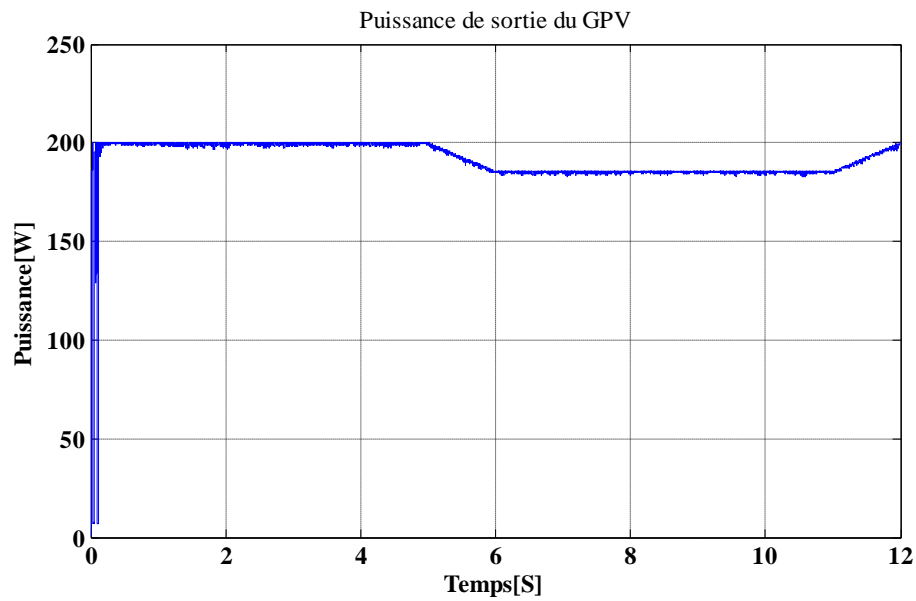


Figure III.23 : puissance de sortie du GPV pour une température variable (profil rapide).

#### III.4.2.2.1 Résultats de la simulation a la sortie du convertisseur :

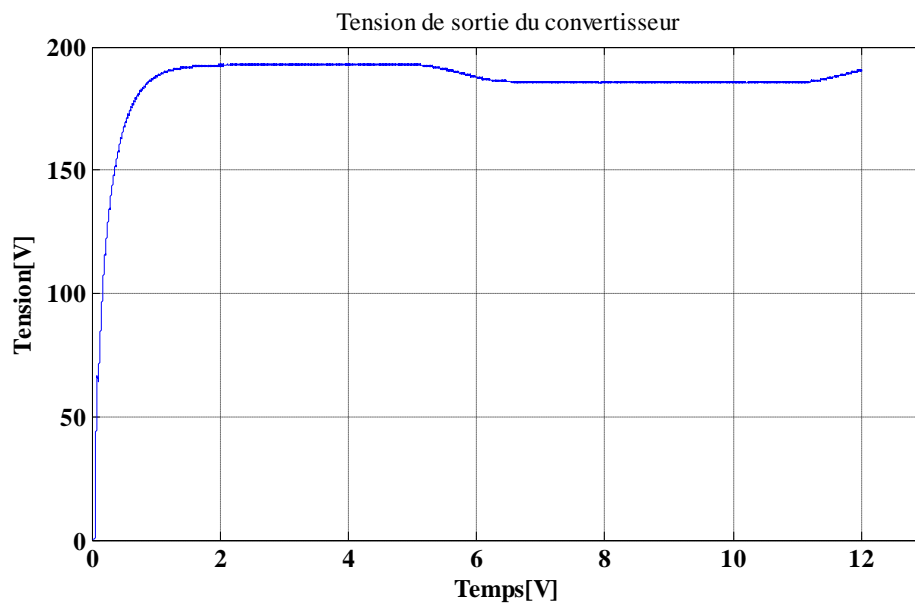
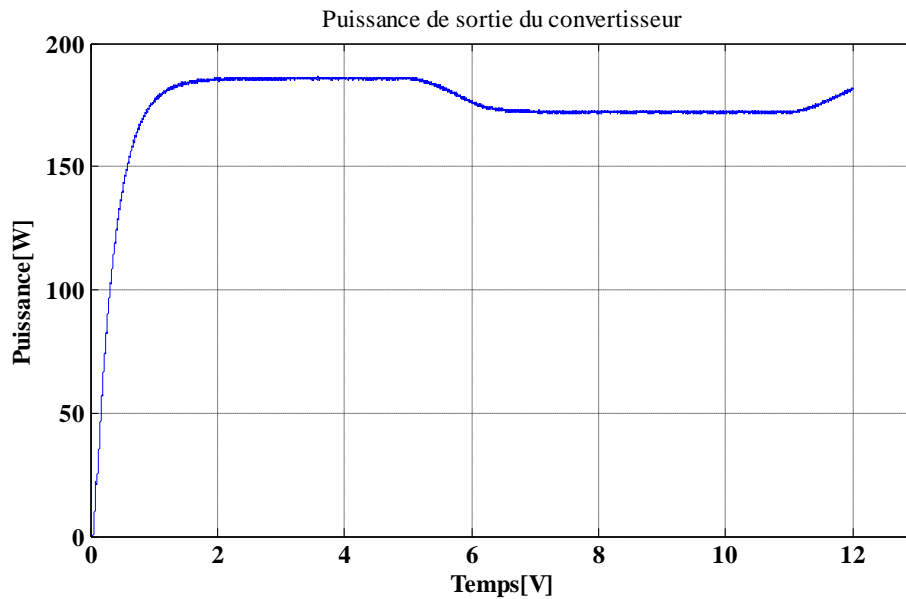


Figure III.24 : tension de sortie du convertisseur pour une température variable (profil rapide).



**Figure III.25** : puissance de sortie du convertisseur pour une température variable (profil rapide).

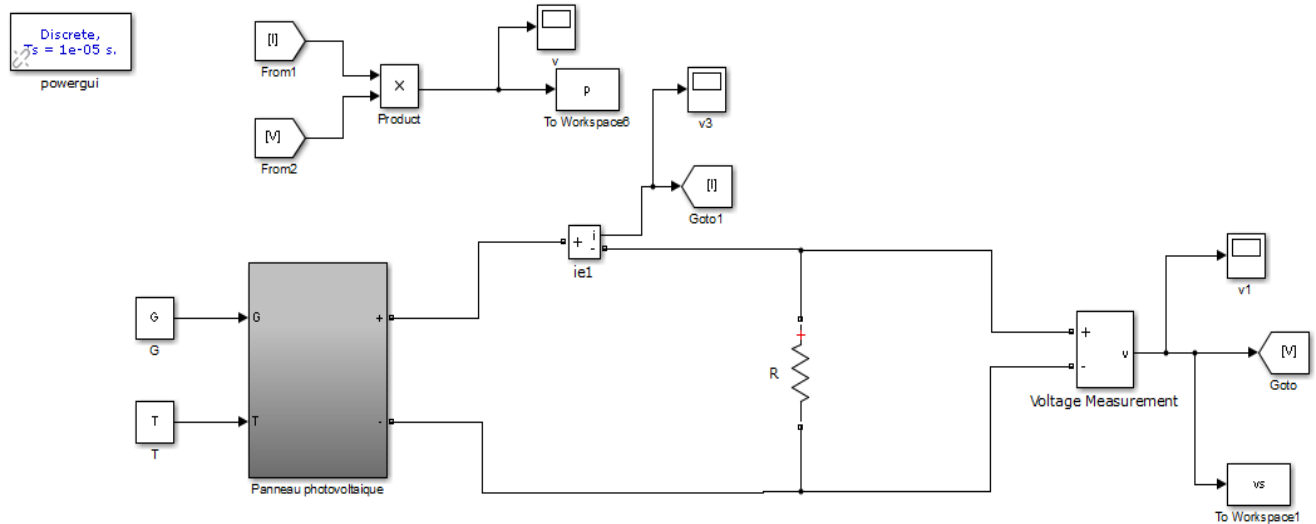
#### Interprétation des résultats :

Comme dans le cas d'un changement d'éclairement rapide la variation brusque de la température nous fait constater que l'algorithme P&O n'a pas pu suivre exactement la pente de la variation de la température, elle n'a rattrapé le PPM qu'après l'écoulement de 2 s de variation de cette dernière.

Notons bien qu'à cause de la masse thermique importante du panneau solaire la variation de la température est très lente, des changements rapides de la température sont rarement occasionnés. Ainsi la température dépend du flux des radiations solaires, dans le cas d'un fort ensoleillement la température croît progressivement jusqu'à ce que l'équilibre thermique soit atteint. Généralement une augmentation rapide de la température ne se produit jamais.

**III.5 Connexion générateur PV – Charge**

La connexion directe du panneau solaire figure (III.26) reste actuellement le mode de fonctionnement le moins cher. L'inconvénient majeur de ce fonctionnement est la dépendance directe de la puissance fournie par le générateur envers l'éclairement. On veut observer la puissance maximale produit par le générateur photovoltaïque, on utilise une résistance variable comme une charge.



**Figure III.26** : Schéma bloc de connexion direct d'un GPV

**III.4.1 Variation de la puissance et de la tension en fonction de la charge :**

Pour une température fixée à 25 °C et un éclairement fixé à 1000 W/m<sup>2</sup> nous allons simuler une variation de la résistance de la charge.

Résistance (ohm)	Tension (V)	Puissance (W)
200	32.81	5.38
100	32.74	10.71
50	32.58	21.24
10	31.31	98.06
3.49	26.43	200.141

**Tableau III.1** : la variation de la puissance par rapport la charge (sans MPPT)

A partir de ce tableau on remarque que :

- pour une augmentation de la résistance de charge  $R$  la tension tend vers la valeur de  $V_{oc}$ .
- pour une diminution de  $R$  on trouve augmentation de la puissance.

- pour une augmentation de  $R$ , on trouve une diminution de la puissance. pour la puissance maximale on trouve  $R_{opt}=3.49\Omega$ .

#### III.4.1 Eclairage variable et température constante :

Pour une température fixée à 25 °C nous allons simuler une variation de l'éclairage et les résultats obtenus seront comparés à  $P_{opt}$  obtenue lors du premier chapitre.

G (W/m <sup>2</sup> )	R <sub>opt</sub> (ohm)	P (W)	P <sub>opt</sub> (W)
1000	3.49	200.141	200.143
800	3.49	145.46	159.41
600	3.49	83.18	118.32
400	3.49	37	77.14

**Tableau III.2 :** Variation d'éclairage

#### III.4.1 Température variable et éclairage constant :

Pour un éclairage fixé à 1000 W/m<sup>2</sup> nous allons simuler une variation de la température et les résultats obtenus seront comparés à  $P_{opt}$  obtenue lors du premier chapitre.

T(°C)	R <sub>opt</sub> (ohm)	P(W)	P <sub>opt</sub> (W)
25	3.49	200.141	200.143
30	3.49	194.98	195.27
40	3.49	183.88	185.5
45	3.49	178.06	180.6

**Tableau III.3 :** Variation de la température

#### Interprétation

La puissance produite par une connexion directe entre le générateur PV et la charge est toujours inférieur à la puissance maximale. Par contre, dans l'utilisation d'un système muni d'une commande MPPT, les pertes de puissance dans la chaîne de conversion sont négligeables par rapport à la puissance électrique prélevée sur le panneau solaire. La puissance électrique fournie à la charge sera donc approximativement égale à la puissance générée par le GPV., le générateur PV peut fonctionner sur sa courbe de puissance électrique optimale sur toute la plage de variation d'éclairage et de température.

**III.6 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté la simulation d'un système PV fonctionnement dans les conditions standard et avec des changements climatiques (éclairagements et températures). Ensuite nous avons fait une comparaison entre deux systèmes (avec et sans MPPT).

Les résultats de simulation ont montré de bonnes performances en termes de poursuite de la puissance maximale fournie par le panneau photovoltaïque dans les conditions standard et variables, la comparaison nous a donné que le système optimisé porte un gain de puissance considérable par rapport à un système non optimisé.

*Conclusion générale.*

## *Conclusion générale*

Ces dernières années la consommation mondiale d'électricité évolue rapidement et les ressources naturelles de l'énergie telles que l'uranium, le gaz et le pétrole diminuent en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie. Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches sont conduites à l'énergie renouvelable. Une des énergies renouvelables qui peut accomplir la demande est l'énergie solaire photovoltaïque, c'est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite. C'est d'ailleurs ce qui explique que son utilisation connaît une croissance significative dans le monde.

L'utilisation d'énergie solaire comme source alternative d'énergie, souffre du coût élevé des cellules solaires, du faible rendement et de puissance intermittent selon la fluctuation des conditions atmosphériques. Par conséquent, n'importe quelle conception de système d'application d'énergie solaire, devrait prendre en compte ces inconvénients. Ce travail s'agit d'une contribution à l'optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque.

Les travaux présentés dans ce mémoire traitent plus particulièrement la problématique du couplage non parfait entre un générateur photovoltaïque et une charge de type continue. En effet, ce type de couplage souffre encore du problème du transfert de puissance du GPV à la charge qui est souvent très loin de la puissance maximale du générateur.

Avant d'aborder la problématique de conversion, nous avons tout d'abord étudié le contexte et la problématique de l'énergie solaire photovoltaïque. Ceci s'est avéré nécessaire pour acquérir une connaissance approfondie du comportement d'un générateur photovoltaïque.

Nous avons établi des programmes de calculs sous l'environnement Matlab permettant de tracer la caractéristique I-V et P-V du panneau PV pour différents éclairagements et températures solaires et de calculer la puissance maximale délivrée correspondante.

Nous avons rappelé aussi les principales caractéristiques des convertisseurs statiques dont il faut tenir compte pour réaliser les étages d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge. Pour mieux analyser les problèmes de l'exploitation d'un générateur photovoltaïque, nous avons étudié la méthode d'optimisation classique.

Dans le dernier chapitre, nous avons analysé dans le simulateur Matlab le fonctionnement d'un système PV, de moyennes puissances (200 W) dont la régulation de la

puissance est effectuée par une commande MPPT, suites aux variations des conditions météorologiques (éclaircissements, températures) et de la charge.

Les résultats obtenus montrent l'oscillation instantanée du point de fonctionnement du module photovoltaïque autour du PPM indépendamment à des variations des conditions climatiques et de la charge. Le bon fonctionnement du convertisseur DC-DC (Boost) et les faibles pertes de puissances fournies par ce module nous ont permis de conclure le bon fonctionnement et les performances satisfaisantes du système PV réalisé au cours de ce travail.

Pour mieux analyser les contraintes de l'exploitation d'un système photovoltaïque, nous avons présenté à la fin de ce travail de recherche les résultats obtenus d'une étude comparative entre deux systèmes (Le premier utilise une connexion directe et le deuxième un étage d'adaptation). Le deuxième système étant optimisé avec la technique MPPT. Les résultats obtenus montrent que l'utilisation du système optimisé pour un générateur photovoltaïque apporte un gain énergétique. Il est clair maintenant qu'un système PV optimisé favorise considérablement l'utilisation des énergies renouvelables. .

Comme perspectives, plusieurs travaux futurs pourraient être poursuivis à partir de nos résultats. Nous proposons particulièrement :

La généralisation de l'étude d'optimisation. Il est envisageable d'inclure les batteries dans le système proposé.

Une validation par moyens expérimentaux des résultats obtenus est aussi souhaitable et possible.

## Bibliographie

- [1] Helali Kamelia 'Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative', mémoire de Magister, UMMTO, TIZI OUZOU, juin 2012.
- [2] Boukhers Djamil, 'Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage', mémoire de magister, Université Mentouri de Constantine, 2007.
- [3] M. P. Stéphane « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques » thèse doctorat de l'université de Toulouse 20 Janvier 2009
- [4] M.Ladouani, B.Bakir 'Modélisation d'un Système photovoltaïque alimentant un moteur asynchrone alimenté en tension commandée en courant'. Mémoire d'Ingéniorat, USTHB, Alger, 2008.
- [5] R.Maoudj, 'Application de l'énergie photovoltaïque sur les sites de Tlemcen et Bouzerah'. Mémoire de Magistère, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2005.
- [6]- J.ROYER T DJIAKO et SCHILER B saday le pompage pv' universite d'Ottawa',1998
- [7] SOFIANE ABADA 'étude et optimisation d'un générateur pv pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur', Mémoire master es sciences, université LAVAL ,2011 .
- [8] A.T.SINGO 'Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome' Thèse de doctorat, université Henri Poincaré, Nancy I, 2010.
- [9] M.L Louazene, 'Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque' mémoire de magister, Université de Ouargla, Juin 2008.
- [10] M. SLAMA Fateh 'Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique' mémoire de magistère 01 /04/2011.
- [11] A. Lyes 'Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque', mémoire de magistère 05/05/2011.
- [12] H. BELGHITRI et H. 'Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque' mémoire de magister, 2009.
- [13] S.BELAKEHAL ' Conception & commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables' thèse de doctorats, université de Constantine, 2010.

## Bibliographie

---

- [14] V.Boitier , P. Maussion , C. CABAL ‘Recherche du maximum de puissance sur les générateurs photovoltaïques’, université de Toulouse, revue 3E.I, N°54, pp 90-96, septembre 2008.
- [15] N. Abouchabana, ‘*Etude d’une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT*’, Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.
- [16] S. M. Ait-Cheikh, ‘*Etude, Investigation et conception d’algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques*’, Thèse de Doctorat d’état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.
- [17] S. Issaadi, ‘*Commande d’une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les Réseaux de Neurones*’, Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2006.
- [18] M. Moulay-Amar et M. Loghouini, ‘*Etude et réalisation d’un système de poursuite de point de puissance maximale à base de microcontrôleur destiné a une installation photovoltaïque*’, Mémoire d’ingénieur, université de Ouargla, Algérie, 2005.
- [19] C. CABAL ‘Optimisation énergétique de l’étage d’adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque ’, Thèse de doctorat université de Toulouse III ,2008.
- [20] Y. PANKOW ‘Etude de l’intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. application au générateur photovoltaïque’, thèse de doctorats de l’école nationale,2004.
- [21] SOBAIHI. K. Etude et Réalisation d’un Hacheur MPPT à contre réaction de tension, ENP Algérie, Thèse Magister Septembre 2003.
- [22] Mr. Yassine LASMI « Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale(MPPT) d’un système photovoltaïque par les techniques intelligentes ». Mémoire de magistère 2013
- [23] F. Ansari ,A. K. Jha‘ Maximum power point tracking using perturbation and observation as well as incremental conductance algorithm’ international journal of research in engineering & applied sciences, issn: 2294-3905, PP 19-30,2011.

## Bibliographie

---

[24] Villalva et al “ Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays” IEEE transaction on power electronics, vol 24, no. 5,may 2009.

## **Résumé**

Dans ce travail, on a analysé la modélisation et la simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque (PV) adapté par une commande numérique « perturbation et observation » assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV. Dans notre analyse, on a conçu un système PV où le générateur PV est le module KC200GT produisant, dans les conditions standards de test (CST), une puissance crête de 200.143W, un courant optimal de 7.61 A et une tension optimale de 26.3V. Les résultats de simulation obtenus sous Matlab/Simulink montrent la performance du contrôle dans le comportement dynamique des systèmes photovoltaïques.

**Mots clés:** Système PV – Convertisseur survolteur - Commande MPPT –Modélisation – Simulation.

## **Abstract**

In this work, we analyze the modelisation and the simulation of the electric operation of a photovoltaic (PV) system adapted by an numerical control « perturbation and observation » ensuring the tracking of the maximum power provided by the PV generator. In our analysis, we conceived a PV system where the PV generator is the panel KC200GT, this panel gives under the test standard conditions (CST), a power peak of 60W, an optimal current of 7.61A and an optimal voltage of 26.3V. The simulation results under Matlab/Simulink show the control performance and dynamic behaviour of photovoltaic system.

## **Keywords :**

PVsysteme, Boost converter, MPPT command, Modelisation, Simulation