

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

*Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj*

**Faculté des Sciences et de la technologie**

*Département Electromécanique*

# **Mémoire**

*Présenté pour obtenir*

**LE DIPLOME DE MASTER**

FILIERE : Electromécanique

**Spécialité : Electromécanique**

Par

- **BENDJOUAL Hacene**
- **SAHIME Rabah**

*Intitulé*

***Commande MPPT par backstepping d'un système photovoltaïque***

*Soutenu le :25/06/2022*

*Devant le Jury composé de :*

<i>Nom &amp; Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<b><i>M. REFFAS Abderrahim</i></b>	<b><i>MCA</i></b>	<b><i>Président</i></b>	<b><i>Univ-BBA</i></b>
<b><i>M. TALHAOUI Hicham</i></b>	<b><i>MCA</i></b>	<b><i>Encadreur</i></b>	<b><i>Univ-BBA</i></b>
<b><i>M. NACIB Leila</i></b>	<b><i>MCB</i></b>	<b><i>Examineur</i></b>	<b><i>Univ-BBA</i></b>
<b><i>M. SAKHARA Saadi</i></b>	<b><i>MCB</i></b>	<b><i>Examineur</i></b>	<b><i>Univ-BBA</i></b>

*Année Universitaire 2021/2022*

# بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

*Nous remercions Allah, qui nous a aidés à accomplir cet humble travail, et nous adressons toute notre reconnaissance et notre sincère gratitude au **Dr TALHAOUI Hicham**, qui n'a pas lésiné des conseils, des instructions et une bonne orientation tout au long de la période de préparation de ce travail.*

*Nous adressons également nos sincères remerciements et notre gratitude aux membres jury pour nous avoir donné part de leur temps et accepté l'étude et la discussion de notre mémoire à bras ouverts.*

*Nous remercions tous ceux qui nous ont soutenus dans la préparation de ce mémoire, que ce soit par la prière ou par l'information, que Dieu les récompense et les bénisse.*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Ma mère, que Allah ait pitié d'elle, et à mon cher père,  
que Allah prolonge sa vie et lui accorde la santé.*

*Dr BENAÏSSA Soria et enseignante SEDDIKI Nadia pour  
leurs encouragements et leur soutien à mon égard.*

*A mes amis les plus chers et à tous ceux qui me sont chers.*

*BENDJOUAL Hacene*

*Je dédie mon travail avant tout à mes chers Parents qui  
M'ont soutenu pendant toute la durée de ces longues études,*

*« Que*

*Dieux me les protègent ».*

*À Mes chers Frères et Sœurs.*

*Au Dr respecté Hicham TALHAOUI*

*SAHIME Rabah*

### الملخص:

في هذه الدراسة، قدمنا معلومات عامة عن الطاقة الشمسية. ثم شرحنا كيف تقوم الخلايا الكهروضوئية بتحويل الأشعة الشمسية إلى طاقة كهربائية وذلك من خلال نمذجة ومحاكاة نظام ضوئي بقدرة 60 وات. بهدف تطوير وتحسين كفاءة النظام الكهروضوئي، أدخلنا تقنيات تتبع أقصى نقطة للطاقة، حيث استعملنا خوارزمية الاضطراب والمراقبة، والباك ستيبينغ. من خلال مقارنة نتائجهما وجدنا أن تحكم بالباك ستيبينغ أفضل من التحكم بالاضطراب والمراقبة من عدة نواحي.

**كلمات مفتاحية:** الطاقة الشمسية، الخلايا الكهروضوئية، تتبع أقصى نقطة للطاقة، الباك ستيبينغ، الاضطراب والمراقبة.

### Résumé :

Dans cette étude, nous avons donné des informations générales sur l'énergie solaire. Puis nous avons expliqué comment les cellules photovoltaïques convertissent le rayonnement solaire en énergie électrique à travers la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque de 60 watts. Afin de développer et d'améliorer l'efficacité du système photovoltaïque, nous avons introduit des techniques MPPT, en utilisant l'algorithme P&O, et le Backstepping. En comparant leurs résultats, nous avons constaté que le contrôle Backstepping est meilleur que le contrôle P&O à plusieurs égards.

**Mots clés :** Énergie solaire, Cellules photovoltaïques, MPPT, Backstepping, P&O.

### Abstract :

In this study, we have given general information about solar energy. Then we explained how photovoltaic cells convert solar radiation into electrical energy through the modeling and simulation of a 60-watt photovoltaic system. In order to develop and improve the efficiency of the photovoltaic system, we introduced MPPT techniques, using the P&O, and Backstepping algorithm. By comparing their results, we found that Backstepping control is better than P&O control in several aspects.

**Keywords :** Solar energy, Photovoltaic cells, MPPT, Backstepping, P&O.

## Sommaire :

Introduction générale	01
<b>Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques</b>	
I.1 Introduction	02
I.2 Historique	02
I.3 Énergie solaire (photovoltaïque)	03
I.3.1 Soleil	03
I.3.2 Rayonnement solaire	03
I.4 Système photovoltaïque	04
I.4.1 Cellule photovoltaïque	05
I.4.2 Rendement d'une cellule	05
I.4.3 Principe de fonctionnement de la cellule PV	06
I.5 Association des cellules photovoltaïques	06
I.5.1 Association en parallèle	06
I.5.2 Association en série	07
I.5.3 Association en série- parallèle	08
I.6 Caractéristiques d'un module	08
I.7 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	09
I.8 Modélisation et simulation d'une cellule photovoltaïque	10
I.9 Simulation du panneau photovoltaïque	13
I.9.1 Simulation d'un panneau photovoltaïque sous MATLAB/SIMULINK	13
I.9.2 Résultats de la simulation	13
I.10 Conclusion	16
<b>Chapitre II : Commande MPPT et Les convertisseurs DC-DC</b>	
II.1 Introduction	18
II.2 Commande du module photovoltaïque	18
II.3 Convertisseurs DC-DC	18
II.4 Types des convertisseurs DC-DC	19
II.4.1 Convertisseur survolteur (parallèle, élévateur ou Boost)	19
II.4.2 Convertisseur dévolteur (série, abaisseurs ou Buck)	20
II.4.3 Convertisseur dévolteur-survolteur (buck-boost)	20
II.5 Commande MPPT	20
II.6 Suivi du point de puissance maximale	21
II.7 Commande P&O	21
II.8 Principe du contrôle "Perturbation et Observation " (P&O)	22
II.9 Bloc de simulation du système photovoltaïque	24
II.10 Résultats de la simulation	24
II.11 Conclusion	31

<b>Chapitre III Commande MPPT par backstepping</b>	
III.1 Introduction	32
III.2 Historique et principe de la commande backstepping	32
III.3 Technique du backstepping	32
III.4 Méthodes de Lyapunov	33
III.5 Synthèse de la commande par backstepping	33
III.6 Simulation d'un système photovoltaïque commandé par backstepping	35
III.6.1 Bloc de simulation	36
III.6.2 Résultats de la simulation	36
III.6.3 Comparaison entre les résultats de la simulation de la commande backstepping et la commande P&O	41
III.7 Conclusion	43
Conclusion générale	44
Références Bibliographiques	

## Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques

<b>Figure I.1</b> Rayonnement solaire.	04
<b>Figure I.2</b> Composantes d'un générateur photovoltaïque.	04
<b>Figure I.3</b> Représentation schématique d'une cellule solaire.	06
<b>Figure I.4</b> Représentation des cellules connectées en parallèle.	07
<b>Figure I.5</b> Représentation des cellules photovoltaïques en série.	07
<b>Figure I.6</b> Représentation des cellules photovoltaïques en mixte (série- parallèle).	08
<b>Figure I.7</b> Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.	11
<b>Figure I.8</b> Schéma de simulation d'un panneau photovoltaïque.	13
<b>Figure I.9</b> Caractéristique tension / puissance d'un panneau photovoltaïque pour $G = 600 \text{ W/m}^2$ , $800 \text{ W/m}^2$ et $1000 \text{ W/m}^2$ ; $T=25^\circ\text{C}$ .	14
<b>Figure I.10</b> Caractéristique tension / courant d'un panneau photovoltaïque pour $G = 600 \text{ W/m}^2$ , $800 \text{ W/m}^2$ et $1000 \text{ W/m}^2$ ; $T=25^\circ\text{C}$ .	15
<b>Figure I.11</b> Caractéristique tension / puissance d'un panneau photovoltaïque pour $T=25^\circ\text{C}$ , $50^\circ\text{C}$ et $75^\circ\text{C}$ ; $G=1000\text{w/m}^2$ .	15
<b>Figure I.12</b> Caractéristique tension / courant d'un panneau photovoltaïque pour $T=25^\circ\text{C}$ , $50^\circ\text{C}$ et $75^\circ\text{C}$ ; $G=1000\text{w/m}^2$ .	16
<b>Chapitre II : Commande MPPT et Les convertisseurs DC-DC</b>	
<b>Figure II.1</b> Schéma du convertisseur DC-DC.	18
<b>Figure II.2</b> Schéma électrique du convertisseur survolteur.	20
<b>Figure II.3</b> Schéma d'un système PV.	21
<b>Figure II.4</b> Méthode (P&O) pour trouver PPM.	22
<b>Figure II .5</b> Organigramme de la méthode P&O.	23
<b>Figure II.6</b> Schéma du système photovoltaïque avec la commande MPPT (P&O) sur MATLAB SIMULINK.	24
<b>Figure II.7</b> Caractéristiques du PV ( $I_{pv}$ , $V_{pv}$ et $P_{pv}$ ), avec : $G = 600 \text{ W/m}^2$ , $800 \text{ W/m}^2$ et $1000 \text{ W/m}^2$ ; $T=25^\circ\text{C}$ et $R=25\Omega$ .	25
<b>Figure II.8</b> Sortie du convertisseur ( $I_{ch}$ , $V_{out}$ et $P_{ch}$ ), avec : $G = 600 \text{ W/m}^2$ , $800 \text{ W/m}^2$ et $1000 \text{ W/m}^2$ ; $T=25^\circ\text{C}$ et $R=25\Omega$ .	25

## Liste des figures

---

<b>Figure II.9</b> Rapport cyclique (D), avec : $G = 600 \text{ W/m}^2$ , $800 \text{ W/m}^2$ et $1000 \text{ W/m}^2$ ; $T=25^\circ\text{C}$ et $R=25\Omega$ .	26
<b>Figure II.10</b> Caractéristiques du PV ( $I_{pv}$ , $V_{pv}$ et $P_{pv}$ ), avec : $T=25^\circ\text{C}$ , $50^\circ\text{C}$ et $75^\circ\text{C}$ ; $G=1000\text{w/m}^2$ et $R=25\Omega$ .	26
<b>Figure II.11</b> Sortie du convertisseur ( $I_{ch}$ , $V_{out}$ et $P_{ch}$ ), avec : $T=25^\circ\text{C}$ , $50^\circ\text{C}$ et $75^\circ\text{C}$ ; $G=1000\text{w/m}^2$ et $R=25\Omega$ .	27
<b>Figure II.12</b> Rapport cyclique (D), avec : $T=25^\circ\text{C}$ , $50^\circ\text{C}$ et $75^\circ\text{C}$ ; $G=1000\text{w/m}^2$ et $R=25\Omega$ .	27
<b>Figure II.13</b> Caractéristiques du PV ( $I_{pv}$ , $V_{pv}$ et $P_{pv}$ ), avec : $R=25\Omega$ et $35\Omega$ ; $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ .	28
<b>Figure II.14</b> Sortie du convertisseur ( $I_{ch}$ , $V_{out}$ et $P_{ch}$ ), avec : $R=25\Omega$ et $35\Omega$ ; $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ$	28
<b>Figure II.15</b> Rapport cyclique (D), avec : $R=25\Omega$ et $35\Omega$ ; $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ .	29
 <b>Chapitre III Commande MPPT par backstepping</b>	
<b>Figure III.1</b> Schéma du système photovoltaïque avec la commande backstepping sur MATLAB SIMULINK.	36
<b>Figure III.2</b> Caractéristiques du PV ( $I_{pv}$ , $V_{pv}$ et $P_{pv}$ ), avec : $G = 600 \text{ W/m}^2$ , $800 \text{ W/m}^2$ et $1000 \text{ W/m}^2$ ; $T=25^\circ\text{C}$ et $R=25\Omega$ .	37
<b>Figure III.3</b> Sortie du convertisseur ( $I_{ch}$ , $V_{out}$ et $P_{ch}$ ), avec : $G = 600 \text{ W/m}^2$ , $800 \text{ W/m}^2$ et $1000 \text{ W/m}^2$ ; $T=25^\circ\text{C}$ et $R=25\Omega$ .	37
<b>Figure III.4</b> Caractéristiques du PV ( $I_{pv}$ , $V_{pv}$ et $P_{pv}$ ), avec : $T=25^\circ\text{C}$ , $50^\circ\text{C}$ et $75^\circ\text{C}$ ; $G=1000\text{w/m}^2$ et $R=25\Omega$ .	38
<b>Figure III.5</b> Sortie du convertisseur ( $I_{ch}$ , $V_{out}$ et $P_{ch}$ ), avec : $T=25^\circ\text{C}$ , $50^\circ\text{C}$ et $75^\circ\text{C}$ ; $G=1000\text{w/m}^2$ et $R=25\Omega$ .	38
<b>Figure III.6</b> Caractéristiques du PV ( $I_{pv}$ , $V_{pv}$ et $P_{pv}$ ), avec : $R=25\Omega$ et $35\Omega$ ; $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ .	39
<b>Figure III.7</b> Sortie du convertisseur ( $I_{ch}$ , $V_{out}$ et $P_{ch}$ ), avec : $R=25\Omega$ et $35\Omega$ ; $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ .	39
<b>Figure III.8</b> Rapport cyclique (D), avec : $G = 600 \text{ W/m}^2$ , $800 \text{ W/m}^2$ et $1000 \text{ W/m}^2$ ; $T=25^\circ\text{C}$ et $R=25\Omega$ .	40
<b>Figure III.9</b> Rapport cyclique (D), avec : $T=25^\circ\text{C}$ , $50^\circ\text{C}$ et $75^\circ\text{C}$ ; $G=1000\text{w/m}^2$ et $R=25\Omega$ .	40
<b>Figure III.10</b> Rapport cyclique (D), avec : $R=25\Omega$ et $35\Omega$ ; $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ .	40
<b>Figure III.11</b> Ppv, avec : $G = 600 \text{ W/m}^2$ , $800 \text{ W/m}^2$ et $1000 \text{ W/m}^2$ ; $T=25^\circ\text{C}$ et $R=25\Omega$ .	41

## Liste des figures

---

- Figure III.12**  $P_{ch}$ , avec :  $G = 600 \text{ W/m}^2$ ,  $800 \text{ W/m}^2$  et  $1000 \text{ W/m}^2$  ;  $T=25^\circ\text{C}$  et  $R=25\Omega$ . 41
- Figure III.13**  $P_{pv}$ , avec :  $T=25^\circ\text{C}$ ,  $50^\circ\text{C}$  et  $75^\circ\text{C}$  ;  $G=1000\text{w/m}^2$  et  $R=25\Omega$ . 42
- Figure III 14**  $P_{ch}$ , avec :  $T=25^\circ\text{C}$ ,  $50^\circ\text{C}$  et  $75^\circ\text{C}$  ;  $G=1000\text{w/m}^2$  et  $R=25\Omega$ . 42
- Figure III.15**  $P_{pv}$ , avec :  $R=25\Omega$  et  $35\Omega$  ;  $G = 1000 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ . 42
- Figure III.16**  $P_{ch}$  , avec :  $R=25\Omega$  et  $35\Omega$ ;  $G = 1000 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ . 43

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

<b>Tableau I.1</b> Quelques historiques sur le développement de l'énergie solaire.	02
<b>Tableau I.2</b> Différents types de cellules et leur efficacité.	05
<b>Tableau I.3</b> Caractéristiques d'un module (PV).	09
<b>Tableau I.4</b> Avantages et inconvénients du PV.	10
<b>Tableau I.5</b> Caractéristiques du module PV (60W).	10

## **Chapitre II : Commande MPPT et Les convertisseurs DC-DC**

<b>Tableau II.1</b> logique de l'algorithme perturbation et observation P&O.	22
<b>Tableau II.2</b> Valeurs extraites à la sortie du convertisseur ( $G = 600 \text{ W/m}^2$ , $800 \text{ W/m}^2$ et $1000 \text{ W/m}^2$ ; $T=25^\circ\text{C}$ et $R=25\Omega$ ).	30
<b>Tableau II.3</b> Valeurs extraites à la sortie du convertisseur ( $T=25^\circ\text{C}$ , $50^\circ\text{C}$ et $75^\circ\text{C}$ ; $G=1000\text{w/m}^2$ et $R=25\Omega$ ).	30
<b>Tableau II.4</b> Valeurs extraites à la sortie du convertisseur ( $R=25\Omega$ et $35\Omega$ ; $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ ).	31

## **Chapitre III : Commande MPPT par backstepping**

<b>Tableau III.1</b> Paramètres backstepping et convertisseur boost DC-DC.	35
<b>Tableau III.2</b> Valeurs extraites à la sortie du convertisseur ( $G = 600 \text{ W/m}^2$ , $800 \text{ W/m}^2$ et $1000 \text{ W/m}^2$ ; $T=25^\circ\text{C}$ et $R=25\Omega$ )	37
<b>Tableau III.3</b> Valeurs extraites à la sortie du convertisseur ( $T=25^\circ\text{C}$ , $50^\circ\text{C}$ et $75^\circ\text{C}$ ; $G=1000\text{w/m}^2$ et $R=25\Omega$ ).	38
<b>Tableau III.4</b> Valeurs extraites à la sortie du convertisseur ( $R=25\Omega$ et $35\Omega$ ; $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ ).	39

## Notations et symboles

---

<b>I</b>	Courant générer par la cellule photovoltaïque (A)
<b>I<sub>ph</sub></b>	Le photo-courant de la cellule (A)
<b>I<sub>D</sub></b>	Le courant circulant dans la diode (A)
<b>I<sub>p</sub></b>	Le courant circulant (A) dans la résistance R <sub>p</sub>
<b>I<sub>cc</sub></b>	Courant de court- circuit (A)
<b>I<sub>0</sub></b>	Courant de saturation inverse d'une diode (A)
<b>V<sub>T</sub></b>	Tension thermique
<b>N</b>	Facture de non idéalité de la jonction comprise entre 1 et 5 dans la pratique
<b>E</b>	Charge d'électron ( $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ )
<b>K</b>	Constante de Boltzmann ( $1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ )
<b>T</b>	Température effective de la cellule en kelvin
<b>R<sub>s</sub></b>	Résistance série ( $\Omega$ )
<b>G</b>	L'éclairement ( $\text{W/m}^2$ )
<b>R<sub>p</sub></b>	Résistance parallèle shunt ( $\Omega$ )
<b>V<sub>CO</sub></b>	Tension de circuit ouvert (V)
<b>V<sub>pv</sub></b>	Tension du GPV (W)
<b>V<sub>out</sub></b>	Tension de charge (V)
<b>I<sub>ch</sub></b>	Courant de charge (A)
<b>I<sub>pv</sub></b>	Courant fourni par le PV (A)
<b>V<sub>0</sub></b>	Tension de circuit ouvert (V)
<b>P<sub>pv</sub></b>	Puissance fourni par le PV (W)
<b>P<sub>ch</sub></b>	Puissance de charge (W)
<b>V<sub>mp</sub></b>	Tension optimale (V)
<b>N<sub>s</sub></b>	Nombre de cellules en série
<b>D</b>	Rapport cyclique
<b>I<sub>mp</sub></b>	Courant optimale (A)
<b>R</b>	Résistance ( $\Omega$ )
<b>P<sub>max</sub></b>	Puissance maximale (W)
<b>N<sub>p</sub></b>	Nombre de modules dans le panneau en parallèle
<b>PPM</b>	Point de puissance maximale
<b>P&amp;O</b>	Perturbation et Observation
<b>DC</b>	Courant Continu
<b>MPPT</b>	Maximum Power Point Tracking

# **Introduction Générale**

## ***Introduction générale***

Les énergies fossiles sont considérées comme l'une des énergies les plus consommées au monde, mais l'un des plus grands inconvénients de ces énergies est qu'elles seront épuisées en quelques décennies, et que leur exploitation pollue l'atmosphère [1].

L'utilisation de l'énergie solaire est l'une des meilleures solutions, où cette énergie peut être convertie en énergie électrique par des cellules photovoltaïques. Cependant, tous les systèmes photovoltaïques présentent certains inconvénients, comme l'efficacité de la production d'énergie est très faible, ce qui a conduit à la recherche de techniques de contrôle pour les systèmes photovoltaïques afin d'améliorer leurs performances [2].

Plusieurs techniques MPPT ont été proposées, parmi lesquelles nous citons (P&O) qui est la plus courante et la plus utilisée. Cette technique nécessite des différences de tension afin de trouver le point de puissance maximum. Le convertisseur DC / DC est utilisé comme intermédiaire entre le générateur photovoltaïque et la charge pour augmenter la tension aux bornes de la charge [3].

Pour réduire les effets déstabilisants sur le système photovoltaïque, nous proposons d'utiliser la stratégie de contrôle par backstepping, qui est une méthode très récente pour les systèmes non linéaires [4].

Notre travail dans ce mémoire est organisé en trois chapitres répartis comme suit :

Le premier chapitre est consacré à la présentation du principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques, la modélisation et la simulation des panneaux photovoltaïques à l'aide de Matlab Simulink.

Le deuxième chapitre présente une étude détaillée du convertisseur boost (DC/DC) avec contrôle MPPT, puis dans ce chapitre on a présenté une simulation du système photovoltaïque avec contrôle MPPT (P&O) sur Matlab Simulink.

Le dernier chapitre présente la stratégie de backstepping. Les résultats de deux contrôleurs : backstepping et P&O ont été comparés par simulation.

# Chapitre I

## *Généralités sur les systèmes photovoltaïques*

## I.1 Introduction :

L'énergie photovoltaïque est l'une des plus importantes sources d'énergie renouvelable que l'on peut obtenir grâce à l'éclairement du soleil, où elle repose sur le principe de la conversion de la lumière en électricité à l'aide d'une cellule photovoltaïque.

L'énergie de cette cellule photovoltaïque est affectée par les changements de température et le rayonnement du soleil, ce qui a un effet négatif ou positif sur les performances de la cellule. Le courant et la tension générés par la cellule varient en fonction des facteurs suivants : température et rayonnement du soleil [5].

Dans le premier chapitre, nous présenterons tout d'abord une définition de l'énergie photovoltaïque et la manière de la produire grâce à l'utilisation de cellules photovoltaïques. Enfin, nous modélisons et simulons le générateur photovoltaïque (GPV) pour connaître son comportement et les facteurs qui affectent ses performances.

## I.2 Historique :

Le tableau I.1 représente quelques historiques importants pour le développement de l'énergie solaire :

Année	Observation	Chercheur
1839	L'effet photoélectrique a été découvert pour la première fois.	Edmond Becquerel
1875	Présentation d'un article sur l'effet photoélectrique dans les semi-conducteurs.	Werner Von Siemens
1954	Faire des recherches afin de construire une cellule photovoltaïque à haut rendement.	Chapin, Pearson et Prince
1958	Une cellule d'un rendement de 9% a été développée. Où il a été utilisé dans les satellites (qui sont alimentés par des cellules solaires).	/
1983	Une voiture à énergie solaire (photovoltaïque) a été inventée en Australie pour la première fois (La distance qui peut être parcourue est de 4000 km).	/

**Tableau I.1** Quelques historiques sur le développement de l'énergie solaire [6].

### I.3 Énergie solaire (photovoltaïque) :

#### I.3.1 Soleil :

Le soleil est une grande source d'énergie car il émet constamment une grande quantité d'énergie rayonnante, dont une partie est reçue par la Terre. Elle est en moyenne de 1367 watts par mètre carré du bord extérieur de l'atmosphère terrestre, c'est ce qu'on appelle la constante du soleil, qui est égale à 1367 watts par mètre carré. Le Soleil est situé à 149 598 000 km de la Terre. La lumière (émise par le soleil) met environ 8 minutes pour atteindre la Terre [7].

L'énergie solaire peut se présenter sous de nombreuses formes différentes, notamment [8] :

- **Énergie solaire thermique** : Elle est formée simplement par la production de chaleur. Nous pouvons également produire de la vapeur à partir de la chaleur solaire, puis convertir cette vapeur en électricité.
- **Énergie solaire photovoltaïque** : Elle consiste à produire de l'électricité directement à partir de la lumière grâce à des panneaux solaires.

#### I.3.2 Rayonnement solaire :

Le soleil émet de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique en raison de sa température élevée. Le rayonnement se présente sous la forme d'un ensemble d'ondes électromagnétiques émises par le soleil d'une puissance de 1367 W/m<sup>2</sup>. Le rayonnement solaire, lorsqu'il traverse l'atmosphère, est soumis à diverses influences. Le rayonnement solaire atteint la Terre à une faible intensité égale à (1000 W/m<sup>2</sup> au niveau de la mer), avec un champ spectral distribué comme suit : UV (Ultraviolet) = 5 %, visible = 40 %, IR (Infrarouge) = 55 % en raison des différentes atténuations atmosphériques. Il est divisé en trois composantes : diffuse, directe et réfléchi par le sol [9].

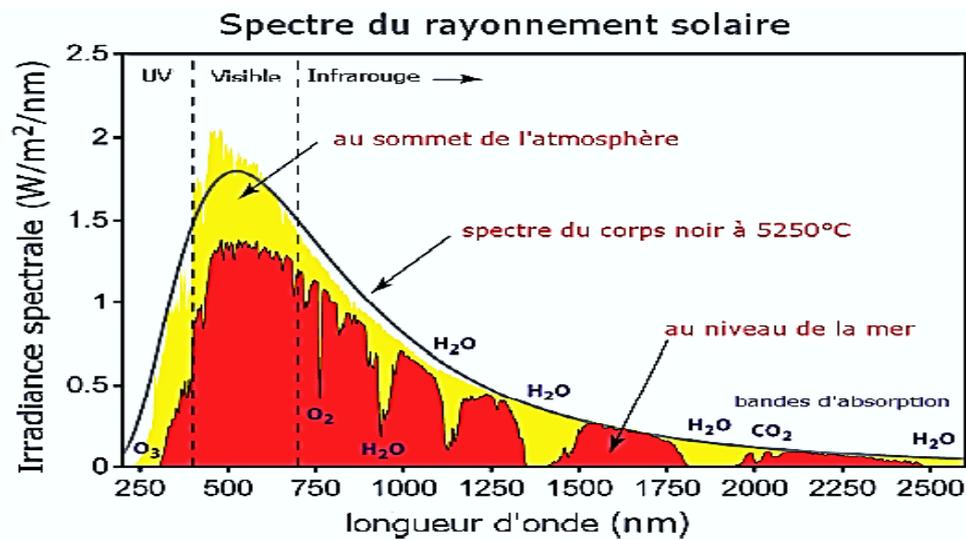


Figure I.1 Rayonnement solaire [9].

#### I.4 Système photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque est l'unité de base du système photovoltaïque. Elle convertit l'énergie lumineuse en énergie électrique. Pour produire plus d'énergie, les cellules sont regroupées pour former une unité (panneau photovoltaïque). La connexion de plusieurs cellules en série augmente la tension d'un même courant. Le courant augmente lorsqu'il est connecté les cellules en parallèle [10].

Pour obtenir une puissance et une tension de sortie supérieure, les cellules doivent être connectées en série ou en parallèle (Ces unités sont également résistantes à l'eau et à l'humidité) [11].

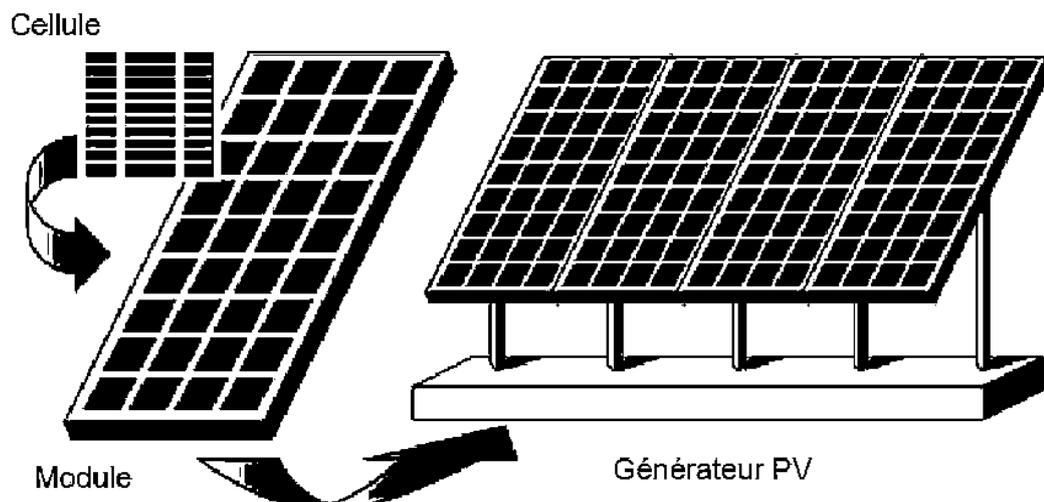


Figure I.2 Composantes d'un générateur photovoltaïque [11].

### I.4.1 Cellule photovoltaïque :

Le fonctionnement de la cellule photoélectrique est similaire à celui d'une diode photosensible. Cette cellule est basée sur un phénomène physique nommé par l'effet photoélectrique. Le principe de fonctionnement de cette cellule dépend de la formation de la force des impulsions électriques lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

La tension générée peut varier entre 0,3V et 0,7V en fonction des matériaux utilisés et de leur disposition ainsi que de la température [12].

Les cellules photovoltaïques sont constituées de [13] :

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possède une bande interdite, qui joue le rôle de la barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.
- D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.
- Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

### I.4.2 Rendement d'une cellule :

Le tableau suivant représente des différents types de cellules et leur efficacité [14] :

Technologie de cellules	Rendement en laboratoire	Rendement production
Silicium amorphe (a-si)	13 %	5-9 %
Silicium poly cristallin (P-SI)	19,8 %	11 à 15 %
Silicium monocristallin (m-SI)	24,7 %	13 à 17 %

**Tableau I.2** Différents types de cellules et leur efficacité [14].

### I.4.3 Principe de fonctionnement de la cellule PV :

La conversion directe de l'énergie lumineuse en électricité se fait par l'intermédiaire d'un matériau semi-conducteur. Ce matériau est constitué de deux parties, elles sont appelées respectivement dopée de type (n) et dopée de type (p). La zone initialement dopée (n) devient chargée positivement, et la zone initialement dopée (p) chargée négativement. Un champ électrique est donc créé entre eux, qui tendent à pousser les électrons dans la zone (n) et les trous vers la zone (p). Une jonction (p-n) est formée. Le passage d'un électron de la bande de valence à la bande de conduction entraîne une différence de tension (courant électrique circule) [15].

La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) [16].

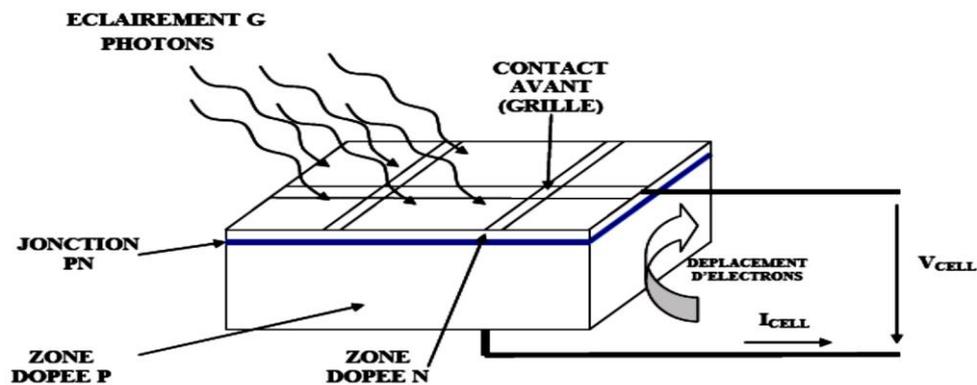


Figure I.3 Représentation schématique d'une cellule solaire [16]

### I.5 Association des cellules photovoltaïques :

Les cellules peuvent également être connectées en série et en parallèle pour obtenir une puissance plus élevée et interconnectée entre eux (en série et/ou en parallèle) [17].

#### I.5.1 Association en parallèle :

Pour augmenter le courant du générateur photovoltaïque (GPV), il faut connecter un certain nombre ( $N_p$ ) de cellules en parallèle [17].

Les équations suivantes résument les propriétés électriques des cellules connectées en parallèle ( $N_p$ ) [17] :

$$I_{ccp} = N_p * I_{cc} \tag{I.1}$$

$$V_{co} = V_{cop} \tag{I.2}$$

✚ **I<sub>ccp</sub>** : la somme des courants en court-circuit de (N<sub>p</sub>) cellules en parallèle.

✚ **V<sub>cop</sub>** : tension de circuit ouvert de (N<sub>p</sub>) cellules en parallèle.

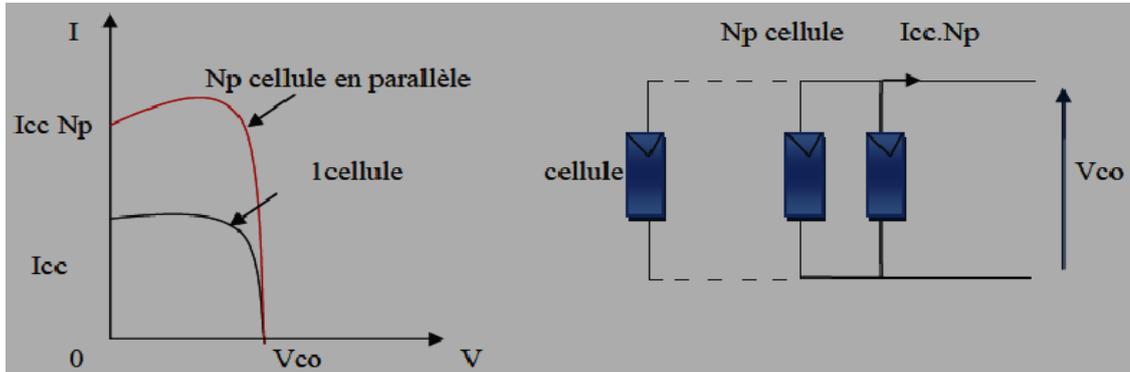


Figure I.4 Représentation des cellules connectées en parallèle [17].

### I.5.2 Association en série :

Pour augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV), il faut connecter un certain nombre (N<sub>s</sub>) de cellules en série [17].

Les équations suivantes résument les propriétés électriques des cellules connectées en série (N<sub>s</sub>) [17] :

$$V_{cos} = N_s * V_{co} \tag{I.3}$$

$$I_{ccs} = I_{cc} \tag{I.4}$$

✓ **V<sub>cos</sub>**: la somme des tensions en circuit ouvert de (N<sub>s</sub>) cellules en série.

✓ **I<sub>ccs</sub>**: courant de court-circuit de (N<sub>s</sub>) cellules en série.

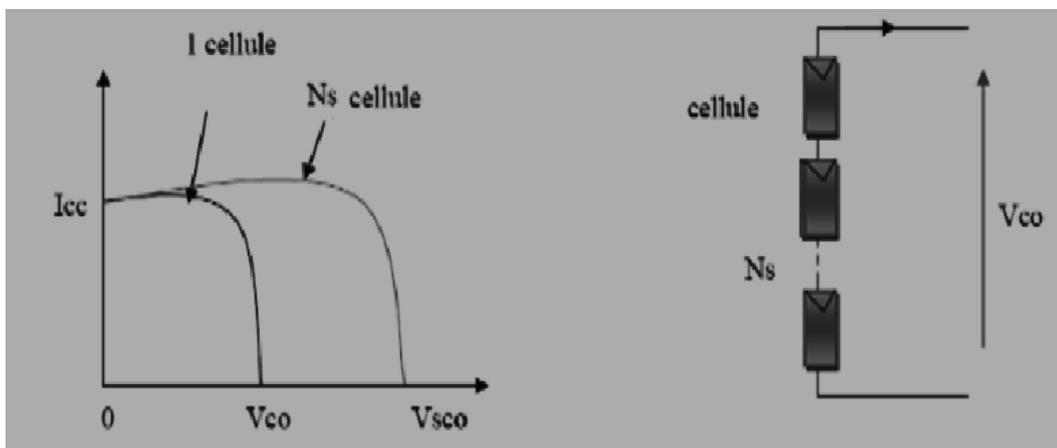


Figure I.5 Représentation des cellules photovoltaïques en série [17].

### I.5.3 Association en série- parallèle :

Pour avoir une augmentation de la tension et un courant élevé (en même temps), il faut utiliser groupement mixte, c'est-à-dire série-parallèle [8].

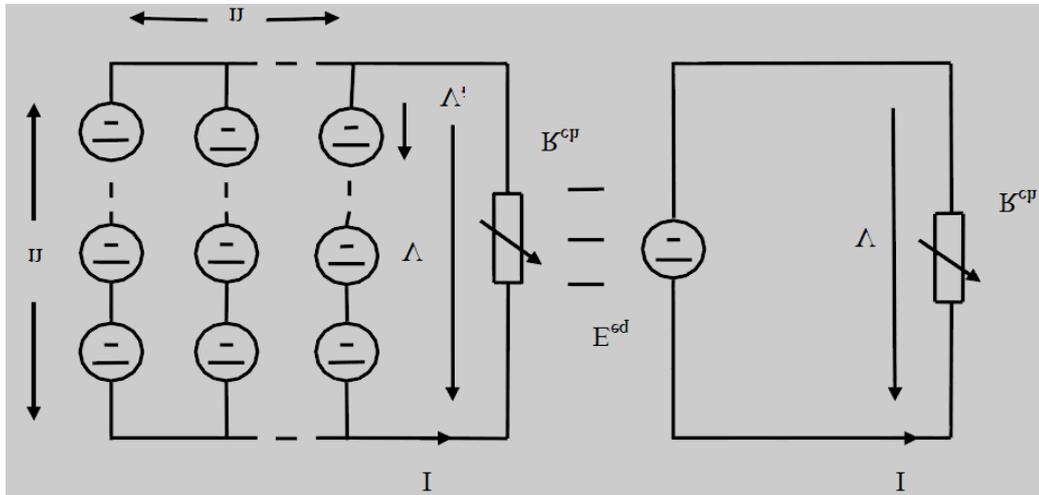


Figure I.6 Représentation des cellules photovoltaïques en mixte (série- parallèle) [8].

### I.6 Caractéristiques d'un module :

Les unités (modules) sont généralement des parallélépipèdes, rectangulaires, solides et minces (quelques centimètres d'épaisseur), dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau suivant (Tableau I.3) [18] :

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

Tableau I.3 Caractéristiques d'un module (PV) [18].

### I.7 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

Les panneaux solaires photovoltaïques présentent un certain nombre d'avantages, mais ces panneaux ont aussi quelques inconvénients, notamment [19] :

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>Énergie gratuite.</li> <li>Elle n'est pas taxée et n'engendre pas de rejets dans l'environnement tout au long de son utilisation.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Les démarches administratives pour installer des panneaux photovoltaïques sont longues, environ 2 à 6 mois et même un an en cas de difficultés de raccordement</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>La vente du surplus de production permet aux propriétaires d'amortir les investissements réalisés lors de l'installation.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Un investissement important lors de leur installation.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Les panneaux résistent aux intempéries et au froid.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>En métropole, la production d'électricité se limite à 1 300 heures par an.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Les panneaux ont une durée de vie de 20 à 35 ans.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Depuis la suppression du crédit d'impôt, le retour sur investissement est rallongé de 9 à 18 mois.</li> </ul>

Tableau I.4 Avantages et inconvénients du PV [19].

## I.8 Modélisation et simulation d'une cellule photovoltaïque :

Le tableau suivant représente les caractéristiques électriques du module PV (60W) [21] :

Puissance maximale (Pmax)	60 W
Tension optimale (Vmp)	17.1V
Courant optimale (Imp)	3.5 A
Courant de court-circuit (Icc)	3.8 A
Tension de circuit-ouvert (Voc)	21.1 V
Coefficient de température en circuit-ouvert (Voc)	-0.08 V/°C
Coefficient de température en court-circuit (Icc)	0.0024 A/°C
Nombre de cellules en série (Ns)	36

Tableau I.5 Caractéristiques du module PV (60W) [20].

Le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque se compose d'une source de courant, d'une diode, d'une résistance en série et d'une résistance shunt, comme illustré à la figure (I.7) [22] :

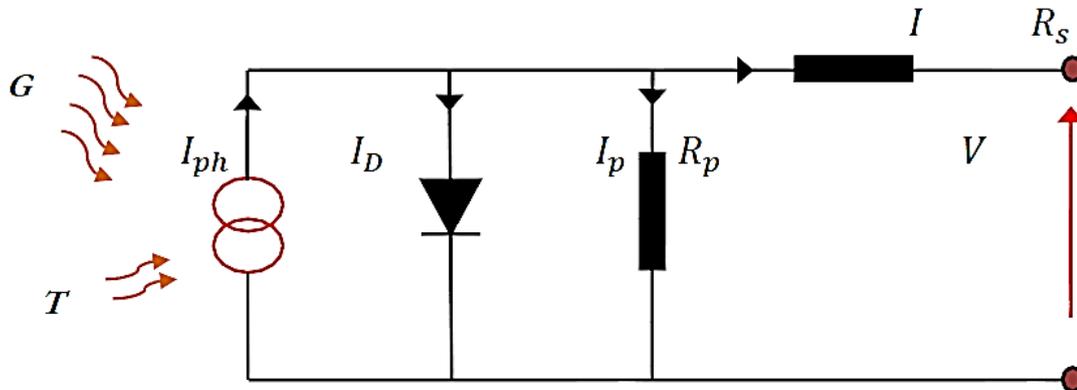


Figure I.7 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque [21].

Selon la loi de Kirchhoff, et grâce à la figure (I.7), nous pouvons écrire l'équation suivante [21] :

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

Avec :

- ❖  $I$  : Courant généré par la cellule photovoltaïque ;
- ❖  $I_{ph}$  : Le photo-courant de la cellule ;
- ❖  $I_D$  : Le courant circulant dans la diode ;
- ❖  $I_p$  : Le courant circulant dans la résistance  $R_p$ .

- **photo-courant  $I_{ph}$  :**

Le photo-courant de la cellule est donné par l'équation suivante :

$$I_{ph} = I_{cc} \left( \frac{G}{1000} \right) \quad (I.6)$$

Avec :

- ❖  $I_{cc}$  : Courant de court-circuit ;
- ❖  $G$  : Éclairement ;

- **Courant  $I_D$  :**

Le courant  $I_D$  est donné par l'équation suivante :

$$I_D = I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + I * R_s}{n * V_T}\right) - 1 \right] \quad (I.7)$$

Avec :

- ❖  $I_0$  : Courant de saturation inverse d'une diode ;
- ❖  $V_T$  : Tension thermique ;
- ❖  $n$  : Facture de non idéalité de la jonction comprise entre 1 et 5 dans la pratique.

- **Tension thermique :**

La tension thermique est donnée par l'équation suivante :

$$V_T = \frac{K * T}{e} \quad (I.8)$$

- ❖  $e$  : charge d'électron ( $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ ) ;
- ❖  $K$  : constante de Boltzmann ( $1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ) ;
- ❖  $T$  : température effective de la cellule en kelvin.

- **Courant  $I_p$  :**

Le courant  $I_p$  est donné par l'équation suivante :

$$I_p = \frac{V + I * R_s}{R_p} \quad (I.9)$$

Grâce aux équations précédentes, le courant  $I$  peut être écrit sous la forme suivante

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + I * R_s}{n * V_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + I * R_s}{R_p} \quad (I.10)$$

## I.9 Simulation du panneau photovoltaïque :

### I.9.1 Simulation d'un panneau photovoltaïque sous MATLAB/SIMULINK :

La figure (I.8) représente un schéma de simulation d'un panneau photovoltaïque à l'aide du programme MATLAB/SIMULINK.

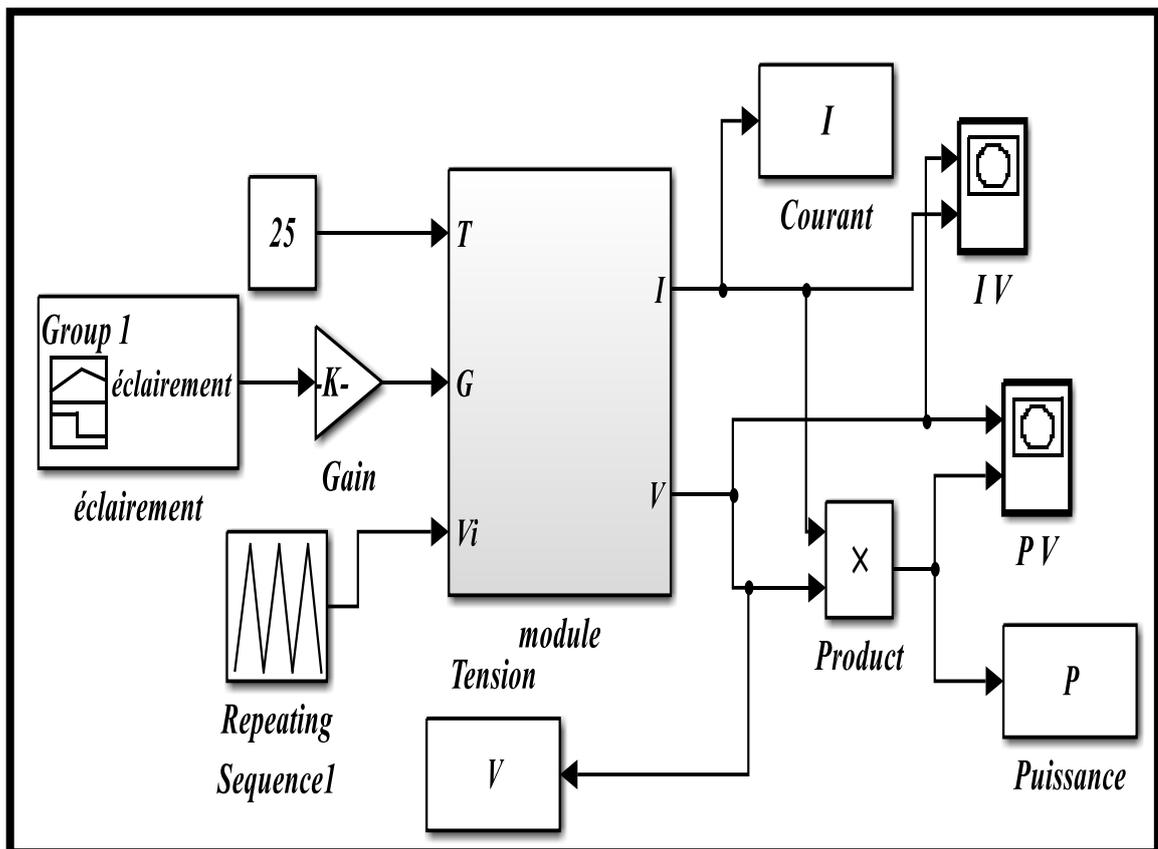
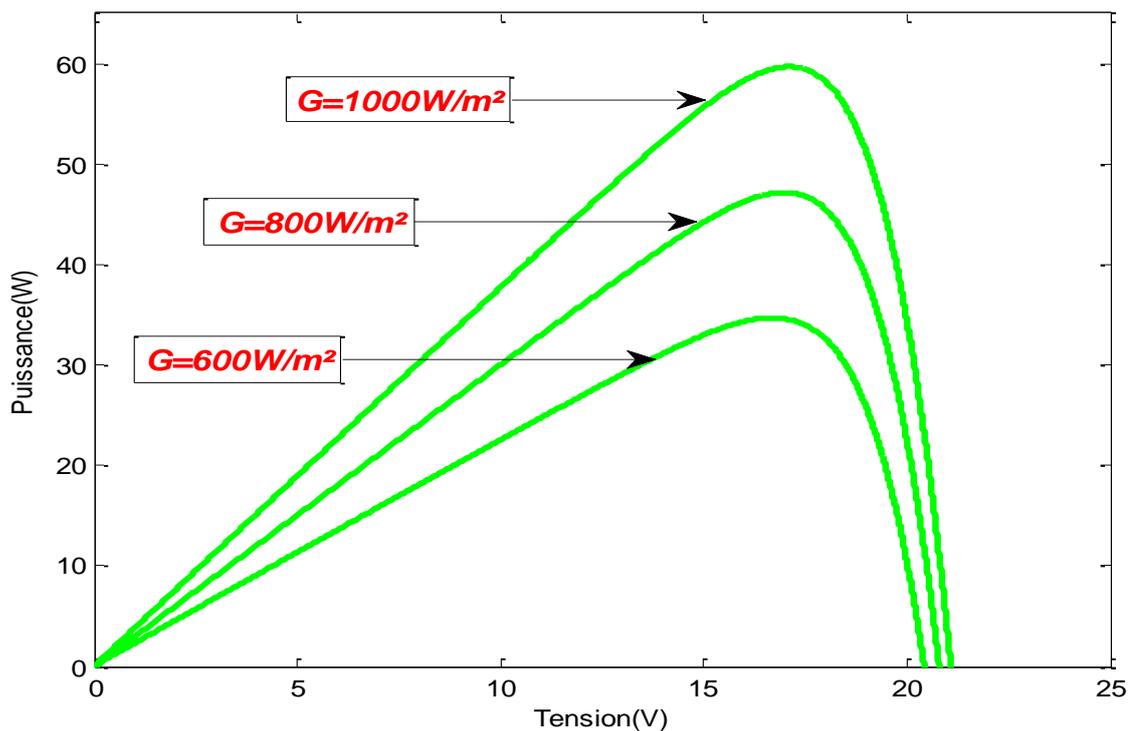


Figure I.8 Schéma de simulation d'un panneau photovoltaïque.

### I.9.2 Résultats de la simulation :

La figure (I.9) représente l'évolution de la puissance du panneau photovoltaïque en fonction de la tension. Nous remarquons à travers cette courbe qu'il y a une augmentation de la puissance du panneau photovoltaïque lorsque l'intensité de l'éclairément augmente. Dans cette simulation, nous avons fixé la température à  $T = 25^{\circ}\text{C}$ , et modifié l'éclairément comme suit :  $600\text{W}/\text{m}^2$ ,  $800\text{W}/\text{m}^2$  et  $1000\text{W}/\text{m}^2$ .



**Figure I.9** Caractéristique tension / puissance d'un panneau photovoltaïque pour  $G = 600 \text{ W/m}^2$ ,  $800 \text{ W/m}^2$  et  $1000 \text{ W/m}^2$ ;  $T=25^\circ\text{C}$

La figure (I.10) représente l'évolution du courant généré par le panneau photovoltaïque en fonction de la tension. Dans cette simulation, nous avons fixé la température à  $T = 25^\circ\text{C}$ , et modifié l'éclairement comme suit :  $600 \text{ W/m}^2$ ,  $800 \text{ W/m}^2$  et  $1000 \text{ W/m}^2$ .

On constate qu'une augmentation de l'éclairement entraîne une augmentation du courant.

La figure (I.11) représente l'évolution de la puissance du panneau photovoltaïque en fonction de la tension. Dans cette simulation, nous avons fixé l'éclairement à  $G=1000 \text{ W/m}^2$ , et modifié la température comme suit :  $T=25^\circ\text{C}$ ,  $T=50^\circ\text{C}$  et  $T=75^\circ\text{C}$ . On peut remarquer sur cette courbe que plus la température n'est élevée, plus l'énergie n'est diminuée.

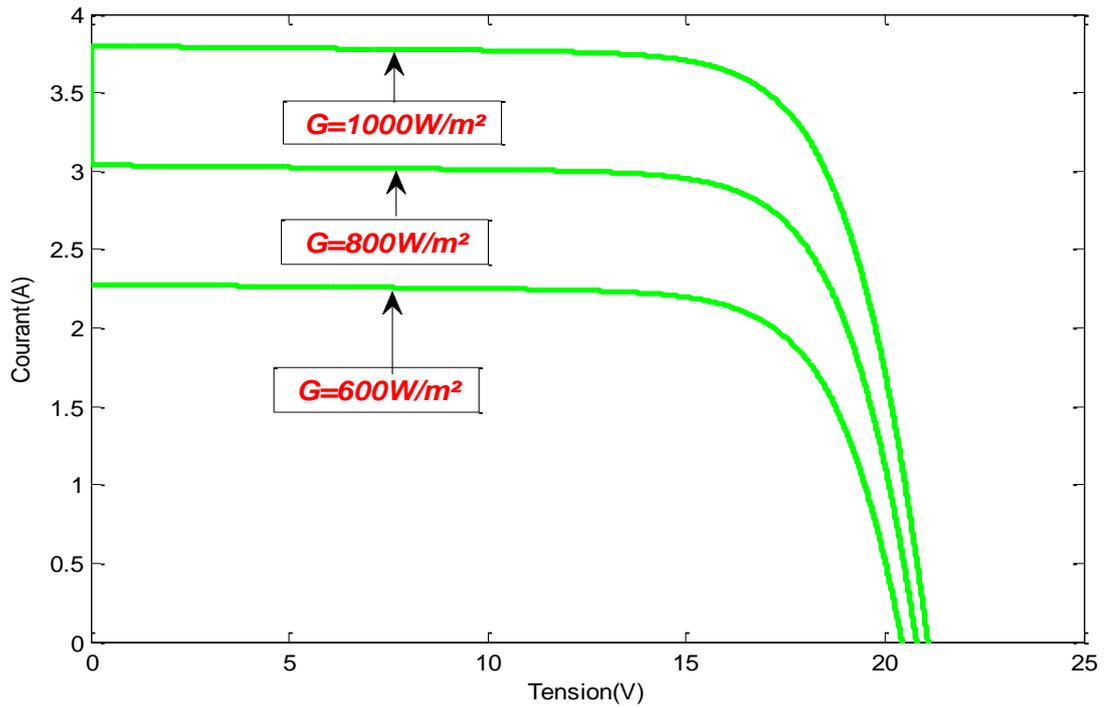


Figure I.10 Caractéristique tension / courant d'un panneau photovoltaïque pour  $G = 600 \text{ W/m}^2$ ,  $800 \text{ W/m}^2$  et  $1000 \text{ W/m}^2$  ;  $T=25^\circ\text{C}$ .

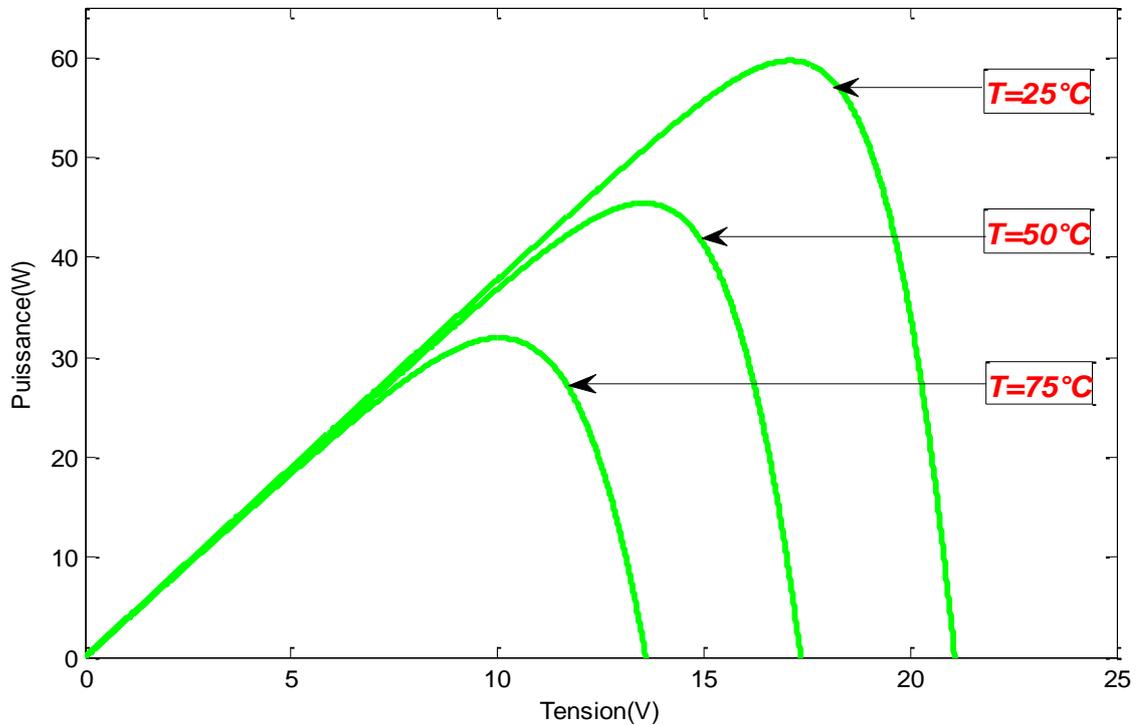
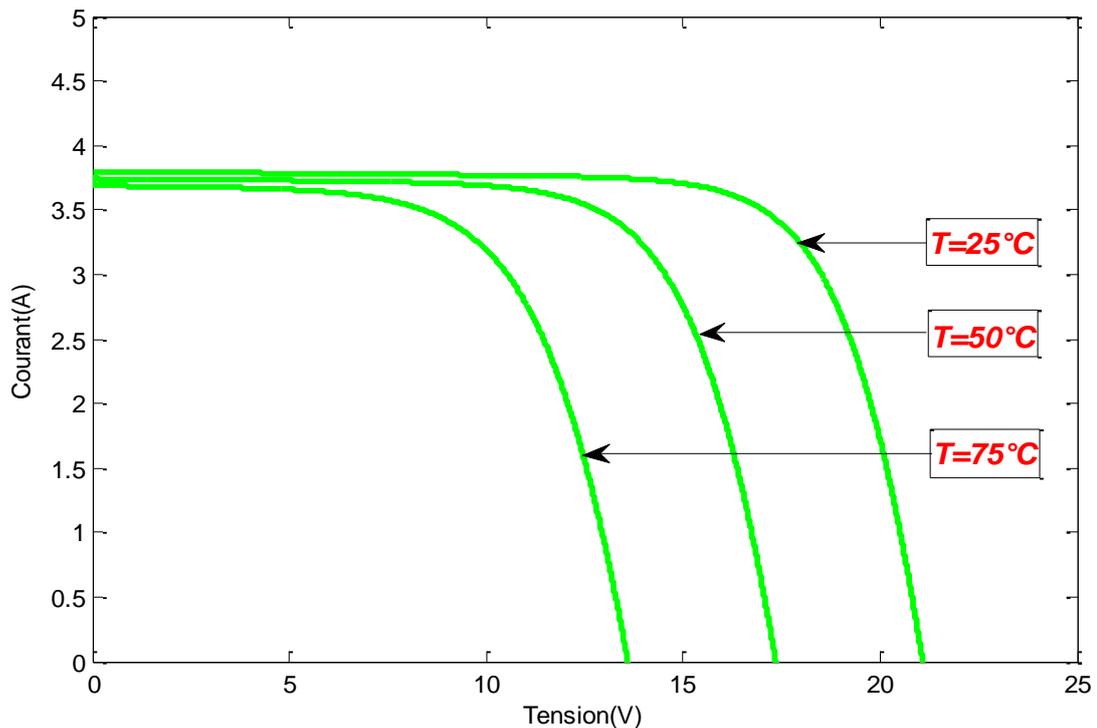


Figure I.11 Caractéristique tension / puissance d'un panneau photovoltaïque pour  $T=25^\circ\text{C}$ ,  $50^\circ\text{C}$  et  $75^\circ\text{C}$  ;  $G=1000\text{w/m}^2$ .

La figure (I.12) représente l'évolution du courant généré par le panneau photovoltaïque en fonction de la tension. Dans cette simulation, nous avons fixé l'éclairement à  $G=1000\text{W/m}^2$ , et modifié la température comme suit :  $T=25^\circ\text{C}$ ,  $T=50^\circ\text{C}$  et  $T=75^\circ\text{C}$ .

On remarque sur la figure (I.12) que la température élevée affecte négativement sur le rendement du panneau photovoltaïque.



**Figure I.12** Caractéristique tension / courant d'un panneau photovoltaïque pour  $T=25^\circ\text{C}$ ,  $50^\circ\text{C}$  et  $75^\circ\text{C}$  ;  $G=1000\text{w/m}^2$ .

## I.10 Conclusion :

En raison du développement de l'économie, les besoins en électricité sont devenus très importants. Avec le développement de la technologie, les chercheurs se sont intéressés à l'exploitation des énergies renouvelables pour répondre à ce besoin. Dans le premier chapitre, nous avons présenté une définition de l'énergie solaire, un système photovoltaïque, les caractéristiques de ce système photovoltaïque et son principe de fonctionnement. Enfin, nous avons modélisé et simulé le GPV pour connaître son comportement.

Selon les résultats obtenus par la simulation, nous avons observé :

- ❖ Plus la température est élevée, plus l'efficacité (rendement) du GPV est faible, car la température a un effet négatif sur les performances du GPV.

- ❖ Plus l'intensité de l'éclairement n'est élevée, plus la puissance et le courant sont élevés. L'intensité de l'éclairement joue donc un rôle positif dans l'efficacité (rendement) du GPV.

Dans le prochain chapitre, nous étudierons le contrôle MPPT par convertisseur DC-DC (Boost), afin d'améliorer la puissance du GPV et d'obtenir la puissance maximale dans le générateur photovoltaïque.

# *Chapitre II*

## *Commande*

*MPPT (P&O) et*

*les convertisseurs*

*DC-DC*

## II.1 Introduction :

L'énergie générée par les panneaux solaires varie en fonction de la charge. Pour extraire la puissance maximale de ces panneaux, il existe plusieurs méthodes, dont la plus importante est le MPPT (Maximum Power Point Tracking). La méthode MPPT est utilisée pour améliorer les performances du système photovoltaïque en extrayant une puissance maximale. Cette méthode dépend d'un convertisseur DC-DC très efficace qui convertit l'énergie au niveau de tension la plus appropriée, quelle que soit la charge du système [22].

Dans le deuxième chapitre, nous étudierons la commande du convertisseur DC-DC (hacheur) qui fera fonctionner le générateur photovoltaïque à la puissance maximale en utilisant l'algorithme de perturbation et observation (P&O) pour suivre le point de puissance maximale (PPM).

## II.2 Commande du module photovoltaïque :

L'objectif du contrôle du module PV est d'obtenir et de maintenir une énergie maximale. Les convertisseurs DC / DC assure cette opération, où ils sont utilisés comme intermédiaires entre le générateur photovoltaïque et la charge pour extraire une puissance maximale.

Le convertisseur DC / DC (Boost) est contrôlé par l'algorithme de perturbation et observation (P&O) [20].

## II.3 Convertisseurs DC-DC :

Le convertisseur DC/DC peut être utilisé comme un intermédiaire entre la source et la charge, comme indiqué sur la figure (II.1) [23] :

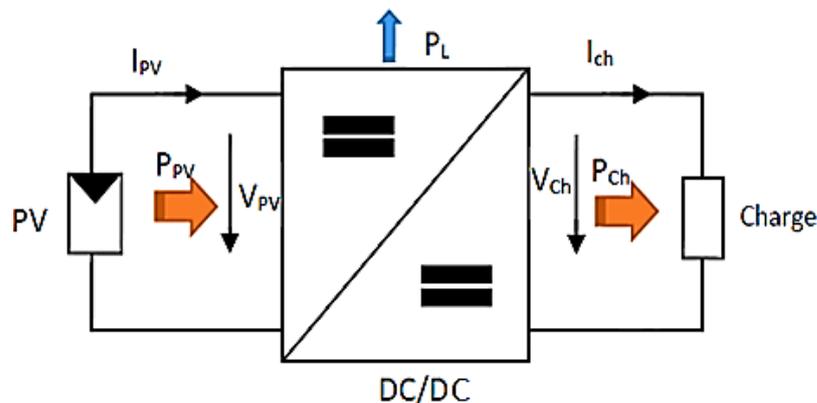


Figure II.1 Schéma du convertisseur DC-DC [23].

Le contrôle de la puissance électrique se fait par des convertisseurs DC-DC, où il est composé de condensateurs, d'inductances et d'interrupteurs. Dans l'état idéal, la consommation d'énergie est inexistante, car le commutateur est réalisé à l'aide d'un dispositif à semi-conducteurs. Généralement les transistors (MOSFET ou IGBT) fonctionnant en mode (off/saturé). Si le dispositif semi-conducteur est en mode off, son courant est nul, alors la dissipation de puissance est nulle. Si le dispositif est saturé, la chute de tension à ses bornes sera quasiment nulle et donc la puissance perdue sera très faible [23].

Les équations dynamiques du convertisseur Boost (figure II.2) peuvent être exprimées comme suit [24] :

$$\frac{dX_1}{dt} = \frac{i_{pv}}{C_1} - \frac{X_2}{C_1} \quad (\text{II.1})$$

$$\frac{dX_2}{dt} = \frac{V_{pv}}{L} - \frac{(1-u)V_o}{L} \quad (\text{II.2})$$

Où  $[X_1 \ X_2] = [V_{pv} \ I_L]$ ,

$u \in \{0,1\}$  : est un commande de signaux de commutation.

## II.4 Types des convertisseurs DC-DC :

### II.4.1 Convertisseur survolteur (parallèle, élévateur ou Boost) :

Le convertisseur Boost DC-DC se compose principalement d'un commutateur (S) (IGBT ou MOSFET) et d'une diode (D). Le commutateur (S) est contrôlé par un signal de modulation de largeur d'impulsion (PWM) avec une période de commutation constante  $d_T$  et un rapport cyclique variable [25].

Le rapport cyclique du hacheur survolteur (boost) est donné par [26] :

$$V_o = \frac{1}{(1-\alpha)} V_i \quad (\text{II.3})$$

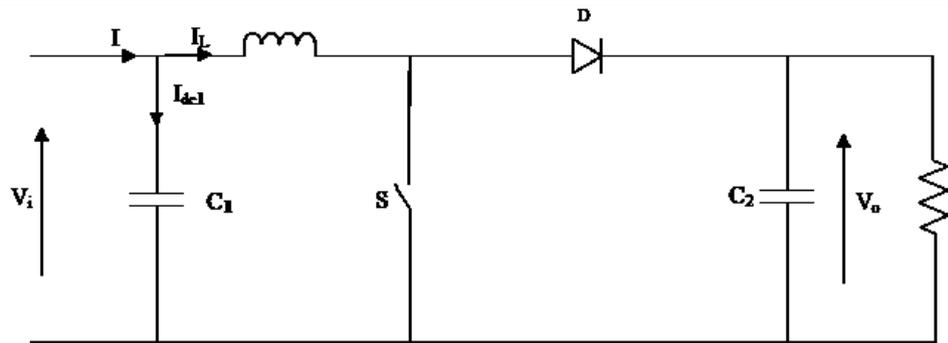


Figure II.2 Schéma électrique du convertisseur survolteur [26].

#### II.4.2 Convertisseur dévolteur (série, abaisseurs ou Buck) :

Il délivre une tension à la sortie inférieure à l'entrée (panneaux), sa structure nécessite un interrupteur avec une commande marche/arrêt (transistor bipolaire, transistor, IGBT, ..... ) et une diode [26].

#### II.4.3 Convertisseur dévolteur-survolteur (buck-boost) :

Le convertisseur dévolteur-survolteur (buck-boost) combine entre les deux convertisseurs : buck et boost [26].

#### II.5 Commande MPPT :

Le contrôle du point de puissance maximale (PPM) d'un système photovoltaïque nécessite des techniques permettant de suivre le point de puissance maximale à tout moment, qui permet au système de fonctionner dans des conditions optimales, dans le but d'exploiter la puissance maximale disponible [27].

Le système doit trouver la nouvelle tension de circuit ouvert ( $V_o$ ) lorsque les conditions d'éclairage changent. Pour trouver la nouvelle tension de circuit ouvert, la charge connectée au module PV doit être déconnectée chaque fois que cela provoque une perte de puissance. Une des méthodes les plus importantes et simple du contrôle (MPPT), nous trouvons la technique de perturbation et observation (P&O), car elle dépend de la mesure directe du courant, de la tension ou de la puissance. Elle est plus précise et a une réponse plus rapide que les méthodes indirectes [28].

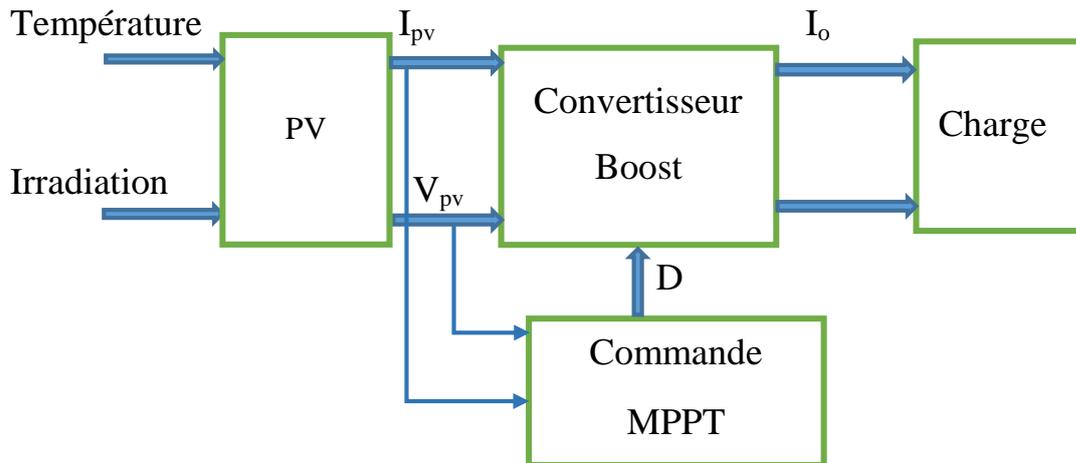


Figure II.3 Schéma d'un système PV [27].

## II.6 Suivi du point de puissance maximale :

Le suivi du point de puissance maximale (MPPT) est un élément essentiel des systèmes photovoltaïques. Les techniques de contrôle MPPT diffèrent entre elles à plusieurs égards, notamment : la complexité, le nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, les performances et le domaine d'application [29].

Lorsqu'une résistance ( $R$ ) est connectée aux bornes du module, le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection entre la caractéristique de charge ( $I$ - $V$ ) et la courbe ( $I$ - $V$ ) du module. Lorsque la résistance de la charge et la résistance interne de la source sont égales, la puissance délivrée à la charge est maximale selon la théorie de la transmission de puissance maximale [30].

## II.7 Commande P&O :

L'algorithme P&O peut suivre le point de puissance maximale (PPM), et est considéré comme l'un des algorithmes les plus utilisés dans les contrôles MPPT en raison de sa structure simple et de sa facilité d'utilisation [31].

Comme son nom l'indique, cet algorithme dépend de la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de la tension de référence, cela se fait en contrôlant directement le rapport cyclique du convertisseur (DC-DC). Le rapport cyclique ( $D$ ) peut être corrigé à travers l'observation de l'effet sur la puissance de sortie [32].

### II.8 Principe du contrôle "Perturbation et Observation " (P&O) :

Le principe du contrôle P&O est la perturbation par la diminution ou l'augmentant du rapport cyclique (PWM) du convertisseur élévateur (Boost). Ensuite, nous observons le changement de direction de l'énergie de sortie, si la puissance photovoltaïque  $P(k)$  et la tension  $V(k)$  résultantes à l'instant  $(k)$  sont supérieures à la puissance  $P(k-1)$  et à la tension  $V(k-1)$  calculées précédemment, alors la direction de la perturbation sera conservée ou inversée [33].

L'algorithme contient 4 états ou possibilités comme le montre la figure (II.5) et peut être détaillé comme suit [33] :

- **Lorsque  $\Delta P < 0$  &  $V(k) > V(k-1)$ , donc  $D(k+1) = D(k) - \Delta D$**
- **Lorsque  $\Delta P < 0$  &  $V(k) < V(k-1)$ , donc  $D(k+1) = D(k) + \Delta D$**
- **Lorsque  $\Delta P > 0$  &  $V(k) > V(k-1)$ , donc  $D(k+1) = D(k) + \Delta D$**
- **Lorsque  $\Delta P > 0$  &  $V(k) < V(k-1)$ , donc  $D(k+1) = D(k) - \Delta D$**

Tableau II.1 logique de l'algorithme perturbation et observation P&O [31].

Perturbation de la tension $\Delta V$	Observation de la puissance $\Delta P$	Prochaine perturbation
Positive (+)	Positive (+)	Positive (+)
Positive (+)	Négative (-)	Négative (-)
Négative (-)	Positive (+)	Négative (-)
Négative (-)	Négative (-)	Positive (+)

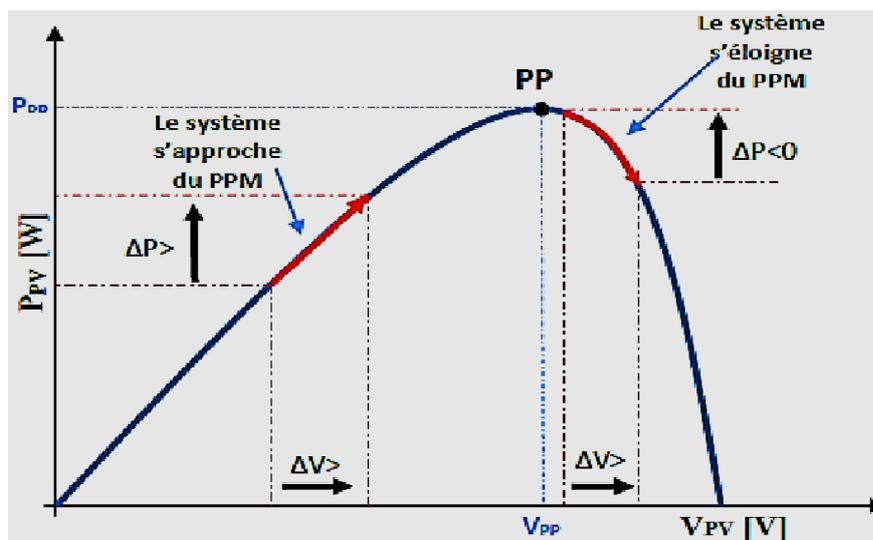


Figure II.4 Méthode (P&O) pour trouver PPM [34].

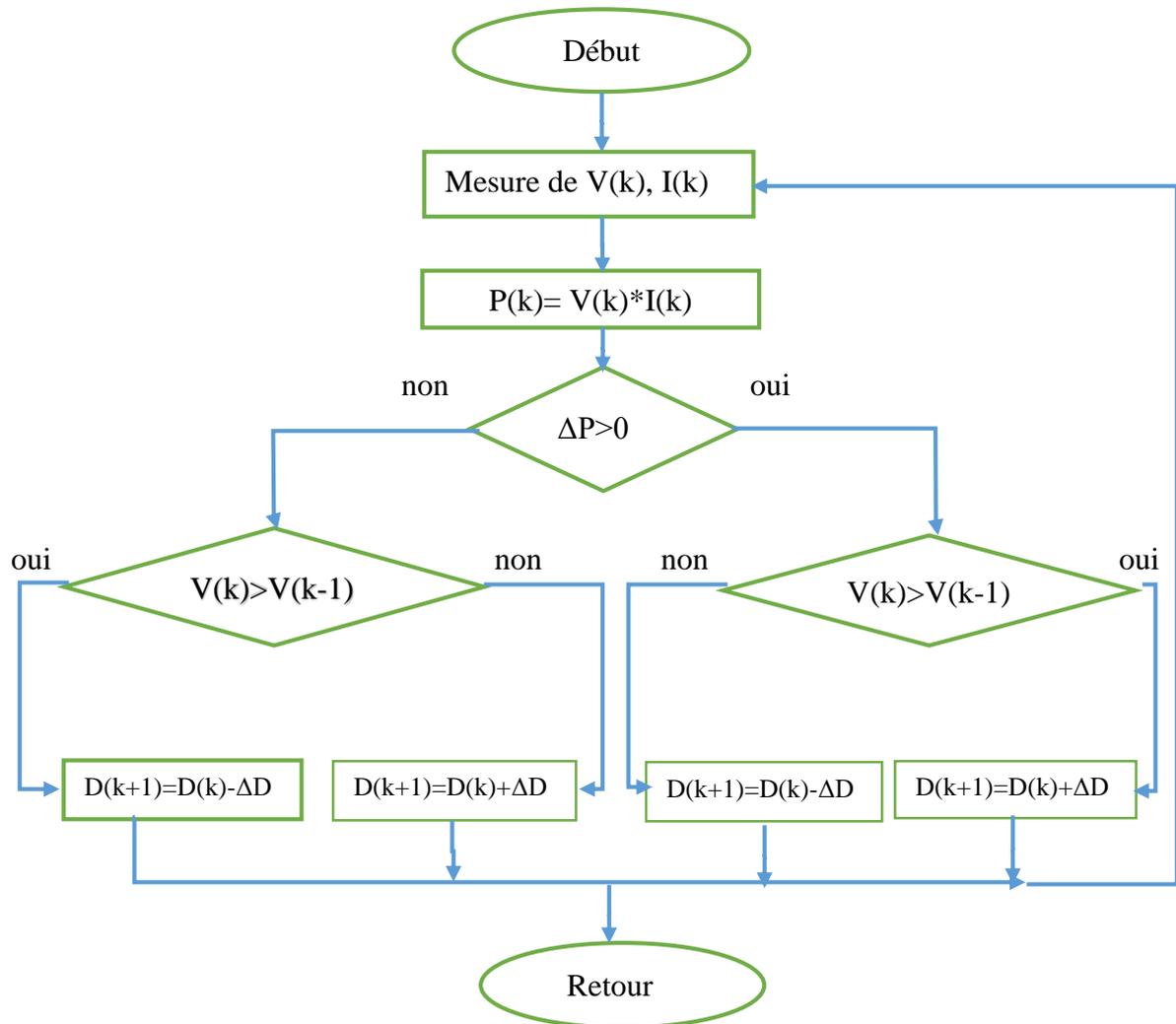


Figure II .5 Organigramme de la méthode P&O [33].

## II.9 Bloc de simulation du système photovoltaïque :

La figure (II.6) montre un schéma du système photovoltaïque par la commande MPPT (P&O) dans MATLAB SIMULINK.

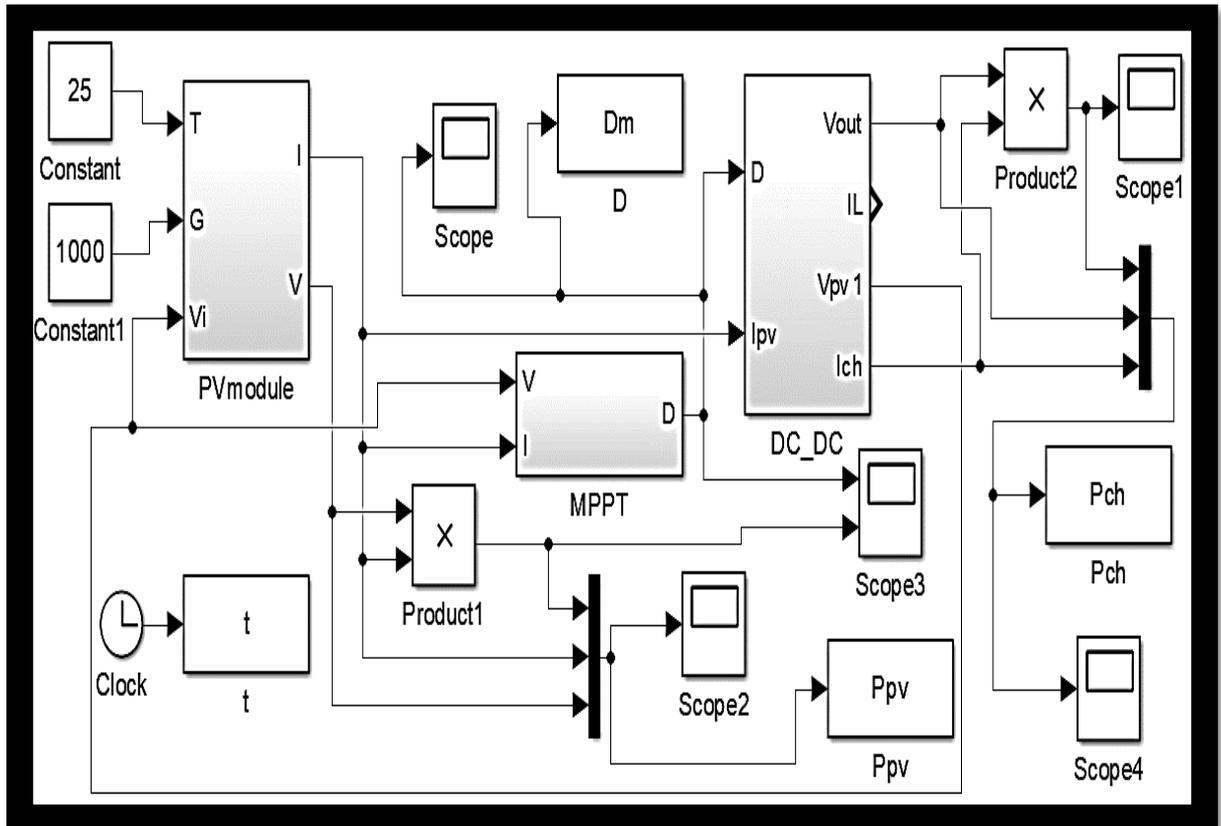


Figure II.6 Schéma du système photovoltaïque par la commande MPPT (P&O) sur MATLAB SIMULINK.

## II.10 Résultats de la simulation :

Nous avons simulé la commande MPPT par la technique P&O à l'aide du logiciel MATLAB / SIMULINK. Nous avons effectué les trois tests suivants :

- ❖ Différents éclairagements, avec : température constante = 25 °C et R (Résistance) constante ;
- ❖ Différentes températures, avec : éclairage constant = 1000 W/m<sup>2</sup> et R constante ;
- ❖ Différentes R, avec : éclairage constant = 1000 W/m<sup>2</sup> et température constante = 25 °C.
- ❖ **1<sup>ère</sup> test :** Différents éclairagements (600 W/m<sup>2</sup>, 800 W/m<sup>2</sup> et 1000 W/m<sup>2</sup>), avec : température constante = 25 °C et R (Résistance = 25 Ω) constante.

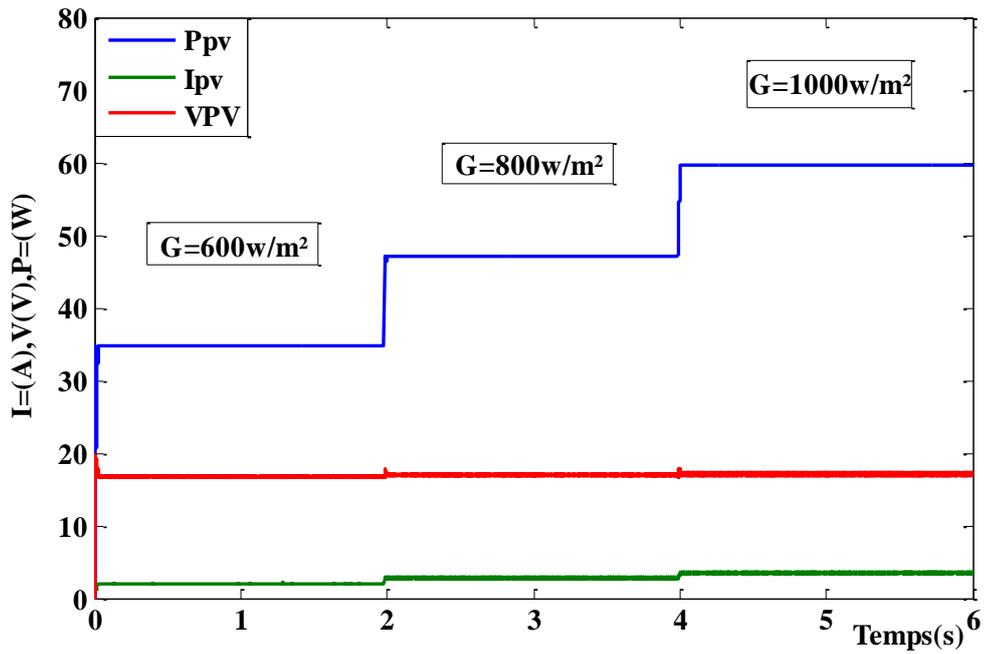


Figure II.7 Caractéristiques du PV ( $I_{pv}$ ,  $V_{pv}$  et  $P_{pv}$ ), avec :  $G = 600 \text{ W/m}^2$ ,  $800 \text{ W/m}^2$  et  $1000 \text{ W/m}^2$ ;  $T=25^\circ\text{C}$  et  $R=25\Omega$ .

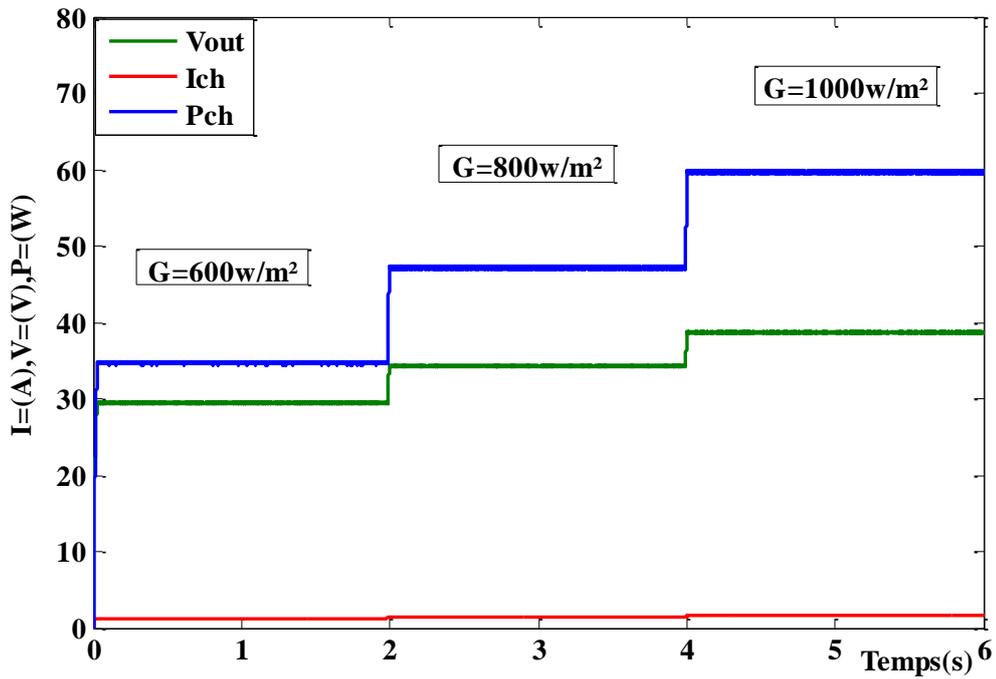


Figure II.8 Caractéristiques du convertisseur ( $I_{ch}$ ,  $V_{out}$  et  $P_{ch}$ ), avec :  $G = 600 \text{ W/m}^2$ ,  $800 \text{ W/m}^2$  et  $1000 \text{ W/m}^2$ ;  $T=25^\circ\text{C}$  et  $R=25\Omega$ .

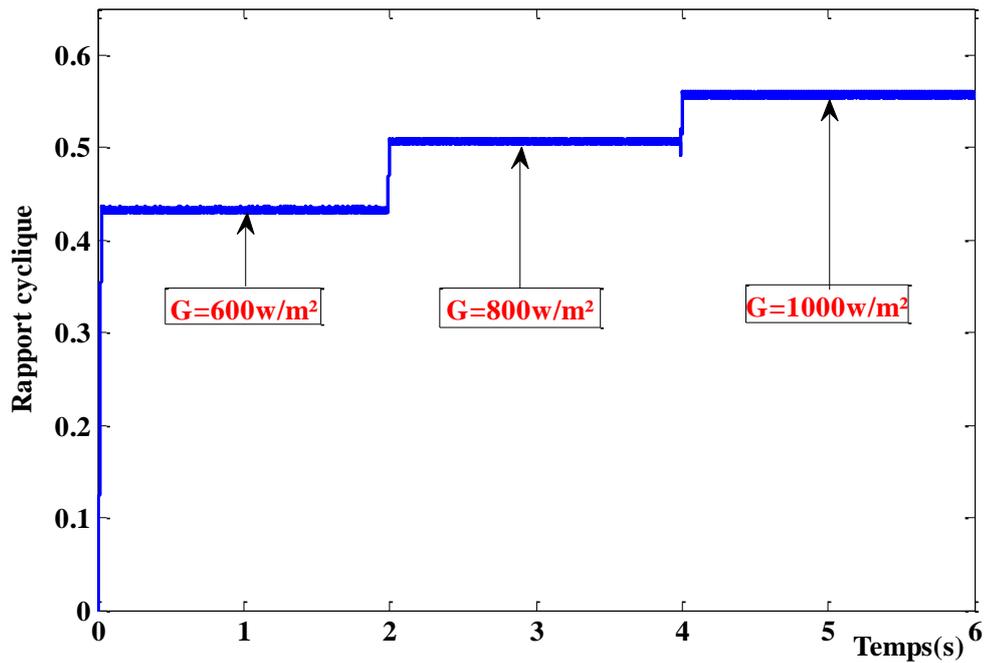


Figure II.9 Rapport cyclique (D), avec :  $G = 600 \text{ W/m}^2$ ,  $800 \text{ W/m}^2$  et  $1000 \text{ W/m}^2$  ;  $T=25^\circ\text{C}$  et  $R=25\Omega$ .

❖ 2<sup>ème</sup> test : Différentes températures ( $T=25^\circ\text{C}$ ,  $50^\circ\text{C}$  et  $75^\circ\text{C}$ ), avec : éclairement constant =  $1000 \text{ W/m}^2$  et R (Résistance =  $25 \Omega$ ) constante.

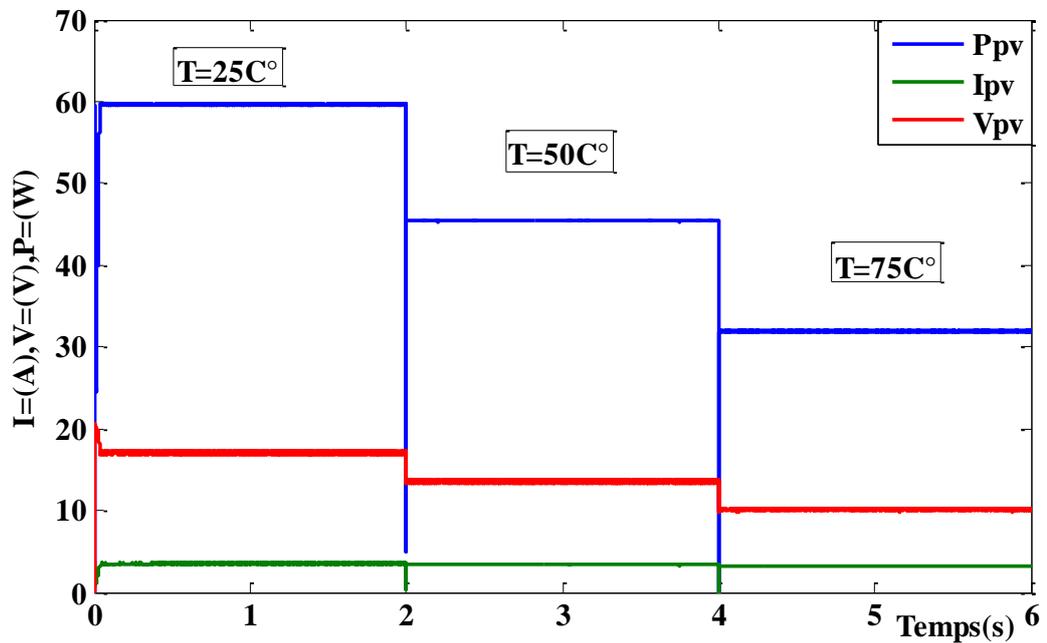


Figure II.10 Caractéristiques du PV ( $I_{pv}$ ,  $V_{pv}$  et  $P_{pv}$ ), avec :  $T=25^\circ\text{C}$ ,  $50^\circ\text{C}$  et  $75^\circ\text{C}$  ;  $G=1000\text{w/m}^2$  et  $R=25\Omega$ .

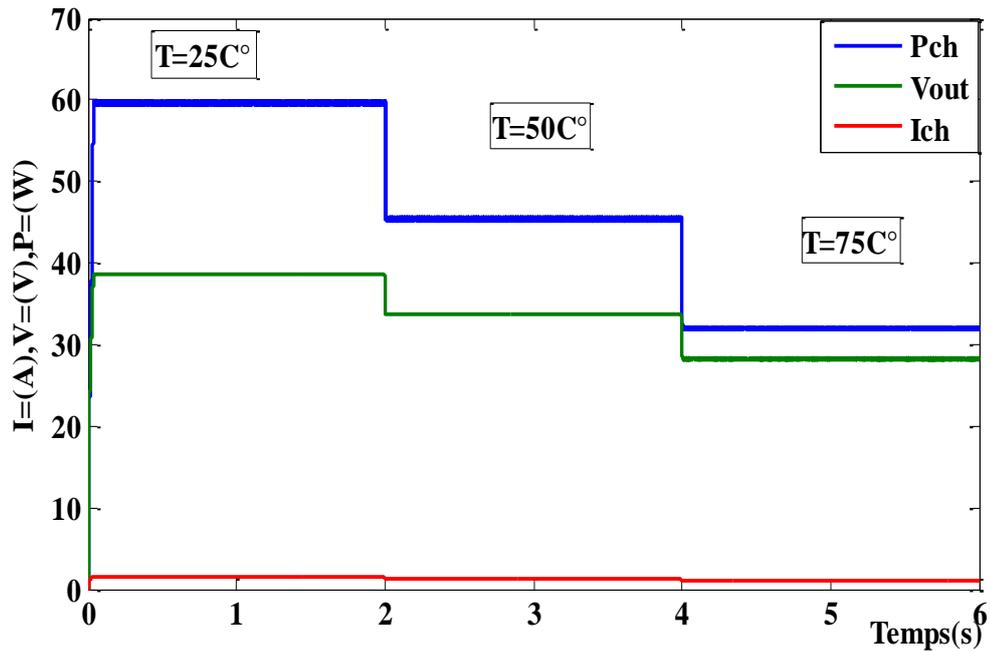


Figure II.11 Caractéristiques du convertisseur ( $I_{ch}$ ,  $V_{out}$  et  $P_{ch}$ ), avec :  $T=25^{\circ}C$ ,  $50^{\circ}C$  et  $75^{\circ}C$  ;  $G=1000w/m^2$  et  $R=25\Omega$ .

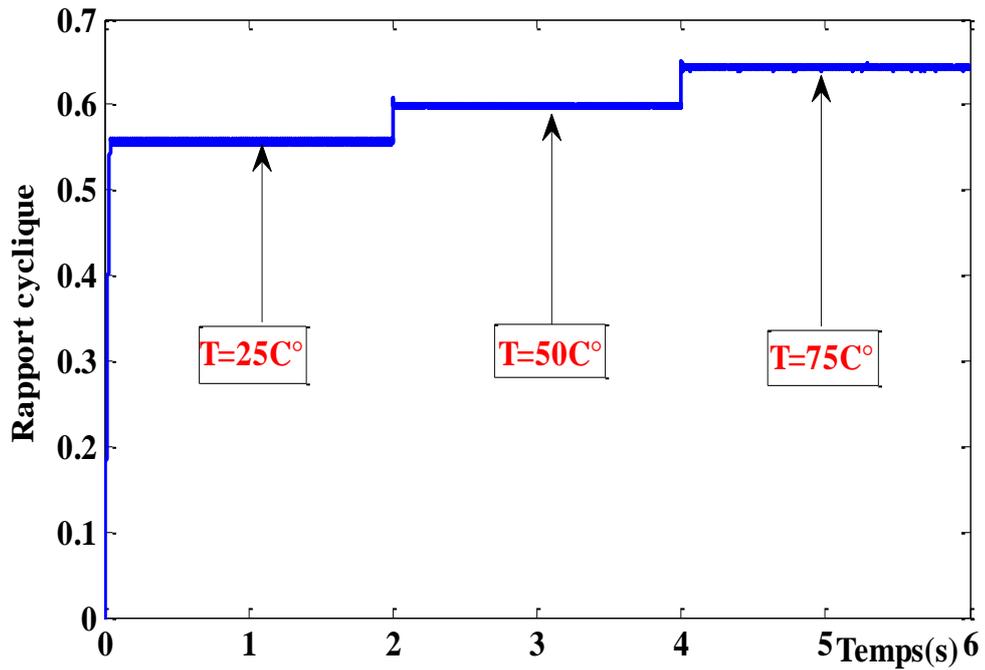


Figure II.12 Rapport cyclique (D), avec :  $T=25^{\circ}C$ ,  $50^{\circ}C$  et  $75^{\circ}C$  ;  $G=1000w/m^2$  et  $R=25\Omega$ .

- ❖ 3<sup>ème</sup> test : Différentes R ( $R=25\Omega$  et  $35\Omega$ ), avec : éclairement constant =  $1000 \text{ W/m}^2$  et température constante =  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

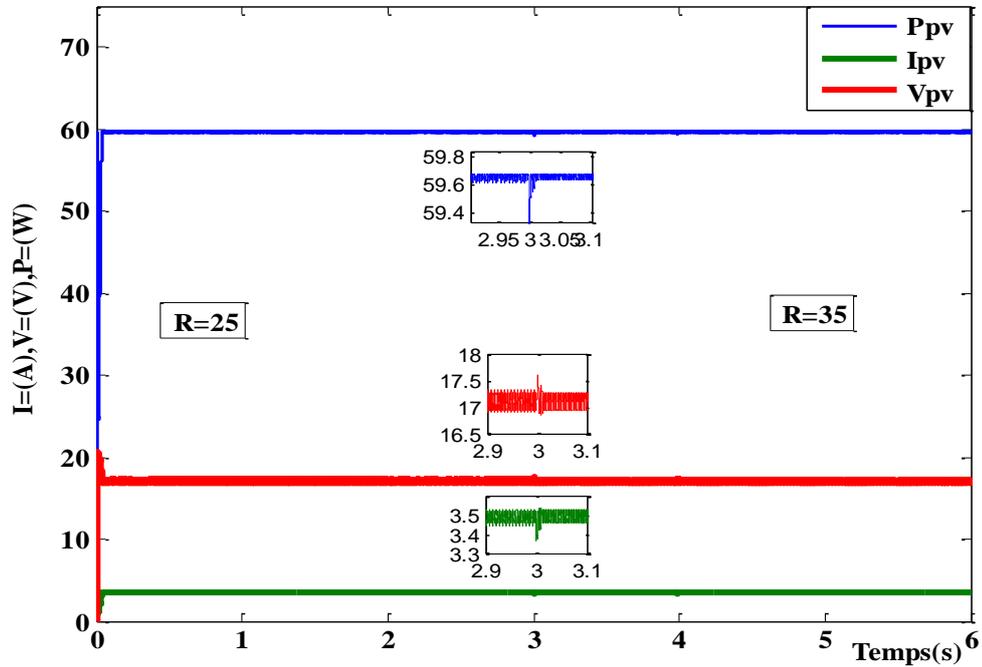


Figure II.13 Caractéristiques du PV ( $I_{pv}$ ,  $V_{pv}$  et  $P_{pv}$ ), avec :  $R=25\Omega$  et  $35\Omega$  ;  $G = 1000 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ .

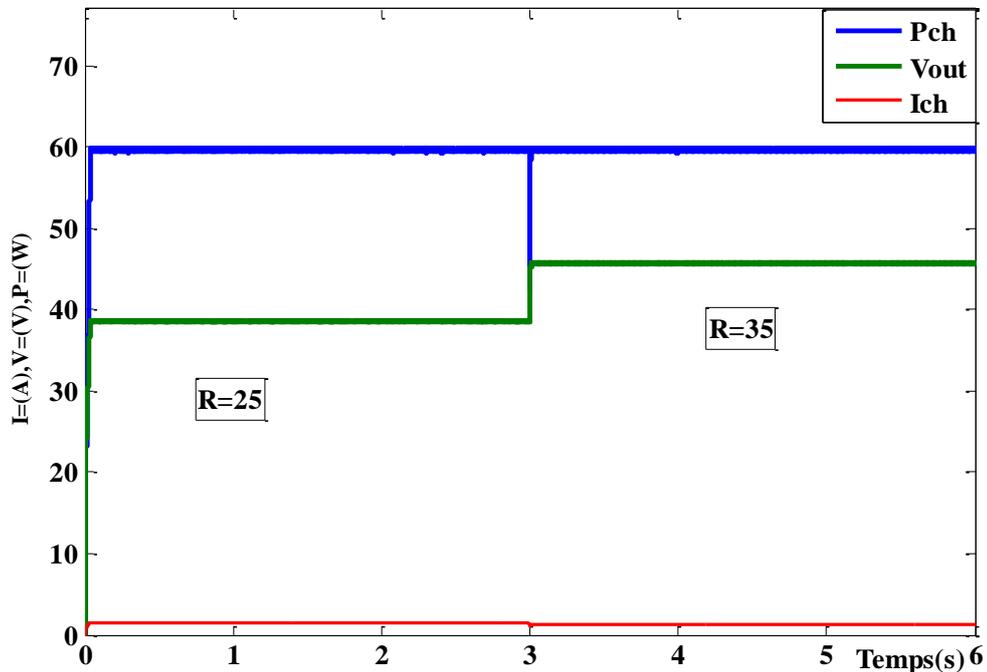


Figure II.14 Caractéristiques du convertisseur ( $I_{ch}$ ,  $V_{out}$  et  $P_{ch}$ ), avec :  $R=25\Omega$  et  $35\Omega$  ;  $G = 1000 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ .

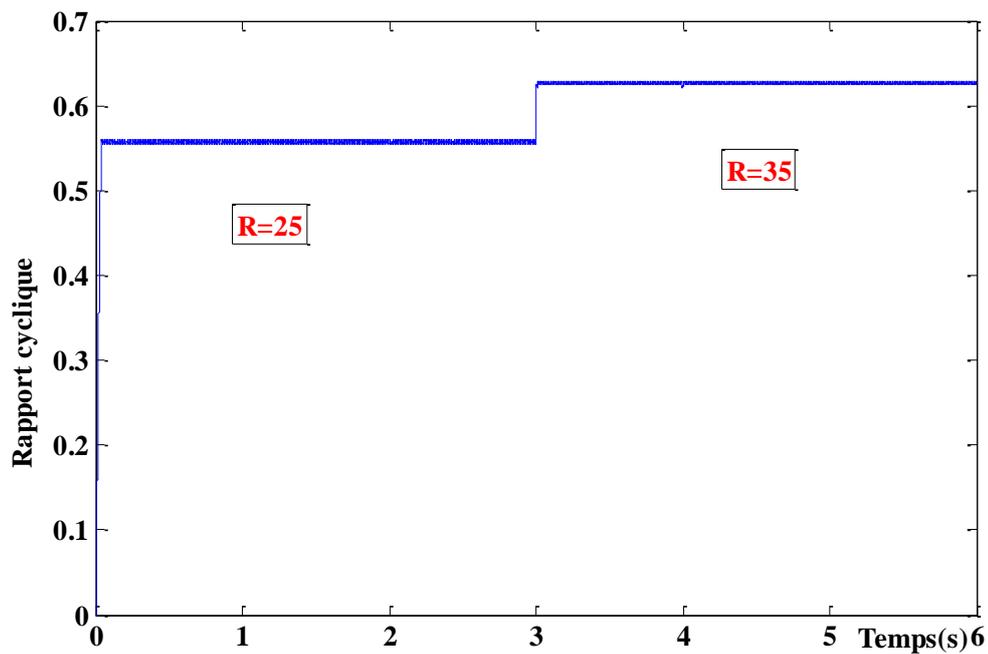


Figure II.15 Rapport cyclique (D), avec :  $R=25\Omega$  et  $35\Omega$  ;  $G = 1000 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ .

Avec :

$V_{pv}$  : Tension du GPV ;

$I_{pv}$  Courant fourni par le PV ;

$P_{pv} = V_{pv} * I_{pv}$  ;

$V_{out}$  : Tension de charge ;

$I_{ch}$  : Courant de charge ;

$P_{ch} = V_{out} * I_{ch}$  ;

D : Rapport cyclique.

### ✚ Interprétation des résultats

À travers les figures (II.7, et 8), on constate :

- L'augmentation de l'éclairement entraîne une augmentation de la puissance et du courant de la sortie du PV et du convertisseur (Boost) ;
- La tension  $V_{pv}$  est presque constante ;
- Il y a une augmentation dans la valeur de la tension  $V_{out}$  ;
- $V_{out}$  est supérieur à  $V_{pv}$  ;
- $I_{pv}$  est supérieur à  $I_{ch}$ ,

À travers les figures (II.10, et 11), on constate :

- L'augmentation de la température entraîne une diminution de la puissance et du courant de la sortie du PV et du convertisseur (Boost) ;
- $V_{out}$  est supérieur à  $V_{pv}$  ;
- $I_{pv}$  est supérieur à  $I_{ch}$  ;
- L'augmentation de la température a un effet négatif sur le système (PV + Boost).

À travers les figures (II.13, et 14), on constate :

- L'apparition de perturbations lors du changement de la valeur de résistance ( $P_{pv}$ ,  $I_{pv}$ ,  $V_{pv}$  et  $P_{ch}$ ) ;
- $P_{pv}$  est égale à  $P_{ch}$  ;
- $V_{out}$  est supérieur à  $V_{pv}$  ;
- $I_{pv}$  est supérieur à  $I_{ch}$ .

À travers les figures (II.13, et 14), on constate :

- Le rapport cyclique varie en fonction de la variation de l'éclairement, de la température et de la résistance.

D'après les figures (II.8, 11 et 14), les tableaux (II.2, 3 et 4) peuvent être donnés comme suit :

**Tableau II.2** Valeurs extraites à la sortie du convertisseur ( $G = 600 \text{ W/m}^2$ ,  $800 \text{ W/m}^2$  et  $1000 \text{ W/m}^2$ ;  $T=25^\circ\text{C}$  et  $R=25\Omega$ )

Temps(S)	0-----2	2-----4	4-----6
R ( $\Omega$ )	25	25	25
$P_{ch}$ (W)	34.82	47.31	59.82
$V_{out}$ (V)	29.52	34.45	38.7
$I_{ch}$ (A)	1.18	1.376	1.547

**Tableau II.3** Valeurs extraites à la sortie du convertisseur ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $50^{\circ}\text{C}$  et  $75^{\circ}\text{C}$  ;  $G=1000\text{w}/\text{m}^2$  et  $R=25\Omega$ )

Temps(S)	0-----2	2-----4	4-----6
R ( $\Omega$ )	25	25	25
P <sub>ch</sub> (W)	59.5	45.53	32
V <sub>out</sub> (V)	38.7	33.72	28.275
I <sub>ch</sub> (A)	1.547	1.349	1.131

**Tableau II.4** Valeurs extraites à la sortie du convertisseur ( $R=25\Omega$  et  $35\Omega$  ;  $G = 1000 \text{ W}/\text{m}^2$  et  $T=25^{\circ}\text{C}$ )

Temps(S)	0-----3	3-----6
R ( $\Omega$ )	25	35
P <sub>ch</sub> (W)	59.75	59.7
V <sub>out</sub> (V)	38.65	45.75
I <sub>ch</sub> (A)	1.548	1.307

## II.11 Conclusion :

Pour améliorer les performances du système photovoltaïque et d'extraction le maximum de puissance ; dans ce chapitre nous avons présenté la définition de la commande MPPT, convertisseur DC-DC et la simulation du système photovoltaïque par la commande MPPT (P&O). À travers les résultats obtenus par simulation, nous avons observé des perturbations dans le système, notamment lorsque la valeur de la résistance change.

Dans le chapitre suivant, nous étudierons la simulation du système photovoltaïque à travers la commande backstepping, et son objectif est d'empêcher les perturbations qui affectent le système photovoltaïque.

# Chapitre III

## *Commande MPPT par Backstepping*

### III.1 Introduction :

La commande backstepping a la capacité d'annuler tous les effets déstabilisants avec une réponse dynamique rapide. Son principe est basé sur la conception itérative d'un contrôleur non linéaire en sélectionnant certaines variables d'état du système comme contrôleurs virtuels. En raison de la nature non linéaire des propriétés électriques de la cellule photovoltaïque et du convertisseur DC-DC, l'utilisation de cette commande est intéressante en raison de ses bonnes propriétés [35].

Dans ce chapitre, nous allons présenter la modélisation et la simulation de la commande backstepping d'un système photovoltaïque, ensuite, nous comparons entre les résultats obtenus par cette commande et par la commande P&O.

### III.2 Historique et principe de la commande backstepping :

Le backstepping inspiré par les travaux de Feurer et Morse d'une part et Tsinias, Kokotovic et Sussmann d'autre part, où il était développé par Kanellakopoulos. Cette commande a été proposée pour résoudre plusieurs problèmes dans les systèmes non linéaires. Il est utilisé dans de nombreuses applications industrielles, notamment dans l'aéronautique [36].

L'idée principale est de calculer la loi de contrôle pour s'assurer que la fonction de Lyapunov est toujours positive et que sa dérivée est toujours négative. Cette méthode consiste à créer des sous-systèmes imbriqués par ordre décroissant. Ensuite, on commence à calculer la fonction de Lyapunov à l'intérieur de la boucle. L'ordre du système est augmenté à chaque étape et la partie instable de l'étape précédente est traitée. Dans la dernière étape, nous trouvons la loi de commande. Celle-ci assure la stabilité du système compensé dans le temps [36].

### III.3 Technique du backstepping :

Le contrôle d'un système non linéaire est souvent une tâche difficile, voire impossible. Le backstepping fournit une méthode systématique de résoudre les problèmes de cette nature. Le backstepping permet, de conserver des valeurs finies du vecteur d'état par la conservation de non-linéarités utiles. Bien que la technique du backstepping soit moderne, les travaux de Kokotovic lui ont permis d'atteindre de nombreuses applications en fournissant un cadre mathématique en établissant des lois de commandes pour les systèmes non linéaires [26].

### III.4 Méthodes de Lyapunov :

La commande des systèmes non linéaires à l'aide de la méthode de Lyapunov est basée sur deux approches. La première s'intéresse au système de commandes linéaire, la seconde assure certaines préférences pour les systèmes en boucle fermée en trouvant une fonction de contrôle de Lyapunov [37].

- **Première méthode de Lyapunov :**

Cette méthode consiste à étudier la stabilité locale sans donner d'informations sur la stabilité globale [37].

- **Deuxième méthode de Lyapunov :**

Cette méthode est basée sur le concept d'énergie dans le système. Son principe est d'analyser la stabilité du système [38].

### III.5 Synthèse de la commande par backstepping :

Selon le schéma du convertisseur DC-DC de la figure II-2 (chapitre II), et grâce aux équations dynamiques de ces convertisseurs (chapitre II), la synthèse de la commande backstepping est donnée comme suit [24] :

- **Etape 1 :**

On a :

$$Z_1 = (x_1 - V_{pvref}) \quad (\text{III.1})$$

La dérivée de l'erreur est décrite comme suit :

$$\dot{Z}_1 = (\dot{x}_1 - \dot{V}_{pvref}) = \frac{1}{C_1} (i_{pv} - x_2) - \dot{V}_{pvref} \quad (\text{III.2})$$

La fonction de Lyapunov est donnée par :

$$V_1(Z_1) = V_1 = \frac{1}{2} Z_1^2 \quad (\text{III.3})$$

La dérivée de la fonction de Lyapunov est représentée comme suit :

$$\dot{V}_1 = Z_1 \dot{Z}_1 = Z_1 \left( \frac{1}{C_1} (i_{pv} - x_2) - \dot{V}_{pvref} \right) \quad (\text{III.4})$$

Un choix judicieux de  $\alpha_1$  permet d'écrire:  $\dot{Z}_1 = -K_1 Z_1$ , donc :  $\dot{V}_1 = -K_1 Z_1^2 \leq 0$

Avec :  $K_1$  : constante positive.

La fonction de stabilisation est donnée par :

$$\alpha_1 = i_{pv} + C_1 (k_1 Z_1 - \dot{V}_{pvref}) \quad (\text{III.5})$$

• **Etape 2 :**

On a :

$$Z_2 = x_2 - \alpha_1 \quad (\text{III.6})$$

Ensuite, les équations du système sont déduites :

$$\dot{Z}_1 = -\frac{1}{C_1} (\alpha_1 + Z_2) + \frac{1}{C_1} i_{pv} - \dot{V}_{pvref} \quad (\text{III.7})$$

$$\dot{Z}_2 = \frac{1}{L} (x_1 - (1 - u_1) V_0) - \dot{\alpha}_1$$

(III.8)

La nouvelle fonction de Lyapunov :

$$V_2(Z_1, Z_2) = V_1 + \frac{1}{2} Z_2^2 \quad (\text{III.9})$$

La dérivée exprimée par :

$$\dot{V}_2(Z_1, Z_2) = \dot{V}_2 = Z_1 \dot{Z}_1 + Z_2 \dot{Z}_2 \quad (\text{III.10})$$

$$\dot{V}_2 = -k_1 Z_1^2 + Z_2 \left( -\frac{1}{C_1} Z_1 + \frac{1}{L} (x_1 - (1 - u_1) V_0) - \dot{\alpha}_1 \right) \quad (\text{III.11})$$

Dans cette étape, la commande  $u_1$  est choisie de manière suivante :

$$\left( -\frac{1}{C_1}Z_1 + \frac{1}{L}(x_1 - (1-u_1)V_0) - \dot{\alpha}_1 \right) = -K_2Z_2 \quad (\text{III.12})$$

L'expression de la commande est donnée par :

$$u_1 = 1 - \frac{1}{V_0} \left[ x_1 - L\dot{\alpha}_1 - L \left( \frac{1}{C_1}Z_1 - K_2Z_2 \right) \right] \quad (\text{III.13})$$

Avec :  $K_2 > 0$  conduit à la dérivée négative de la fonction de Lyapunov :

$$\text{Et : } \dot{V}_2 = -K_1Z_1^2 - K_2Z_2^2 \leq 0$$

### III.6 Simulation d'un système photovoltaïque commandé par backstepping :

Le tableau suivant représente les paramètres de la simulation de contrôleur backstepping et du convertisseur boost DC-DC :

Paramètre	Valeur
C <sub>1</sub>	120e <sup>-6</sup> F
L	25e <sup>-6</sup> H
C <sub>2</sub>	120e <sup>-6</sup> F
R	25 ohms
K <sub>1</sub>	0.6
K <sub>2</sub>	0.6

**Tableau III.1** Paramètres backstepping et convertisseur boost DC-DC.



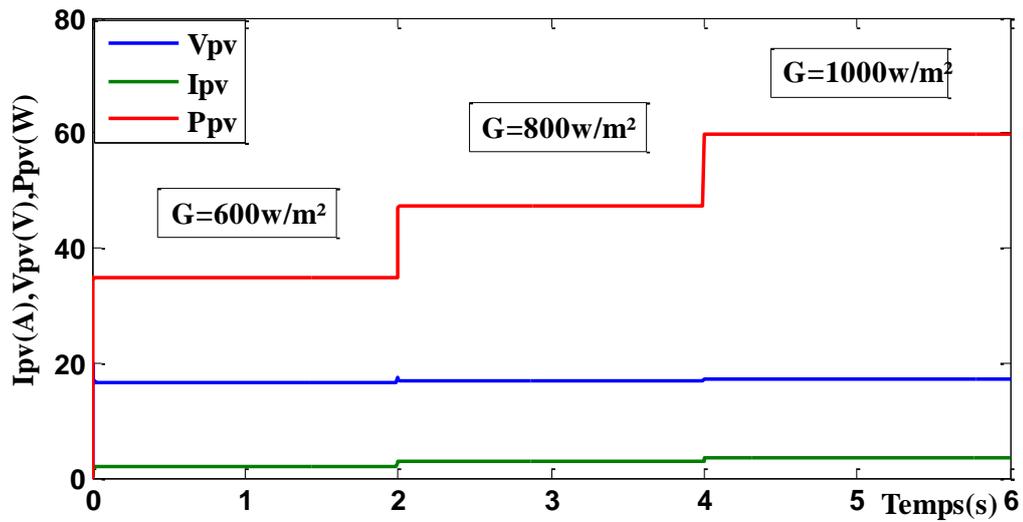


Figure II.2 Caractéristiques du PV ( $I_{pv}$ ,  $V_{pv}$  et  $P_{pv}$ ), avec :  $G = 600 \text{ W/m}^2$ ,  $800 \text{ W/m}^2$  et  $1000 \text{ W/m}^2$  ;  $T=25^\circ\text{C}$  et  $R=25\Omega$ .

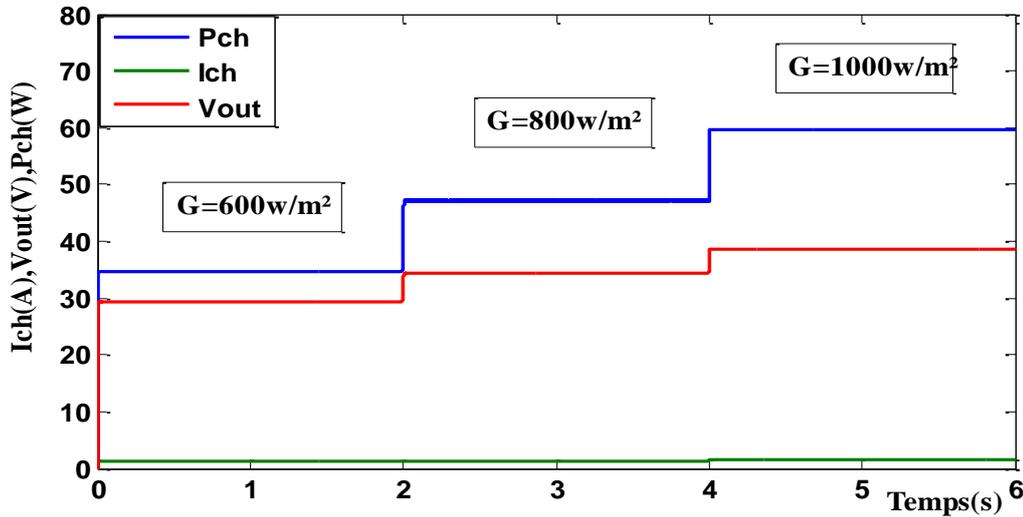


Figure III.3 Sortie du convertisseur ( $I_{ch}$ ,  $V_{out}$  et  $P_{ch}$ ), avec :  $G = 600 \text{ W/m}^2$ ,  $800 \text{ W/m}^2$  et  $1000 \text{ W/m}^2$  ;  $T=25^\circ\text{C}$  et  $R=25\Omega$ .

D'après la figure (III.3), le tableau (III.2) peut être donné comme suit :

Temps(S)	0-----2	2-----4	4-----6
R ( $\Omega$ )	25	25	25
$P_{ch}$ (W)	34.71	47.15	59.68
$V_{out}$ (V)	29.46	34.34	38.68
$I_{ch}$ (A)	1.178	1.374	1.545

Tableau III.2 Valeurs extraites à la sortie du convertisseur ( $G = 600 \text{ W/m}^2$ ,  $800 \text{ W/m}^2$  et  $1000 \text{ W/m}^2$  ;  $T=25^\circ\text{C}$  et  $R=25\Omega$ ).

2<sup>ème</sup> test : Différentes températures ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $50^{\circ}\text{C}$  et  $75^{\circ}\text{C}$ ), avec : éclairement constant =  $1000\text{ W/m}^2$  et R (Résistance =  $25\ \Omega$ ) constante

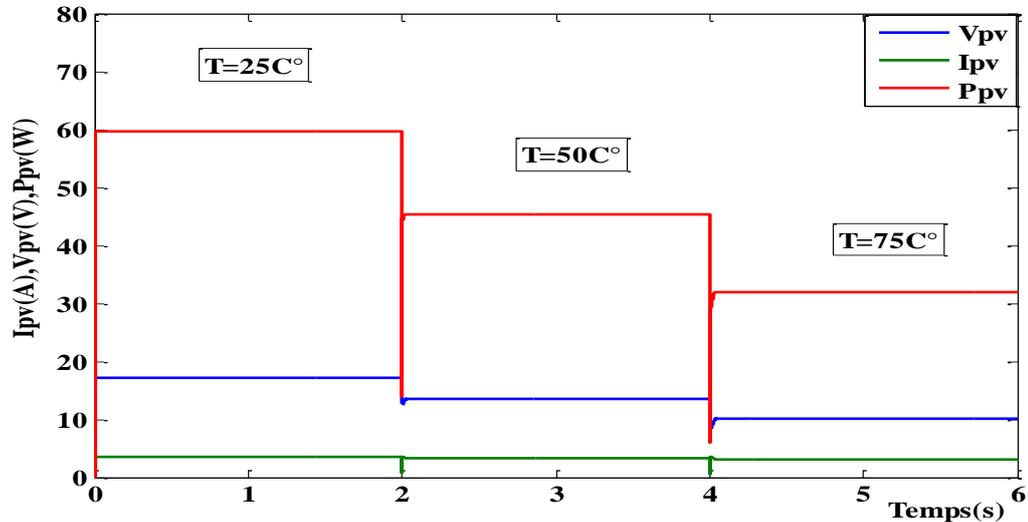


Figure III.4 Caractéristiques du PV ( $I_{pv}$ ,  $V_{pv}$  et  $P_{pv}$ ), avec :  $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $50^{\circ}\text{C}$  et  $75^{\circ}\text{C}$  ;  $G=1000\text{w/m}^2$  et  $R=25\Omega$ .

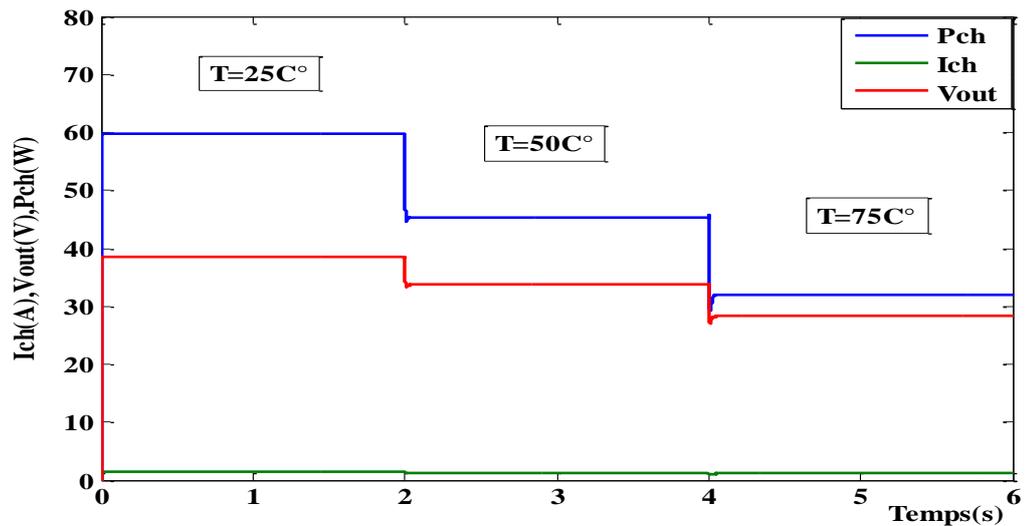


Figure III.5 Sortie du convertisseur ( $I_{ch}$ ,  $V_{out}$  et  $P_{ch}$ ), avec :  $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $50^{\circ}\text{C}$  et  $75^{\circ}\text{C}$  ;  $G=1000\text{w/m}^2$  et  $R=25\Omega$ .

D'après la figure (III.5), le tableau (III.3) peut être donné comme suit :

Temps(S)	0-----2	2-----4	4-----6
R ( $\Omega$ )	25	25	25
$P_{ch}$ (W)	59.68	45.41	31.93
$V_{out}$ (V)	38.63	33.69	28.25
$I_{ch}$ (A)	1.545	1.348	1.13

Tableau III.3 Valeurs extraites à la sortie du convertisseur ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $50^{\circ}\text{C}$  et  $75^{\circ}\text{C}$  ;  $G=1000\text{w/m}^2$  et  $R=25\Omega$ ).

3<sup>ème</sup> test : Différentes R (R=25Ω et 35Ω), avec : éclairement constant = 1000 W/m<sup>2</sup> et température constante = 25 °C.

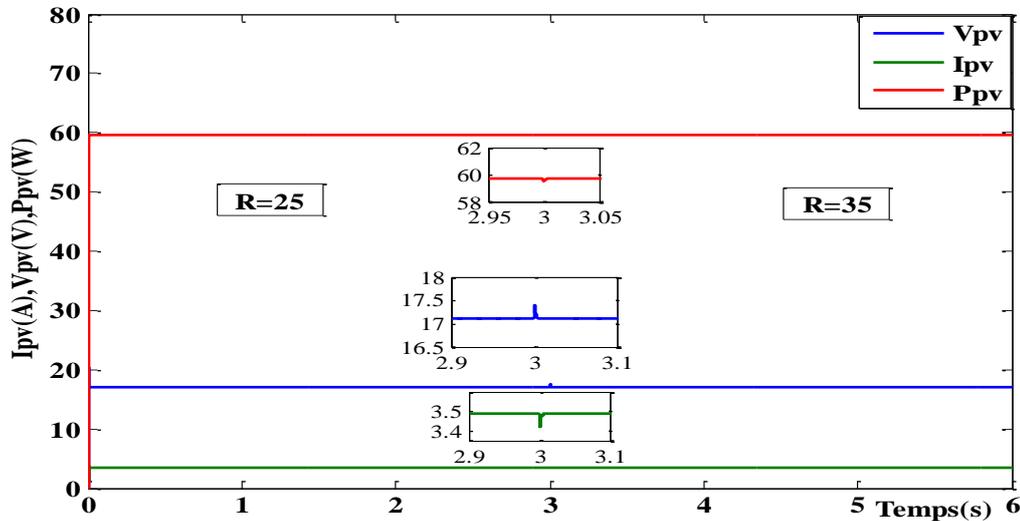


Figure III.6 Caractéristiques du PV ( $I_{pv}$ ,  $V_{pv}$  et  $P_{pv}$ ), avec : R=25Ω et 35Ω ; G = 1000 W/m<sup>2</sup> et T=25°C.

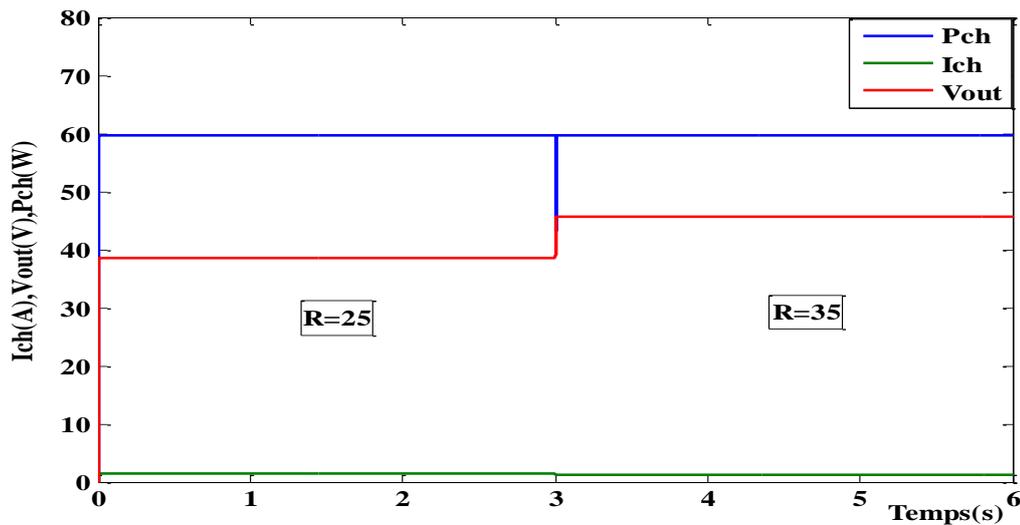


Figure III.7 Sortie du convertisseur ( $I_{ch}$ ,  $V_{out}$  et  $P_{ch}$ ), avec : R=25Ω et 35Ω ; G = 1000 W/m<sup>2</sup> et T=25°C.

D'après la figure (III.7), le tableau (III.4) peut être donné comme suit :

Temps(S)	0-----3	3-----6
R (Ω)	25	35
$P_{ch}$ (W)	59.68	59.68
$V_{out}$ (V)	38.63	45.7
$I_{ch}$ (A)	1.545	1.306

Tableau III.4 Valeurs extraites à la sortie du convertisseur (R=25Ω et 35Ω ; G = 1000 W/m<sup>2</sup> et T=25°C).

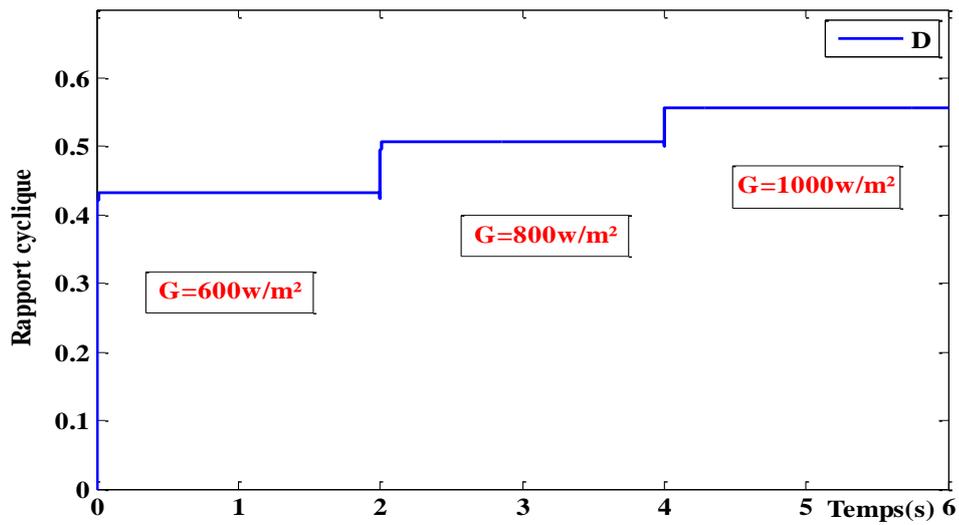


Figure. III.8 Rapport cyclique (D), avec :  $G = 600 \text{ W/m}^2$ ,  $800 \text{ W/m}^2$  et  $1000 \text{ W/m}^2$  ;  $T=25^\circ\text{C}$  et  $R=25\Omega$ .

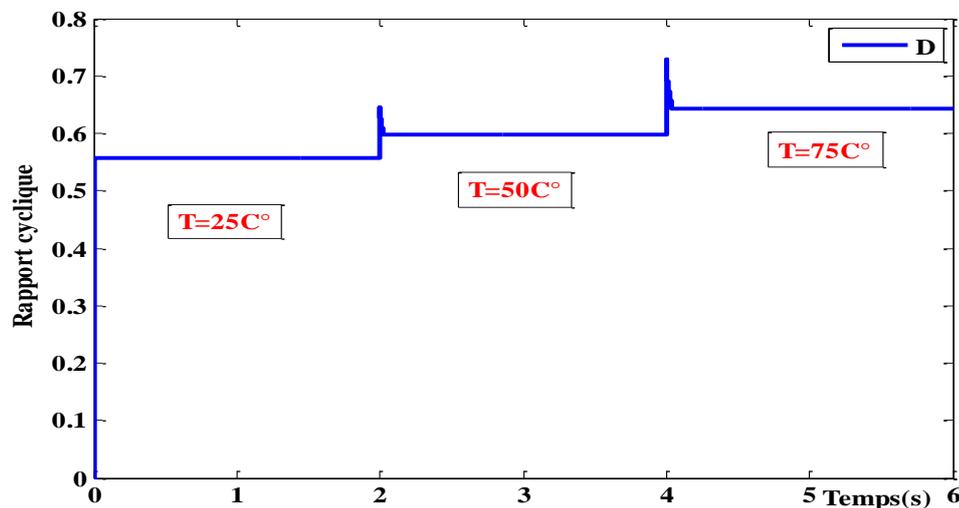


Figure III.9 Rapport cyclique (D), avec :  $T=25^\circ\text{C}$ ,  $50^\circ\text{C}$  et  $75^\circ\text{C}$  ;  $G=1000 \text{ W/m}^2$  et  $R=25\Omega$ .

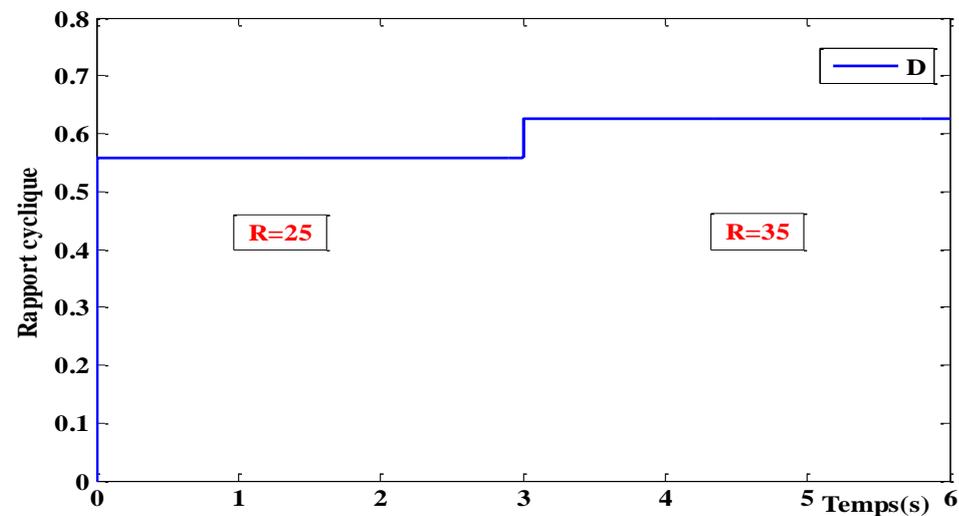


Figure III.10 Rapport cyclique (D), avec :  $R=25\Omega$  et  $35\Omega$  ;  $G = 1000 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ .

✓ **Interprétation des résultats :**

À travers les figures (III.2 à 10), on constate que :

- Les résultats du contrôle backstepping sont presque similaires à ceux du contrôle P&O, mais il y a quelques différences que nous allons voir dans la prochaine partie de la simulation (Comparaison entre les résultats de la simulation de la commande backstepping et la commande P&O).

**II.6.3 Comparaison entre les résultats de la simulation de la commande backstepping et la commande P&O :**

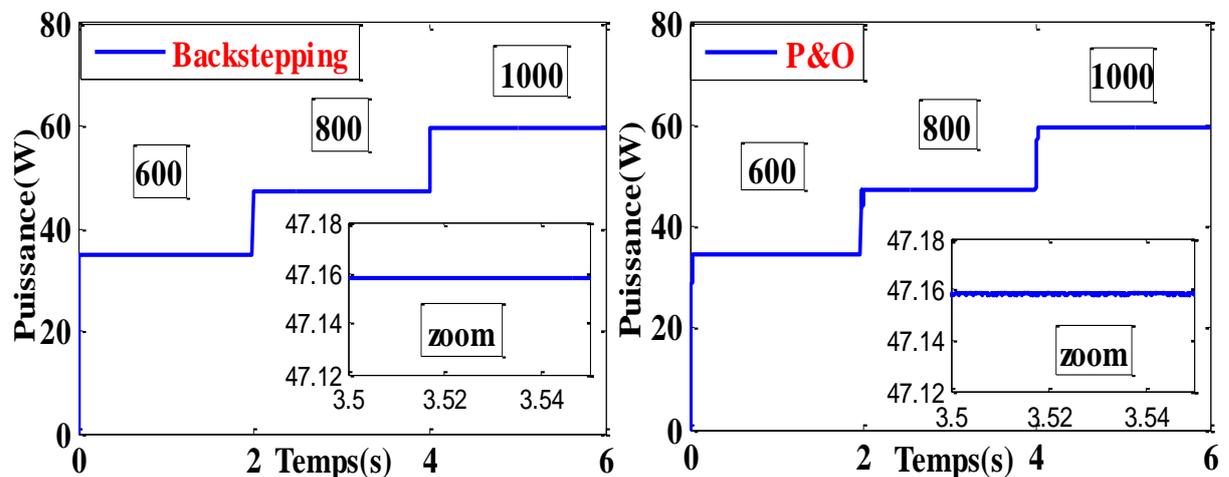


Figure III.11  $P_{pv}$ , avec :  $G = 600 \text{ W/m}^2, 800 \text{ W/m}^2$  et  $1000 \text{ W/m}^2$  ;  $T=25^\circ\text{C}$  et  $R=25\Omega$ .

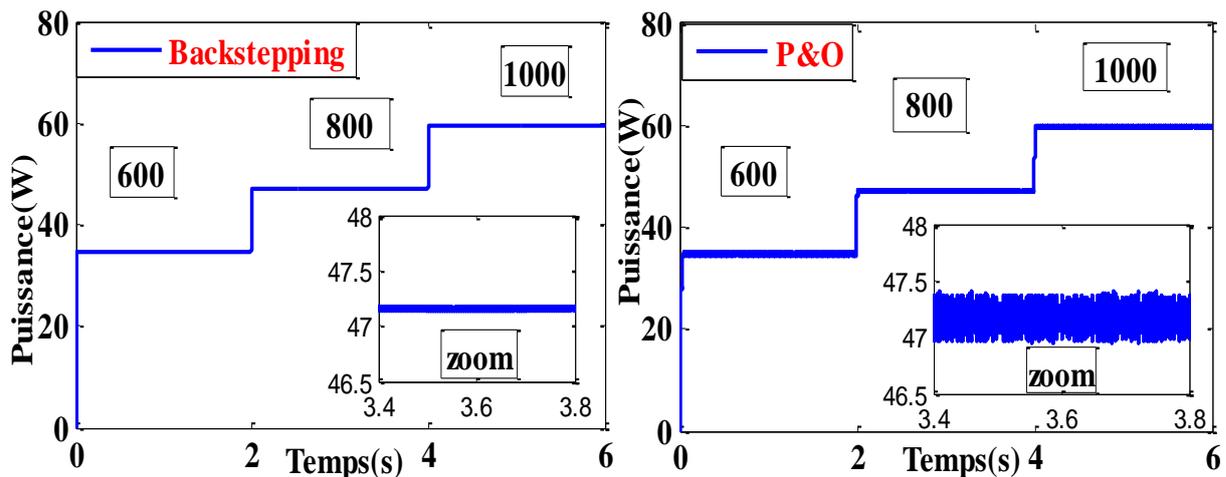


Figure III.12  $P_{ch}$ , avec :  $G = 600 \text{ W/m}^2, 800 \text{ W/m}^2$  et  $1000 \text{ W/m}^2$  ;  $T=25^\circ\text{C}$  et  $R=25\Omega$ .

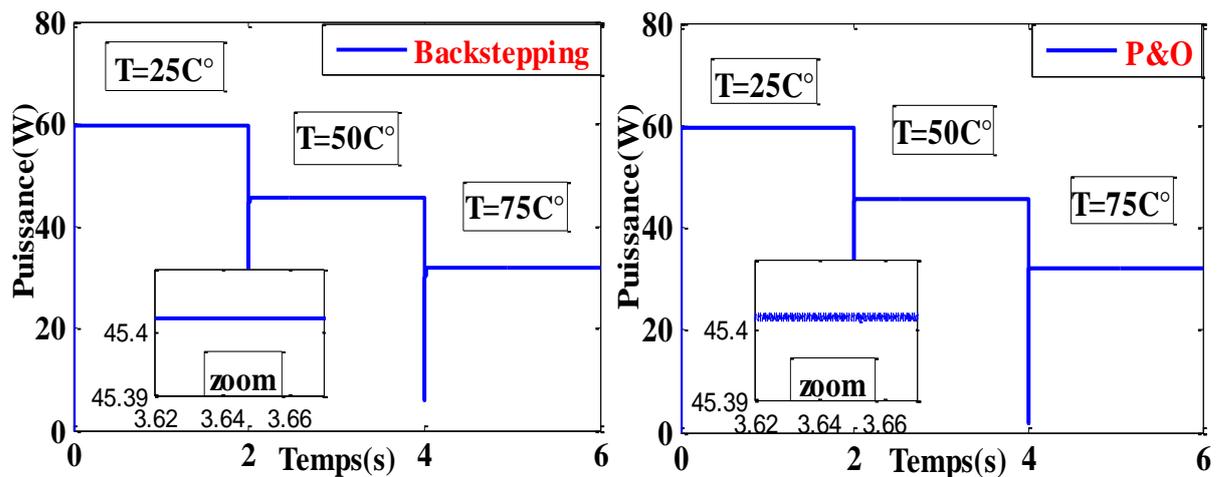


Figure III.13  $P_{pv}$ , avec :  $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $50^{\circ}\text{C}$  et  $75^{\circ}\text{C}$  ;  $G=1000\text{w/m}^2$  et  $R=25\Omega$ .

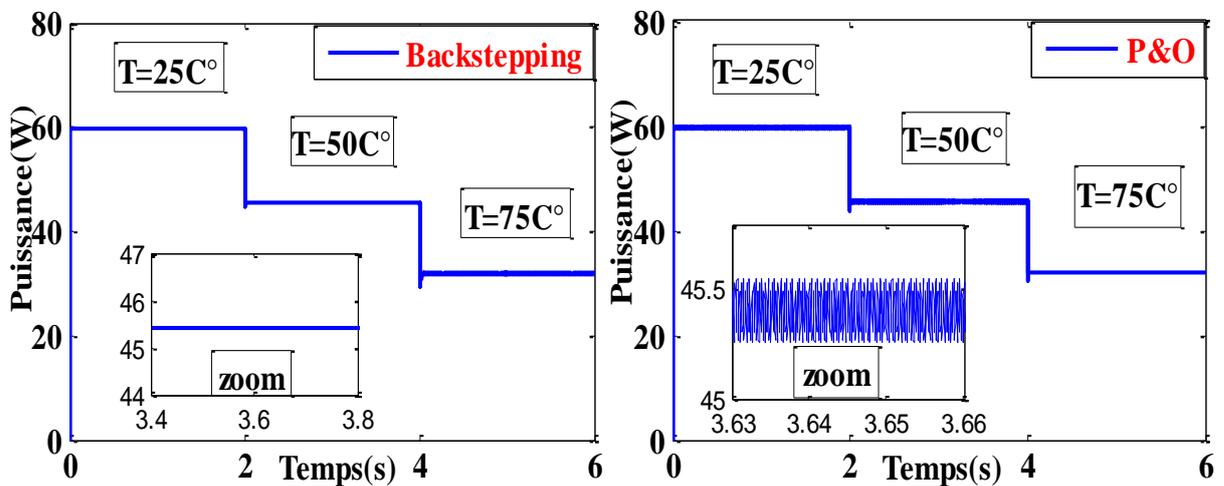


Figure III.14  $P_{ch}$ , avec :  $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $50^{\circ}\text{C}$  et  $75^{\circ}\text{C}$  ;  $G=1000\text{w/m}^2$  et  $R=25\Omega$ .

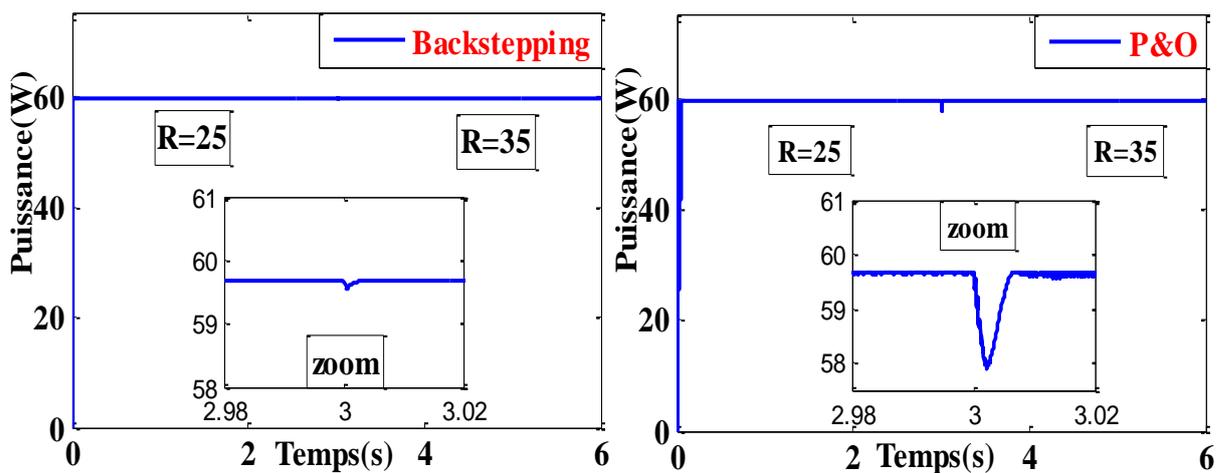


Figure III.15  $P_{pv}$ , avec :  $R=25\Omega$  et  $35\Omega$  ;  $G = 1000 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^{\circ}\text{C}$ .

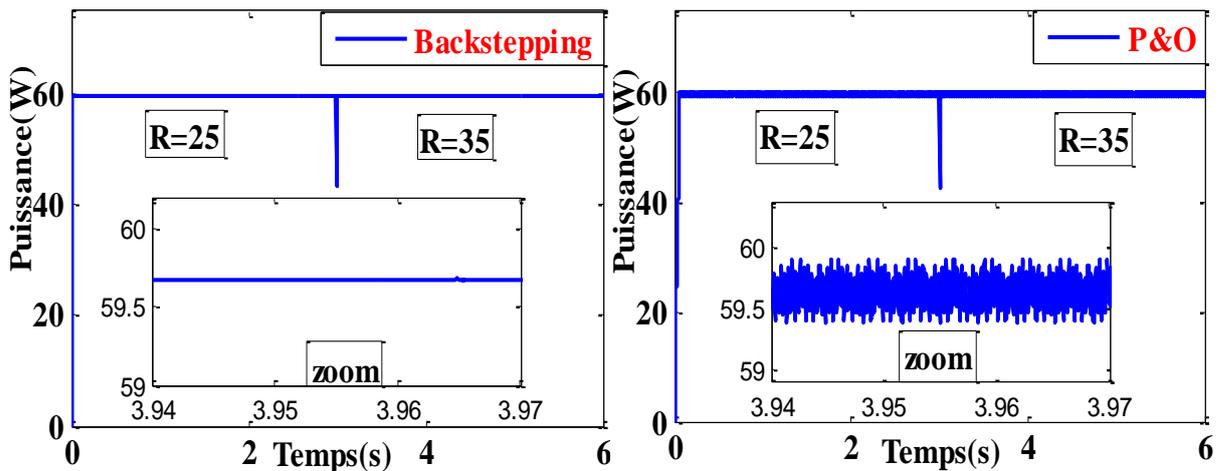


Figure III.16  $P_{ch}$ , avec :  $R=25\Omega$  et  $35\Omega$  ;  $G = 1000 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ .

### ✓ Interprétation des résultats :

Grâce aux résultats de simulation que nous avons obtenus par la commande P&O et la commande backstepping, nous constatons que la précision et la rapidité de réponse dans la commande backstepping sont meilleures que celle de l'algorithme P&O.

La méthode de backstepping permet d'obtenir le point de puissance maximale sans oscillations (seulement de petites oscillations au moment du changement de l'éclairement, de température ou de résistance). L'algorithme backstepping est plus stable que l'algorithme P&O.

### III.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la commande backstepping, afin d'améliorer les performances du système photovoltaïque et d'obtenir le point de puissance maximale de manière très rapide et avec une grande précision. En comparant les résultats obtenus (entre la commande backstepping et P&O), nous avons constaté que la commande backstepping est efficace pour le système photovoltaïque, rapide et fonctionne avec une grande précision sans perturbations.

# **Conclusion Générale**

## *Conclusion générale*

Le soleil émet constamment une grande quantité d'énergie rayonnante, qui peut être convertie en énergie électrique grâce aux cellules photovoltaïques. Les performances du système photovoltaïque doivent être développées et améliorées, afin d'extraire un maximum d'énergie. Afin d'effectuer cette amélioration, nous avons étudié dans ce mémoire la modélisation et la simulation du contrôle MPPT par backstepping.

Dans le premier chapitre nous avons présenté des informations générales sur les systèmes photovoltaïques et expliquer comment convertir le rayonnement solaire en énergie électrique grâce à des cellules solaires. Ensuite, nous avons modélisé et simulé les panneaux solaires, où nous avons observé que les changements climatiques affectent les performances du PV.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté, le principe du contrôle MPPT par Perturbation et Observation (P&O). Ensuite, nous avons modélisé et simulé le système PV via le contrôle MPPT (P&O) et nous avons constaté que le système est soumis à des perturbations affectant sa stabilité.

Après dans le troisième chapitre, nous avons utilisé la commande MPPT par backstepping. Puis nous avons comparé les résultats de la simulation, nous avons remarqué que la technique P&O extrait la puissance maximale dans le PV, mais avec certains inconvénients tels que des oscillations autour de la courbe de puissance. La commande par backstepping a donné de bons résultats avec une grande précision.

Enfin, pour l'amélioration de ce modeste travail, nous suggérons quelques perspectives à savoir :

- Autres méthodes MPPT : logique floue, commande par mode glissant ... ;
- L'implémentation pratique.

# **Références Bibliographiques**

## Références Bibliographiques

---

- [1] H. REJDAL, "Optimisation du fonctionnement d'un champ photovoltaïque sous des conditions d'ombrage partiel," Mémoire Master, Université Mohamed Seddiki Ben Yahia – Jijel, 09/11/2020.
- [2] K. Behih and H. Attoui, "Backstepping Terminal Sliding Mode MPPT Controller for Photovoltaic Systems," Article, Engineering, Technology & Applied Science Research Vol. 11, No. 2, 2021, 7060-7067 7060.
- [3] M. A. Yildirim and M. Nowak-Ocłó'n, "Modified Maximum Power Point Tracking Algorithm under Time-Varying Solar Irradiation," Article, Department of Energy, Cracow University of Technology, 31-864 Kraków, Poland.
- [4] M. El Azzaoui, H. Mahmoudi, and K. Boudaraia, "Backstepping Control of Wind and Photovoltaic Hybrid Renewable Energy System," Article, International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS) Vol. 7, No. 3, September 2016, pp. 677 – 686 ISSN : 2088-8694.
- [5] M. Bouzegane et F. Gaouaoui, "Alimentation d'un moteur à courant continu par une source photovoltaïque," Mémoire Master Académique, Université M. Mammeri De Tizi-Ouzou, 2018.
- [6] D. Boukhers, "optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au Pompage," Mémoire Magister Université M. de Constantine, 2007.
- [7] M. Belmadi et Y. Abid Taha, "Étude Technico-économique d'une installation photovoltaïque autonome," Mémoire Master Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2017.
- [8] F. Hananou et A. Rouabah, "Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque," Mémoire Master Académique, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2014.
- [9] Mme MENASSEL Née HALOUI HAFSIA, "Contribution à la conception et modélisation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique à base de cellules solaires en couches minces," Mémoire Doctorat Université d'oum el bouagi.
- [10] B. Déodat, D. Lucien, D. Adrien et G. Simon, "Etudes des cellules photovoltaïques," Lycée Jean Monnet-Annemasse (74).
- [11] A. Nechmi, "aperçu sur le système de pompage photovoltaïque destiné pour l'alimentation en eau potable," Mémoire Master, Ecole Nationale Supérieure d'hydraulique -arbaoui abdellah-, 2015.
- [12] A. Alouane, "Modélisation du transfert radiatif dans les strates supérieures d'un module photovoltaïque," Mémoire Master, Université M'Hamed Bougera Boumerdes, 2017.
- [13] K. Amara, "Contribution à l'étude de conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (1MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension," Mémoire magister Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou ,2014/2015.
- [14] K. Ouabdelkader et H. Mersel, "Modélisation et Contrôle d'un Système Photovoltaïque Connecté au Réseau," Mémoire Master Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2014/2015.
- [15] S. Belaid Lalouni, "Energie Solaire Photovoltaïque, " Cours, Université A. Mira de Bejaia Année universitaire, 2014/2015.
- [16] P. A. Ndiaye et K. Achari, "Production d'énergie électrique à partir d'un système photovoltaïque," Mémoire Master académique Université 8 Mai 1945 – Guelma, 2018/2019.
- [17] : H. Meghellet et L. Hocine, "Contribution à l'étude d'un système photovoltaïque," Mémoire Master Université Colonel Akli Mohand-Oulhadj Bouira, 2018.
- [18] N. E. Touil et S. Ghenbazi, "Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque," Mémoire Master académique Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued, 2015.
- [19] N. Fellah et O. Sidibe, "Etude et dimensionnement de l'installation photovoltaïque," Mémoire Master, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, 2018/ 2019.
- [20] S. Motahhir, A. E. Ghzizal et Aziz Derouich. "Modélisation et commande d'un panneau photovoltaïque dans l'environnement PSIM," Article, Congrès International de Génie Industriel et Management des Systèmes, May 2015, fès, Maroc. Hal-01351493f

## Références Bibliographiques

---

- [21] : M. L.Louazene, "Contribution à l'optimisation des systèmes photovoltaïques utilisés pour l'irrigation dans les zones sahariennes – Application zone de Ouargla," Mémoire Doctorat, université el hadj lakhdar – batna, 2015.
- [22] A. Youcef, "Contribution à l'Optimisation des Performances d'un Générateur photovoltaïque en Présence d'Ombrage Partiel," Mémoire Doctorat, Université Djilali liabes de Sidi-Bel-Abbès, 2017.
- [23] f. Benadel, "Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour Système PV," Mémoire Master, université Mohamed Boudiaf - m'sila, 2015/ 2016.
- [24] A. Taouni, A. Abbou, M. Akherraz, A. O. Mohammadia, "MPPT Design for Photovoltaic System using Backstepping Control with Boost Converter," Article, School ofEngineers EMI Université of Mohammed V Agdal Rabat, Morocco et Radouane Majdouli L.A.S.T.I, Université HASSAN ler, Faculty of sciences and technology of Settat Settat, Morocco.
- [25] A. Belkaid, " Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome," Mémoire Doctorat en sciences Université Ferhat Abbas – Sétif, 2015.
- [26] A. Boudia, "Contribution à l'étude d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique avec un système de stockage à base d'une inductance supraconductrice (SMES)," Mémoire Doctorat, université Mohamed Boudiaf - M'silla 2020.
- [27] D. Cortes-Vega, H. Alazki and J. Luis Rullan-Lara, "Current Sensorless MPPT Control for PV Systems Based on Robust Observer," Article, Faculty of Engineering, Universidad Autonoma del Carmen, Ciudad del Carmen 24180, Campeche, Mexico.
- [28] S. Salman, Xin AI and Zhouyang WU, "Design of a P-&O algorithm based MPPT charge controller for a stand-alone 200W PV system," Article, Salman et al. Protection and Control of Modern Power Systems (2018) 3 :25 <https://doi.org/10.1186/s41601-018-0099-8>.
- [29] CH. Houiche, et L. Faid, "Commande MPPT intelligente d'une classe de systèmes photovoltaïques," Mémoire Master Professionnel, université Mohamed boudiaf - m'sila, 2020 /2021.
- [30] : M. Ahmed Sais, " Fuzzy Logic Control of MPPT Controller for PV Systems," Article, A Thesis submitted to School of Graduate Studies in Partial fulfillment of the Requirements for the degree of Master of Engineering Faculty of Engineering and Applied Science Memorial Université of Newfoundland, May 2017, St. John's, Newfoundland, Canada.
- [31] M. Ghebbache, " stratégies de commande d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique dans le but d'optimiser la qualité de l'énergie," Mémoire présenté à l'université du québec à trois-rivières, juillet 2019.
- [32] H. Roubi, H. Aib, "Amélioration de la commande MPPT d'un système Photovoltaïque par backstepping," Mémoire Master Académique Université Mohamed boudiaf - m'sila, 2018 /2019.
- [33] H.E.A. Ibrahim and M. Ibrahim, "Comparison Between Fuzzy and P&O Control for MPPT for Photovoltaic System Using Boost Converter," Article, Journal of Energy Technologies and Policy ISSN2224-3232 (Paper) ISSN 2225-0573 (Online) Vol.2, No.6, 2012.
- [34] A. Hakoumi et A. Benamar, "Commande MPPT et contrôle d'un système photovoltaïque 3KW par la logique floue," Mémoire Master, Université Ahmed Draia Adrar, 2018/ 2019.
- [35] R. Khan, L. Khan, S. Ullah, Irfan Sami and Jong-Suk Ro, " Backstepping Based Super-Twisting Sliding Mode MPPT Control with Differential Flatness Oriented Observer Design for Photovoltaic System," Article, Basel, Switzerland, 2020.
- [36] H. Benadda, "Application des commandes non linéaires avec observateur d'un robot manipulateur," Mémoire Magister, Université Mohamed Boudiaf d'Oran.
- [37] H. Takabait et H. Amara, "Commande par Backstepping d'un moteur asynchrone alimenté par un onduleur à trois niveaux," Mémoire Master, Université Abderrahmane Mira – Bejaia, 2020.
- [38] B. Boukhoudem et M. Layaida, "Commande par backstepping d'un convertisseur DC - DC entrelacée," Mémoire Master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2018/2019.