

Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

## Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electronique

Spécialité : Instrumentation

### Thème

Modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque

**Préparé par :**

- IDIR Massinissa
- MADJI Khaled

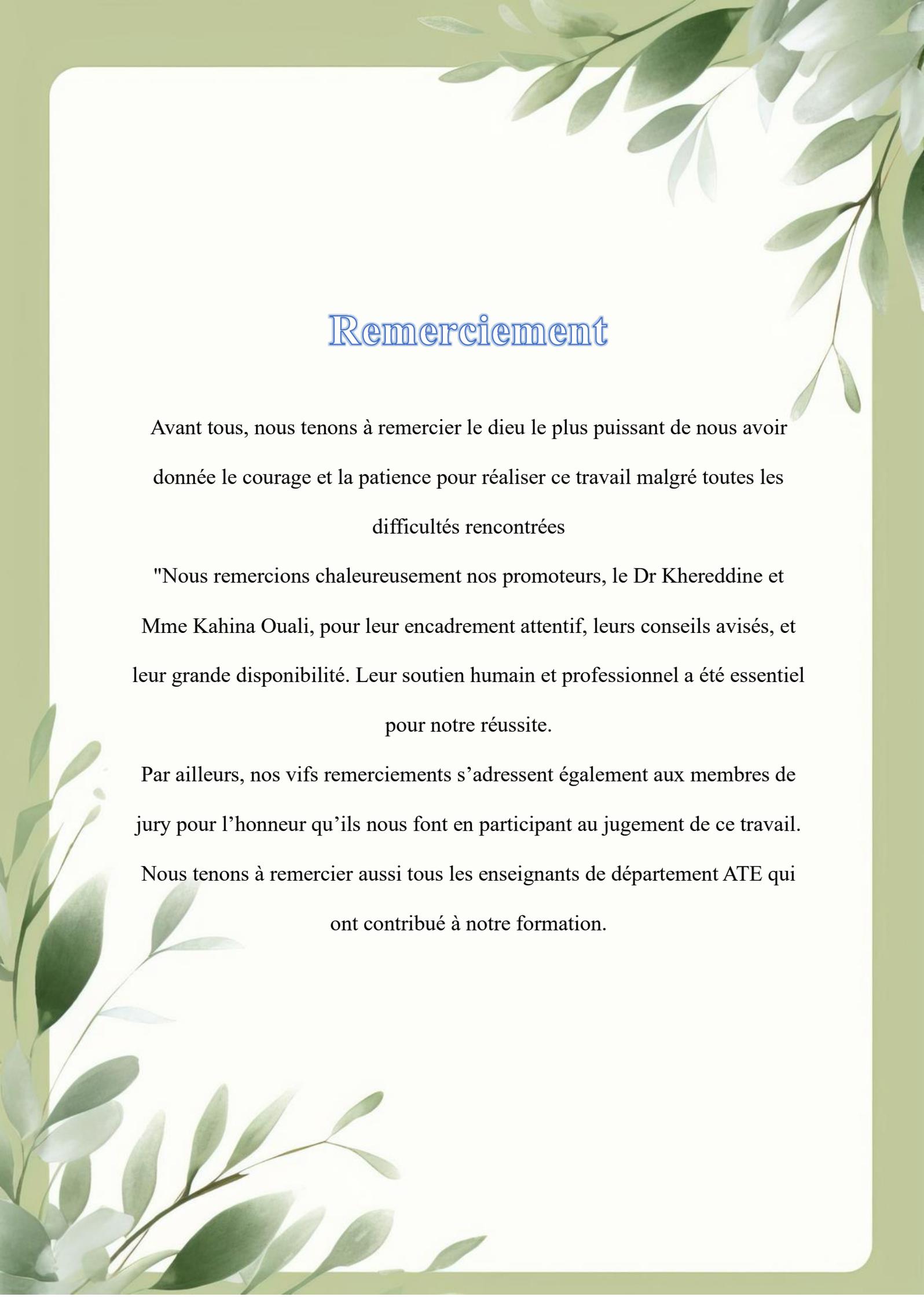
**Dirigé par :**

Mme. OUALI  
M. KHIREDDINE

**Examiné par :**

Mme. MALOUM  
M. LAHRECHE

Année universitaire : 2023/2024



## Remerciement

Avant tous, nous tenons à remercier le dieu le plus puissant de nous avoir donnée le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées

"Nous remercions chaleureusement nos promoteurs, le Dr Khereddine et Mme Kahina Ouali, pour leur encadrement attentif, leurs conseils avisés, et leur grande disponibilité. Leur soutien humain et professionnel a été essentiel pour notre réussite.

Par ailleurs, nos vifs remerciements s'adressent également aux membres de jury pour l'honneur qu'ils nous font en participant au jugement de ce travail.

Nous tenons à remercier aussi tous les enseignants de département ATE qui ont contribué à notre formation.



## Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À mes chers parents, que dieu veille sur eux et les protège en leur offrant son soutien moral et financier, ses encouragements et ses sacrifices

À mes chers frères.

À mes chères sœurs.

À mon binôme Madji Khaled pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.



## Dédicace

À ma mère et mon père, pour l'éducation qu'ils m'ont prodiguée  
avec tous les moyens et au prix de tous les sacrifices qu'ils ont  
consentis à mon égard, pour le sens du devoir qu'ils m'ont enseigné  
depuis mon enfance.

À ma chère sœur,

À mes chers frères.

À tous mes amis et collègues que j'ai pu connaître depuis mon  
enfance,

Je vous dédie ce modeste travail.

**Table des matières**

Introduction générale..... 1

I.1. Introduction..... 3

I.2. L'énergie solaire..... 3

    I.2.1 Rayonnement solaire ..... 4

    I.2.2 Spectre solaire ..... 4

I.3. La conversion photovoltaïque..... 5

    I.3.1 Historique ..... 5

    I.3.2 l'effets photovoltaïque..... 6

    I.3.3. Semi-conducteurs ..... 7

    I.3.4 Les principaux matériaux semi-conducteurs photovoltaïques ..... 7

    I.3.5. Dopage de silicium..... 8

        I.3.5.1 Dopage de type N ..... 9

        I.3.5.2. Dopage de type P ..... 9

    I.3.6. Jonction P-N..... 10

I.4. Cellules photovoltaïques ..... 11

    I.4.1. Description d'une cellule PV ..... 11

    I.4.2 Principe de fonctionnement d'une cellule PV ..... 12

    I.4.3. Caractéristiques d'une cellule solaire ..... 13

I.5. Différents types des cellules photovoltaïques ..... 14

    I.5.1. Cellules monocristallines ..... 15

    I.5.2. Cellules Poly-cristalline ..... 15

    I.5.3. Cellules amorphes ..... 16

    I.5.4. Autres types de cellules solaires..... 17

I.6. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïques..... 17

I.7. Conclusion ..... 18

II.1. Introduction ..... 20

II.2. Générateur photovoltaïque.....	20
II.2.1. Module Photovoltaïque .....	20
II.2.2. Groupement des cellules solaires .....	20
➤ Groupement en série .....	20
➤ Groupement en parallèle.....	21
➤ Groupement mixte .....	22
II.2.3. Champ photovoltaïque .....	22
II.3. Protection des modules photovoltaïques .....	23
II.3.1. Diode By-pass .....	23
II.3.2. Diode Anti-retour .....	24
II.4. Modélisation du générateur photovoltaïque .....	25
II.4.1. Modèle à une diodes .....	25
II.4.1.a. Modèle à trois paramètres (L3P) .....	25
II.4.1.b. Modèle à quatre paramètres (L4P) .....	27
II.4.1.c. Modèle à cinq paramètres (L5P) .....	28
II.4.2. Modèles à deux diodes.....	30
II.4.2.a. Modèle à cinq paramètres (2M5P) .....	30
II.4.2.b. Modèle à Six paramètres (2M6P).....	31
II.4.2.c. Modèle à Sept paramètres (2M7P) .....	31
II.5. Conclusion .....	33
III.1. Introduction .....	34
III.2. Simulation du module photovoltaïque .....	34
III.2.1. Simulation du module photovoltaïque le modèle à une diode.....	34
III.2.1.1. Résultat de simulation.....	35
III.2.2. Simulation du module photovoltaïque le modèle à deux diodes .....	45
III.2.2.1. Résultat de Simulation .....	46

III.2.3. Comparaison entre les deux modèles de panneaux solaires $G=1000 \text{ W/m}^2$ $T=25^\circ\text{C}$ ]	
.....	51
III.3. Conclusion.....	53
IV.1. Introduction .....	54
IV.2. Introduction d'un étage d'adaptation.....	55
IV.2.1. Convertisseur statique (Hacheur Boost) .....	55
IV.3. La commande MPPT .....	58
IV.3.1. Algorithme de perturbation et observation .....	58
IV.3.2. La méthode d'incrément de conductance (IncCond).....	60
IV.4. Simulation du convertisseur Boost.....	62
IV.5. Simulation des méthodes MPPT.....	63
IV.5.1 Modèle a une diode.....	63
IV.5.1.a Simulation du système photovoltaïque avec MPPT (P&O).....	63
IV.5.1.b Simulation du système PV avec MPPT (INC) .....	70
IV.5.2 Modèle a deux diodes .....	77
IV.5.2.1.a Résultat de simulation avec l'algorithme (P&O) .....	77
IV.5.3. Comparaison entre les deux modèle (méthode P&O).....	80
IV.6. Conclusion.....	82

## Liste des Figures :

### Chapitre I :

<b>Figure I. 1 :</b> Répartition spectrale du rayonnement solaire .	5
<b>Figure I. 2 :</b> Structure d'un semi-conducteur intrinsèque.	7
<b>Figure I. 3 :</b> Emplacement des matériaux photovoltaïques dans le tableau périodique.	8
<b>Figure I. 4 :</b> Silicium dopé au Phosphore a) $T=0$ °K. b) $T\neq 0$ °K.	9
<b>Figure I. 5 :</b> Silicium dopé au Bore	10
<b>Figure I. 6 :</b> Illustration de principe et diagramme de bande d'une jonction P-N à l'équilibre La jonction P-N est un composant contenant deux régions (région dopé N et région dopé P).	10
<b>Figure I. 7 :</b> Coupe transversale de la cellule solaire .	12
<b>Figure I. 8 :</b> Figure d'une cellule photovoltaïque.	12
<b>Figure I. 9 :</b> Caractéristiques I(V), d'un module PV (MPP).	13
<b>Figure I. 10 :</b> Cellule photovoltaïque (monocristalline).	15
<b>Figure I. 11 :</b> Cellule PV poly-crystalline.	16
<b>Figure I. 12 :</b> Couche mince	17

### Chapitre II :

<b>Figure II. 1 :</b> a) Association en série de ns cellules solaires b) Caractéristique I(V) .	21
<b>Figure II. 2 :</b> a) Association en parallèle de np cellules solaire b) Caractéristique I(V).	21
<b>Figure II. 3 :</b> a) Association mixte de np branches et de ns modules composés de cellule identiques. b) Caractéristique I(V).	22
<b>Figure II. 4 :</b> De la cellule au champ photovoltaïque	23
<b>Figure II. 5 :</b> Mise en série de cellules PV dans le module avec les deux diodes by-pass. ....	24
<b>Figure II. 6 :</b> Rôle de la diode anti-retour .	24
<b>Figure II. 7 :</b> Schéma block du générateur photovoltaïque.	25
<b>Figure II. 8 :</b> Schéma équivalent d'une cellule PV, Modèle à une diode avec trois paramètres	26
<b>Figure II. 9 :</b> Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode avec quatre paramètres.	27
<b>Figure II. 10 :</b> Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode avec cinq paramètres	28

<b>Figure II. 11</b> : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes avec cinq paramètres .	30
<b>Figure II. 12</b> : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes avec six paramètres .	31
<b>Figure II. 13</b> : Schéma équivalent d'une cellule Modèle à deux diodes avec sept paramètres	32

### Chapitre III :

<b>Figure III. 1</b> : Schéma bloc de simulation du module photovoltaïque.	35
<b>Figure III. 2</b> : Caractéristique puissance- tension.	36
<b>Figure III. 3</b> : Caractéristique courant -tension.	36
<b>Figure III. 4</b> : Caractéristique courant tension pour différentes valeurs d'éclairement à température constante (25°C).	37
<b>Figure III. 5</b> : Caractéristique puissance tension pour différentes valeurs d'éclairement à température constante (25°C).	38
<b>Figure III. 6</b> : Caractéristique courant -tension à 1000W/ m <sup>2</sup> .	39
<b>Figure III. 7</b> : Caractéristique puissance- tension à 1000W/m <sup>2</sup> .	40
<b>Figure III. 8</b> : Effet de la résistance shunt sur les caractéristique I(V).	41
<b>Figure III. 9</b> : Effet de la résistance shunt sur les caractéristique P(V).	42
<b>Figure III. 10</b> : L'influence de la résistance série (Rs) sur la caractéristique I (V) du panneau PV.	43
<b>Figure III. 11</b> : L'influence de la résistance série (Rs) sur la caractéristique P(V) du panneau PV.	43
<b>Figure III. 12</b> : Effet du facteur d'idéalité de la diode sur les caractéristiques I(V).	44
<b>Figure III. 13</b> : Effet du facteur d'idéalité de la diode sur les caractéristiques P(V).	45
<b>Figure III. 14</b> : Bloc de simulation sous l'environnement Matlab/Simulink.	46
<b>Figure III. 15</b> : Caractéristique courant -tension.	47
<b>Figure III. 16</b> : Caractéristique courant -tension.	47
<b>Figure III. 17</b> : Caractéristique courant tension pour différentes valeurs d'éclairement à température constante (25°C).	48
<b>Figure III. 18</b> : Caractéristique puissance tension pour différentes valeurs d'éclairement à température constante (25°C).	49
<b>Figure III. 19</b> : Caractéristique courant -tension à 1000W/ m <sup>2</sup> .	50
<b>Figure III. 20</b> : Caractéristique puissance- tension à 1000W/m <sup>2</sup> .	50

**Figure III. 21** : Caractéristique  $I_{pv}=f(V_{pv})$  pour  $G=1000 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ ..... 51

**Figure III. 22** : Caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$  pour  $G=1000 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ ..... 52

**Chapitre IV :**

**Figure IV. 1** : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT [30].  
..... 54

**Figure IV. 2** : Schéma électrique de base du convertisseur Boost. .... 55

**Figure IV. 3** : Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est fermé. .... 56

**Figure IV. 4** : Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est ouvert..... 57

**Figure IV. 5** : Caractéristique P-V selon la méthode P&O. .... 58

**Figure IV. 6** : Organigramme de l'algorithme perturbation et observation (P&O)..... 59

**Figure IV. 7** : Organigramme de l'algorithme Incrémentale Conductance (INC). .... 61

**Figure IV. 8** : Schéma de simulation Boost-Charge. .... 62

**Figure IV. 9** : Tension d'entrée et de sortie du convertisseur Boost..... 62

**Figure IV. 10** : Schéma de simulation du système PV avec MPPT (P&O)..... 63

**Figure IV. 11** : Structure de l'Algorithme P&O. .... 63

**Figure IV. 12** : La puissance générée par le module photovoltaïque. .... 64

**Figure IV. 13** : La puissance de sortie du convertisseur. .... 64

**Figure IV. 14** : La tension générée par le module photovoltaïque. .... 65

**Figure IV. 15** : La tension de sortie du convertisseur. .... 65

**Figure IV. 16** : Le courant générée par le module photovoltaïque..... 66

**Figure IV. 17** : Le courant de sortie du convertisseur. .... 66

**Figure IV. 18** : Courbe de variation d'éclairement..... 67

**Figure IV. 19** : Courbe puissance générée par le module photovoltaïque..... 68

**Figure IV. 20** : Courbe puissance de sortie du convertisseur. .... 68

**Figure IV. 21** : Courbe de variation de la Température. .... 69

**Figure IV. 22** : Courbe puissance générée par le module photovoltaïque..... 69

**Figure IV. 23** : Courbe puissance de sortie du convertisseur. .... 70

**Figure IV. 24** : Schéma de simulation du système PV avec MPPT (INC)..... 71

**Figure IV. 25** : Structure de l'Algorithme INC. .... 71

**Figure IV. 26** : La puissance générée par le module photovoltaïque. .... 72

**Figure IV. 27** : La puissance de sortie du convertisseur..... 72

**Figure IV. 28** : Résultats de simulation de la tension générée par le module photovoltaïque. 73

**Figure IV. 29** : Résultats de simulation de sortie du convertisseur. .... 73

<b>Figure IV. 30</b> : Le courant générée par le module photovoltaïque.....	74
<b>Figure IV. 31</b> : Le courant de sortie du convertisseur. ....	74
<b>Figure IV. 32</b> : Courbe puissance générée par le module photovoltaïque.....	75
<b>Figure IV. 33</b> : Courbe puissance de sortie du convertisseur. ....	75
<b>Figure IV. 34</b> : Courbe puissance générée par le module photovoltaïque.....	76
<b>Figure IV. 35</b> : Courbe puissance de sortie du convertisseur. ....	76
<b>Figure IV. 36</b> : La puissance générée par le module photovoltaïque. ....	77
<b>Figure IV. 37</b> : La puissance de sortie du convertisseur.....	78
<b>Figure IV. 38</b> : Le courant générée par le module photovoltaïque.....	78
<b>Figure IV. 39</b> : Courbe puissance générée par le module photovoltaïque.....	79
<b>Figure IV. 40</b> : Courbe puissance générée par le module photovoltaïque.....	79
<b>Figure IV. 41</b> : La puissance générée par le module photovoltaïque a une diode.....	80
<b>Figure IV. 42</b> : La puissance générée par le module photovoltaïque a deux diodes. ....	81

**Liste des Tableaux :**

**Chapitre I :**

<b>Tableau I. 1</b> : Gap de différents matériaux photovoltaïques. ....	8
<b>Tableau I. 2</b> : Comparatif des différentes technologies de cellules à base de silicium. ....	16

**Chapitre III :**

<b>Tableaux III. 1</b> : Caractéristique électrique du Module PWX 500 à une diode .....	34
<b>Tableaux III. 2</b> : Valeurs obtenues pour le modèle à une diode (éclairage) .....	38
<b>Tableaux III. 3</b> : Valeurs obtenues pour le modèle à une diode (température).....	40
<b>Tableaux III. 4</b> : caractéristique électrique du Module PWX 500 a deux diodes.....	45
<b>Tableaux III. 5</b> : Valeurs obtenues pour le modèle à deux diodes (éclairage).....	49
<b>Tableaux III. 6</b> : Valeurs obtenues pour le modèle à deux diodes (température) .....	51

**Liste des symboles :**

$\lambda$  : longueur d'onde en mètre

**h** : Constante de Planck

**C** : la vitesse de lumière

**E** : énergie de photon

**V<sub>oc</sub>** : Tension du circuit ouvert

**I<sub>sc</sub> = I<sub>cc</sub>** : courant de court-circuit

**V<sub>m</sub>** : Tension Max

**I<sub>m</sub>** : Courant Max

**P<sub>m</sub>** : La puissance Max

**G** : Irradiation (w/m<sup>2</sup>)

**G<sub>ref</sub>** : Irradiation à STC =1000(w/m<sup>2</sup>)

**T** : la température réelle de la cellule (K)

**T<sub>ref</sub>** : est la température de référence de la cellule, en Kelvin (K) (= 25C ° + 273),

**I** : Courant délivré par le panneau

**I<sub>ph</sub>** : le photo courant

**I<sub>d</sub>** : le courant de diode

**I<sub>0</sub>** : la saturation inverse ou le courant de fuite de la diode (A)

**K** : Boltzmann constant  $1.38 \times 10^{-23} \cdot \text{J} / \text{K}$

**q** : la charge d'électrons (1,602 · C)

$V_t = \frac{kT}{q}$  : potentiel thermodynamique (V).

**K<sub>i</sub>** : le coefficient de température du courant de court-circuit de la cellule,

**A** : le Facteur d'idéalité

**V** : la tension imposée sur la diode

**Rsh** : Résistance shunt de la cellule PV

**RS** : Résistance série de la cellule PV

**NP** : Nombres des cellules en parallèle

**NS** : le nombre de cellules PV connectées en série

**L** : Inductance de filtres

**Eg** : Énergie de Gap du matériel de la cellule PV en [ev]

**d** : factor alpha de l'hacheur

### **LISTE DES ABREVIATIONS :**

**DC** : Courant Continu

**GPV** : Générateur Photovoltaïque

**MPPT** : Maximum Power Point Tracking

**MPP** : Maximum Power Point

**P&O** : Perturbation et Observation

**IncCond** : Incrément de Conductance

**PV** : Photovoltaïque

**InSb** : Antimoniure d'indium

**InAs** : Arséniure d'indium

**Ge** : Germanium

**c-Si** : Crystalline silicon

**GaAs** : Arséniure de gallium

**CdTe** : Tellurure de cadmium

**a-Si** : Amorphous silicon

## Liste des Symboles et Abréviations

**AlAs** : Aluminum Arsenide

**CdS** : Sulfure de cadmium

# **Introduction générale**

### Introduction générale

De nos jours, les pays doivent constamment augmenter leur production d'énergie pour répondre à la demande croissante. La plupart de cette production dépend actuellement de sources d'énergie fossiles comme le gaz naturel et le pétrole. Cependant, ces sources sont limitées, non renouvelables et contribuent à la pollution atmosphérique par leurs émissions de gaz.

En revanche, il existe des sources d'énergie renouvelables comme celles provenant du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau et de la biomasse. Contrairement aux combustibles fossiles, ces sources sont illimitées et non polluantes. L'énergie solaire est particulièrement notable avec deux principaux types : l'énergie solaire thermique, qui produit de la chaleur, et l'énergie solaire photovoltaïque, qui génère de l'électricité.

L'énergie photovoltaïque est produite en exploitant le rayonnement solaire et peut être convertie en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Les panneaux solaires, constitués de cellules photovoltaïques, ont la capacité de convertir la lumière du soleil en électricité en utilisant des photons pour générer des électrons. Cette électricité est produite sous forme de courant continu, directement utilisable. Pour optimiser l'efficacité des systèmes photovoltaïques, il est possible d'améliorer leur rendement grâce à des méthodes comme le suivi du point de puissance maximale (MPPT), qui permettent de trouver la configuration optimale pour la production d'énergie.

La commande MPPT est une commande essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV.

L'objectif de notre travail est d'étudier, de modéliser et de simuler un panneau solaire, ainsi que des techniques de poursuite des points de puissance maximale (MPP) qui permettent d'augmenter leur productivité.

## Introduction générale

Notre mémoire est structurée en quatre chapitres

Dans le premier chapitre, nous allons faire un rappel sur les généralités de l'énergie solaire photovoltaïques. Nous présenterons, le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et les paramètres qui agissent sur ses caractéristiques.

Dans le deuxième chapitre, nous allons modéliser un module photovoltaïque, nous présenterons les schémas équivalents de deux modèles : le modèle à une seule diode et le modèle à deux diodes.

Dans le troisième chapitre, nous allons simuler les deux modèles électriques du module photovoltaïques sous Matlab/Simulink sous des conditions métrologiques standards et variables pour évaluer leurs performances.

Dans le dernier chapitre, nous allons présenter quelques méthodes de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) des panneaux solaires ainsi leurs simulations sous Matlab/Simulink.

Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume notre travail.

**Chapitre I : Généralités**  
*sur l'énergie*  
*photovoltaïque*

# Chapitre I : Généralités sur l'énergie photovoltaïque

## I.1. Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable générée par le rayonnement solaire. Elle représente l'une des sources les plus importantes parmi les énergies renouvelables et a suscité un intérêt croissant ces dernières années. Accessible à tous, l'énergie solaire permet de produire trois types d'énergies : l'énergie calorifique avec les installations solaires thermiques (chauffe-eau solaire ou climatiseur solaire), l'énergie électrique avec les installations solaires photovoltaïques, et le solaire à concentration thermodynamique.

## I.2. L'énergie solaire

La distance de la terre au soleil est environ 150 millions de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300000 km/h, les rayons du soleil mettent donc environ 8 minutes à nous parvenir.

La constante solaire est la quantité d'énergie solaire qui atteint la limite de l'atmosphère directement exposée au soleil. Habituellement, cette luminosité est de 1360 W/m<sup>2</sup>. Au niveau du sol, cette énergie est réduite à 1000 W/m<sup>2</sup> à cause de l'absorption dans l'atmosphère. En étudiant l'effet photoélectrique, Albert Einstein a réalisé que la lumière, en plus d'être une onde, est portée par des particules appelées photons. L'énergie d'un photon est donnée par la relation suivante :

$$E = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

$h$  : la constante de Planck ,  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  [j. s].

$c$  : la vitesse de la lumière [m. s<sup>-1</sup>].

$\lambda$  : la longueur d'onde [m].

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande [1]. Une façon commode d'exprimer cette énergie est :

$$E = 1.26 \lambda \quad (\text{I.2})$$

## Chapitre I : Généralités sur l'énergie photovoltaïque

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 microns ( $\mu\text{m}$ ) [2].

### I.2.1 Rayonnement solaire

Le Soleil est une étoile colossale parmi les étoiles de l'univers, mesurant environ 1 390 000 kilomètres, soit près de 50 fois la taille de la Terre. Principalement constitué d'hydrogène et d'hélium. Le Soleil est alimenté par l'énergie de la fusion nucléaire, un processus confirmé depuis environ soixante ans. Chaque seconde, des millions de tonnes d'hydrogène se transforment en hélium au sein d'un noyau atteignant une température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement [3].

### I.2.2 Spectre solaire

Le rayonnement électromagnétique est composé de « grains » de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde  $\lambda$  :

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800 K. Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de AM0. Sa distribution en énergie est répartie en [4] :

Ultraviolet UV	$0.20 < \lambda < 0.38 \text{ mm}$	6.4%
Visible	$0.38 < \lambda < 0.78 \text{ mm}$	48.0%
Infrarouge IR	$0.78 < \lambda < 10 \text{ mm}$	45.6%

La figure I.1 illustre la répartition spectrale du rayonnement solaire.

## Chapitre I : Généralités sur l'énergie photovoltaïque

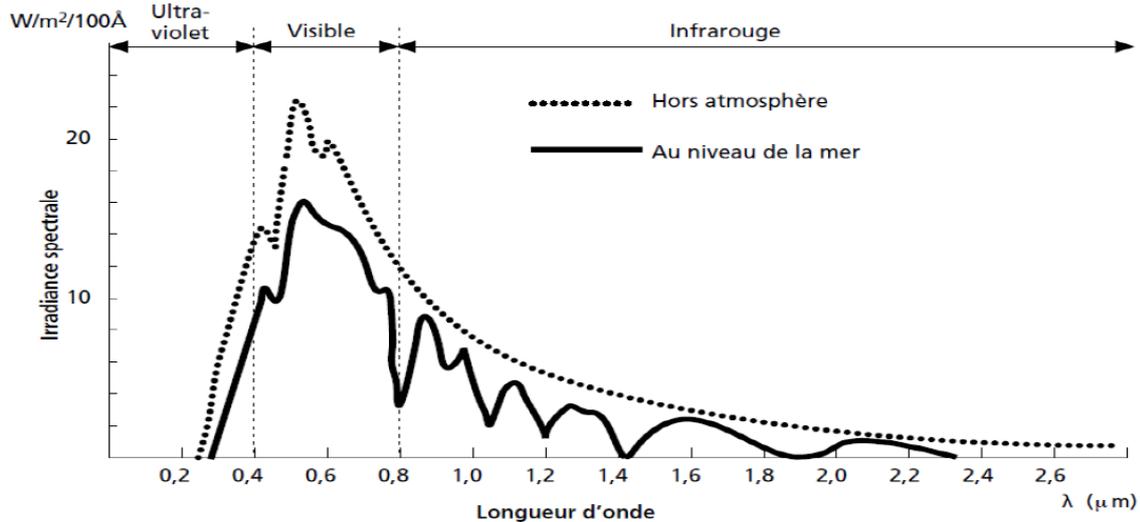


Figure I. 1 : Répartition spectrale du rayonnement solaire [4].

### I.3. La conversion photovoltaïque

#### I.3.1 Historique

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par Antoine Becquerel en 1839, mais il faudra attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène de la physique.

L'utilisation des cellules solaires débute dans les années quarante dans le domaine spatial. Les recherches d'après-guerre ont permis d'améliorer leurs performances et leur taille mais il faudra attendre la crise énergétique des années septante pour que les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque et ses applications terrestres.[5]

- En 1839 : le physicien français Edmond Becquerel a découvert le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.
- En 1875 : Werner Von Siemens a exposé devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire
- En 1954 : trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, ont mis au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

## Chapitre I : Généralités sur l'énergie photovoltaïque

- En 1958 : une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- En 1973 : la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware USA (à New York).
- 1983 : la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000km en Australie.

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été mise au point aux États-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell. Ils ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés", une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Cependant, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles sont devenues la solution idéale pour répondre aux besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé [5].

### I.3.2 l'effets photovoltaïque

L'énergie solaire est convertie directement en électricité par l'effet photovoltaïque. Le terme « photovoltaïque » est formé à partir de mots " photos " un mot grec signifiant lumière, et de " voltaïque ", mot dérivé du physicien italien Alessandro VOLTA, qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque résulte de la discontinuité qui existe dans un semi-conducteur entre les niveaux d'énergie que peuvent prendre les porteuses de charges qui sont les électrons et les trous. Cette discontinuité forme une jonction.

La production d'un courant à partir du rayonnement solaire est donc en relation avec trois phénomènes : la création de paires électron-trou sous l'effet du rayonnement, leur mouvement vers la jonction sous l'effet des forces de diffusion, et enfin, la collecte de toutes les paires électron-trou.

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont bombardés par les photons constituant la lumière [6].

Sous l'effet de ce bombardement, les électrons des couches électroniques externes (appelés électrons de valence) ont tendance à être arrachés : si l'électron revient à son état

## Chapitre I : Généralités sur l'énergie photovoltaïque

initial, son agitation se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est ainsi transformée en énergie thermique.

En revanche, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à leur état initial. Les électrons arrachés créent une faible tension électrique continue. Ainsi, une partie de l'énergie cinétique des photons est directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque.

### I.3.3. Semi-conducteurs

Dans le domaine de l'électronique, les semi-conducteurs sont d'une importance capitale car leur conductivité peut être dynamiquement modifiée en utilisant de l'énergie extérieure, telle que le champ électrique. Leurs propriétés électriques peuvent être altérées par l'introduction de dopants, ce qui les rend très polyvalents. La nature des semi-conducteurs en fait la base de l'industrie électronique et optoélectronique moderne. Un semi-conducteur intrinsèque est pur, possédant une bande de valence pleine (BV) et une bande de conduction vide (BC), avec un niveau de Fermi (EF) placé au milieu du gap [7].

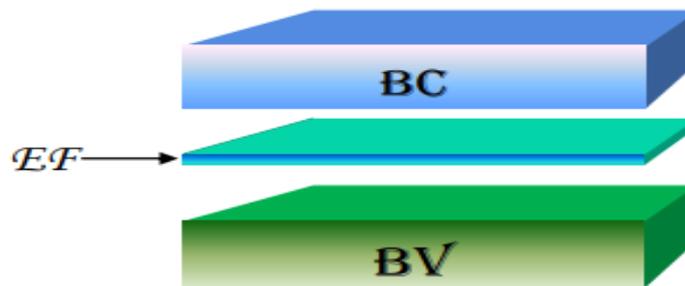


Figure I. 2 : Structure d'un semi-conducteur intrinsèque [7].

### I.3.4 Les principaux matériaux semi-conducteurs photovoltaïques

Le silicium est le matériau photovoltaïque le plus couramment utilisé, se situant dans la quatrième colonne de la classification périodique (avec 4 électrons sur la dernière couche). Ils sont également présents dans les colonnes 2, 3 et 5 sous forme de composés, appelés III-V et II-VI, qui assurent une dernière couche électronique comportant 8 électrons

## Chapitre I : Généralités sur l'énergie photovoltaïque

Tableau périodique des éléments chimiques. Les matériaux photovoltaïques sont mis en évidence en orange dans l'image originale. Les éléments concernés sont : Al (13), Si (14), P (15), S (16), Cu (29), Zn (30), Ga (31), Ge (32), As (33), Se (34), In (49), Sn (50), Sb (51), Te (52), Au (79), Hg (80), Tl (81), Pb (82), Bi (83), Po (84), At (85), et Rn (86).

**Figure I. 3 :** Emplacement des matériaux photovoltaïques dans le tableau périodique [8].

Selon Santo Martinuzzi [8], Le choix des matériaux est fortement influencé par la largeur de la bande interdite  $E_g$ , en raison de la condition quantique  $h\nu > E_g$ . Plus  $E_g$  est faible, plus le nombre de photons utilisables sera élevé. Le tableau I.1 présente le gap de différents matériaux photovoltaïques.

**Tableau I. 1 :** Gap de différents matériaux photovoltaïques.

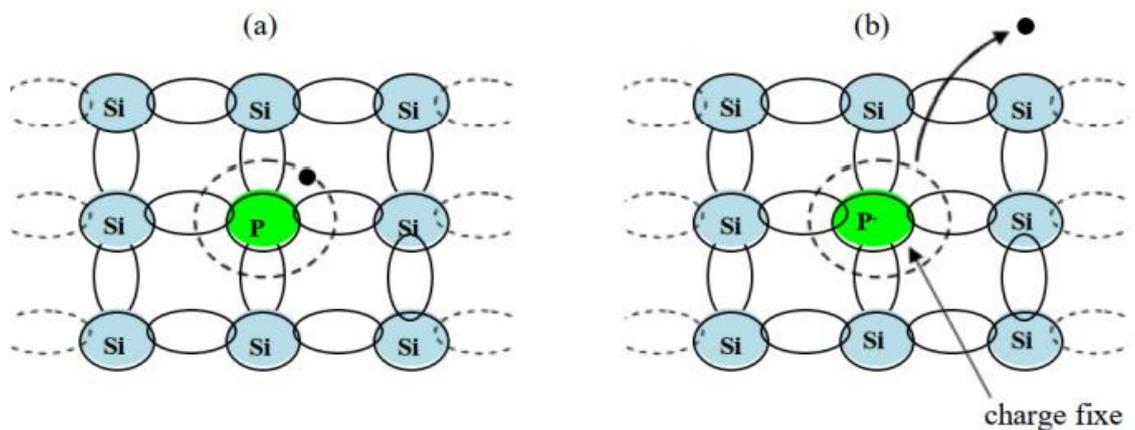
Matériau	InSb	InAs	Ge	CIS	c-Si	GaAs	CdTe	a-Si	AIAs	GaP	CdS
Gap (eV)	0.2	0.4	0.6	1.06	1.12	1.43	1.44	1.72	2.2	2.35	2.42

### I.3.5. Dopage de silicium

L'énergie solaire peut transformer le silicium en conducteur en le chauffant par agitation thermique. Cependant, les atomes de silicium se lient entre eux dans un réseau cristallin pour atteindre un état stable, ce qui le rend moins conducteur. En effet, comme l'atome de silicium possède quatre électrons sur sa couche externe, il les partage avec les électrons des atomes voisins [9].

### I.3.5.1 Dopage de type N

Supposons que nous examinons les semi-conducteurs tétravalents tels que le silicium (Si) ou le germanium (Ge). Ils adoptent une structure cristalline où chaque atome est lié à quatre atomes voisins par des liaisons covalentes. Si nous introduisons un atome ayant cinq électrons de valence (par exemple, le phosphore, l'arsenic, l'antimoine...), il prendra la place d'un atome du cristal. Parmi les électrons de l'impureté, quatre seront impliqués dans les connexions avec les voisins et le cinquième restera seul. L'atome d'impureté est associé à un niveau d'énergie appelé niveau donneur, qui se situe juste en dessous de la bande de conduction. Dans ce cas, le semi-conducteur est qualifié de type n [10].



**Figure I. 4 :** Silicium dopé au Phosphore a)  $T=0$  °K. b)  $T \neq 0$  °K.

### I.3.5.2. Dopage de type P

Si on insère un atome d'impureté avec trois électrons de valence (comme le bore, l'aluminium ou le gallium), il ne peut se lier que par trois liaisons. Par conséquent, une liaison par atome d'impureté est manquante, ce qui correspond à un niveau d'énergie situé au-dessus de la bande de valence, appelé niveau accepteur. Le semi-conducteur est alors qualifié de type p [10].

## Chapitre I : Généralités sur l'énergie photovoltaïque

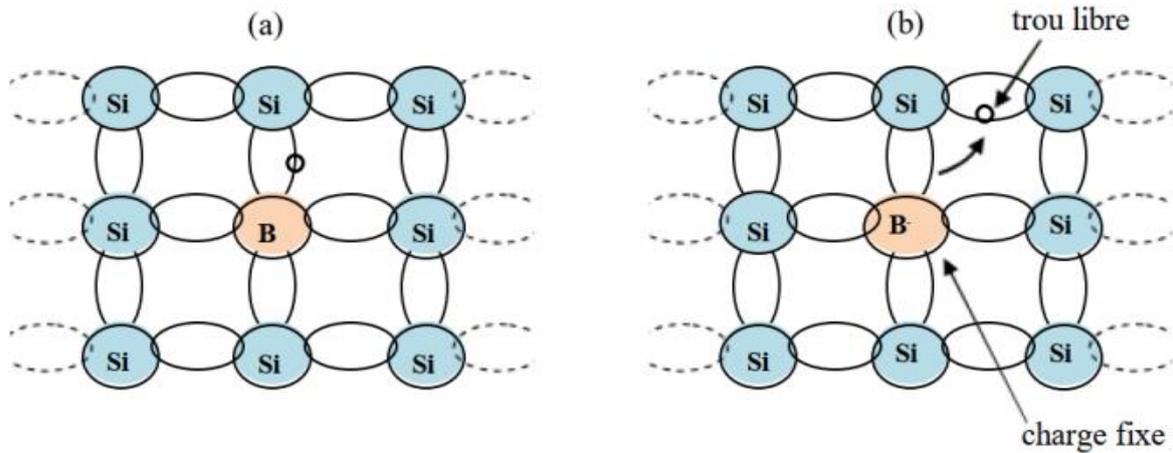


Figure I. 5 : Silicium dopé au Bore

a)  $T=0$  °K. b)  $T\neq 0$  °K.

### I.3.6. Jonction P-N

Pour obtenir des dispositifs électroniques comme les diodes, les capteurs, les transistors et les panneaux photovoltaïques, la plupart des applications électroniques des semi-conducteurs utilisent l'état dopé de ce type de matériaux. Il est nécessaire de créer un contact entre les deux types de semi-conducteurs, N et P, afin de former la base d'un composant électronique appelé jonction PN [11]. Cette jonction permet des applications intéressantes des semi-conducteurs, telles que les applications photovoltaïques et solaires en général. La structure simple de cette jonction est présentée dans la figure suivante [12] :

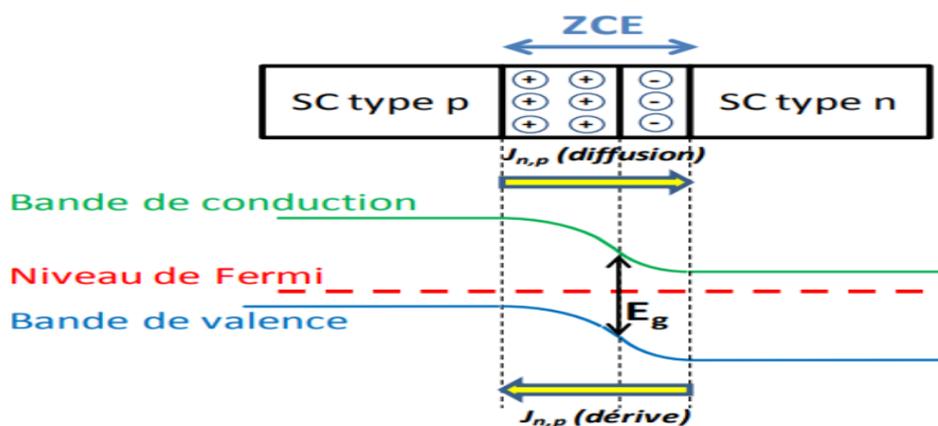


Figure I. 6: Illustration de principe et diagramme de bande d'une jonction P-N à l'équilibre. La jonction P-N est un composant contenant deux régions (région dopée N et région dopée P).

## Chapitre I : Généralités sur l'énergie photovoltaïque

Dès que la région dopée P rencontre la région N, les électrons et les trous se propagent automatiquement de la jonction. Créant ainsi une zone de déplétion où la concentration en porteurs libres est presque nulle. La longueur de la zone de déplétion varie en fonction de la tension appliquée d'un côté et de la jonction de l'autre. Plus cette zone est courte, plus la résistance de la jonction est faible.

La jonction P-N de grande dimension est utilisée dans les cellules solaires pour distinguer les paires électron-trou produites par la lumière par le champ électrique de la jonction. Celle-ci est constituée d'une base en semi-conducteur de type P dopée localement pour former l'émetteur. La différence de concentration d'électrons entre la zone N et P provoque une tension de diffusion à la jonction des deux zones de conductivité opposée. Cette tension de diffusion entraîne un champ électrique primordial à la jonction, dans une zone appelée ZCE (Zone de Charge d'Espace). La jonction P-N est un composant qui contient deux régions distinctes [11].

### I.4. Cellules photovoltaïques

#### I.4.1. Description d'une cellule PV

La cellule solaire, aussi connue sous le nom de cellule photovoltaïque, est un dispositif électronique qui convertit le rayonnement solaire en énergie électrique. La cellule solaire comprend deux processus principaux : la génération de porteurs de charge légère (trous et électrons) dans la couche d'absorption et leur séparation et rassemblement dans leurs contacts métalliques. Le principe de fonctionnement repose sur l'effet photoélectrique. Pour convertir l'énergie photovoltaïque du rayonnement solaire, des matériaux semi-conducteurs sont utilisés sous la forme d'une jonction P-N. On peut facilement comprendre la structure des cellules solaires en se référant à la figure ci-dessous [13]. Les étapes de base du fonctionnement d'une cellule solaire sont :

- Génération de supports photogénèses,
- Génération de courant via la collecte de porteurs photogénèses,
- Génération d'une tension élevée aux bornes de la cellule solaire,
- Dissipation de puissance à la charge.

## Chapitre I : Généralités sur l'énergie photovoltaïque

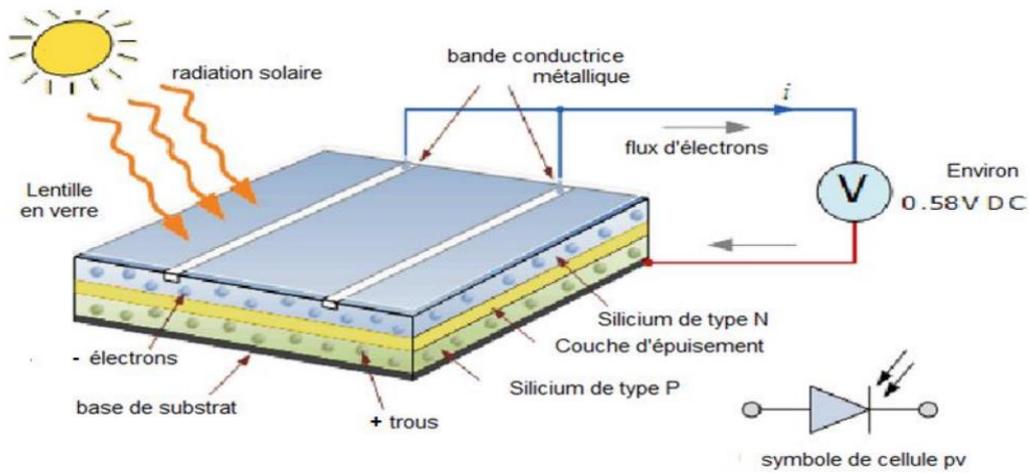


Figure I. 7 : Coupe transversale de la cellule solaire [13].

### I.4.2 Principe de fonctionnement d'une cellule PV

Un dispositif semi-conducteur, généralement fabriqué à partir de silicium, est connu sous le nom de cellule photovoltaïque. Elle est constituée de deux couches, l'une dopée P et l'autre dopée N, créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN, libérant ainsi des électrons (charges N) et des trous (charges P). Cette différence de potentiel entre les deux couches peut être observée en mesurant les connexions des bornes positives et négatives de la cellule [14]. La structure d'une cellule photovoltaïque est illustrée dans la figure (I.8) ci-dessous

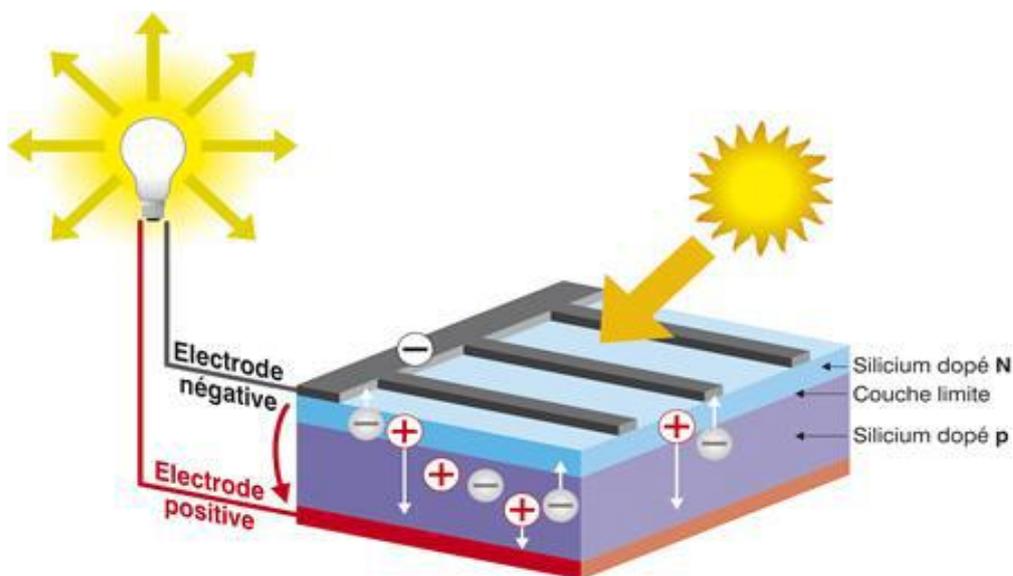


Figure I. 8 : Figure d'une cellule photovoltaïque [14].

### I.4.3. Caractéristiques d'une cellule solaire

Il est possible d'illustrer le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque en utilisant la courbe  $I=f(V)$ , qui démontre la relation entre le courant produit par la cellule et la tension à ses bornes. Cette courbe décrit comment le courant varie depuis la situation de court-circuit jusqu'à celle de circuit ouvert.

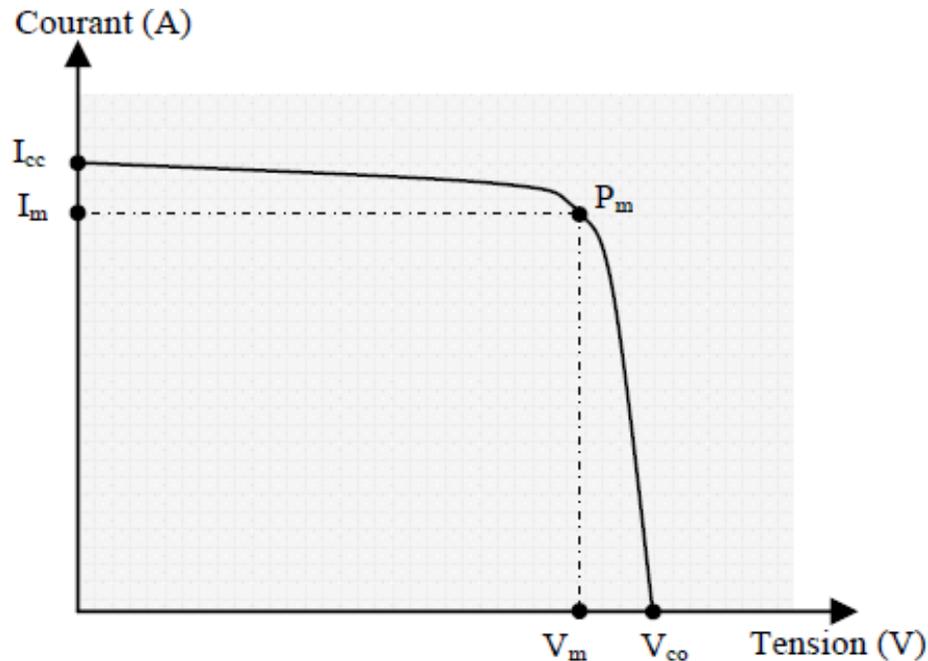


Figure I. 9 : Caractéristiques  $I(V)$ , d'un module PV (MPP).

A partir de la caractéristique  $I(V)$  de la cellule photovoltaïque de la figure (I.9), on déduit les paramètres électriques propres à la cellule :

- **Courant de court-circuit  $I_{sc}$  [15]**

C'est le courant maximal généré par la cellule ; il est produit lorsqu'elle est soumise à un court-circuit ( $V=0$ ).

- **Tension à circuit ouvert  $V_{oc}$  [15]**

C'est la tension obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul, elle constitue la tension maximale qui peut être obtenue d'une cellule ; elle se situe autour de 0.6 V pour la cellule en silicium.

$I_m$  : Le courant optimale.

## Chapitre I : Généralités sur l'énergie photovoltaïque

$U_m$  : La tension optimale.

- **Point de puissance maximale MPP [15]**

C'est le point de fonctionnement ( $V_m, I_m$ ) où la cellule solaire génère sa puissance maximale ( $P_m$ ).

$P_m$  : puissance maximale mesurée dans les conditions de référence (STC : *Standard Test Condition*), c'est-à-dire sous l'ensoleillement de  $1000 \text{ W/m}^2$ , spectre AM 1.5 et à la température de  $25^\circ\text{C}$ .

- **Facteur de remplissage FF [15]**

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique  $I(V)$  pour qualifier la qualité d'une cellule par rapport à une cellule idéale ( $FF = 1$ ), c'est le facteur de remplissage ou fill factor (FF).

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (\text{I. 3})$$

- **Rendement d'une cellule photovoltaïque [15]**

Le rendement d'une cellule photovoltaïque est le pourcentage de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique, qui est égal au rapport entre la puissance électrique maximale de sortie ( $P_m$ ) et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule photovoltaïque .

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{V_m \cdot I_m}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF}{E \cdot S} \quad (\text{I. 4})$$

Où  $P_{in}$  est la puissance d'entrée qui est l'éclairement incident sous forme de photons ( $E$ ) sur la cellule PV par unité de surface ( $S$ ).

### I.5. Différents types des cellules photovoltaïques

On dénombre plusieurs types de cellules solaires. Chaque type est caractérisé par un rendement, une durée de vie et un coût qui lui est propre. Dans ce qui suit, nous vous présentons ces différents types de cellules PV :

### I.5.1. Cellules monocristallines

La première génération de photopiles est constituée de cellules monocristallines. Elles sont fabriquées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal (voir Figure I.10). Leur procédé de fabrication est long et exigeant en énergie. Le silicium à l'état brut est fondu pour former un barreau. Le silicium refroidit lentement et de manière contrôlée, ce qui permet d'obtenir un monocristal. Un wafer (tranche de silicium) est ensuite découpé dans le barreau de silicium. Après divers traitements (traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction P-N, dépôt de couche antireflet, pose des collecteurs), le wafer devient une cellule. Les cellules sont de forme ronde ou presque carrée, et lorsqu'on les regarde de près, elles ont une couleur uniforme. Elles ont un rendement de 15 à 22 %, mais la méthode de production est laborieuse [16]

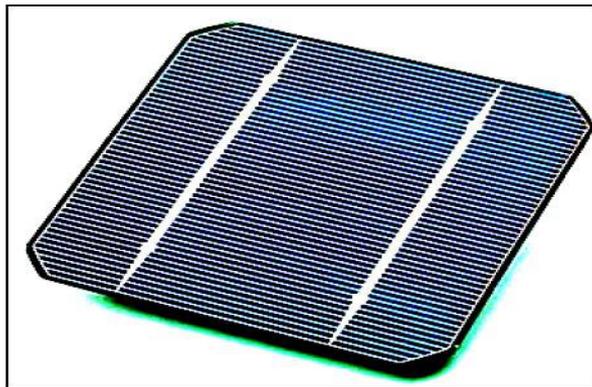


Figure I. 10 : Cellule photovoltaïque (monocristalline). [16]

### I.5.2. Cellules Poly-cristalline

Les cellules polycristallines sont fabriquées en utilisant un bloc de silicium cristallisé sous forme de cristaux multiples. Lorsqu'on les observe de près, on peut distinguer les différentes orientations des cristaux (différences de tonalité) (voir Figure I.11). Leur rendement varie de 11 à 15 %, mais leur coût de production est moins élevé que celui des cellules monocristallines. Ces cellules se sont imposées aujourd'hui grâce à leur potentiel de gain de productivité. Par rapport au silicium monocristallin, elles produisent peu de déchets de coupe et nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication. Un barreau de silicium est utilisé pour scier le wafer, et le refroidissement forcé a provoqué la formation d'une structure polycristalline. Durée de vie estimée : 30 ans [16].

## Chapitre I : Généralités sur l'énergie photovoltaïque



Figure I. 11 : Cellule PV poly-cristalline. Source : Wikipédia

### I.5.3. Cellules amorphes

Le coût de production des cellules photovoltaïques amorphes est beaucoup plus bas, cependant leur rendement n'est actuellement que de 6 à 8%. Cette technologie utilise des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.

Le rendement de ces cellules est inférieur à celui des technologies polycristallines ou monocristallines. [16].

Tableau I. 2 : Comparatif des différentes technologies de cellules à base de silicium. [16].

Matériaux	Rendement	Longévité	Caractéristiques	Principales utilisations
Silicium monocristallin	12 à 18% (24.7% en laboratoire)	20 à 30 ans	* Très performant * Stabilité de production * Méthode de production couteuse et laborieuse	Aérospatiale, modules pour toits, façades, ...
Silicium Poly-cristalline	11 à 15% (19.8% en laboratoire)	20 à 30 ans	* Adapté à la production à grande échelle * Stabilité de production, Plus de 50% du marché mondial	Modules pour toits, façades, générateurs...
Amorphe	6 à 8% (13% en laboratoire)	8 à 10 ans	* Peut fonctionner sous la lumière fluorescente. * Fonctionnement si faible luminosité.	Appareils électroniques (montres, calculatrices...),

## Chapitre I : Généralités sur l'énergie photovoltaïque

			<i>* Fonctionnement par temps couvert.</i> <i>* Fonctionnement si ombrage partiel.</i> <i>* La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois.</i>	<i>intégration dans le bâtiment</i>
--	--	--	---	-------------------------------------

### I.5.4. Autres types de cellules solaires

Les cellules solaires à base de silicium, évoquées précédemment, sont les plus couramment utilisées. Il existe d'autres types tels que les cellules solaires à base de CIGS (cuivre, indium, gallium, sélénium) et de tellure de cadmium (CdTe), la k esterite et les cellules solaires pérovskite. Ces dernières sont également employées en raison de leur excellente capacité de conversion, de la disponibilité des matériaux et de l'efficacité de conversion de puissance améliorée [17].



Figure I. 12 : Couche mince [17].

### I.6. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïques

#### Avantages : [18]

- Les avantages de l'électricité solaire photovoltaïque sont multiples :
- La production de cette électricité renouvelable est propre, n'est pas toxique.
- L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains pour sa petite relative taille, et son opération silencieuse.

## Chapitre I : Généralités sur l'énergie photovoltaïque

- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.
- Modulaires, ses composants se prêtent à une utilisation innovante et esthétique en matière d'intégration architecturale (implantés sur ou en éléments de toiture ou de façade, sous forme de brise-soleil, en verrière...)
- L'électricité solaire photovoltaïque a pour qualité sa fiabilité, la durée de vie des capteurs supérieure à 25 ans, son autonomie, son faible impact sur l'environnement.
- Le coût de fonctionnement des panneaux photovoltaïques est très faible, car leur entretien est très réduit, et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Les systèmes photovoltaïques sont fiables : aucune pièce employée n'est en mouvement. Les matériaux utilisés (silicium, verre, aluminium), résistent aux conditions météorologiques extrêmes.

### Inconvénients [18]

- Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- Le coût d'investissement des panneaux photovoltaïques et des capteurs est élevé.
- S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible.
- Le rendement électrique diminue avec le temps (20 % de moins au bout de 20 ans).
- Pollution à la fabrication.

### I.7. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation des concepts fondamentaux indispensables pour la compréhension de l'énergie PV. Nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire. Ensuite, nous avons décrit le principe de conversion photovoltaïque et les technologies de fabrication de cellules PV. Pour conclure, nous avons souligné les points positifs et négatifs de cette énergie

**Chapitre II :**  
*Modélisation du  
générateur  
photovoltaïque*

### II.1. Introduction

Avant d'obtenir le modèle du générateur photovoltaïque, il est primordial de trouver le circuit électrique correspondant à cette source. Plusieurs modèles mathématiques ont été conçus pour représenter leur comportement extrêmement non linéaire, qui découle de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à l'origine de leurs réalisations.

### II.2. Générateur photovoltaïque

#### II.2.1. Module Photovoltaïque

Par définition, un panneau solaire photovoltaïque est composé de cellules solaires assemblées pour produire de l'électricité lorsqu'il est exposé à la lumière, la cellule solaire ne produit qu'une très faible puissance électrique de l'ordre de 1 à 3 W avec une tension de moins d'1 volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module photovoltaïque [19].

#### II.2.2. Groupement des cellules solaires

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module.

##### ➤ Groupement en série

En utilisant une association en série, les cellules sont soumises au même courant, et la tension résultante est la somme des tensions générées par chacune des cellules (figure II.1).

$$V_{panneau} = n_s \cdot V_m \quad (II.1)$$

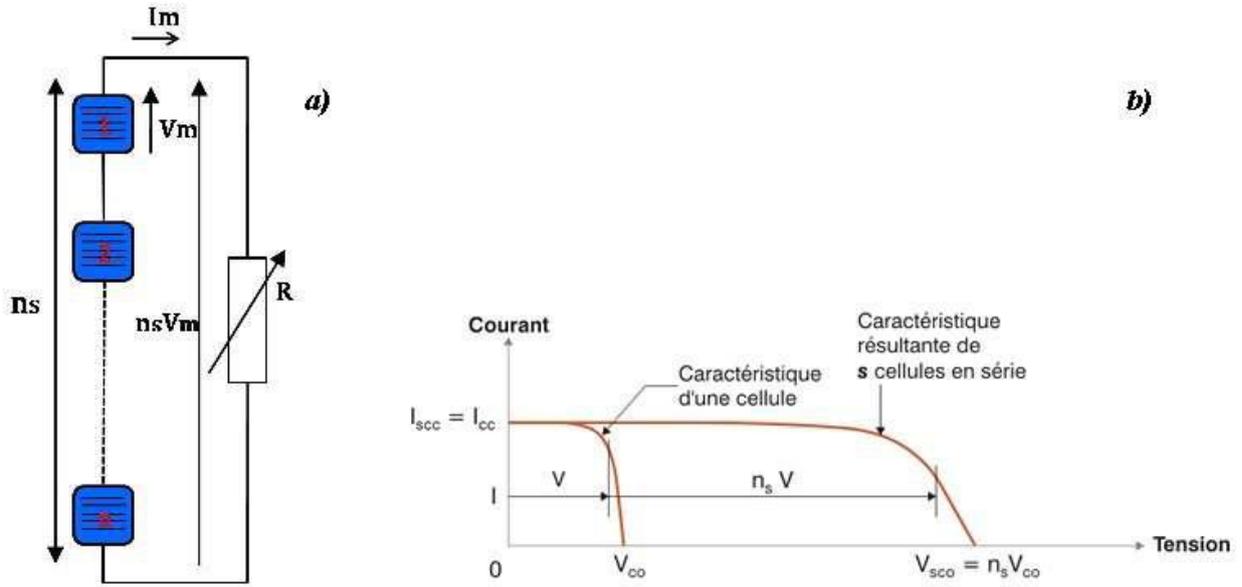


Figure II. 1 : a) Association en série de  $n_s$  cellules solaires b) Caractéristique I(V) [20].

➤ Groupement en parallèle

En association en parallèle, les cellules subissent la même tension, et le courant qui en découle est égal à la somme des courants produits par chaque cellule (figure II.2).

$$I_{panneau} = n_p \cdot I_m \quad (II. 2)$$

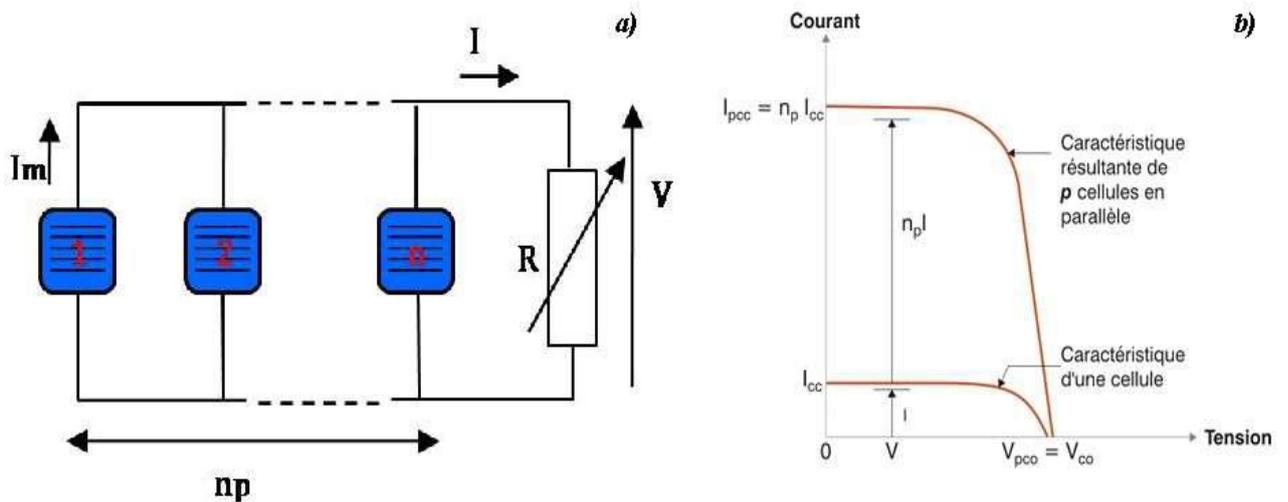


Figure II. 2 : a) Association en parallèle de  $n_p$  cellules solaire b) Caractéristique I(V) [20].

➤ Groupement mixte

Lorsqu'une application spécifique nécessite une augmentation du courant et de la tension fournis par les cellules solaires, on opte pour un groupement mixte ou groupement série parallèle. On parlera dans ce cas de module et de panneaux solaires. Un panneau solaire est par définition un ensemble de modules regroupés selon un montage mixte, le module étant à son tour composé d'un ensemble de cellules montées généralement en série.

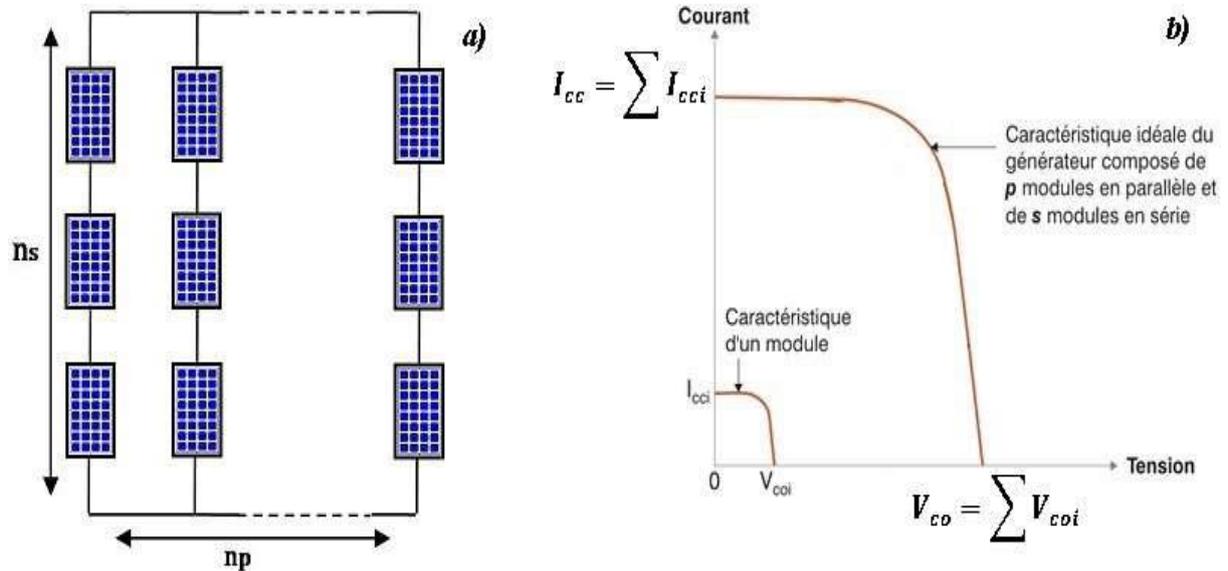


Figure II. 3 : a) Association mixte de  $np$  branches et de  $ns$  modules composés de cellule identiques. b) Caractéristique I(V) [20].

### II.2.3. Champ photovoltaïque

La notation de champ PV est définie par l'interconnexion de modules entre eux, qu'ils soient en série ou en parallèle, pour obtenir une puissance encore plus élevée [21]. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec une orientation et un angle d'inclinaison spécifique.

## Chapitre II : Modélisation du générateur photovoltaïque

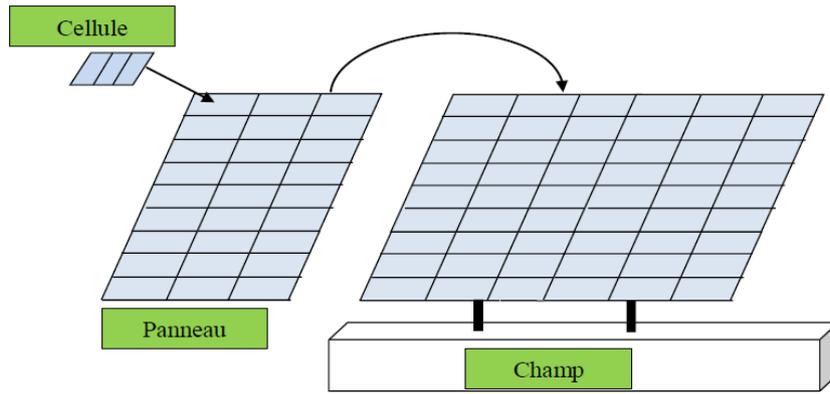


Figure II. 4 : De la cellule au champ photovoltaïque [21].

### II.3. Protection des modules photovoltaïques

Lors de la conception d'une installation photovoltaïque, il faut assurer sa protection électrique afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leurs fonctionnements. Pour cela, deux types de protection sont classiquement utilisés dans les installations photovoltaïques :

#### II.3.1. Diode By-pass

Les panneaux solaires récemment installés sont munis de diodes by-pass qui les protègent contre les courants indésirables causés par l'ombrage partiel. Ainsi, pour assurer la sûreté de fonctionnement du module PV complet, on doit connecter chaque diode by-pass antiparallèlement à une seule cellule PV. Il est très coûteux d'utiliser cette méthode de protection. C'est pourquoi les constructeurs installent chaque diode by-pass avec un groupe de cellules (2 à 3 diodes by-pass par module PV) [22].

La figure II.5 montre la disposition de ces diodes "by-pass" pour un module contenant 3 cellules.

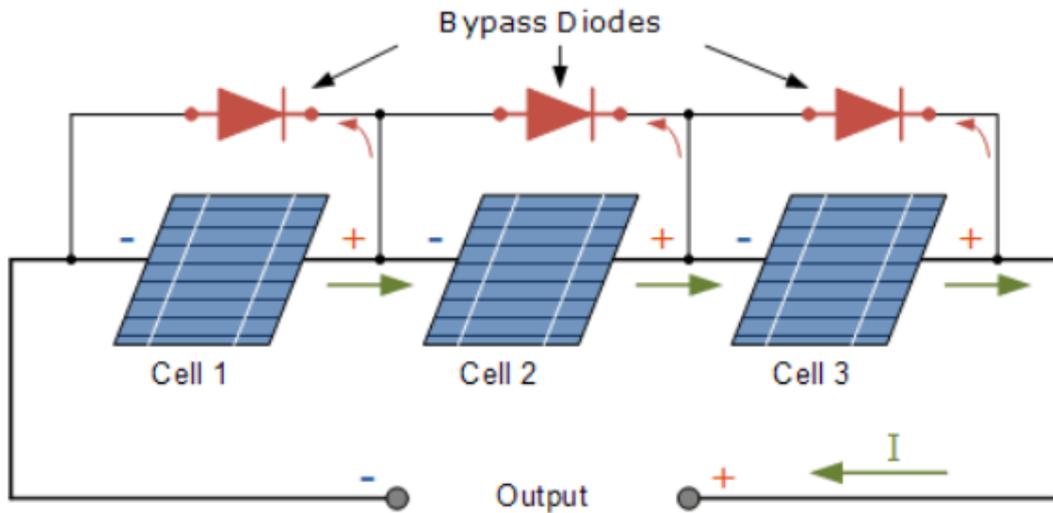


Figure II. 5 : Mise en série de cellules PV dans le module avec les deux diodes by-pass [23].

### II.3.2. Diode Anti-retour

La diode anti-retour (Figure II.6) empêche un panneau de devenir un récepteur de puissance. Il est possible d'observer ce phénomène en connectant les panneaux entre eux en parallèle (pour éviter que l'un ne débite l'autre). Ou qu'une batterie débite sur le panneau (par exemple pendant la nuit) [24].

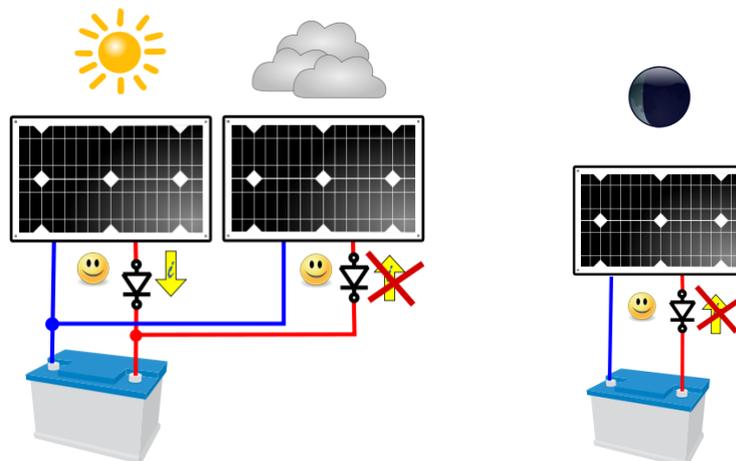


Figure II. 6 : Rôle de la diode anti-retour [24].

## Chapitre II : Modélisation du générateur photovoltaïque

### II.4. Modélisation du générateur photovoltaïque

Plusieurs modèles de cellule photovoltaïque sont décrits dans la littérature, dans le but d'obtenir la caractéristique courant tension  $I(V)$ . Ces modèles diffèrent entre eux par la procédure et le nombre des paramètres intervenants dans le calcul de la paire courant tension.

Le modèle du générateur photovoltaïque comporte quatre variables. Les deux variables d'entrées qui sont :

G : L'éclairement ( $W/m^2$ ).

T : Température de la jonction des cellules ( $^{\circ}C$ ).

Les deux variables de sorties qui sont :

I : Courant délivré par le panneau (A).

V : Tension aux bornes du panneau (V).

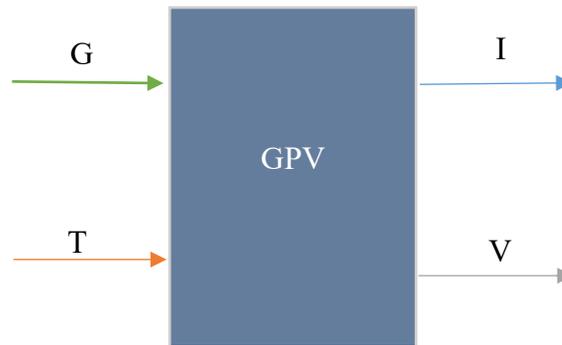


Figure II. 7 : Schéma block du générateur photovoltaïque [21].

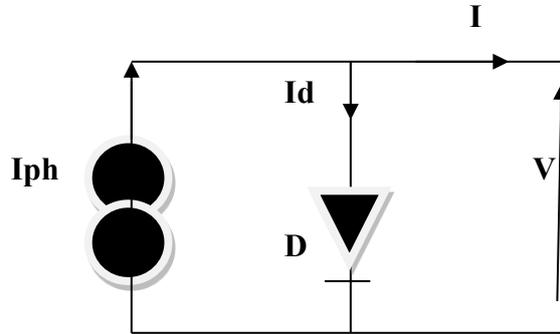
#### II.4.1. Modèle à une diodes

##### II.4.1.a. Modèle à trois paramètres (L3P)

On peut décrire de manière simple une cellule photovoltaïque comme une source idéale de courant qui génère un courant  $I_{ph}$  proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à la jonction PN de la cellule. Il est connu aussi sous le nom L3P.

## Chapitre II : Modélisation du générateur photovoltaïque

Dans le cas d'un générateur photovoltaïque idéal, la tension aux bornes de la résistance est équivalente à celle aux bornes de la diode. Le schéma électrique équivalent de la cellule photovoltaïque pour ce modèle est représenté par la figure II.8 :



**Figure II. 8** : Schéma équivalent d'une cellule PV, Modèle à une diode avec trois paramètres [25].

En appliquant les lois de Kirchhoff au circuit de la figure II.8, on obtient les équations suivantes :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (\text{II. 3})$$

La photo courante dépend principalement de l'ensoleillement et de la température de fonctionnement de la cellule, qui est décrite par l'équation suivante :

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i \cdot (T_c - T_{ref})] \cdot \frac{G}{G_{ref}} \quad (\text{II. 4})$$

Le courant de la diode est donné par la formule suivante :

$$I_d = I_0 \left\{ \exp\left(\frac{qV}{KTA}\right) - 1 \right\} \quad (\text{II. 5})$$

Où :

$$I_d = I_0 \left\{ \exp\left(\frac{V_d}{V_t A}\right) - 1 \right\} \quad (\text{II. 6})$$

On remplace l'équation (II.6) dans l'équation (II.5) on obtient l'équation générale de ce modèle [25] :

## Chapitre II : Modélisation du générateur photovoltaïque

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp\left(\frac{qV}{KTA}\right) - 1 \right\} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

**V** : tension appliquée à la diode(V).

**I** : Le courant délivré par la cellule.

**I<sub>d</sub>** : Courant de la diode.

**I<sub>sc</sub>** : est le courant de court-circuit de la cellule à 25 ° C et 1000W / m<sup>2</sup>,

**V<sub>t</sub>** =  $\frac{KT}{q}$  : potentiel thermodynamique (V).

**K** : constante de Boltzmann, ( $1.38 \times 10^{-23}$  J/k).

**K<sub>i</sub>** : le coefficient de température du courant de court-circuit de la cellule,

**q** : charge de l'électron,  $1.602 \times 10^{-23}$  (Coulomb).

**T** : température absolue (Kelvin).

**A** : Facture d'idéalité.

**T<sub>ref</sub>** : est la température de référence de la cellule, en Kelvin (K) (= 25C ° + 273),

**G** : est l'ensoleillement en watt /mètre carré (W / m<sup>2</sup>),

**G<sub>ref</sub>** : est l'insolation de référence de la cellule (= 1000W / m<sup>2</sup>),

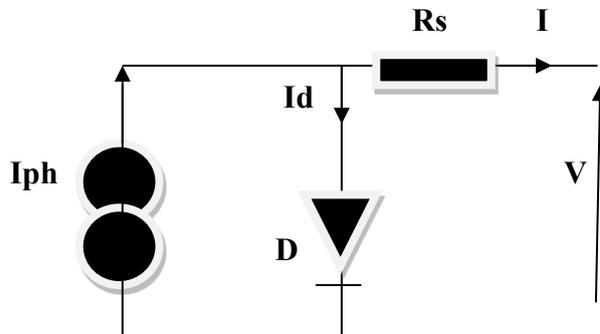
**I<sub>ph</sub>** : photo-courant (A).

**I<sub>0</sub>** : courant de saturation de la diode,

### II.4.1.b. Modèle à quatre paramètres (L4P)

Ce modèle considère la cellule photovoltaïque comme une source de courant dépendante de l'éclairement, connectée en parallèle avec une diode et en série avec une résistance série R<sub>s</sub> [26].

Le schéma électrique équivalent de la cellule PV pour ce modèle est représenté sur la figure (II.9) :



**Figure II. 9** : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode avec quatre paramètres [26].

## Chapitre II : Modélisation du générateur photovoltaïque

La différence de ce modèle par rapport au modèle précédent réside dans le quatrième paramètre, à savoir la résistance  $R_s(\Omega)$ , qui entraîne une perte de tension en sortie. En utilisant les lois de Kirchhoff dans l'équation (II.3), on obtient l'équation de courant de la diode suivante :

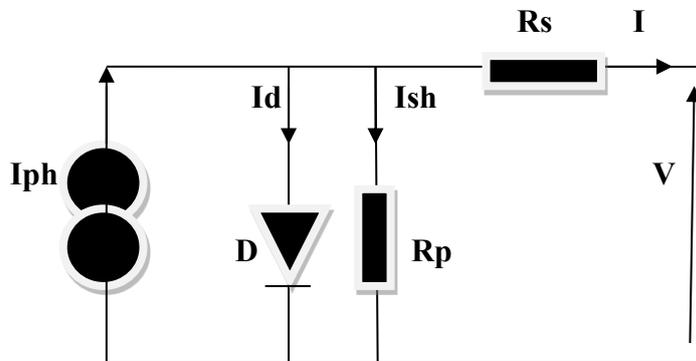
$$I_d = I_0 \left\{ \exp \left( \frac{q(V + IR_s)}{KTA} \right) - 1 \right\} \quad (\text{II. 8})$$

On remplace l'équation (II.8) dans l'équation (II.3) on obtient l'équation générale de ce modèle :

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left( \frac{q(V + IR_s)}{KTA} \right) - 1 \right\} \quad (\text{II. 9})$$

### II.4.1.c. Modèle à cinq paramètres (L5P)

Le circuit électrique de la figure II.10 représente la cellule photovoltaïque, qui est composée d'une source de courant qui représente le flux lumineux. Deux résistances modélisent les pertes, une résistance shunt  $R_p$  et une résistance série  $R_s$ . Il est connu sous le nom L5P [27].



**Figure II. 10 :** Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode avec cinq paramètres [27].

La différence de ce modèle par rapport au modèle précédent c'est le cinquième paramètre qui est la résistance  $R_p$ .

En utilisant les lois de Kirchhoff on aura les équations suivantes :

$$I = I_{ph} - I_{sh} - I_d \quad (\text{II. 10})$$

Le courant de la diode est donné par la formule suivante :

## Chapitre II : Modélisation du générateur photovoltaïque

$$I_d = I_0 \left\{ \exp \left( \frac{q(V + IR_s)}{KTA} \right) - 1 \right\} \quad (\text{II. 11})$$

Le courant de la résistance parallèle est donné par la relation :

$$I_{sh} = \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (\text{II. 12})$$

On remplace les équations (II.11) et (II.12) dans l'équation (II.10) on obtient l'équation générale de ce modèle :

$$I = I_{ph} - I_{sh} - I_0 \left\{ \exp \left( \frac{q(V + IR_s)}{KTA} \right) - 1 \right\} \quad (\text{II. 13})$$

Où :

$$I = I_{ph} - \frac{V + IR_s}{R_p} - I_0 \left\{ \exp \left( \frac{q(V + IR_s)}{KTA} \right) - 1 \right\} \quad (\text{II. 14})$$

Le modèle mathématique qui caractérise le panneau PV est donné par l'équation suivant :

$$I_{panneau} = N_p \cdot I_{ph} - N_p I_0 \cdot \left[ \exp \left( q \cdot \frac{V + I \cdot R_s \cdot \frac{N_s}{N_p}}{N_s \cdot A \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] - \frac{\frac{N_p}{N_s} \cdot V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (\text{II. 15})$$

Avec :

$N_s$  : Nombres de cellules PV raccordées en série.

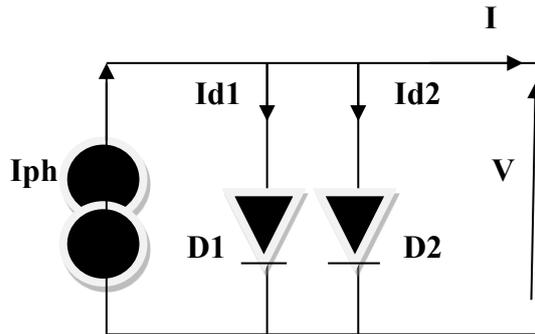
$N_p$  : Nombres de cellules PV raccordées en parallèle.

## II.4.2. Modèles à deux diodes

### II.4.2.a. Modèle à cinq paramètres (2M5P)

Pour obtenir le circuit équivalent de ce modèle à cinq paramètres, on ajoute une simplification supplémentaire au circuit du modèle. Cette simplification se traduit par supposer que la résistance shunt est infinie, et que la résistance série est nulle [25].

Le circuit équivalent est représenté dans la figure ci-dessous (figure II.11) :



**Figure II. 11** : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes avec cinq paramètres [25].

Grâce au schéma équivalent (figure II.11) et en utilisant les lois de Kirchhoff on obtient les équations suivantes :

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} \quad (\text{II. 16})$$

Les diodes étant des éléments, leurs caractéristiques  $I$ - $V$  est donnée par les relations :

$$I_{d1} = I_{01} \left\{ \exp\left(\frac{qV}{KTA_1}\right) - 1 \right\} \quad (\text{II. 17})$$

$$I_{d2} = I_{02} \left\{ \exp\left(\frac{qV}{KTA_2}\right) - 1 \right\} \quad (\text{II. 18})$$

Où :  $I_{01}$ ,  $I_{02}$  : les courants de saturation des diodes,

On remplace les équations (II.17) et (II.18) dans l'équation (II.16) on obtient l'équation générale de ce modèle :

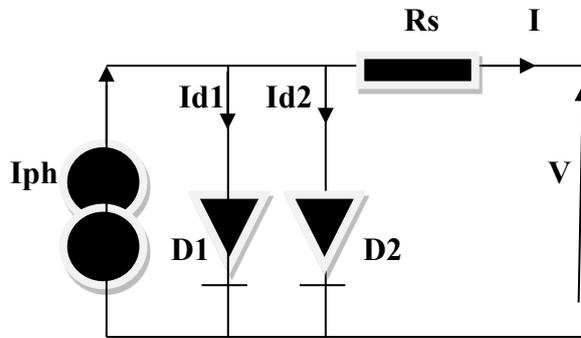
## Chapitre II : Modélisation du générateur photovoltaïque

$$I = I_{ph} - I_{01} \left\{ \exp \left( \frac{qV}{KTA_1} \right) - 1 \right\} - I_{02} \left\{ \exp \left( \frac{qV}{KTA_2} \right) - 1 \right\} \quad (\text{II. 19})$$

### II.4.2.b. Modèle à Six paramètres (2M6P)

Lorsque la résistance shunt est infinie, le nombre de paramètres à déterminer est six, et le nom du modèle dans ce cas est 2M6P. Cette simplification est justifiée par le fait que la résistance shunt est d'habitude beaucoup plus grande que les autres résistances, donc le courant qui la traverse est négligeable. Il consiste aussi en la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes [27].

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique suivant :



**Figure II. 12 :** Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes avec six paramètres [27].

L'équation caractéristique est obtenue à partir des lois de Kirchhoff et c'est la même que celle sans résistance série.

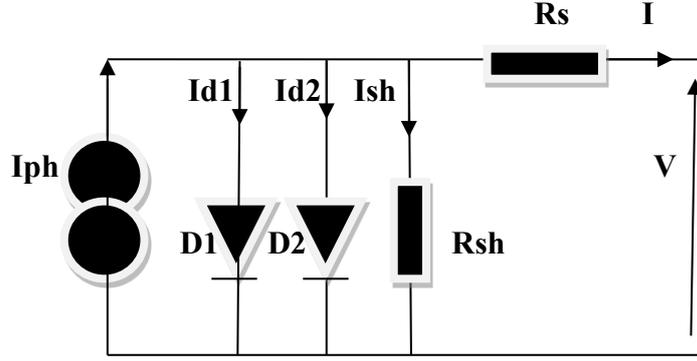
$$I = I_{ph} - I_{01} \left\{ \exp \left( \frac{q(V + IR_s)}{KTA_1} \right) - 1 \right\} - I_{02} \left\{ \exp \left( \frac{q(V + IR_s)}{KTA_2} \right) - 1 \right\} \quad (\text{II. 20})$$

### II.4.2.c. Modèle à Sept paramètres (2M7P)

Dans le modèle à deux diodes, la cellule photovoltaïque est représentée par un circuit électrique, tel qu'illustré dans la Figure II.13, qui est alimenté par une source de courant qui reflète le rayonnement solaire. Les pertes sont présentées par deux résistances, une résistance série  $R_s$ , une résistance shunt  $R_p$ , et deux diodes pour définir la polarisation de la cellule solaire

## Chapitre II : Modélisation du générateur photovoltaïque

et les pertes par la recombinaison des porteurs minoritaires dans la zone de charge d'espace [28].



**Figure II. 13** : Schéma équivalent d'une cellule Modèle à deux diodes avec sept paramètres [28].

Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I = I_{ph} - I_{sh} - I_{d1} - I_{d2} \quad (\text{II. 21})$$

$I_{ph}$  et  $I_{sh}$  garderont les mêmes expressions que celles du modèle à une diode. Le courant traversant les diodes est donné par les équations suivantes :

$$I_{d1} = I_{01} \left\{ \exp \left( \frac{q(V + IR_s)}{KTA_1} \right) - 1 \right\} \quad (\text{II. 22})$$

$$I_{d2} = I_{02} \left\{ \exp \left( \frac{q(V + IR_s)}{KTA_2} \right) - 1 \right\} \quad (\text{II. 23})$$

Le courant de la résistance parallèle est donné par la relation :

$$I_{sh} = \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (\text{II. 24})$$

On remplace les équations (II.22), (II.23) et (II.24) dans l'équation (II.21) on obtient l'équation générale de ce modèle :

$$I = I_{ph} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} - I_{01} \left\{ \exp \left( \frac{q(V + IR_s)}{KTA_1} \right) - 1 \right\} - I_{02} \left\{ \exp \left( \frac{q(V + IR_s)}{KTA_2} \right) - 1 \right\} \quad (\text{II. 25})$$

## Chapitre II : Modélisation du générateur photovoltaïque

Le modèle mathématique qui caractérise le panneau PV est donné par l'équation suivant :

$$I_{\text{panneau}} = N_p \cdot I_{\text{ph}} - N_p I_{01} \cdot \left[ \exp \left( q \cdot \frac{V + I \cdot R_s \cdot \frac{N_s}{N_p}}{N_s \cdot A1 \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] - N_p I_{02} \cdot \left[ \exp \left( q \cdot \frac{V + I \cdot R_s \cdot \frac{N_s}{N_p}}{N_s \cdot A2 \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] - \frac{\frac{N_p}{N_s} \cdot V + I \cdot R_s}{R_{\text{sh}}} \quad (\text{II.26})$$

Avec :

$N_s$  : Nombres de cellules PV raccordées en série.

$N_p$  : Nombres de cellules PV raccordées en parallèle.

$A1$  : Facture d'idéalité diode 1.

$A2$  : Facture d'idéalité diode 2.

### II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les différents groupements des cellules pour former un module, ainsi que la manière dont les modules sont consolidés pour constituer un générateur.

Une attention particulière a été portée à la modélisation d'un générateur photovoltaïque, où nous avons présenté plusieurs modèles mathématiques. En particulier, nous avons discuté le modèle à une seule diode et celui à deux diodes. Ces modèles se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant du module photovoltaïque.

**Chapitre III :**  
**Simulation du module**  
**photovoltaïque**

## Chapitre III : Simulation du module photovoltaïque

### III.1. Introduction

La modélisation est couramment utilisée pour estimer la sortie du générateur (tension, courant) en fonction de deux variables d'entrée : la température et l'éclairement solaire reçu sur le plan du générateur.

Dans ce chapitre, nous allons simuler les deux modèles électriques du panneau photovoltaïque afin d'obtenir les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V), en mettant en évidence l'impact des conditions météorologiques telles que l'éclairement solaire et la température.

### III.2. Simulation du module photovoltaïque

Dans notre travail, nous avons utilisé l'environnement MATLAB, pour simuler deux modèles électriques (modèle à une diode et modèle à deux diodes) d'un panneau photovoltaïque à base de silicium.

Pour réaliser cette simulation, nous avons choisi un module photovoltaïque PWX 500 (49W). Le module est composé de 36 cellules solaires Poly-cristalline connectées en série pour produire une puissance maximale de 49 W.

#### III.2.1. Simulation du module photovoltaïque le modèle à une diode

Les caractéristiques électriques du module photovoltaïque, le modèle à une seule diode sont données dans le tableau suivant :

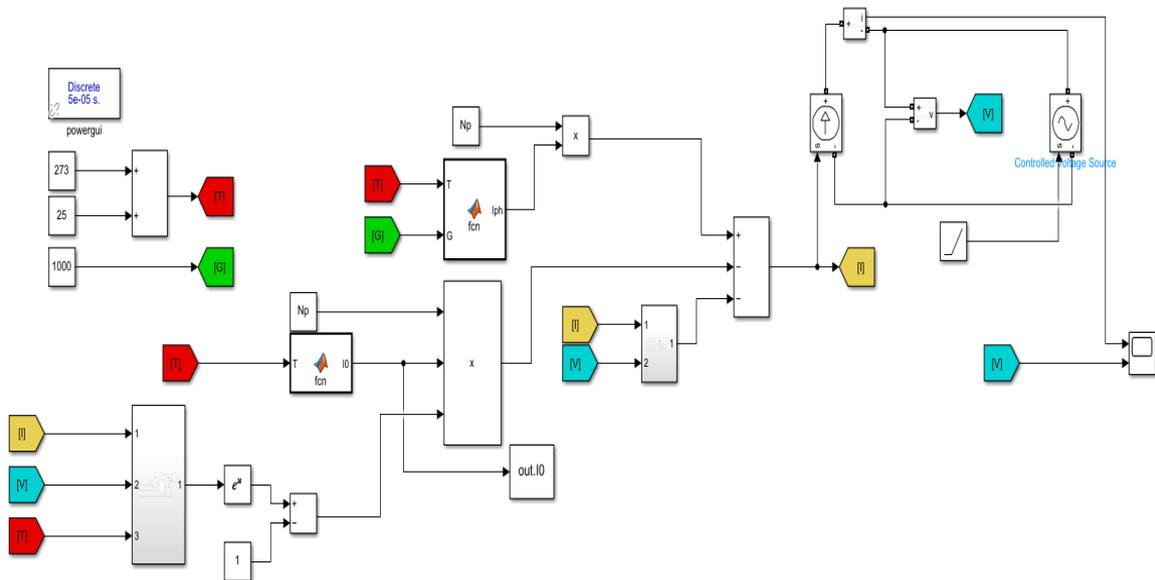
**Tableaux III. 1** : Caractéristique électrique du Module PWX 500 à une diode [29]

Puissance maximale	<b>P<sub>max</sub></b>	<b>49W</b>
Tension de crête maximale	<b>V<sub>m</sub></b>	<b>17V</b>
Courant de crête maximale	<b>I<sub>m</sub></b>	<b>2.88A</b>
Tension du circuit ouvert	<b>V<sub>oc</sub></b>	<b>21.8V</b>
Courant de court-circuit	<b>I<sub>sc</sub></b>	<b>3.11A</b>
Resistance série	<b>R<sub>s</sub></b>	<b>0.45 Ω</b>
Resistance parallèle	<b>R<sub>sh</sub></b>	<b>310 Ω</b>

### Chapitre III : Simulation du module photovoltaïque

Constante d'idéalité de la diode	<b>A1</b>	<b>1.3</b>
Coefficient du Température Courent Constant	<b>Ki</b>	<b><math>1.3 \cdot 10^{-3}</math> (/K°)</b>
Coefficient du Température Tension Constant	<b>Kv</b>	<b><math>-72.5 \cdot 10^{-3}</math> (/K°)</b>
Nombre de cellule série	<b>Ns</b>	<b>36</b>
Nombre de cellule parallèle	<b>Np</b>	<b>1</b>

Le schéma de simulation du modèle à une diode du module photovoltaïque PWX 500 (49W), implanté dans l'environnement Simulink/Matlab est représenté sur la figure ci-dessous :



**Figure III. 1 :** Schéma bloc de simulation du module photovoltaïque.

#### III.2.1.1. Résultat de simulation

Nous avons simulé la caractéristique puissance-tension  $P$  (W) et courant-tension  $I$  (V) sous les conditions standards ; irradiation,  $G = 1000 \text{ w/m}^2$  et Température,  $T = 25^\circ\text{C}$ . Les résultats de simulation sont représentés sur les figures ci-dessous :

### Chapitre III : Simulation du module photovoltaïque

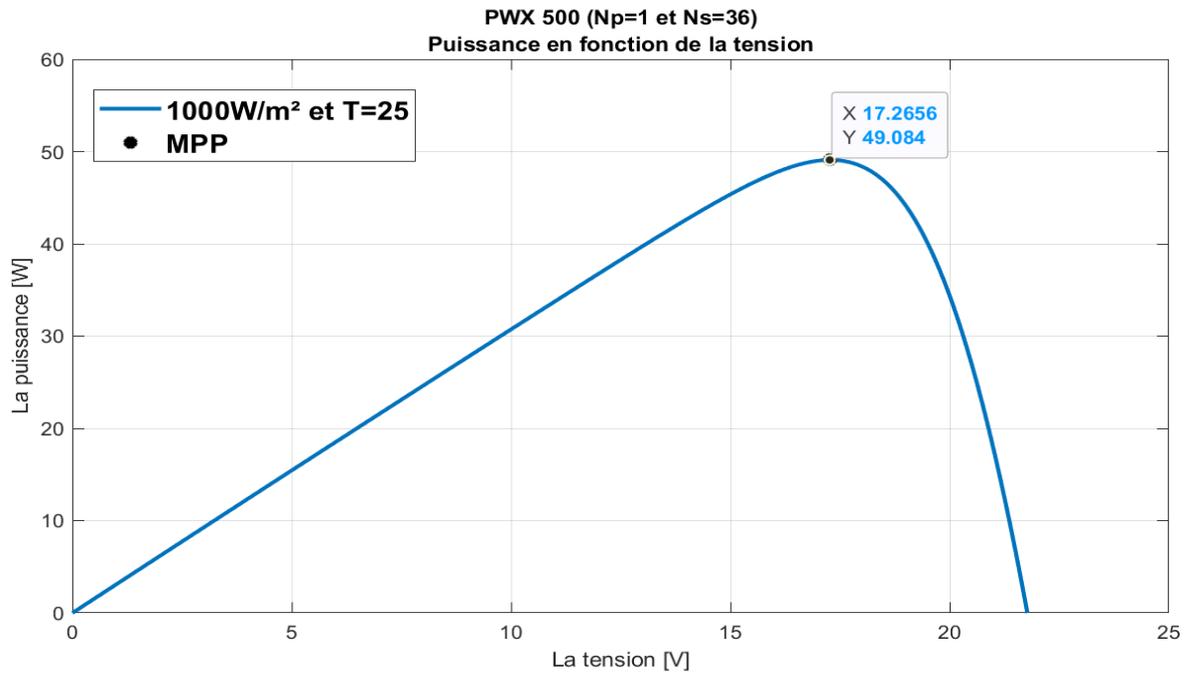


Figure III. 2 : Caractéristique puissance- tension.

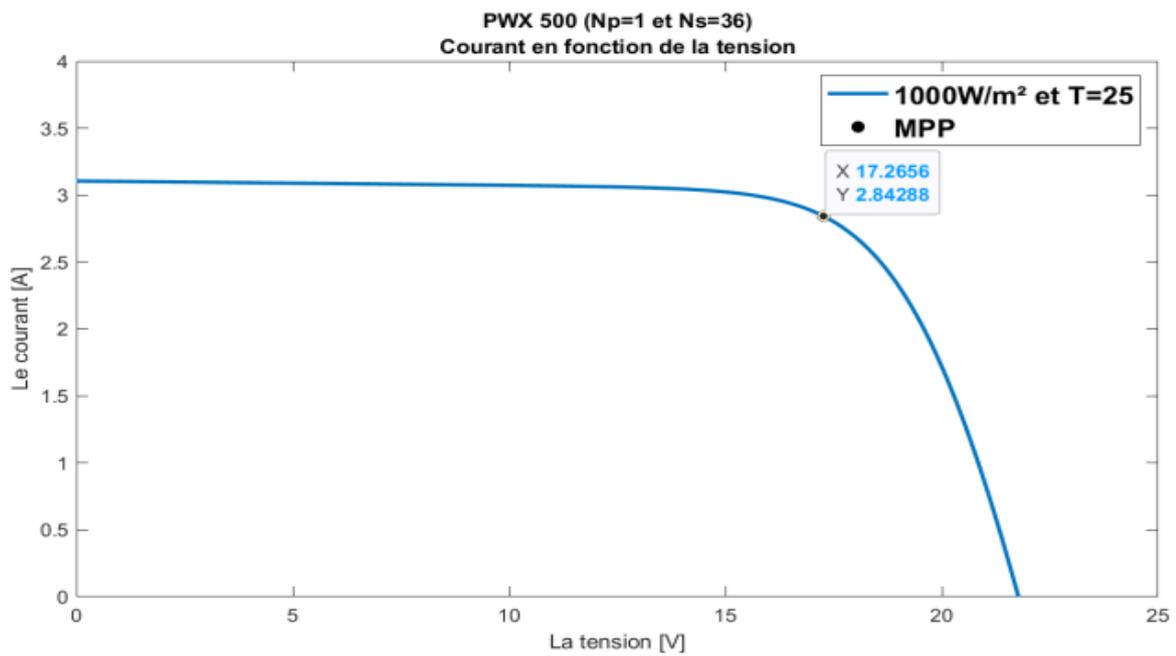


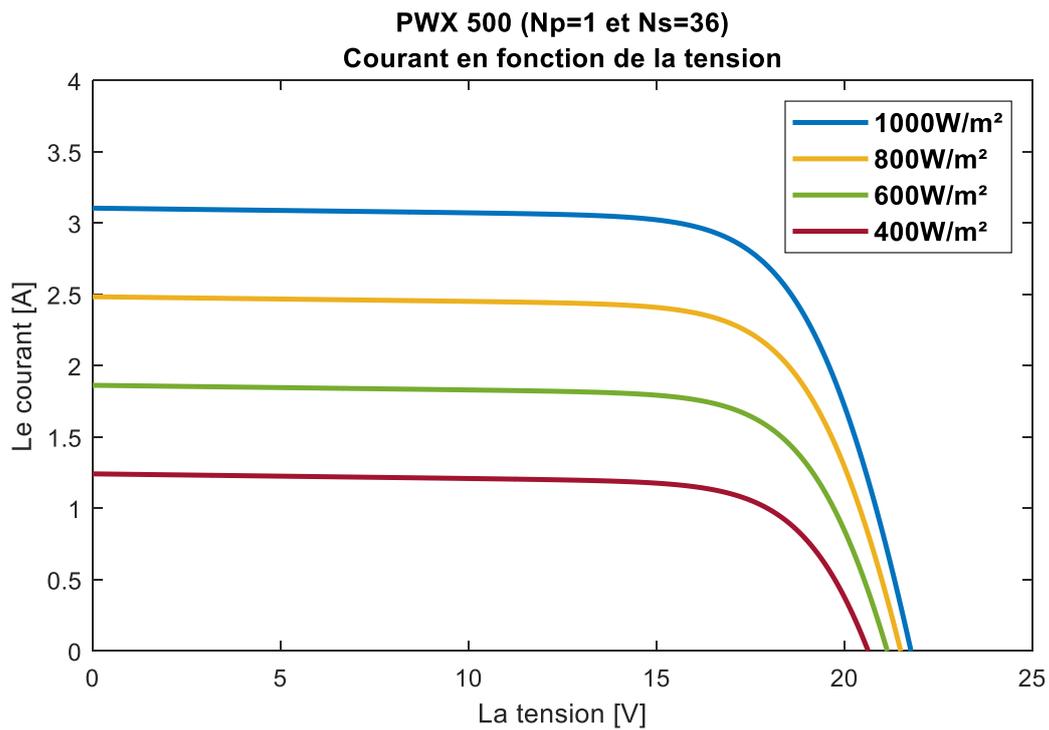
Figure III. 3 : Caractéristique courant -tension.

## Chapitre III : Simulation du module photovoltaïque

### III.2.1.1.a Influence de l'éclairement

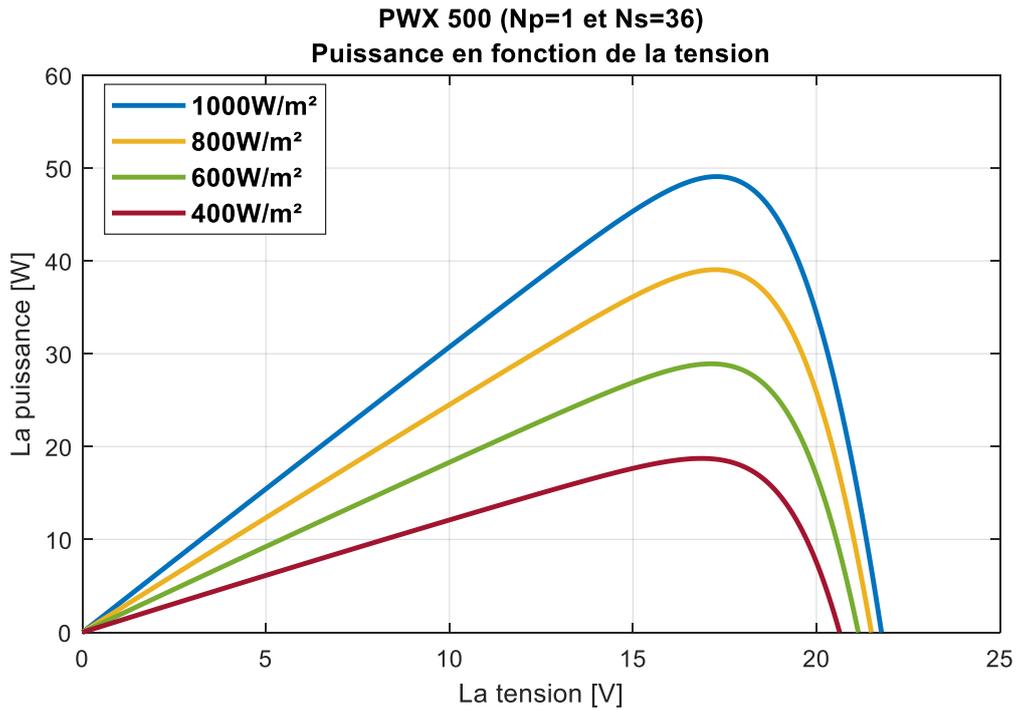
Pour voir influence de l'ensoleillement, nous avons simulé les caractéristiques puissance-tension  $P$  (V) et courant-tension  $I$  (V) pour une large plage de variation de l'éclairement reçu par le panneau photovoltaïque (entre 400 à 1000  $W/m^2$ ) à une température constante 25°C.

Les résultats de simulation sont représentés sur les figures ci-dessous :



**Figure III. 4 :** Caractéristique courant tension pour différentes valeurs d'éclairement à température constante (25°C).

## Chapitre III : Simulation du module photovoltaïque



**Figure III. 5 :** Caractéristique puissance tension pour différentes valeurs d'éclairement à température constante (25°C).

**Tableaux III. 2 :** Valeurs obtenues pour le modèle à une diode (éclairement)

<b>Modèle à une diode</b>					
<b>Caractéristiques</b>	<b><math>V_m</math> (V)</b>	<b><math>I_m</math> (A)</b>	<b><math>P_{max}</math> (W)</b>	<b><math>V_{oc}</math> (V)</b>	<b><math>I_{sc}</math> (A)</b>
<b><math>G=1000 W/m^2</math></b>	<b>17.2656</b>	<b>2.8428</b>	<b>49.0840</b>	<b>21.7658</b>	<b>3.1054</b>
<b><math>G=800 W/m^2</math></b>	<b>17.2264</b>	<b>2.2673</b>	<b>39.0588</b>	<b>21.4997</b>	<b>2.4843</b>
<b><math>G=600 W/m^2</math></b>	<b>17.1479</b>	<b>1.6863</b>	<b>28.9170</b>	<b>21.1436</b>	<b>1.8633</b>
<b><math>G=400 W/m^2</math></b>	<b>16.8732</b>	<b>1.1097</b>	<b>18.7258</b>	<b>20.6326</b>	<b>1.2422</b>

### ➤ Interprétation des résultats

Les figures III.4 et III.5 montrent que, le courant de court-circuit  $I_{sc}$  délivré par le panneau PV est proportionnel à l'éclairement solaire. Il en découle immédiatement une puissance maximale  $P_{max}$  en sortie qui varie aussi proportionnellement avec l'irradiation.

### Chapitre III : Simulation du module photovoltaïque

En contrepartie, nous observons une diminution de la tension en circuit ouvert  $V_{oc}$  au fur et à mesure du ralentissement de l'éclairement. En effet, lorsque l'éclairement varie de  $1000 \text{ W/m}^2$  à  $800 \text{ W/m}^2$ , on remarque que la tension en circuit ouvert diminue d'une valeur qui vaut  $\Delta V = 0.2161 \text{ V}$  et une réduction de la puissance maximale qui vaut  $\Delta P = 10.0252 \text{ w}$ .

L'énergie électrique produite par un panneau photovoltaïque dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface.

#### III.2.1.1.b. Influence de la température

Pour voir l'influence de la température, nous avons simulé les caractéristiques puissance-tension  $P(V)$  et courant-tension  $I(V)$  pour différentes valeurs de température ( $25^\circ\text{C}$  à  $50^\circ\text{C}$ ) pour un éclairement solaire constant  $1000 \text{ W/m}^2$ .

Les résultats de simulation sont représentés sur les figures ci-dessous :

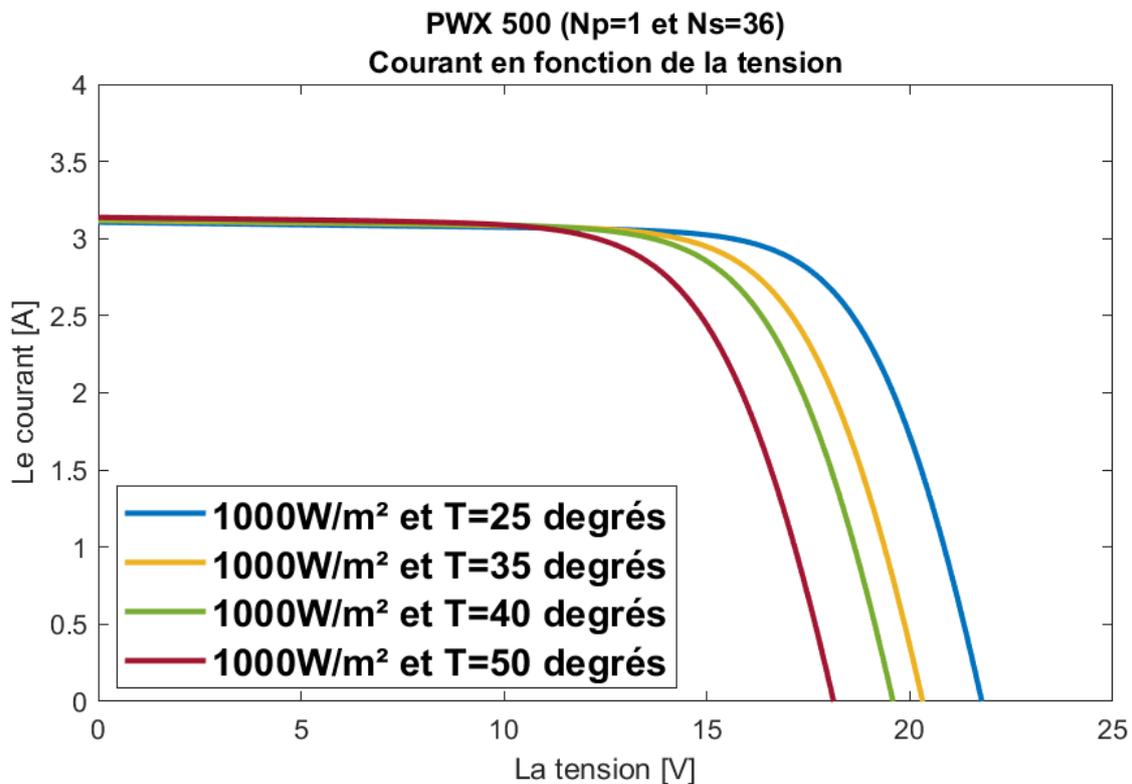
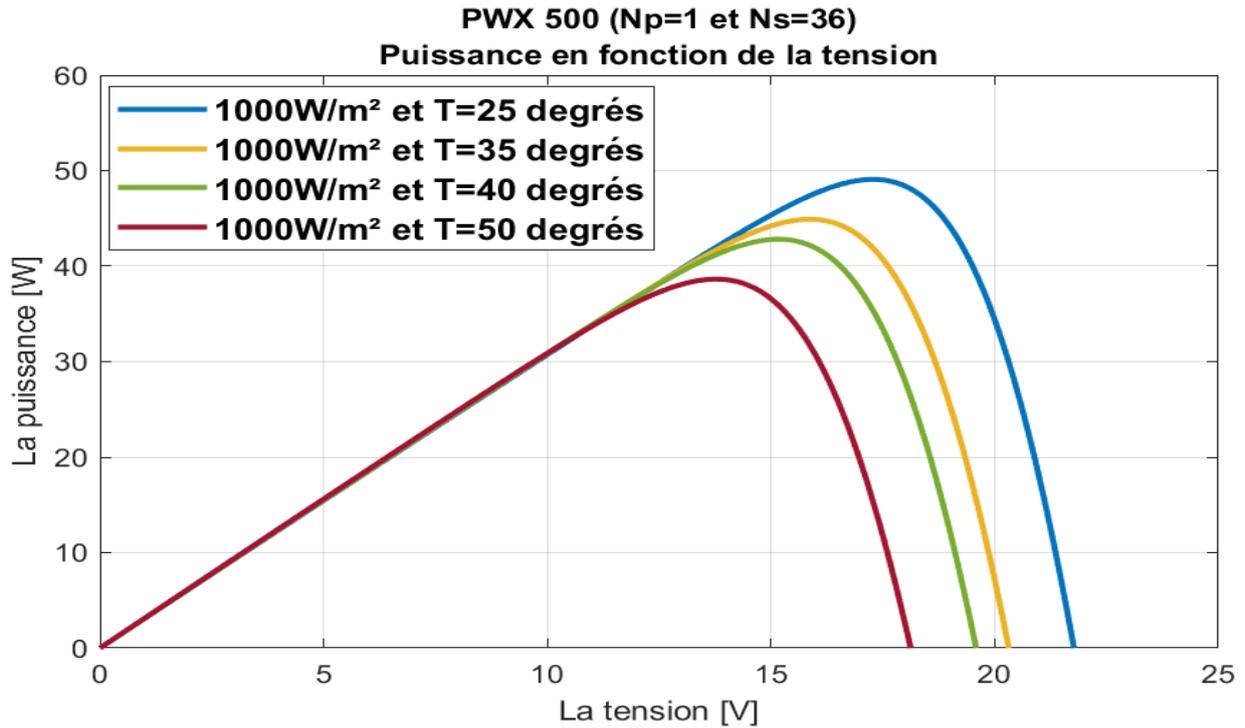


Figure III. 6 : Caractéristique courant -tension à  $1000 \text{ W/m}^2$ .

## Chapitre III : Simulation du module photovoltaïque



**Figure III. 7 :** Caractéristique puissance- tension à 1000W/m<sup>2</sup>.

**Tableaux III. 3 :** Valeurs obtenues pour le modèle à une diode (température)

Modèle à une diode					
Caractéristiques	Vm (V)	Im (A)	Pmax (W)	Voc (V)	Isc (A)
T= 25 degrés	17.2656	2.8428	49.0840	21.7658	3.1054
T= 35 degrés	15.8530	2.8327	44.9070	20.3149	3.1184
T= 40 degrés	15.1466	2.8268	42.8167	19.5847	3.1249
T= 50 degrés	13.7732	2.8054	38.6394	18.1218	3.1379

### ➤ Interprétation des résultats

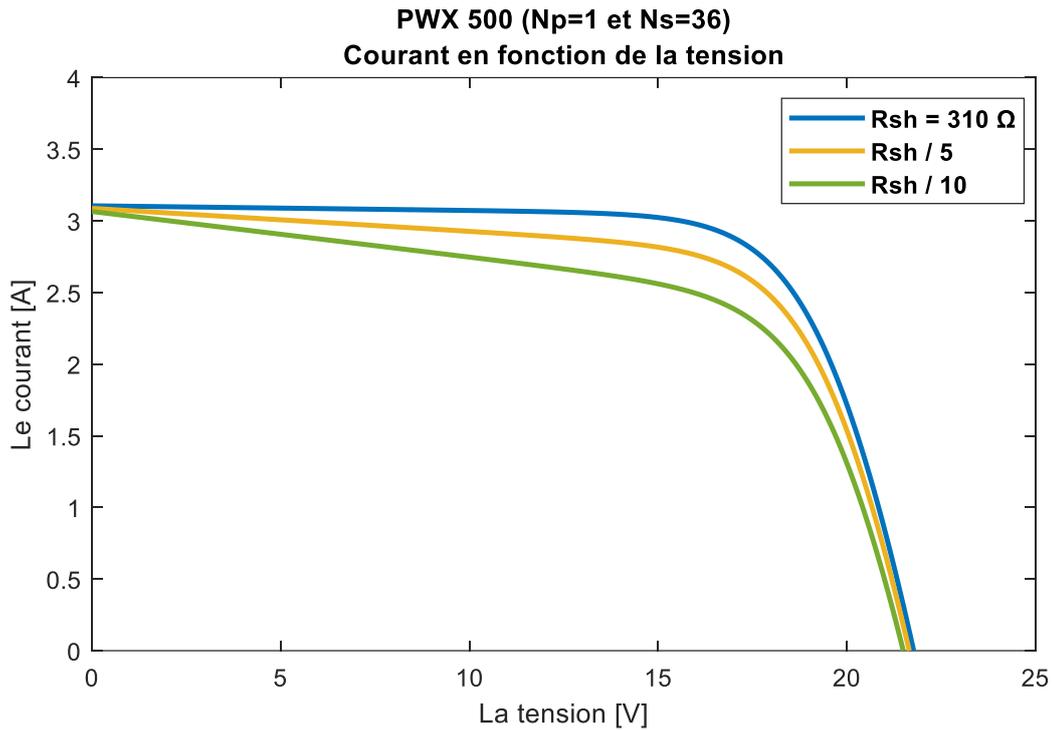
Si la température est de 25 à 35 degrés Celsius, on observe une diminution de la tension de circuit ouvert, de  $\Delta V = 1,4509$  volts. Plus la température est supérieure plus Voc est faible et le courant de court-circuit Isc augmente légèrement avec la température. Cette augmentation est moins importante que la baisse de tension. L'influence de la température sur Isc peut être négligée dans la majorité des cas. Par conséquent, la puissance maximale diminue de  $\Delta P = 4,770$  W. Cela met en évidence l'effet négatif de la température sur la tension du circuit ouvert. Ainsi,

## Chapitre III : Simulation du module photovoltaïque

il est évident que les cellules PV fonctionnent de manière plus performante dans des environnements froids et sous un ciel dégagé.

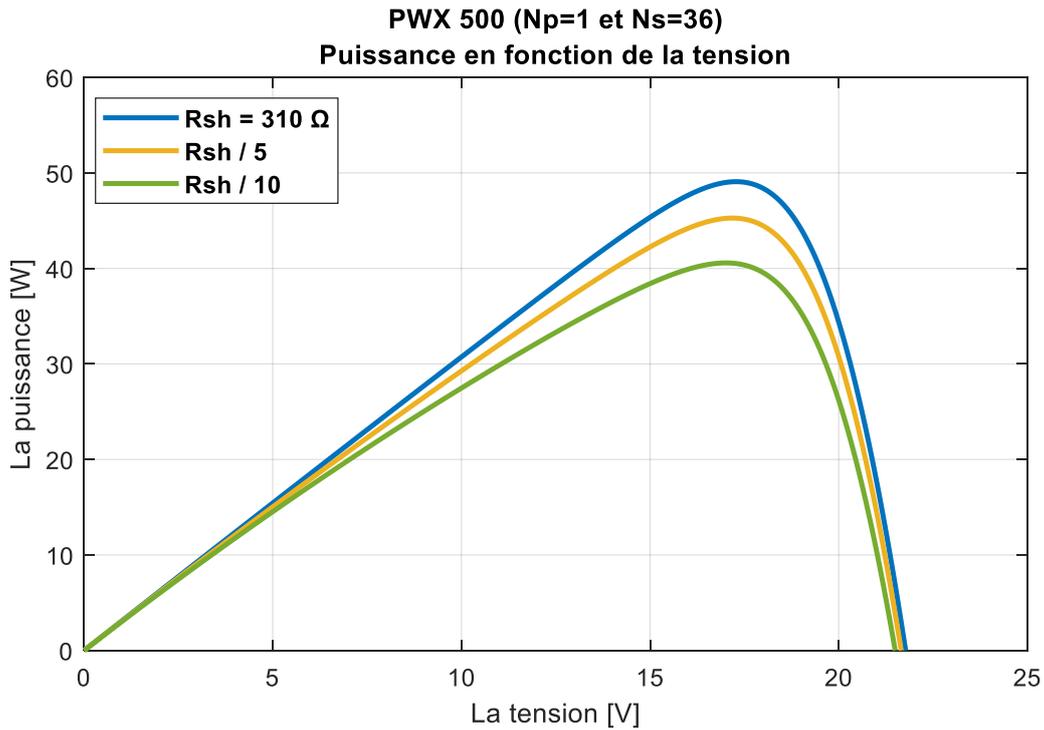
### III.2.1.1.c Effet de la résistance parallèle Rsh

La figure III.8 illustre respectivement les caractéristiques I-V et P-V pour différentes résistances shunt.



**Figure III. 8 :** Effet de la résistance shunt sur les caractéristique I(V).

## Chapitre III : Simulation du module photovoltaïque



**Figure III. 9 :** Effet de la résistance shunt sur les caractéristique P(V).

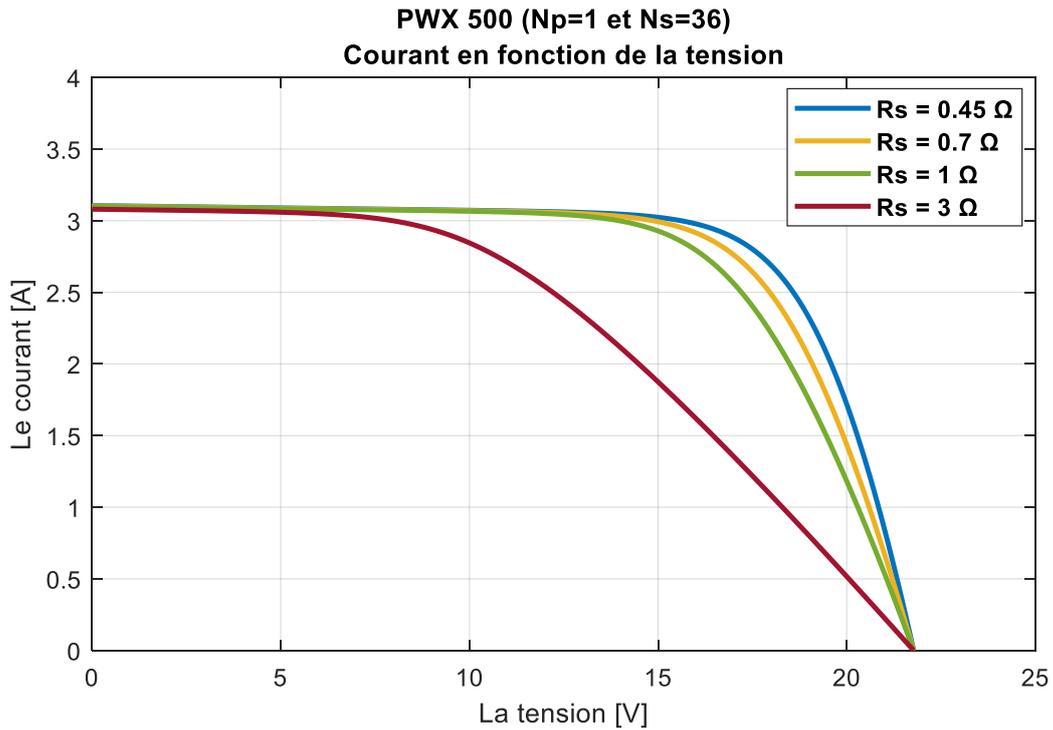
En remarque d'après la figure (III.8) que l'influence de la résistance parallèle (shunt) sur la caractéristique courant-tension se traduit par une légère diminution de la tension de circuit ouvert, et une augmentation de la pente de la courbe I-V de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme une source de courant.

Pour obtenir une meilleure puissance de sortie et un bon facteur de remplissage, il est essentiel que la résistance shunt soit suffisamment grande.

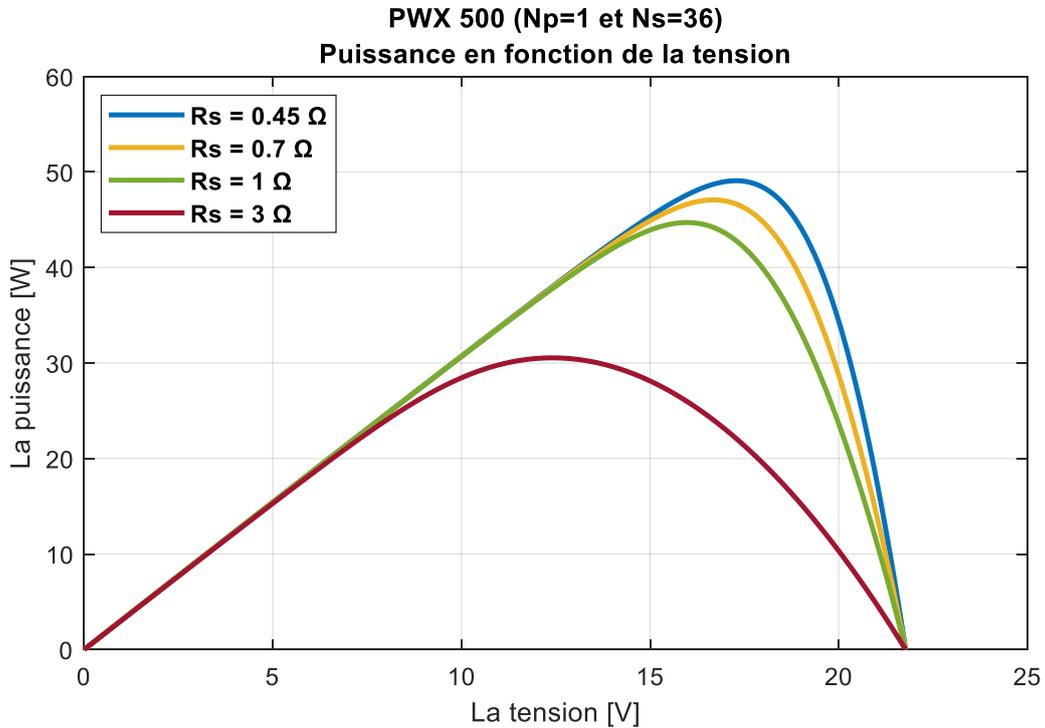
### III.2.1.1.d Effet de la résistance parallèle $R_s$

La figure III.9, illustre respectivement les caractéristiques I-V et P-V pour différentes résistances série.

### Chapitre III : Simulation du module photovoltaïque



**Figure III. 10 :** L'influence de la résistance série ( $R_s$ ) sur la caractéristique I (V) du panneau PV.



**Figure III. 11 :** L'influence de la résistance série ( $R_s$ ) sur la caractéristique P(V) du panneau PV.

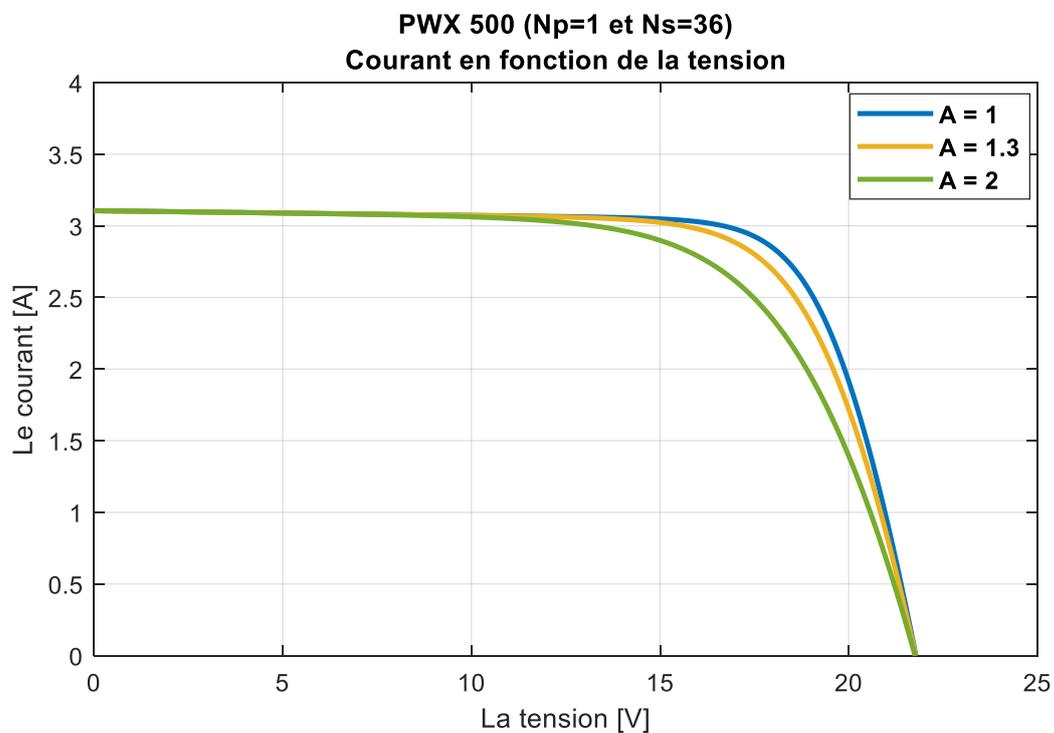
## Chapitre III : Simulation du module photovoltaïque

D'après la figure III.9, on constate que la résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode se comporte comme un générateur de tension. Elle ne change pas la tension du circuit ouvert, et lorsqu'elle augmente, elle réduit la valeur du courant de court-circuit.

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

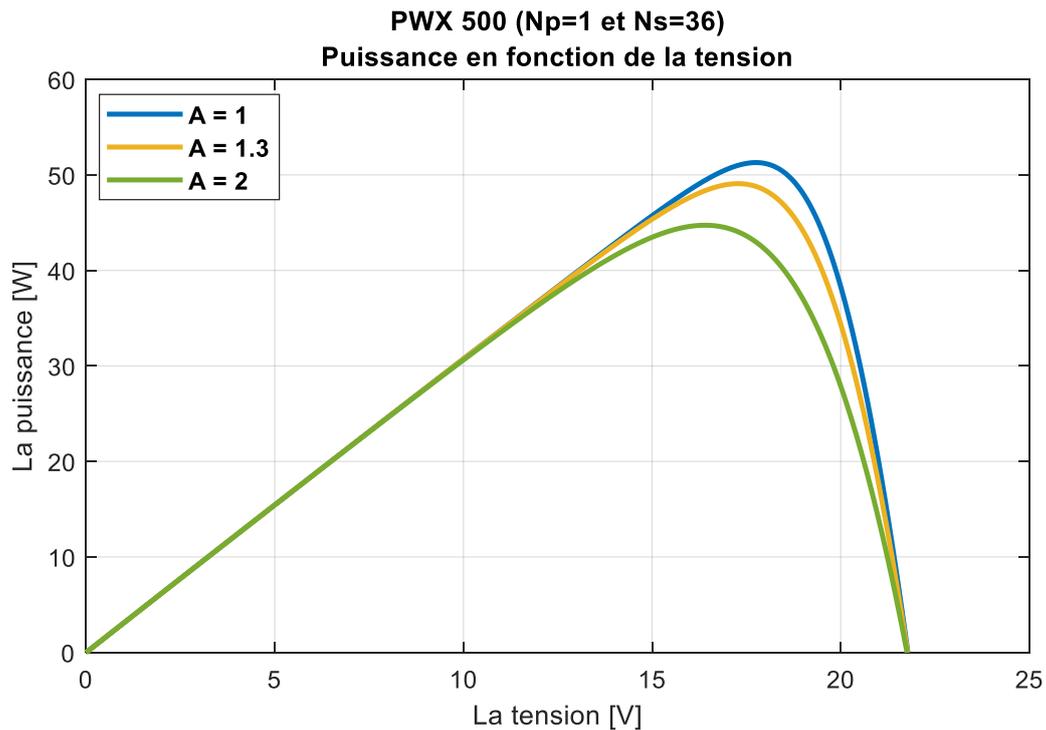
### III.2.1.1.e Effet du facteur d'idéalité

Les figures III.12 et III.13, illustre respectivement les caractéristiques I-V et P-V pour différentes valeurs de facteur d'idéalité.



**Figure III. 12** : Effet du facteur d'idéalité de la diode sur les caractéristiques I(V).

## Chapitre III : Simulation du module photovoltaïque



**Figure III. 13 :** Effet du facteur d'idéalité de la diode sur les caractéristiques P(V).

D'après les figures ci-dessus, on constate que l'augmentation de ce facteur entraîne la diminution du point de puissance maximale tandis que le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert demeurent constantes.

Ce facteur prend la valeur de 1 pour une diode idéale et inférieure à 2 pour une diode non idéale.

### III.2.2. Simulation du module photovoltaïque le modèle à deux diodes

Les caractéristiques électriques du module photovoltaïque, le modèle à deux diodes sont données dans le tableau suivant :

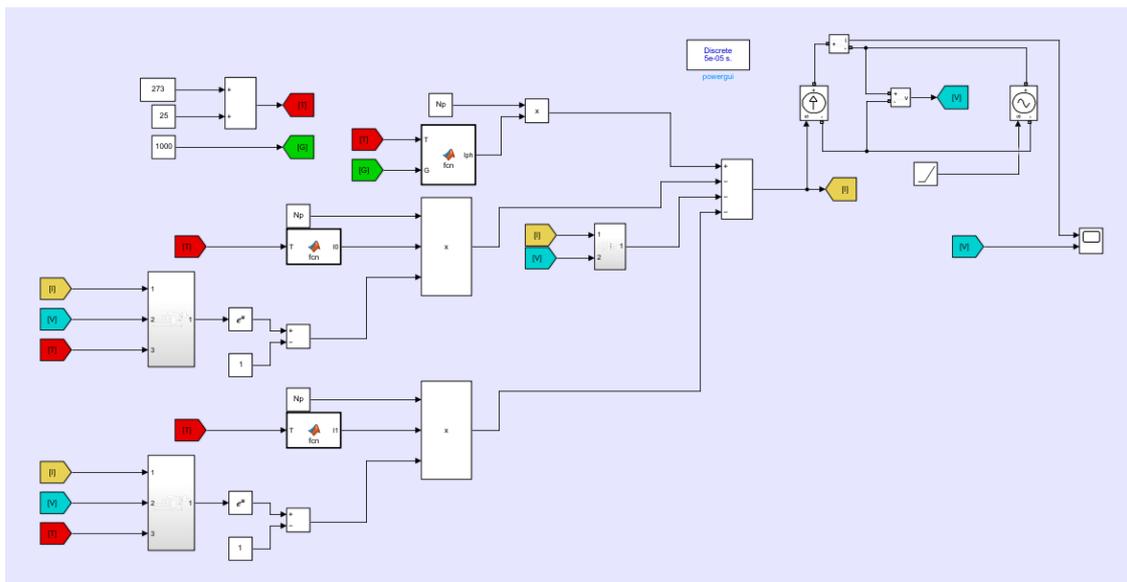
**Tableaux III. 4 :** caractéristique électrique du Module PWX 500 a deux diodes [29]

Puissance maximale	<b>P<sub>max</sub></b>	<b>49W</b>
Tension de crête maximale	<b>V<sub>m</sub></b>	<b>17V</b>
Courant de crête maximale	<b>I<sub>m</sub></b>	<b>2.88A</b>
Tension du circuit ouvert	<b>V<sub>oc</sub></b>	<b>21.8V</b>
Courant de court-circuit	<b>I<sub>sc</sub></b>	<b>3.11A</b>

### Chapitre III : Simulation du module photovoltaïque

Resistance série	<b>Rs</b>	<b>0.3 Ω</b>
Resistance parallèle	<b>Rsh</b>	<b>200 Ω</b>
Constante d'idéalité de la diode 1	<b>A1</b>	<b>1</b>
Constante d'idéalité de la diode 2	<b>A2</b>	<b>1.2</b>
Coefficient du CC, Température Current Constant	<b>Ki</b>	<b>1.3*10-3 (/K°)</b>
Coefficient du CC, Température Voltage Constant	<b>Kv</b>	<b>-72.5*10-3 (/K°)</b>
Nombre de cellule série	<b>Ns</b>	<b>36</b>
Nombre de cellule parallèle	<b>Np</b>	<b>1</b>

Le schéma de simulation du modèle à deux diodes du module photovoltaïque PWX 500 (49W), implanté dans l'environnement Simulink/Matlab est représenté sur la figure ci-dessous :



**Figure III. 14 :** Bloc de simulation sous l'environnement Matlab/Simulink.

#### III.2.2.1. Résultat de Simulation

Nous avons simulé la caractéristique puissance-tension P (V) et courant-tension I (V) sous les conditions standards ; irradiation,  $G = 1000 \text{w/m}^2$  et Température,  $T = 25\text{C}^\circ$ . Les résultats de simulation sont représentés sur les figures ci-dessous :

### Chapitre III : Simulation du module photovoltaïque

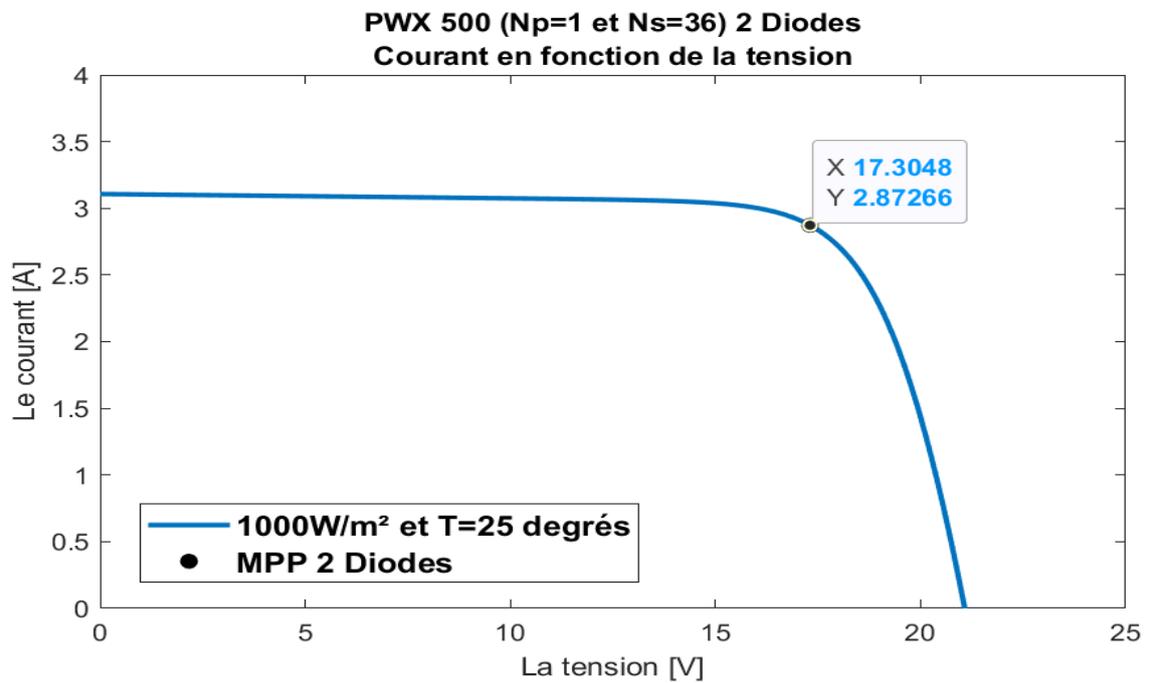


Figure III. 15 : Caractéristique courant -tension.

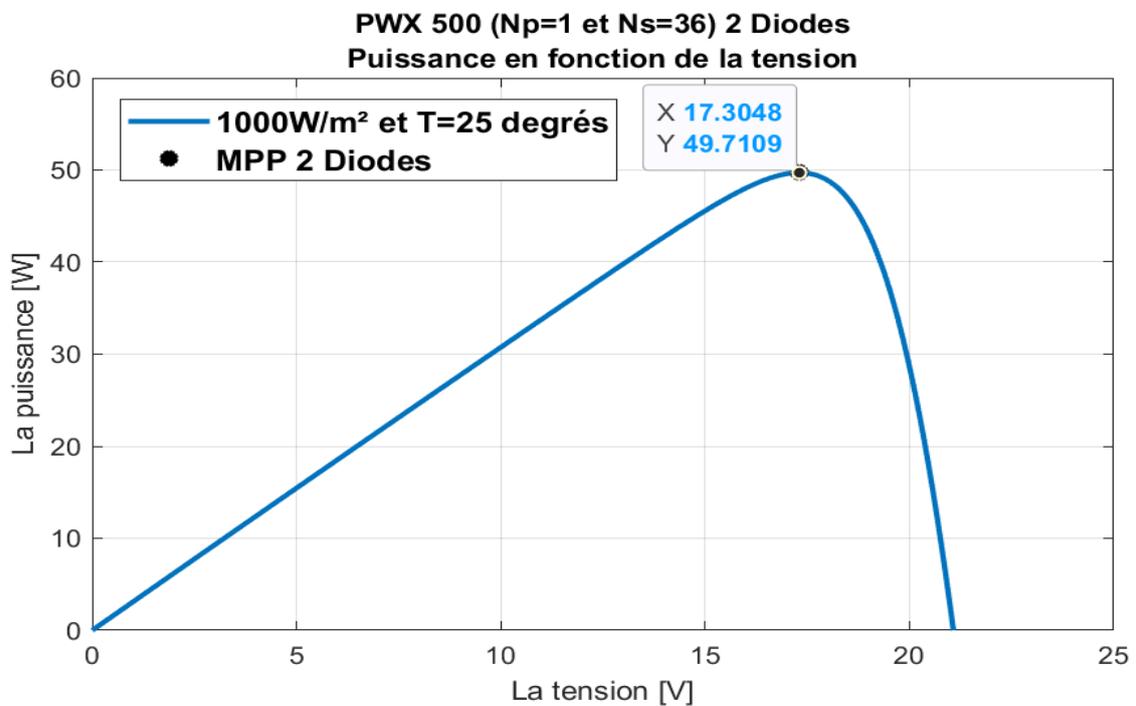


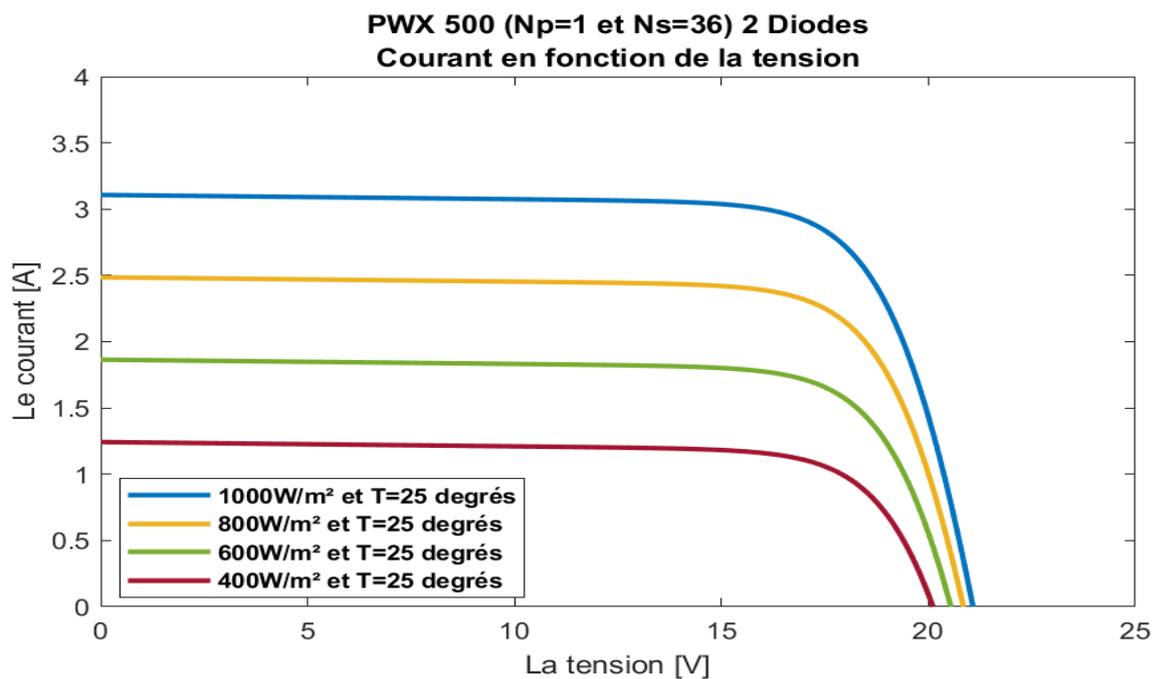
Figure III. 16 : Caractéristique courant -tension.

## Chapitre III : Simulation du module photovoltaïque

### III.2.2.1.a Influence de l'éclairement

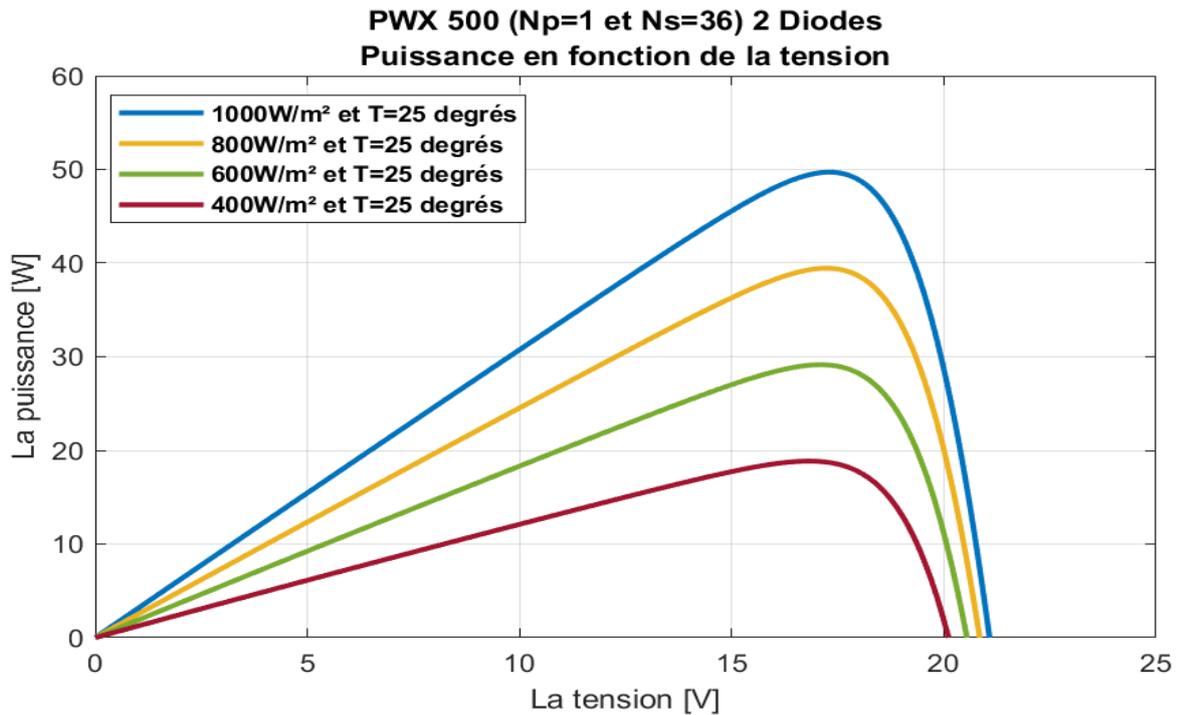
De la même manière que pour un modèle à une diode, pour voir influence de l'ensoleillement, nous avons simulé les caractéristiques puissance-tension  $P$  (W) et courant-tension  $I$  (V) pour une large plage de variation de l'éclairement reçu par le panneau photovoltaïque (entre 400 à 1000 W/m<sup>2</sup>) à une température constante 25°C.

Les résultats de simulation sont représentés sur les figures ci-dessous :



**Figure III. 17 :** Caractéristique courant tension pour différentes valeurs d'éclairement à température constante (25°C).

## Chapitre III : Simulation du module photovoltaïque



**Figure III. 18 :** Caractéristique puissance tension pour différentes valeurs d'éclairement à température constante (25°C).

**Tableaux III. 5 :** Valeurs obtenues pour le modèle à deux diodes (éclairage)

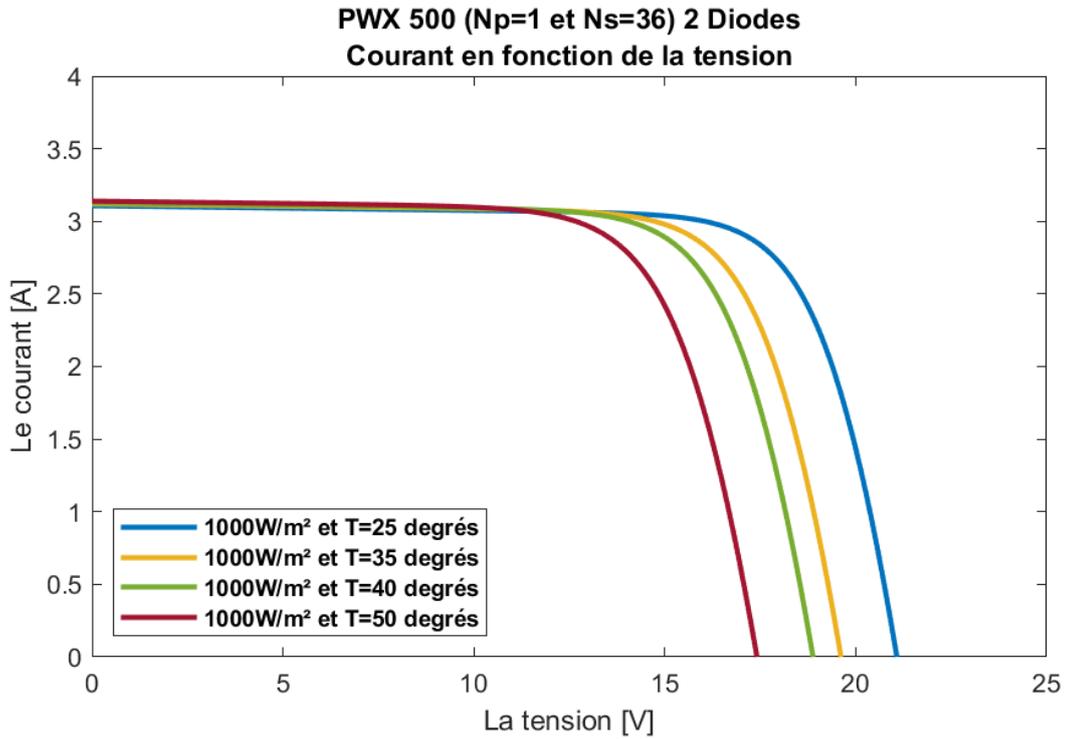
<b>Modèle à deux diodes</b>					
<b>Caractéristiques</b>	<b>Vm (V)</b>	<b>Im (A)</b>	<b>Pmax (W)</b>	<b>Voc (V)</b>	<b>Isc (A)</b>
<b>G=1000 W/m<sup>2</sup></b>	<b>17.3048</b>	<b>2.8726</b>	<b>49.7109</b>	<b>21.0764</b>	<b>3.1070</b>
<b>G=800 W/m<sup>2</sup></b>	<b>17.2264</b>	<b>2.2901</b>	<b>39.4505</b>	<b>20.8444</b>	<b>2.4855</b>
<b>G=600 W/m<sup>2</sup></b>	<b>17.1086</b>	<b>1.7034</b>	<b>29.1445</b>	<b>20.5426</b>	<b>1.8642</b>
<b>G=400 W/m<sup>2</sup></b>	<b>16.8340</b>	<b>1.1199</b>	<b>18.8526</b>	<b>20.1109</b>	<b>1.2428</b>

### III.2.2.1.b Influence de la température

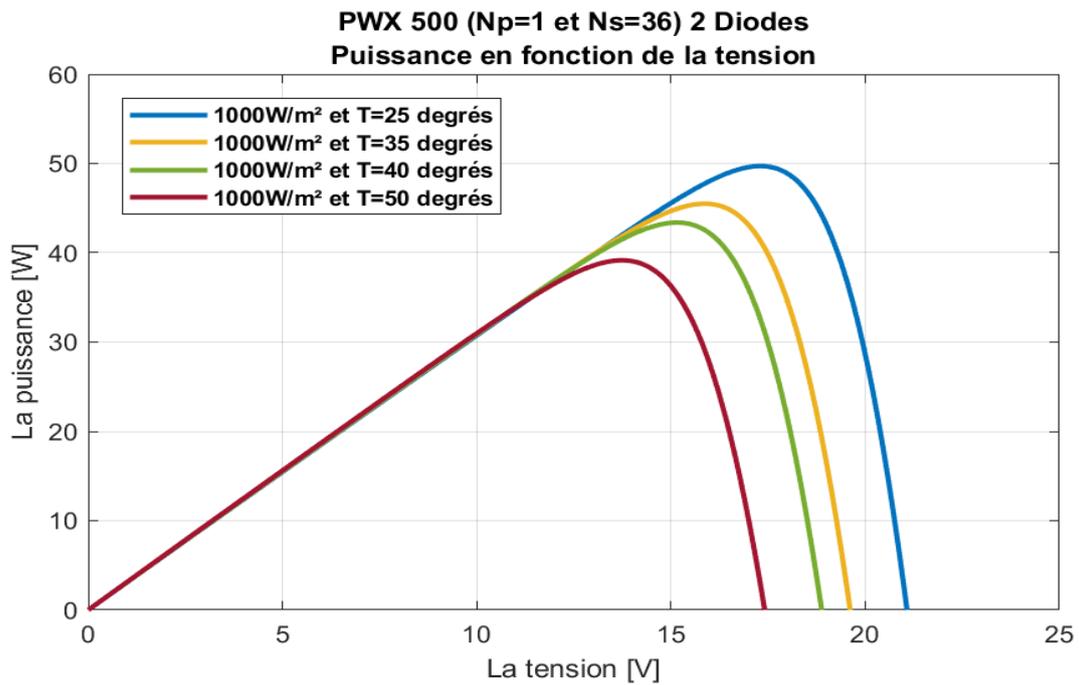
Pour voir l'influence de la température, nous avons simulé les caractéristiques puissance-tension  $P(V)$  et courant-tension  $I(V)$  pour différentes valeurs de température (25°C à 50°C) pour un éclairement solaire constant 1000 W/m<sup>2</sup>.

Les résultats de simulation sont représentés sur les figures ci-dessous :

### Chapitre III : Simulation du module photovoltaïque



**Figure III. 19 :** Caractéristique courant -tension à 1000W/ m<sup>2</sup>.



**Figure III. 20 :** Caractéristique puissance- tension à 1000W/m<sup>2</sup>.

### Chapitre III : Simulation du module photovoltaïque

Tableaux III. 6 : Valeurs obtenues pour le modèle à deux diodes (température)

Modèle à deux diodes					
Caractéristiques	Vm (V)	Im (A)	Pmax (W)	Voc (V)	Isc (A)
T= 25 degrés	17.3048	2.8726	49.7109	21.0764	3.1070
T= 35 degrés	15.8530	2.8698	45.4959	20.6134	3.1199
T= 40 degrés	15.1466	2.8642	43.3843	19.8808	3.1264
T= 50 degrés	13.7340	2.8511	39.1570	18.4132	3.1394

#### III.2.3. Comparaison entre les deux modèles de panneaux solaires $G=1000 \text{ W/m}^2$ $T=25^\circ\text{C}$

Nous avons simulé la caractéristique puissance-tension  $P$  (W) et courant-tension  $I$  (V) sous les conditions standards ( $G = 1000 \text{ w/m}^2$  et  $T = 25^\circ\text{C}$ ) pour les deux modèles électriques.

Les résultats de simulation sont représentés sur les figures ci-dessous :

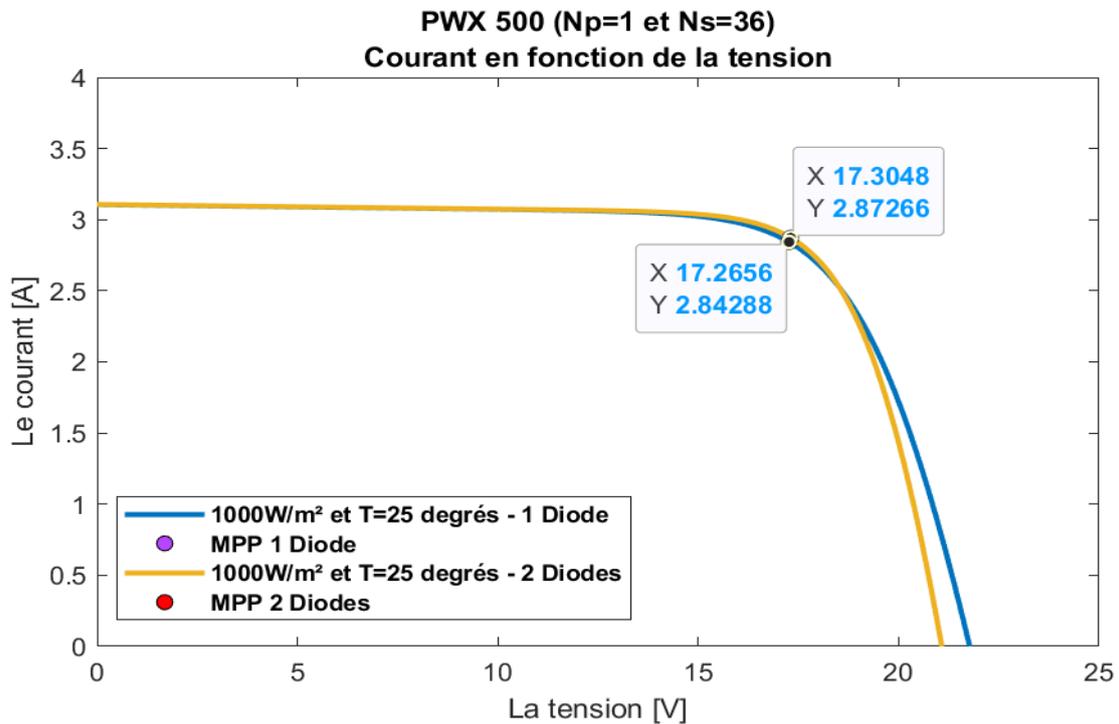
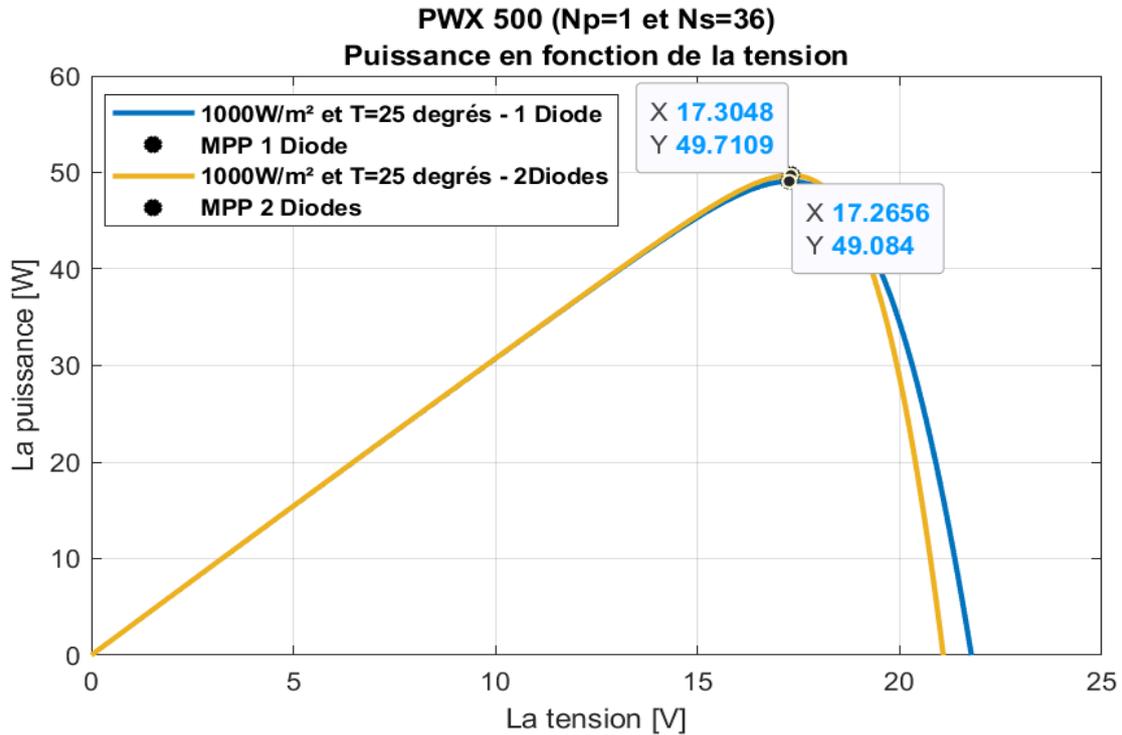


Figure III. 21 : Caractéristique  $I_{pv}=f(V_{pv})$  pour  $G=1000 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$

### Chapitre III : Simulation du module photovoltaïque



**Figure III. 22 :** Caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$  pour  $G=1000 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$

#### ➤ Interprétation des résultats

Les résultats démontrent que le modèle à deux diodes fournit une puissance maximale plus élevée que le modèle à une diode, avec une valeur égale à  $\Delta P = 0,6269 \text{ W}$ .

La tension en circuit ouvert du modèle à deux diodes est inférieure à celle du modèle à une diode d'une valeur  $\Delta V = 0.6894 \text{ V}$ . Par contre le courant  $I_{sc}$  est presque stable.

D'après les résultats d'un panneau solaire on constate :

- ✓ Le courant  $I_{sc}$  reste tel qu'il est.
- ✓ La puissance maximale  $P_{max}$  du modèle à deux diodes est supérieure à celle du modèle à une diodes.
- ✓ La tension en circuit ouvert  $V_{oc}$  du modèle à deux diodes est la plus petite.

## Chapitre III : Simulation du module photovoltaïque

### III.3. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons utilisé l'environnement MATLAB/Simulink, pour simuler les deux modèles de générateurs photovoltaïques qui ont été élaboré dans le chapitre précédent sous des conditions atmosphériques standard et variables.

Ces simulations nous a permis de déduire que les influences de l'éclairement et de la température sur la puissance pouvant être délivrée par un panneau PV sont importantes.

Nous avons finalisé ce chapitre par une comparaison entre les deux modèles, et nous avons constaté que le modèle à deux diodes délivre une puissance nettement supérieure à celle du modèle à une diode.

**Chapitre IV :**  
**Poursuite du point de**  
**puissance maximale**

## Chapitre IV : Poursuite du point de puissance maximale

### IV.1. Introduction

Pour optimiser l'efficacité d'un système photovoltaïque, Il est essentiel que les modules fonctionnent à leur maximum de puissance. Cela permet de maximiser le transfert d'énergie de la source vers la charge. Pour réaliser cela, il est essentiel d'avoir un convertisseur statique entre les modules photovoltaïques et la charge électrique. Ce convertisseur est équipé d'une technique appelée MPPT (Maximum Power Point Tracking), qui recherche en continu le point de puissance maximale (PPM). Grâce à cette approche, il est possible d'adapter l'impédance de manière efficace et d'optimiser le rendement global du système.

Dans ce chapitre, nous décrivons deux algorithmes de contrôle MPPT : P&O (Perturbation et Observation) et Incrémentation. Ensuite, nous simulerons le système en utilisant ces deux méthodes et comparerons les résultats obtenus avec P&O et Incrémentation. Enfin, nous appliquerons la méthode P&O au modèle à deux diodes et comparerons les performances avec le modèle à une diode.

### IV.2. Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque

Une commande MPPT est associée à un étage intermédiaire d'adaptation pour faire fonctionner un générateur PV de manière à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (température et éclairage), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum [30].

L'adaptation de l'impédance se fait habituellement en utilisant un convertisseur DC – DC comme le montre la figure (IV.1).

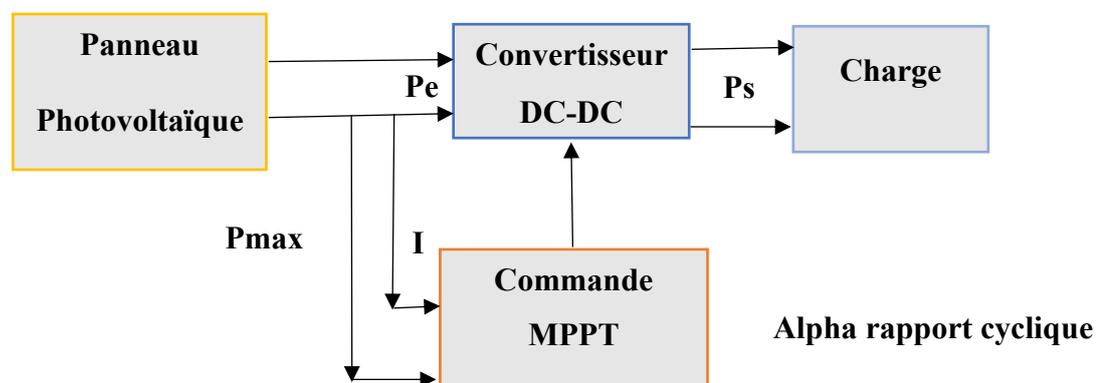


Figure IV. 1 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT [30].

## Chapitre IV : Poursuite du point de puissance maximale

### IV.2. Introduction d'un étage d'adaptation

Le hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue. Il existe plusieurs types de convertisseurs DC-DC nous citons :

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

Dans notre étude nous présentons le principe d'un convertisseur DC/DC de types Boost, qui est utilisé fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités. Ce type de convertisseur n'est constitué que par des éléments réactifs (Selfs, Capacités) qui, dans le cas idéal, ne consomment aucune énergie. C'est pour cette raison qu'ils sont caractérisés par un grand rendement [31].

#### IV.2.1. Convertisseur statique (Hacheur Boost)

Le convertisseur DC-DC est une interface qui permet l'adaptation entre le panneau PV et la charge afin d'extraire la puissance maximale du panneau. La figure IV.2 illustre le montage Boost.

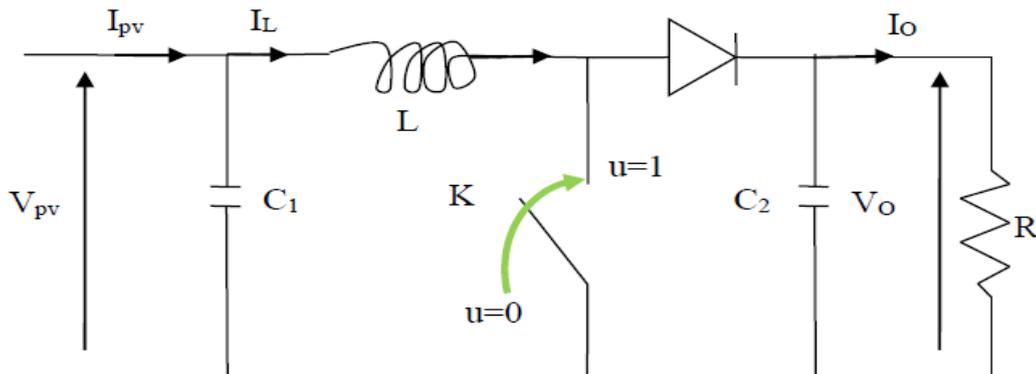


Figure IV. 2 : Schéma électrique de base du convertisseur Boost [32].

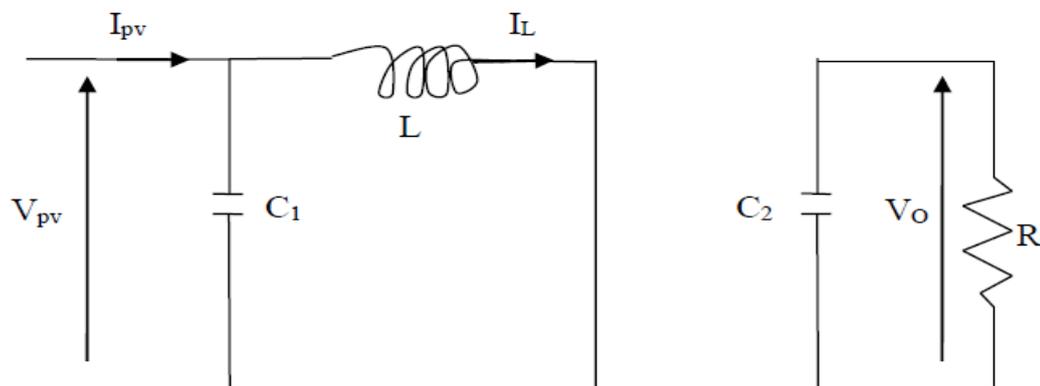
## Chapitre IV : Poursuite du point de puissance maximale

### ➤ Modélisation du convertisseur Boost

Un convertisseur Boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue plus élevée. Il comprend deux séquences selon que l'interrupteur commandable soit fermé ou ouvert.

Pour modéliser le convertisseur, on applique les lois de Kirchhoff aux circuits électriques caractérisant les deux séquences de fonctionnement.

La première séquence est caractérisée par  $u = 1$ , l'interrupteur fermé et la diode ouverte. Le circuit du convertisseur devient (Figure IV.3) :



**Figure IV. 3 :** Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est fermé [32].

Les équations qui régissent le convertisseur sont données par :

$$\begin{cases} \frac{dI_L}{dt} = \frac{V_{pv}}{L} \\ \frac{dV_o}{dt} = -\frac{V_o}{RC_2} \end{cases} \quad (\text{IV.1})$$

La seconde séquence de fonctionnement est caractérisée par  $u = 0$ , l'interrupteur ouvert et la diode fermée. Le circuit du convertisseur sera comme montré dans la figure IV.4.

## Chapitre IV : Poursuite du point de puissance maximale

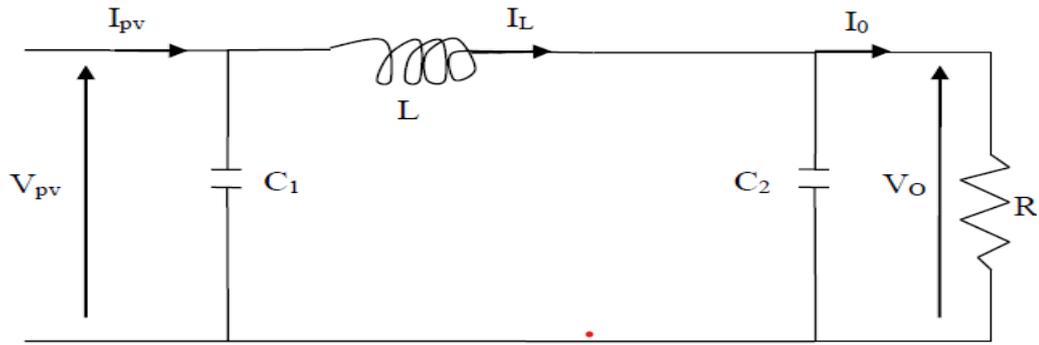


Figure IV. 4 : Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est ouvert [32].

Le système d'équations qui régit le convertisseur à l'état « off » est présenté ci-après :

$$\begin{cases} \frac{dI_L}{dt} = \frac{V_{pv}}{L} - \frac{V_0}{L} \\ \frac{dV_0}{dt} = -\frac{V_0}{RC_2} + \frac{I_L}{C_2} \end{cases} \quad (IV.2)$$

A partir des deux systèmes d'équations précédents (IV.1) et (IV.2), le modèle mathématique du hacheur Boost est déduit :

$$\begin{cases} V_{pv} = L \frac{dI_L}{dt} + V_0(1-u) \\ (1-u)I_L = C_2 \frac{dV_0}{dt} + I_0 \end{cases} \quad (IV.3)$$

Le rapport entre la tension d'entrée et celle de la sortie est donné par :

$$\frac{V_0}{V_{pv}} = \frac{1}{1-d} \quad (IV.4)$$

En appliquant le principe de conservation de puissance entre l'entrée et la sortie du convertisseur, on peut établir la valeur moyenne du courant dans l'inductance en fonction du courant moyen dans la charge et du rapport cyclique :

$$\frac{I_L}{I_0} = \frac{1}{1-d} \quad (IV.5)$$

Où  $d$  est le rapport cyclique du convertisseur Boost.

## Chapitre IV : Poursuite du point de puissance maximale

### IV.3. La commande MPPT

Le principe de la commande MPPT est de faire varier le rapport cyclique  $d$  automatiquement jusqu'à ce que l'on obtienne la valeur optimale de manière à maximiser la puissance du panneau, ainsi quels que soient les conditions météorologiques  $T$  et  $G$ , la commande du convertisseur place le système au point de fonction maximum ( $V_{mpp}$ ,  $I_{mpp}$ ) [33].

Parmi les techniques de contrôle classiques employées pour la poursuite du point de puissance on trouve :

- **Méthode de perturbation et observation.**
- **Méthode d'incrément de l'inductance.**

#### IV.3.1. Algorithme de perturbation et observation

La commande MPPT de type P&O (Perturb and Observe) implique de légèrement perturber la tension du générateur PV ( $V_{pv}$ ) et d'observer la réponse en puissance ( $P_{pv}$ ). Selon la figure IV.2, une augmentation de la tension  $V_{pv}$  entraîne une augmentation de la puissance  $P_{pv}$ . Cela indique que le point de fonctionnement se situe à gauche du point de puissance maximale (PPM). En revanche, si la puissance diminue, cela signifie que le système a dépassé le PPM et se trouve à droite de celui-ci.

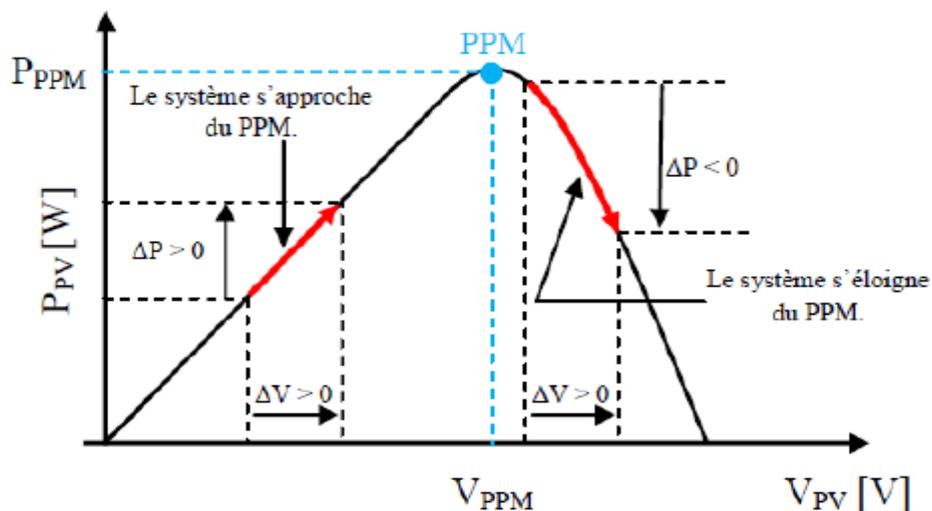


Figure IV. 5 : Caractéristique P-V selon la méthode P&O [34].

## Chapitre IV : Poursuite du point de puissance maximale

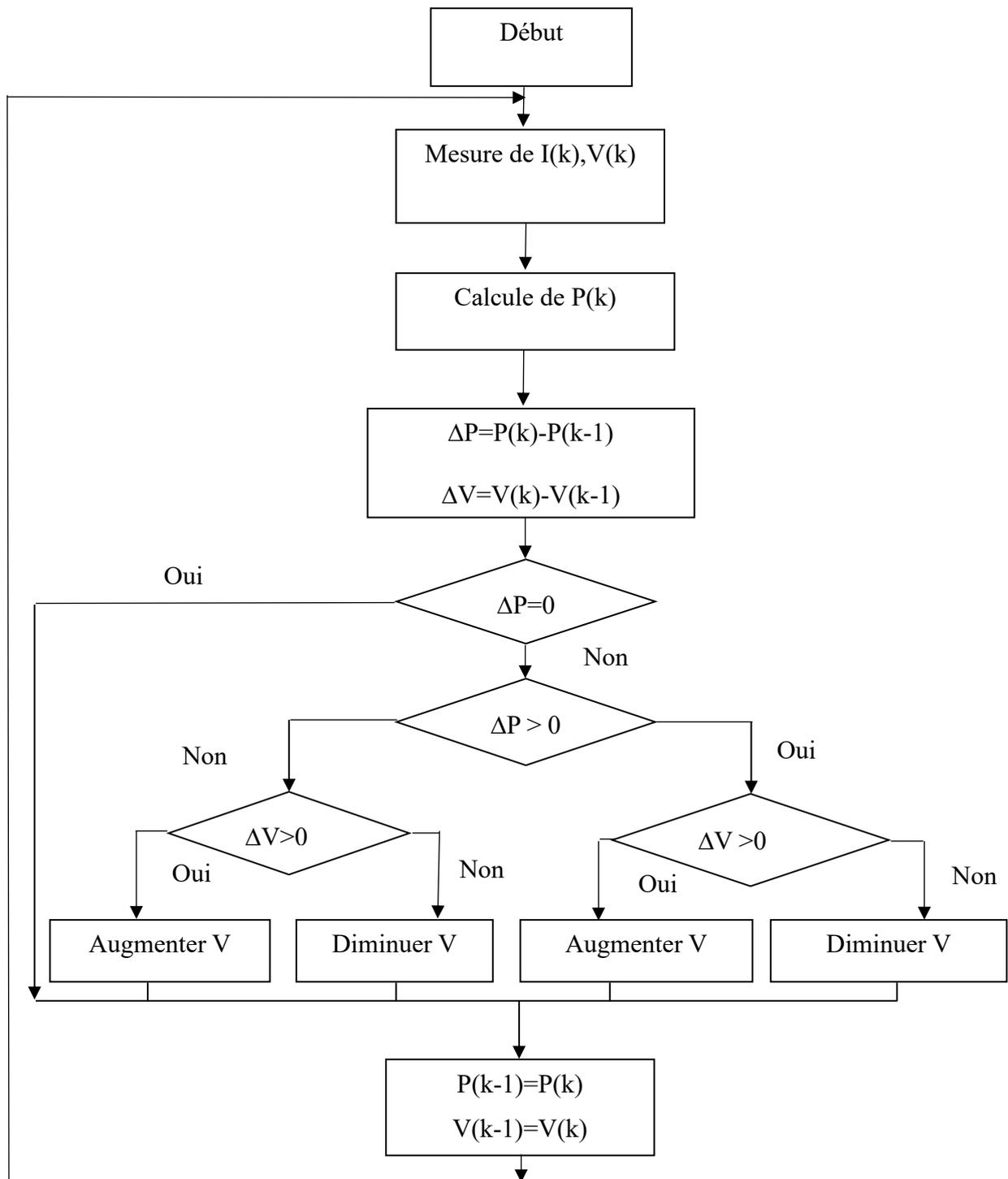


Figure IV. 6 : Organigramme de l'algorithme perturbation et observation (P&O) [34].

## Chapitre IV : Poursuite du point de puissance maximale

On peut conclure les cas possibles d'après la figure IV.3 comme suit [35] :

- ✓ Si  $\Delta P = 0$ , la tension pour l'échantillon suivant  $V(k+1)$  ne sera pas modifiée puisque le système fonctionne au MPP ;
- ✓ Si  $\Delta P > 0$  et  $\Delta V > 0$   $V(k)$  est sur la gauche du MPP et le  $V(k+1)$  sera situé sur un point avec une valeur de tension plus élevée de façon à atteindre le MPP.
- ✓ Si  $\Delta P > 0$  et  $\Delta V < 0$   $V(k)$  est sur la droite du MPP et le  $V(k+1)$  sera situé sur un point avec une valeur de tension inférieure de manière à atteindre le MPP.
- ✓ Si  $\Delta P < 0$  et  $\Delta V > 0$   $V(k)$  est sur la droite du MPP et le  $V(k+1)$  sera situé sur un point avec une valeur de tension inférieure de manière à atteindre le MPP.
- ✓ Si  $\Delta P < 0$  et  $\Delta V < 0$  est sur la gauche du MPP et le  $V(k+1)$  sera situé sur un point avec une valeur de tension plus élevée de façon à atteindre le MPP.

### IV.3.2. La méthode d'incrément de conductance (IncCond)

L'algorithme de l'incrément de conductance (IC) est une technique MPPT classique qui utilise deux sondes pour la mesure de la tension  $V$  de fonctionnement et du courant  $I$  du module PV. Cette méthode repose sur le fait que la dérivée de la puissance  $P$  de sortie par rapport à la tension  $V$  du module PV est égale à zéro au point de puissance maximale (MPP). Donc on a l'ensemble d'équations suivant : [36].

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V.I)}{dV} = I \frac{dV}{dV} + V \frac{dI}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (IV.6)$$

$$\frac{dP}{dV} = 0 \Leftrightarrow \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (IV.7)$$

Selon l'algorithme IC représenté sur la Fig. 3.1, la fonction centrale utilise les conditions suivantes afin d'atteindre le MPP :

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \text{ Pour } V = V_m ; \quad (IV.8)$$

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \text{ Pour } V < V_m ; \quad (IV.9)$$

$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \text{ Pour } V > V_m ; \quad (IV.10)$$

$V_m$  : la tension correspondant au MPP.

## Chapitre IV : Poursuite du point de puissance maximale

Si l'équation (3.3) est vérifiée, donc le système PV a atteint le MPP et aucun changement de la tension de fonctionnement n'est nécessaire, sinon la tension de fonctionnement est modifiée en conséquence.

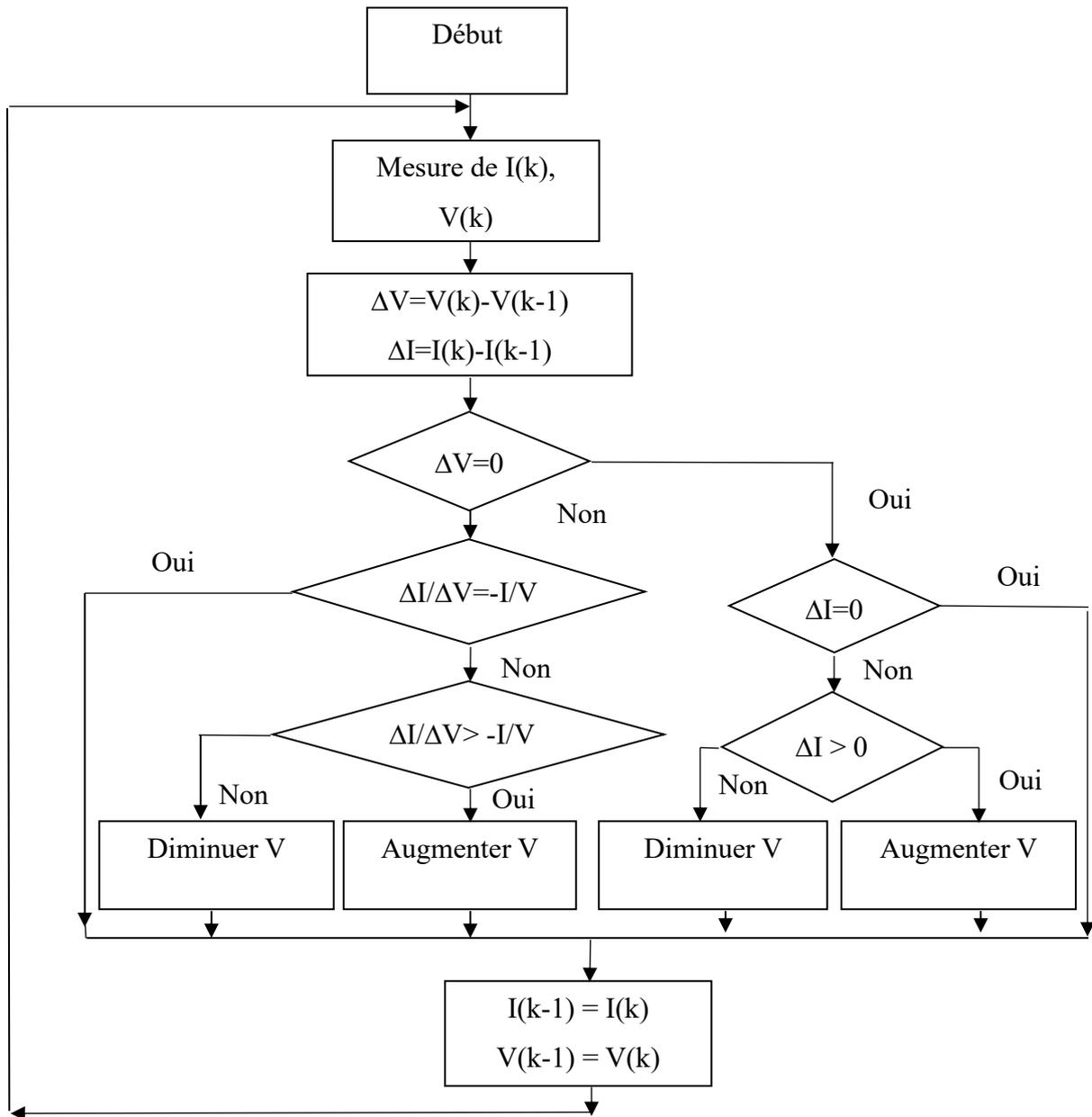


Figure IV. 7 : Organigramme de l'algorithme Incrementale Conductance (INC) [36].

## Chapitre IV : Poursuite du point de puissance maximale

### IV.4. Simulation du convertisseur Boost

La figure IV.8 représente la modélisation du convertisseur BOOST sous le logiciel MATLAB/Simulink, relié à une charge résistive, avec une tension d'entrée :  $V_e = 20V$ .

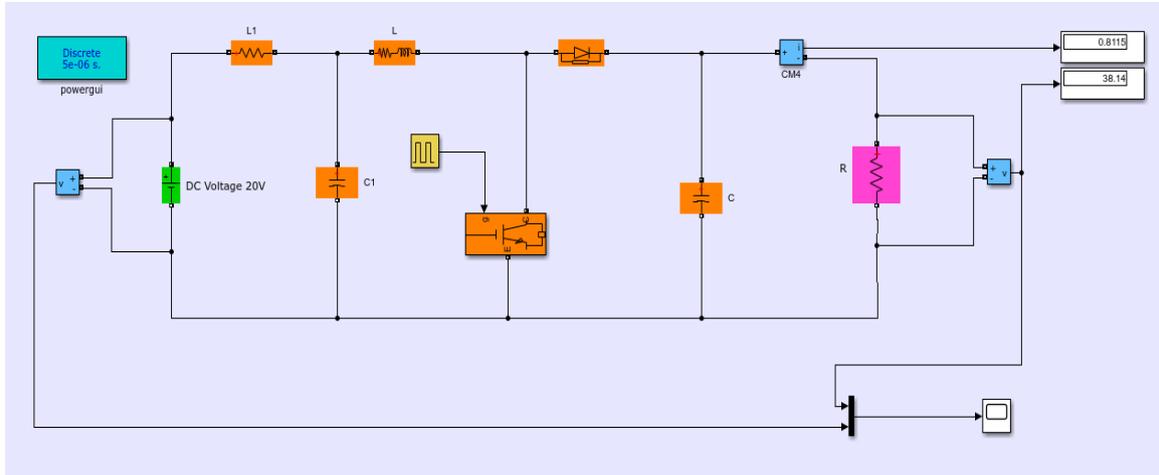


Figure IV. 8 : Schéma de simulation Boost-Charge.

Les résultats de simulation pour un rapport cyclique ( $d = 0.5$ ) à une fréquence  $f = 10e-4$  Hz, sont illustré sur la figure ci-dessous.

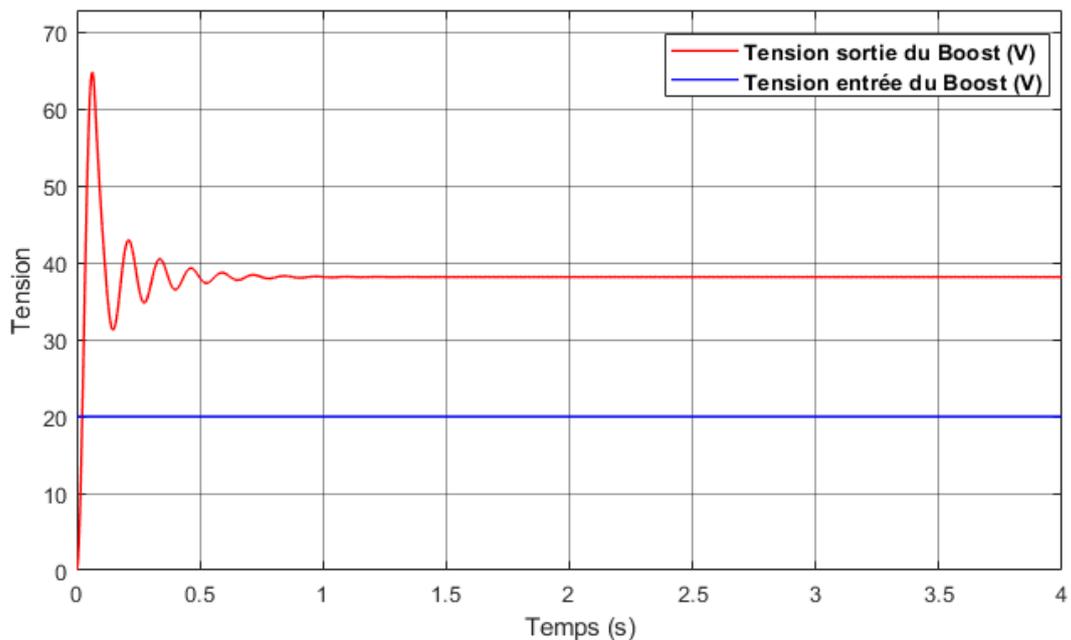


Figure IV. 9 : Tension d'entrée et de sortie du convertisseur Boost.

## Chapitre IV : Poursuite du point de puissance maximale

D'après la figure ci-dessus, on remarque que la tension de sortie du convertisseur BOOST est 38V, vérifie l'équation :  $V_S = \frac{1}{1-d} V_E = \frac{1}{1-0.5} 20 = 40V$  (avec les chutes de tension au niveau du BOOST).

### IV.5. Simulation des méthodes MPPT

#### IV.5.1 Modèle a une diode

##### IV.5.1.a Simulation du système photovoltaïque avec MPPT (P&O)

Nous allons simuler le système photovoltaïque global avec un convertisseur d'adaptation (Boost), commandé par un MPPT de type perturbe & and observe (P&O) sous des conditions atmosphériques fixes (un éclairement  $1000W/m^2$  et une température de  $25^\circ C$ ).

Nous avons établi le schéma de simulation suivant :

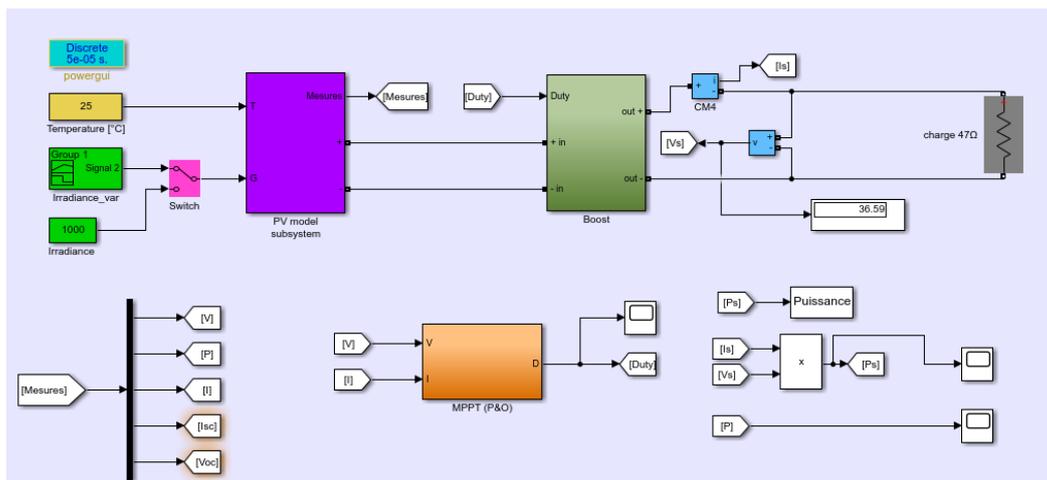


Figure IV. 10 : Schéma de simulation du système PV avec MPPT (P&O).

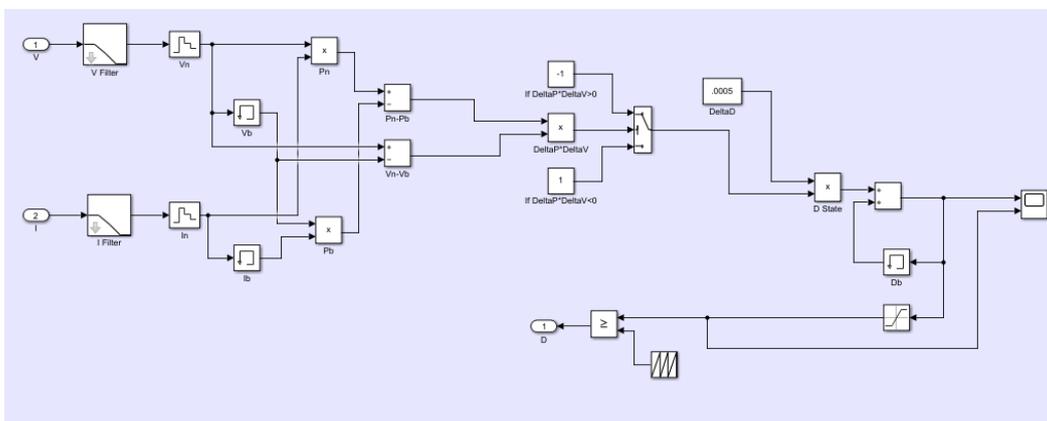


Figure IV. 11 : Structure de l'Algorithme P&O.

## Chapitre IV : Poursuite du point de puissance maximale

Les figures de simulation obtenue par la méthode P&O sont représentées ci-dessous :

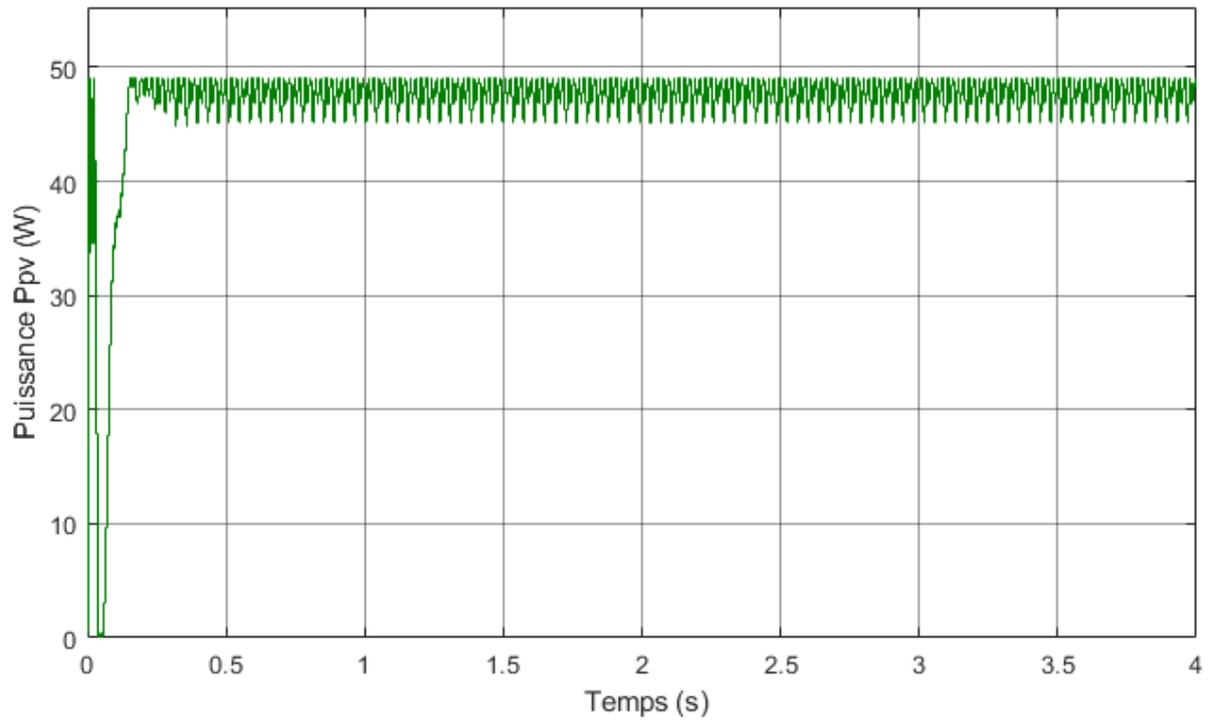


Figure IV. 12 : La puissance générée par le module photovoltaïque.

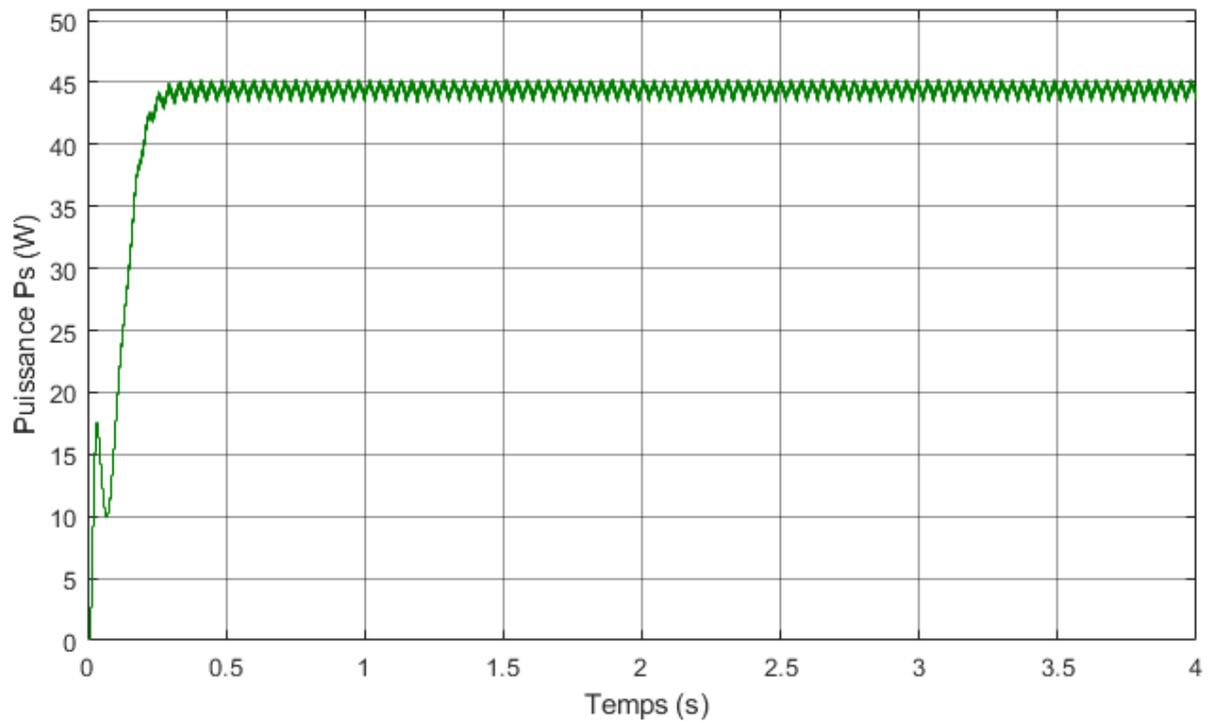


Figure IV. 13 : La puissance de sortie du convertisseur.

## Chapitre IV : Poursuite du point de puissance maximale

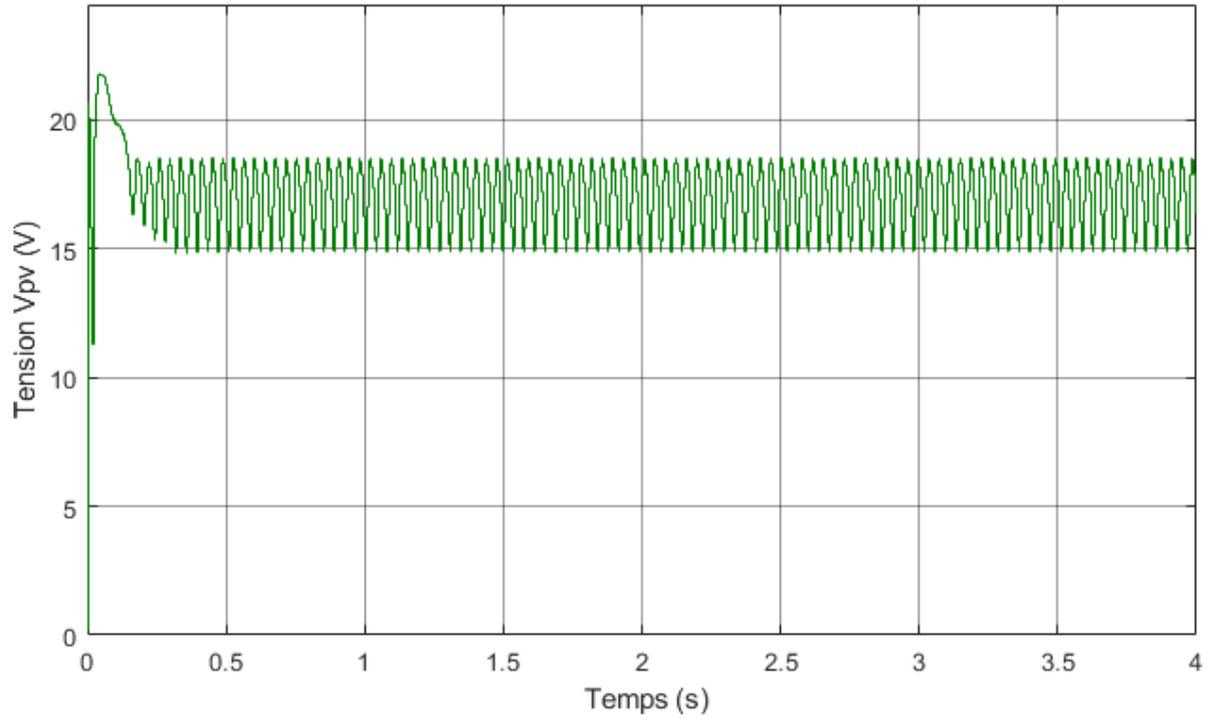


Figure IV. 14 : La tension générée par le module photovoltaïque.

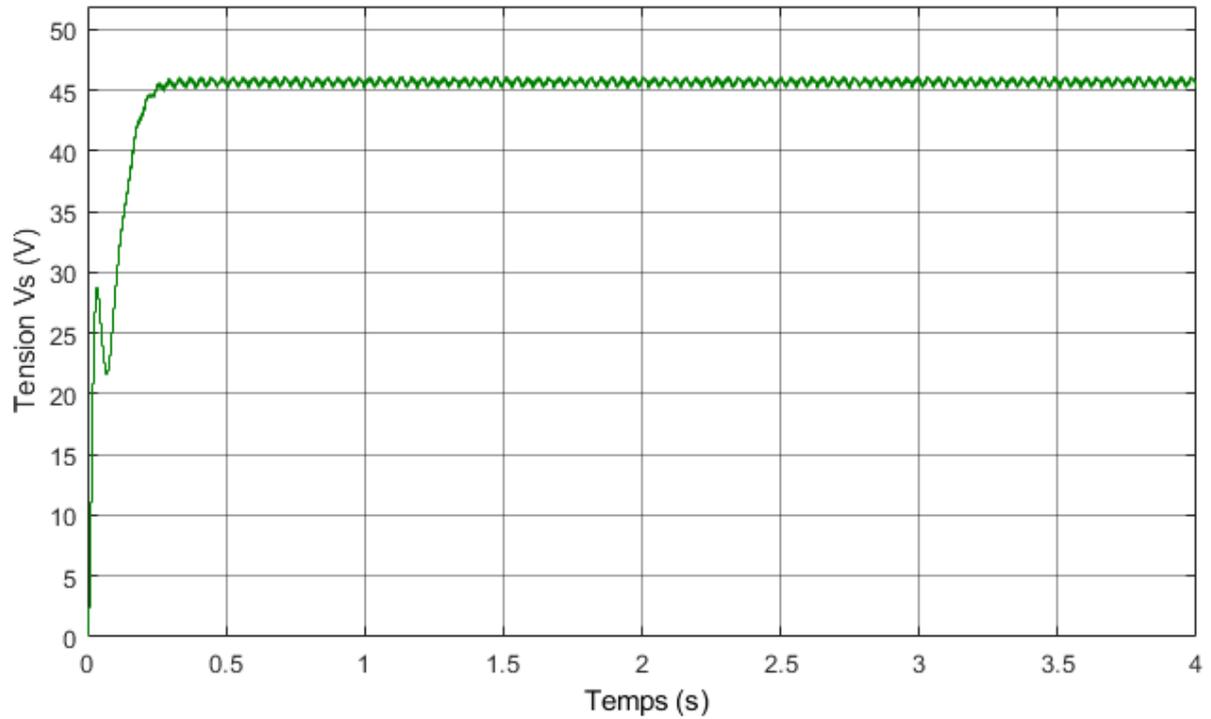


Figure IV. 15 : La tension de sortie du convertisseur.

## Chapitre IV : Poursuite du point de puissance maximale

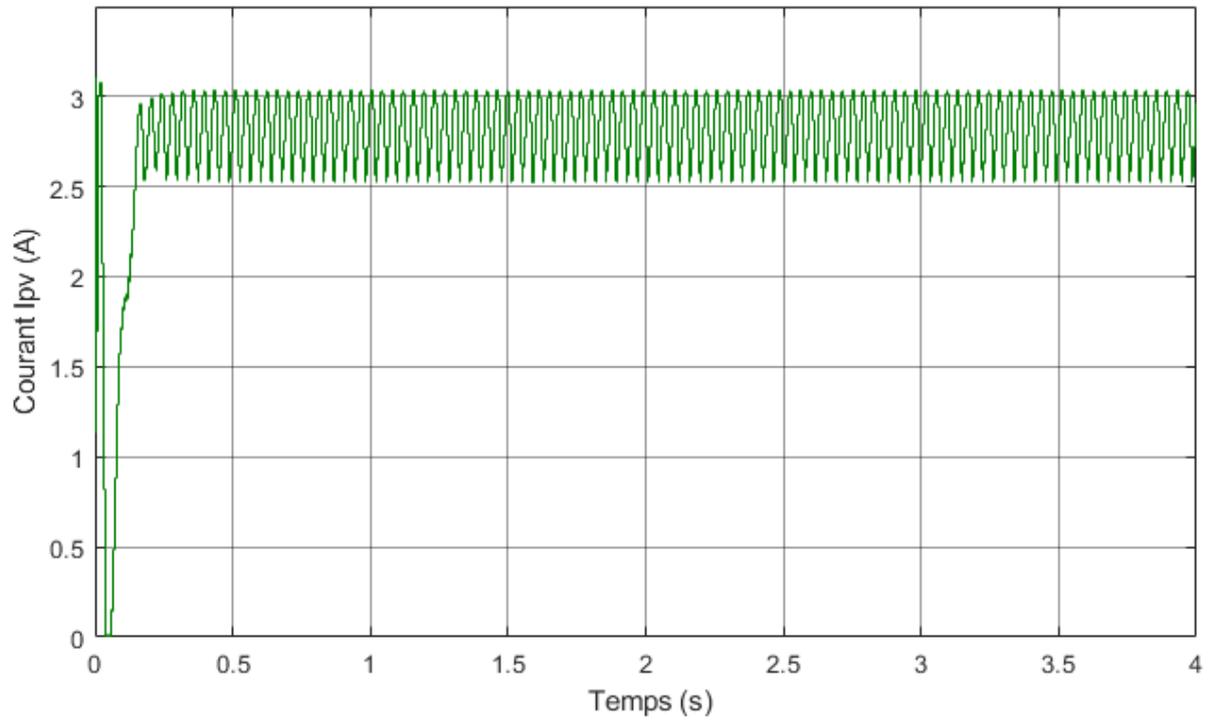


Figure IV. 16 : Le courant généré par le module photovoltaïque.

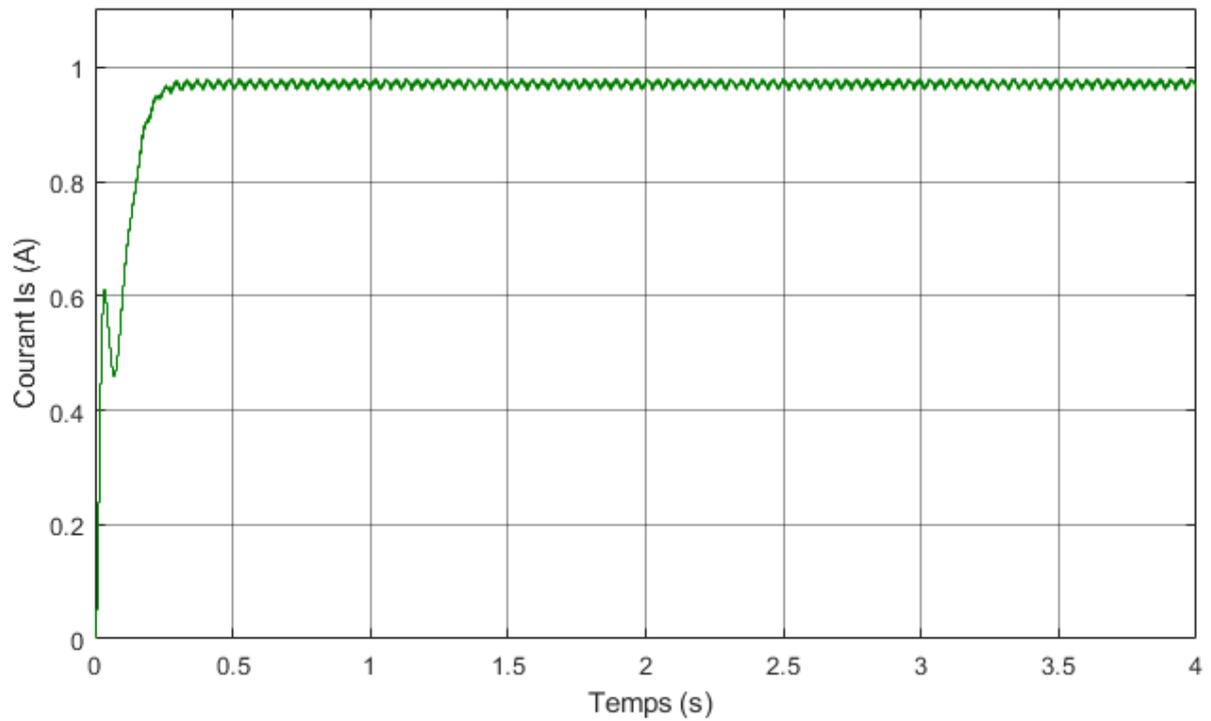


Figure IV. 17 : Le courant de sortie du convertisseur.

## Chapitre IV : Poursuite du point de puissance maximale

### ✓ Interprétation des résultats

D'après les résultats de simulations ;

- On peut observer que la tension et la puissance convergent vers le point de puissance maximal, comme le démontrent les figures (IV.12, IV.13) et (IV.14, IV.15).
- Lorsque le point de puissance maximale est atteint, la commande MPPT maintient le point de fonctionnement à ce niveau.
- On constate aussi que les allures obtenues par la méthode de perturbation et d'observation (P&O) présentent des oscillations, qui sont dû à la perturbation continue de la tension de fonctionnement.
- On remarque d'après les figures IV.14 et IV.15 que le hacheur survolteur fournie une tension supérieure à celle fournie par le modulé photovoltaïque.
- D'après les figures IV.12 et IV.13 observe une légère chute de puissance a la charge à cause des pertes au niveau des composants.

### IV.4.2. Simulation du système global avec variation de l'éclairement

Le module photovoltaïque a subi le changement d'éclairement représenté sur la figure (Fig.IV.17) à une température constante (25°C).

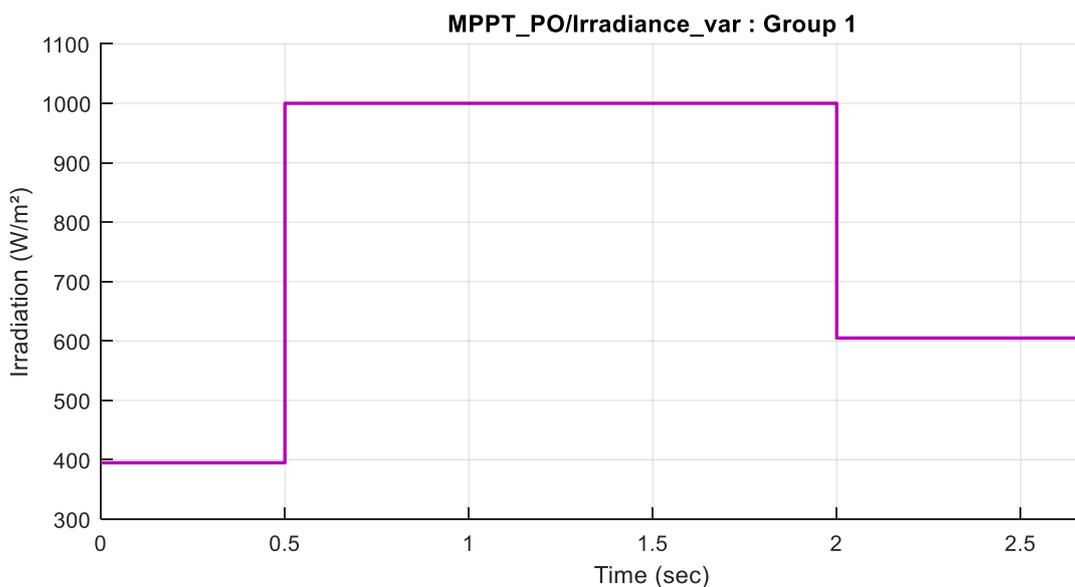


Figure IV. 18 : Courbe de variation d'éclairement.

## Chapitre IV : Poursuite du point de puissance maximale

En utilisant la même procédure dans des conditions constantes, nous avons représenté la puissance générée par le module photovoltaïque dans les figures ci-dessous :

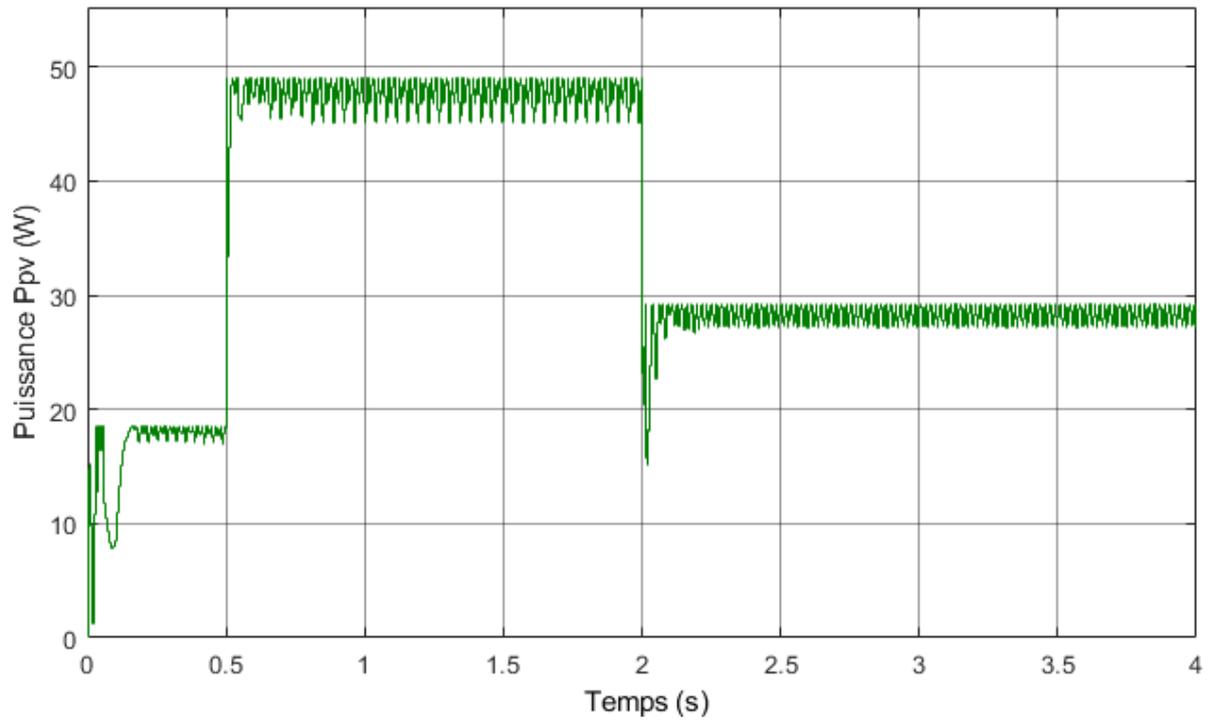


Figure IV. 19 : Courbe puissance générée par le module photovoltaïque.

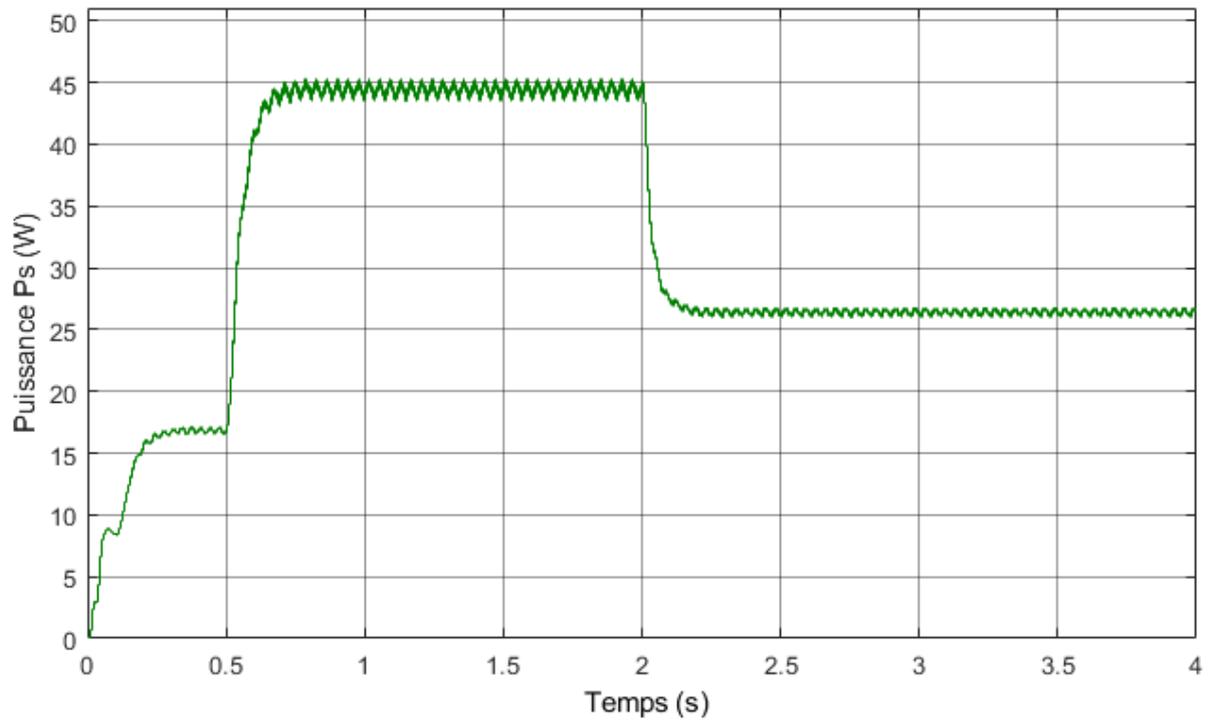


Figure IV. 20 : Courbe puissance de sortie du convertisseur.

## Chapitre IV : Poursuite du point de puissance maximale

### IV.4.3. Variation de la température avec un éclairage constante (1000w/m<sup>2</sup>)

Nous avons testé le fonctionnement du système étudié sous un éclairage fixe ( $E=1000$  WC/m<sup>2</sup>) et une température variable comme illustré dans la figure suivante.

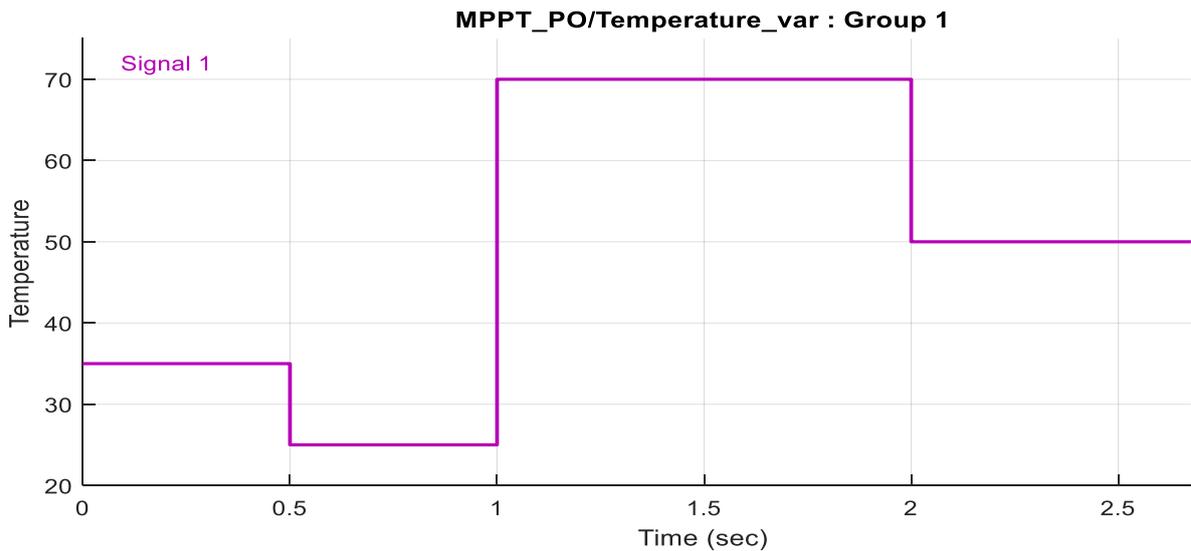


Figure IV. 21 : Courbe de variation de la Température.

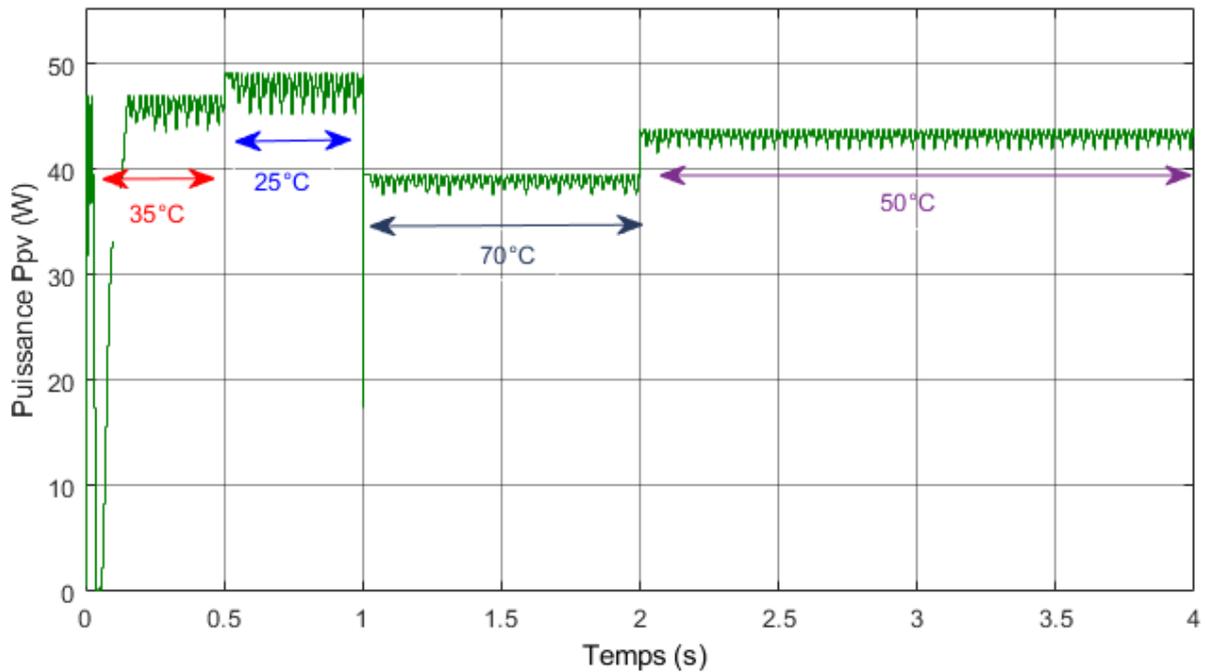


Figure IV. 22 : Courbe puissance générée par le module photovoltaïque.

## Chapitre IV : Poursuite du point de puissance maximale

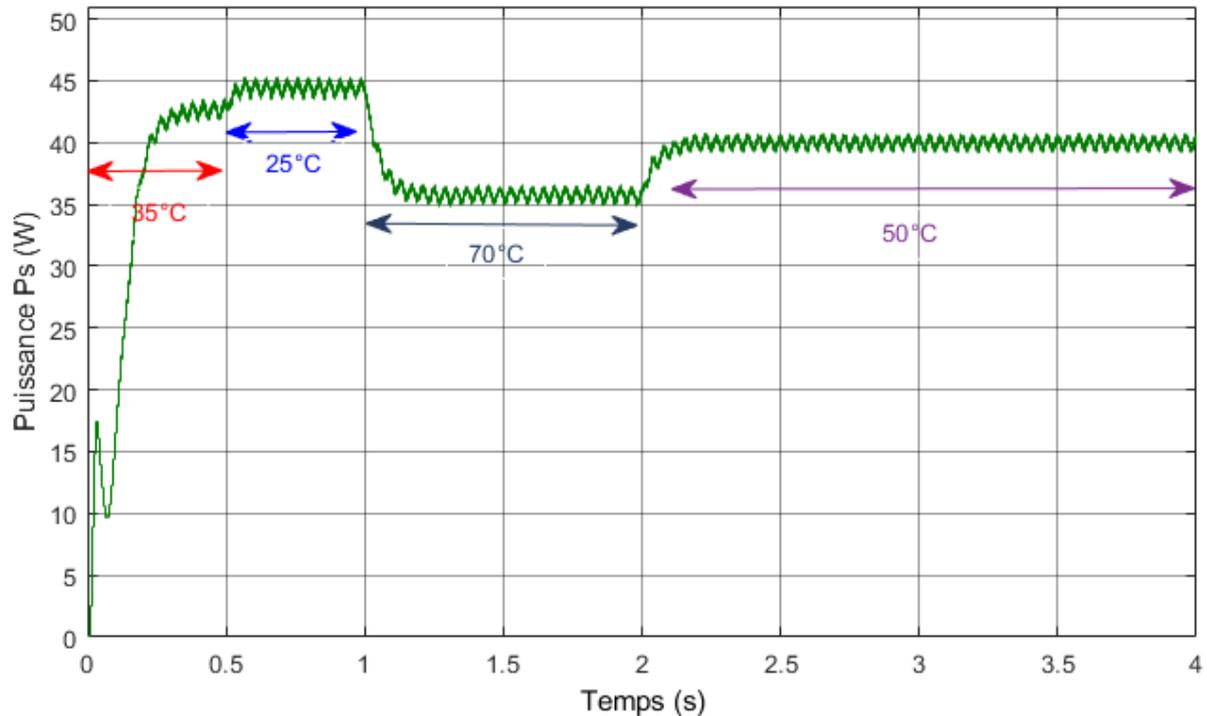


Figure IV. 23 : Courbe puissance de sortie du convertisseur.

### ➤ Interprétation des résultats

- D'après les figures IV (19,20), nous constatons qu'il y a une relation proportionnelle entre le changement d'éclairement et la puissance. La puissance électrique générée par le panneau solaire est toujours maintenue à sa puissance maximale, quelles que soient les conditions atmosphériques.
- On remarque d'après les figures IV (22 et 23) que la variation de la température a un impact très important sur la puissance délivrée par le GPV, l'augmentation de la température réduit la puissance.

### IV.5.1.b Simulation du système PV avec MPPT (INC)

Nous allons simuler le système photovoltaïque global avec un convertisseur d'adaptation (Boost), commandé par un MPPT de type IncCond sous des conditions atmosphériques fixes (un éclairement  $1000\text{W/m}^2$  et une température de  $25\text{ }^\circ\text{C}$ ).

## Chapitre IV : Poursuite du point de puissance maximale

Nous avons établi le schéma de simulation suivant :

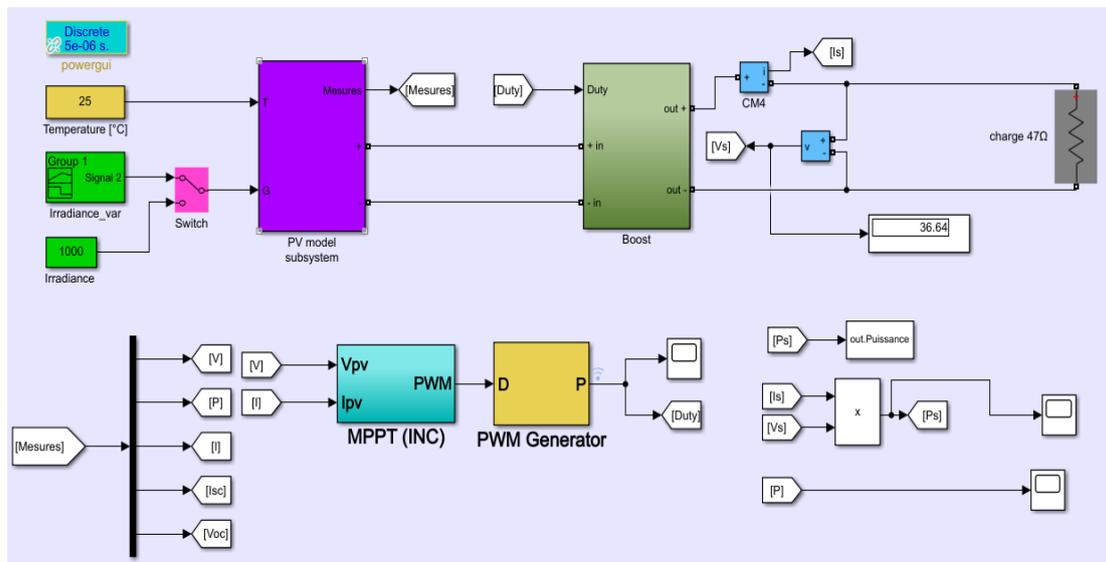


Figure IV. 24 : Schéma de simulation du système PV avec MPPT (INC).

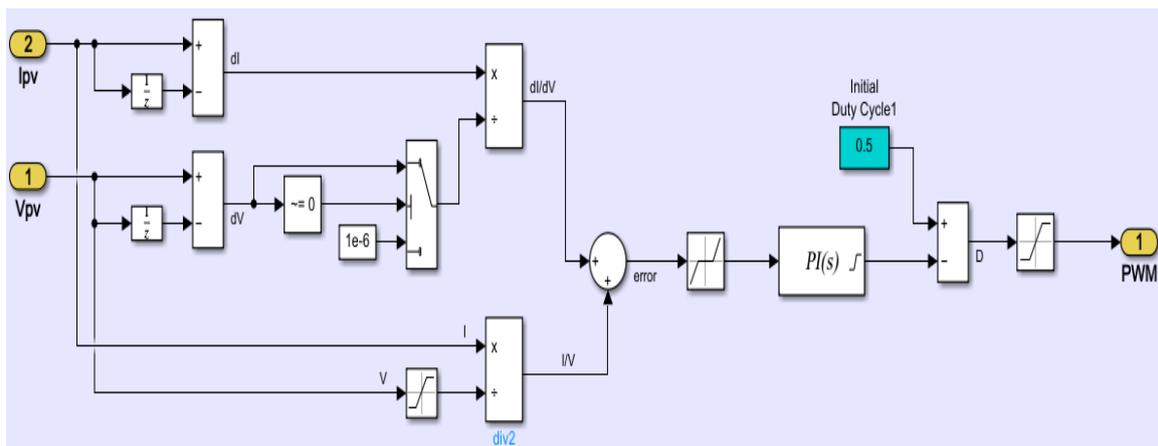
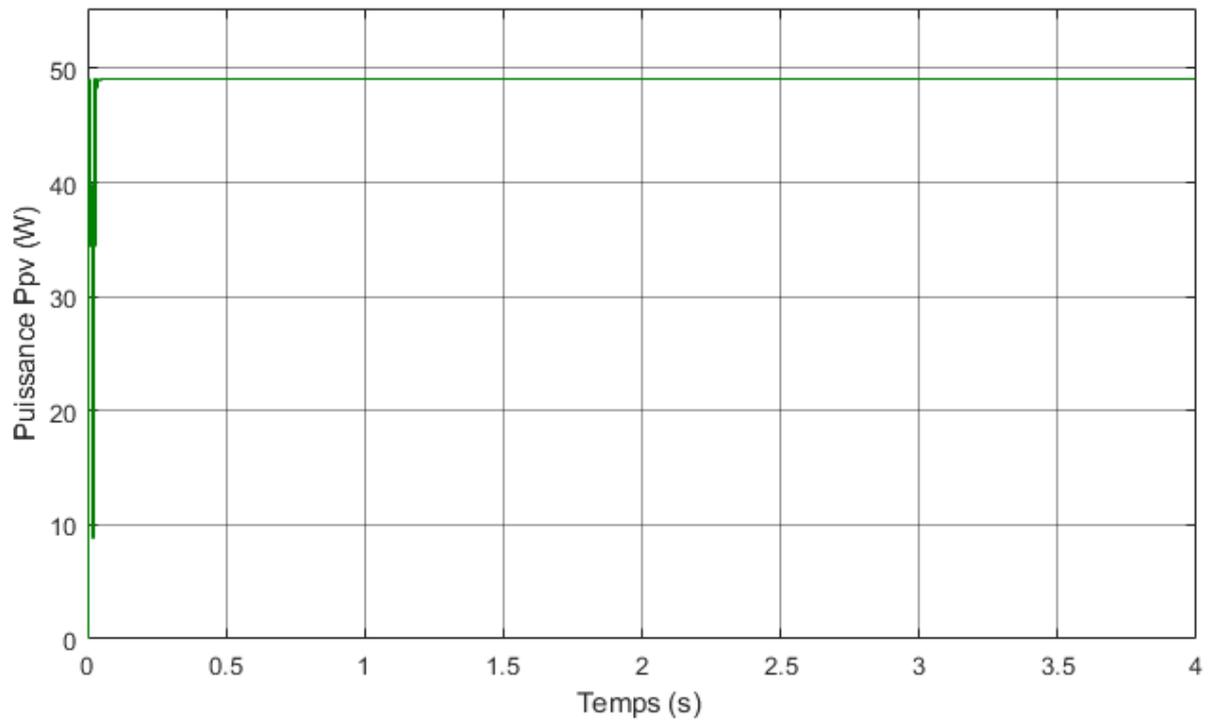


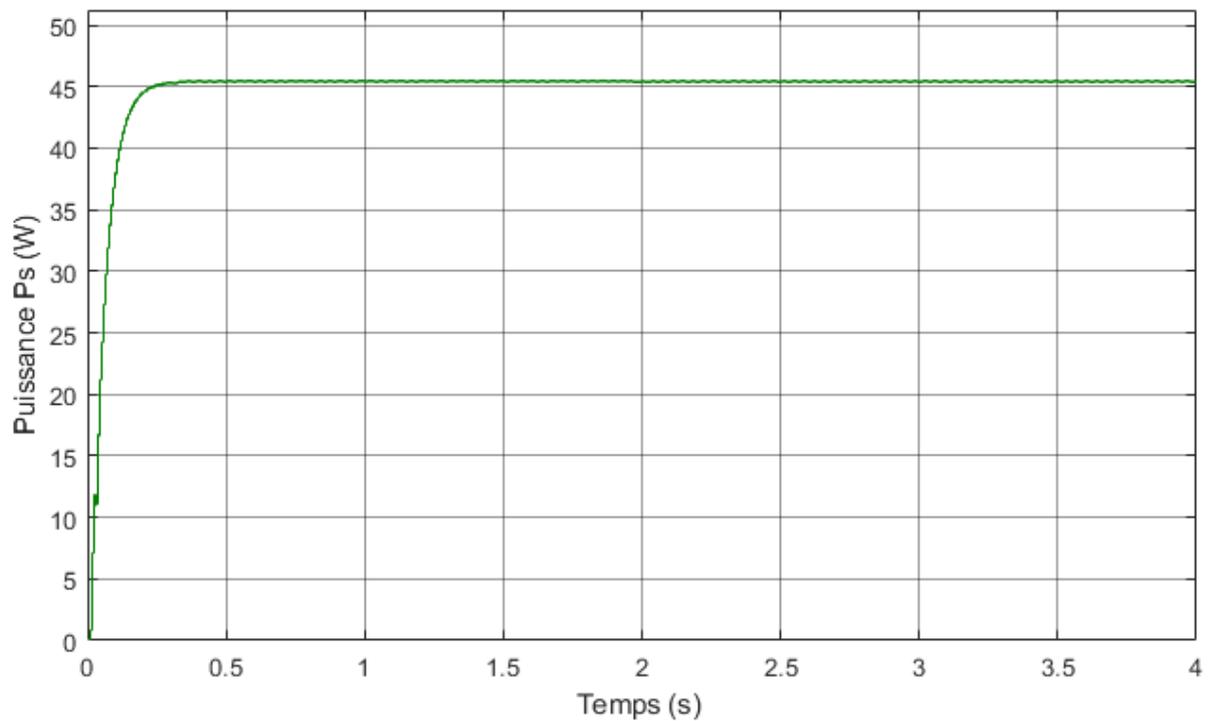
Figure IV. 25 : Structure de l'Algorithme INC.

## Chapitre IV : Poursuite du point de puissance maximale

Les figures de simulation obtenue par la méthode IncCond sont représentées ci-dessous :



**Figure IV. 26 :** La puissance générée par le module photovoltaïque.



**Figure IV. 27 :** La puissance de sortie du convertisseur.

## Chapitre IV : Poursuite du point de puissance maximale

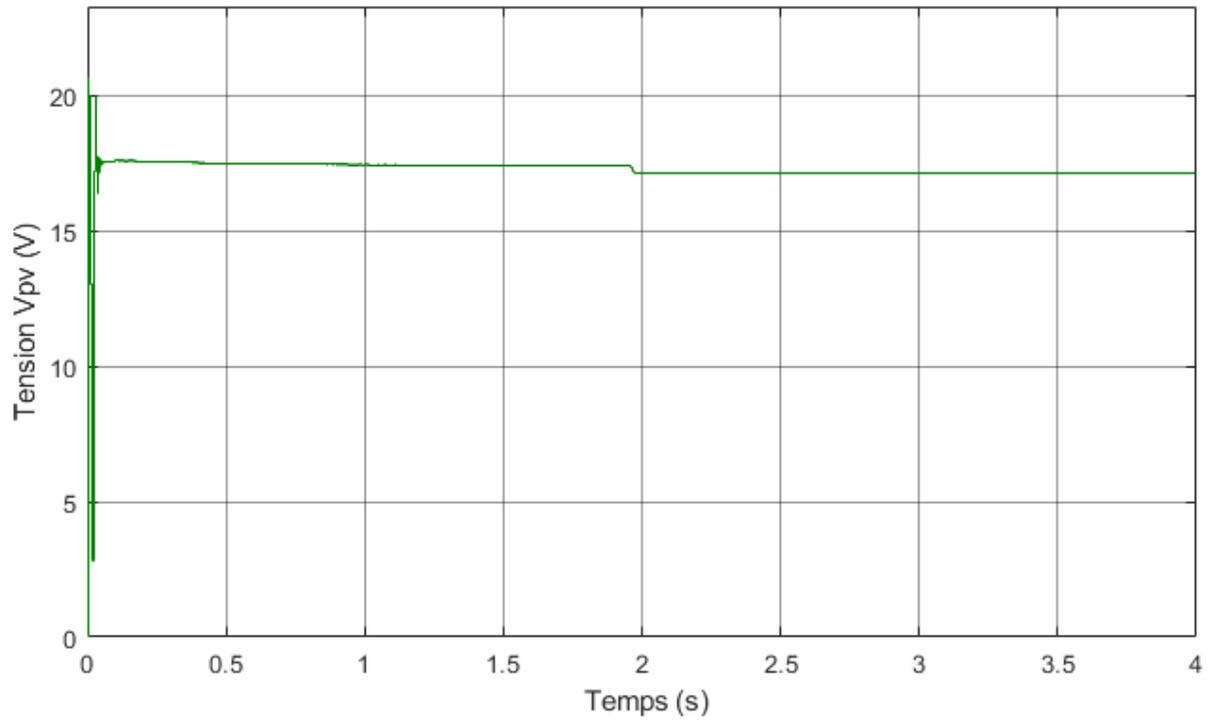


Figure IV. 28 : Résultats de simulation de la tension générée par le module photovoltaïque.

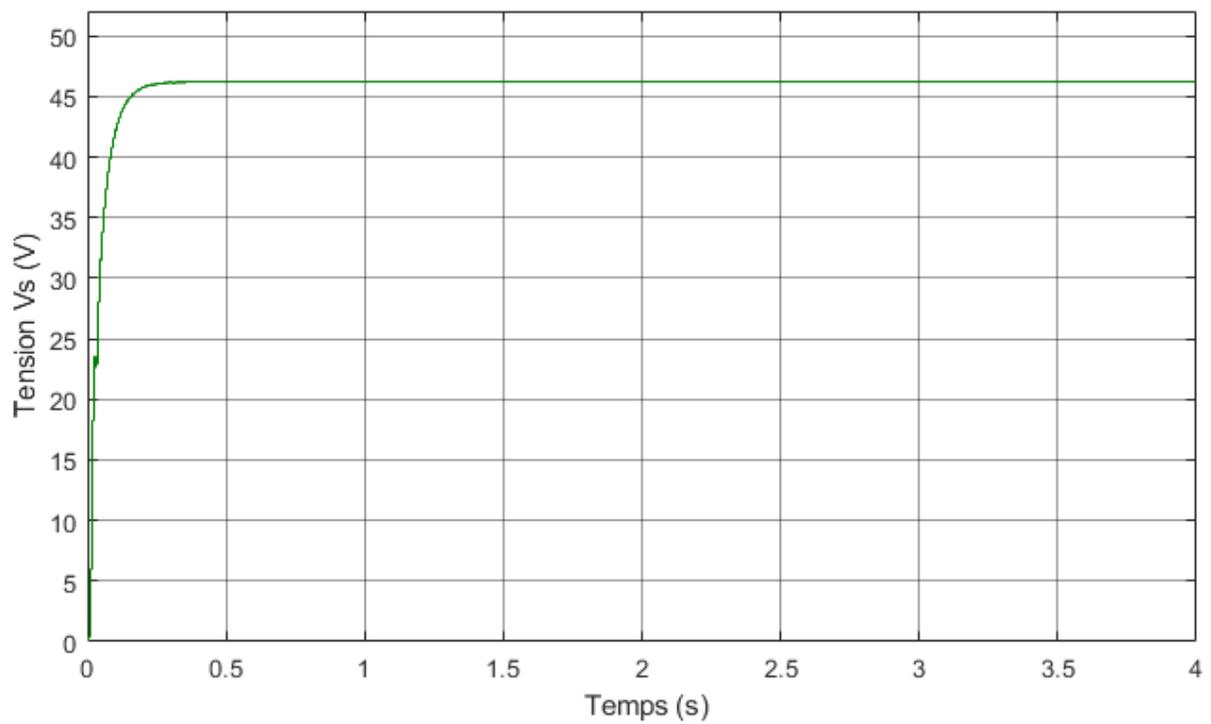


Figure IV. 29 : Résultats de simulation de sortie du convertisseur.

## Chapitre IV : Poursuite du point de puissance maximale

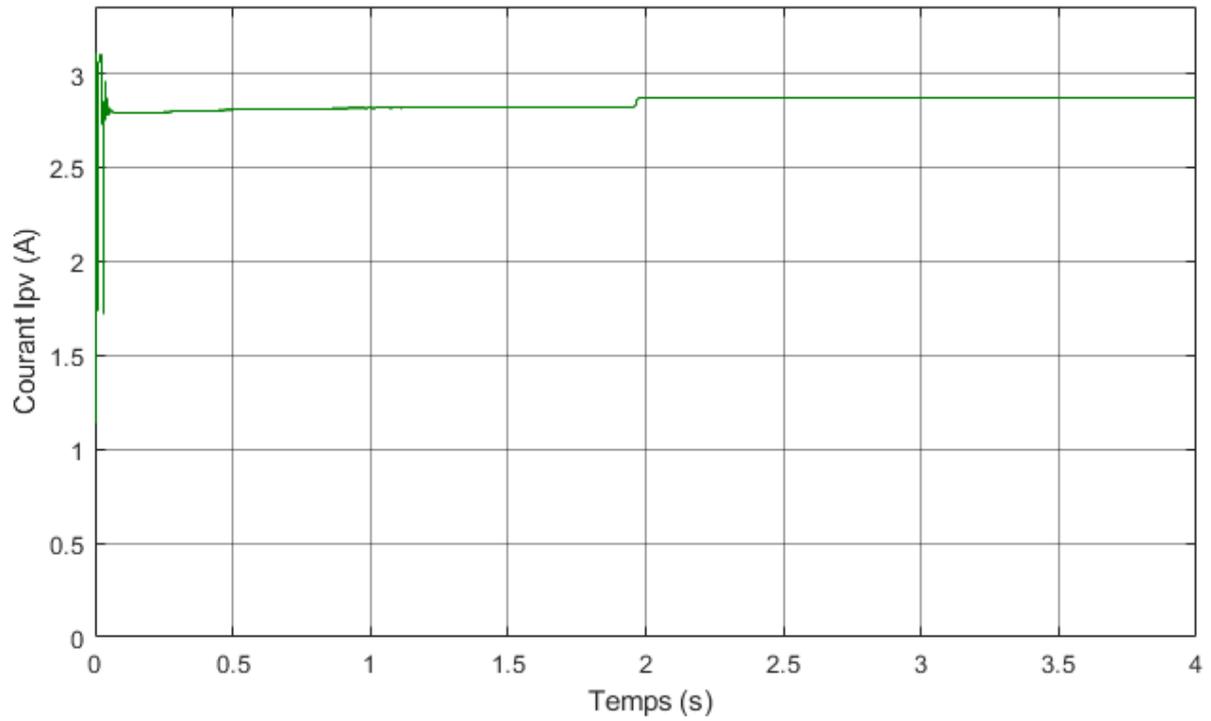


Figure IV. 30 : Le courant générée par le module photovoltaïque.

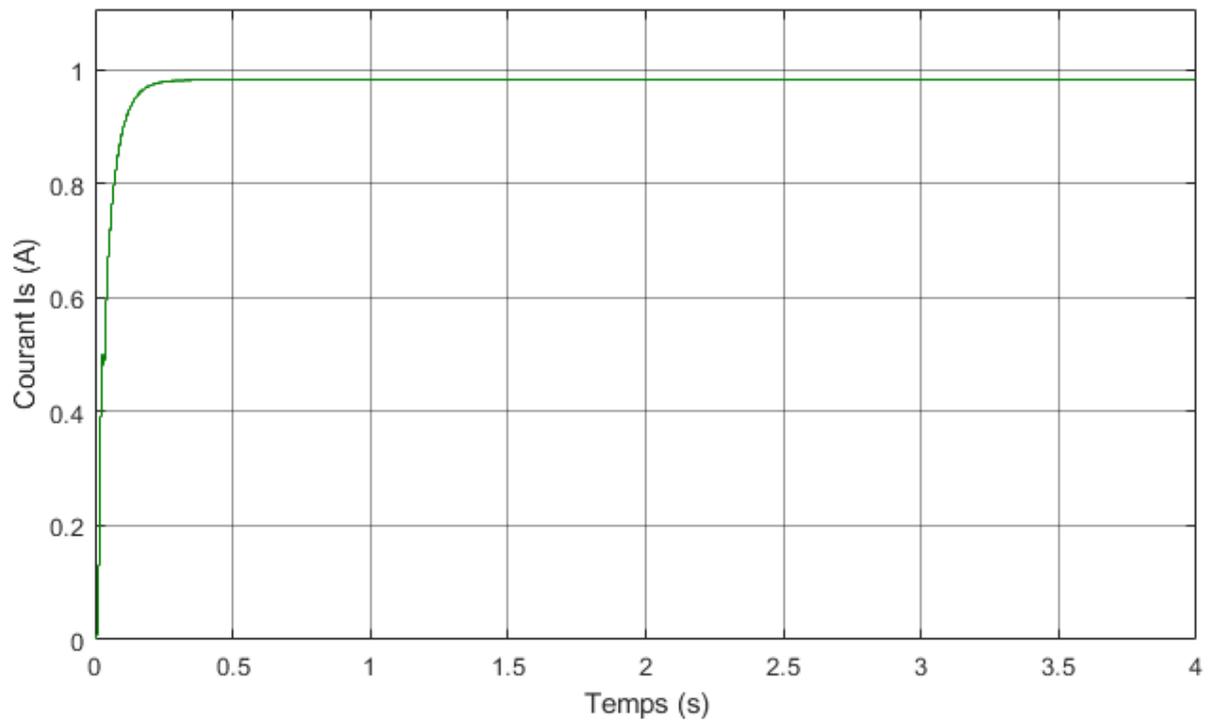


Figure IV. 31 : Le courant de sortie du convertisseur.

## Chapitre IV : Poursuite du point de puissance maximale

### IV.4.5. Simulation du système global avec variation de l'éclairement

Avec le même profil de l'ensoleillement présenté dans la figure IV.16, on représente l'évolution de la puissance en fonction temps dans les figures suivantes,

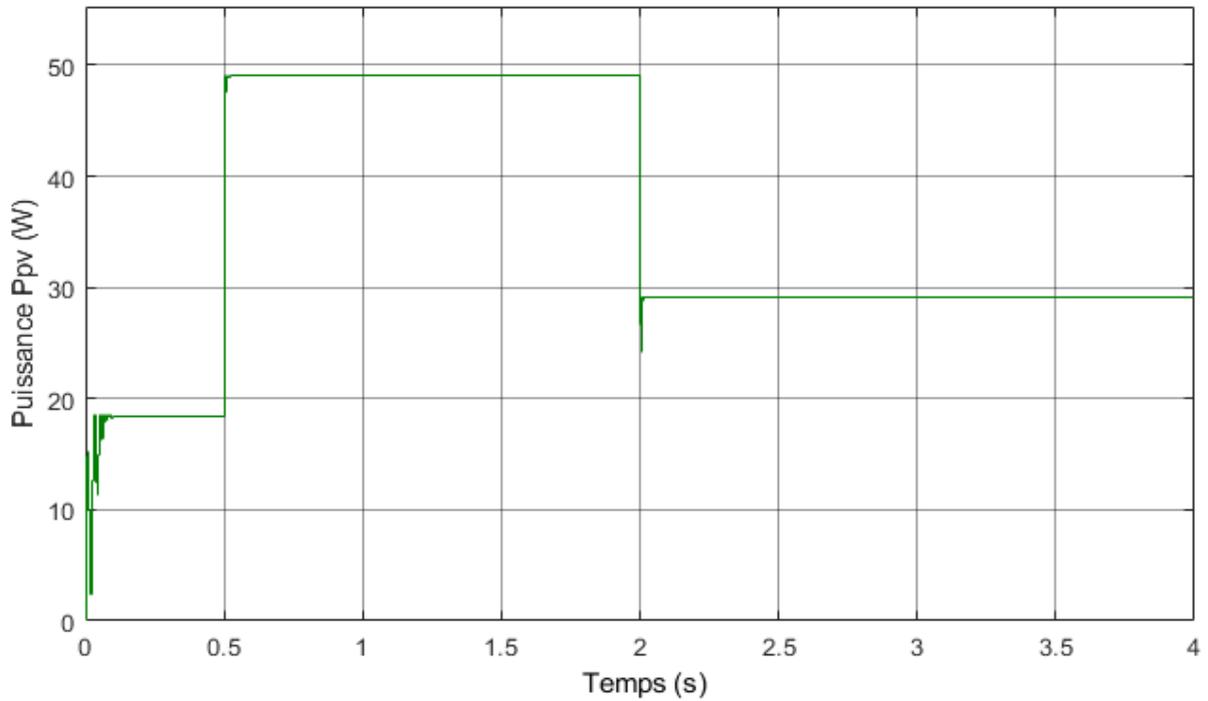


Figure IV. 32 : Courbe puissance générée par le module photovoltaïque.

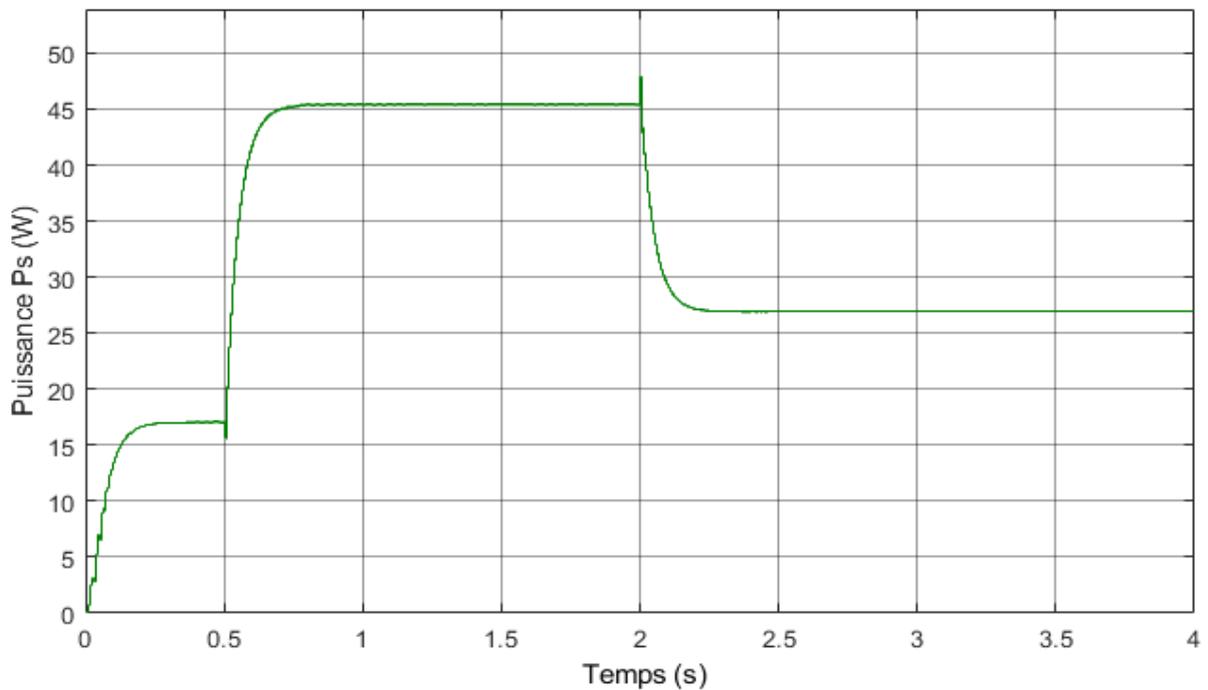


Figure IV. 33 : Courbe puissance de sortie du convertisseur.

## Chapitre IV : Poursuite du point de puissance maximale

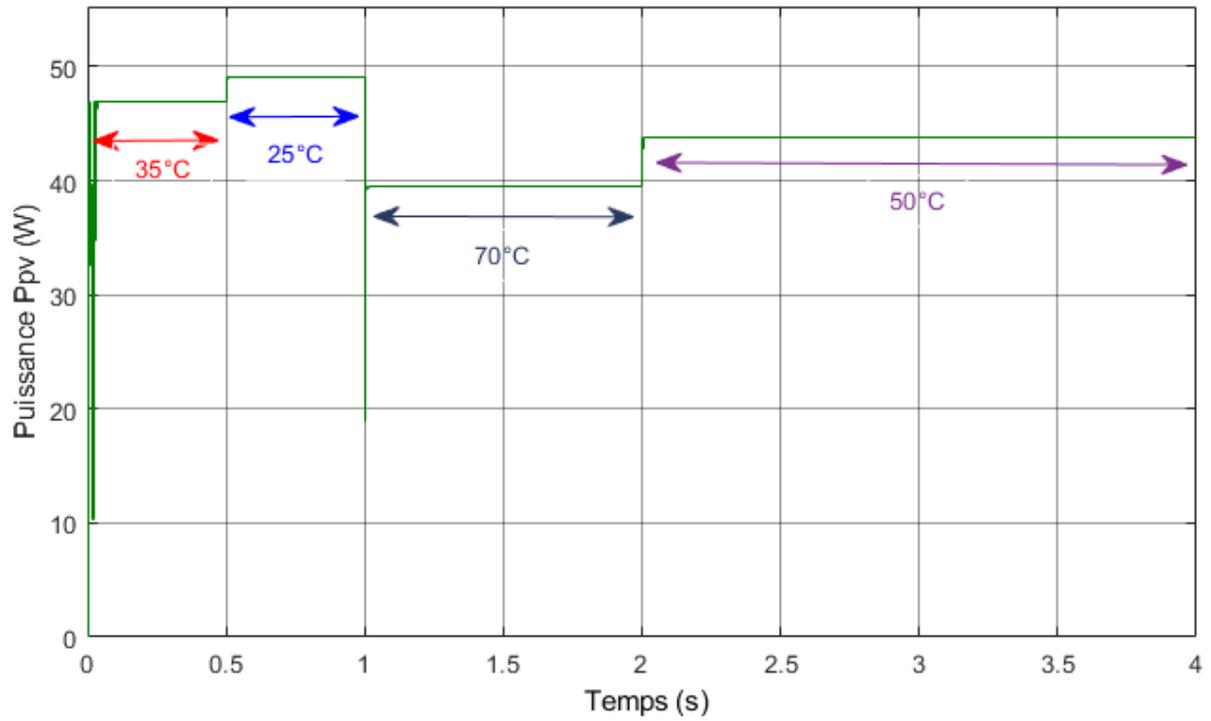


Figure IV. 34 : Courbe puissance générée par le module photovoltaïque.

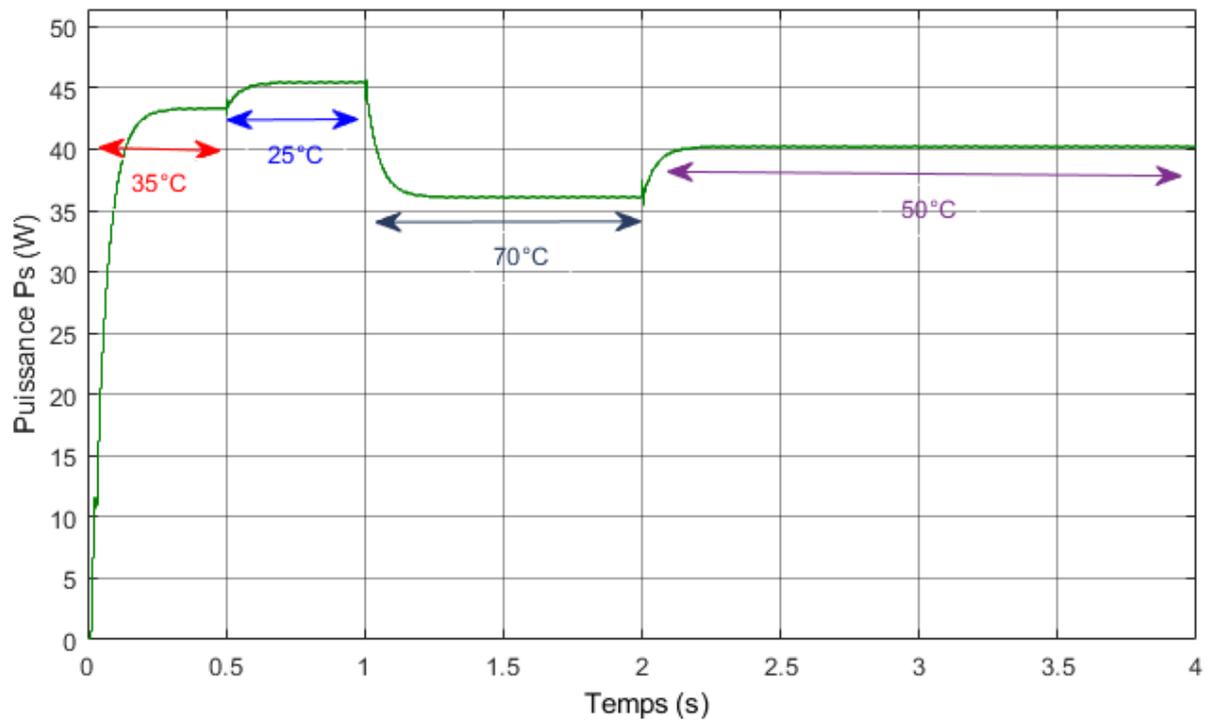


Figure IV. 35 : Courbe puissance de sortie du convertisseur.

## Chapitre IV : Poursuite du point de puissance maximale

### ➤ Interprétation des résultats

On constate que le système utilisant la commande INC donne les mêmes résultats que la méthode P&O, Par contre, on voit que la puissance ne présente pas de pertes et que l'algorithme se comporte mieux lors du changement rapide d'éclairement, la valeur maximale de la puissance est atteinte, donc la méthode INC permet aussi de rechercher le point de puissance maximale fidèlement.

### IV.5.2 Modèle a deux diodes

#### IV.5.2.1.a Résultat de simulation avec l'algorithme (P&O)

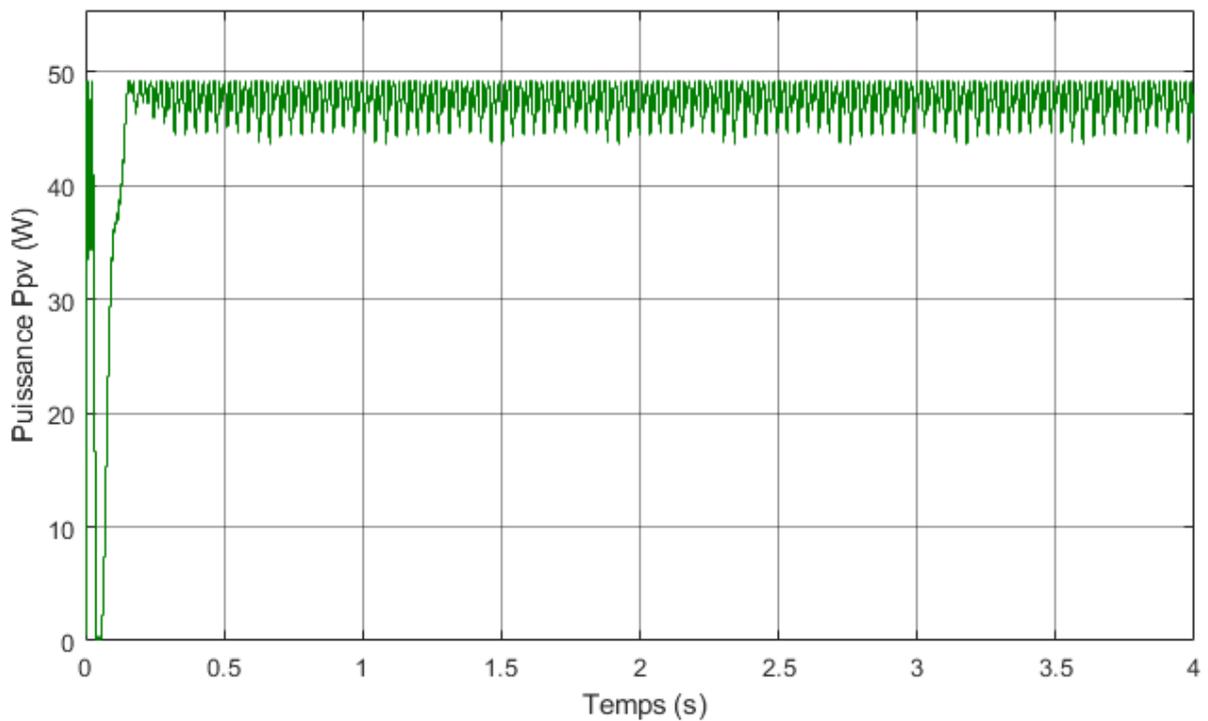


Figure IV. 36 : La puissance générée par le module photovoltaïque.

## Chapitre IV : Poursuite du point de puissance maximale

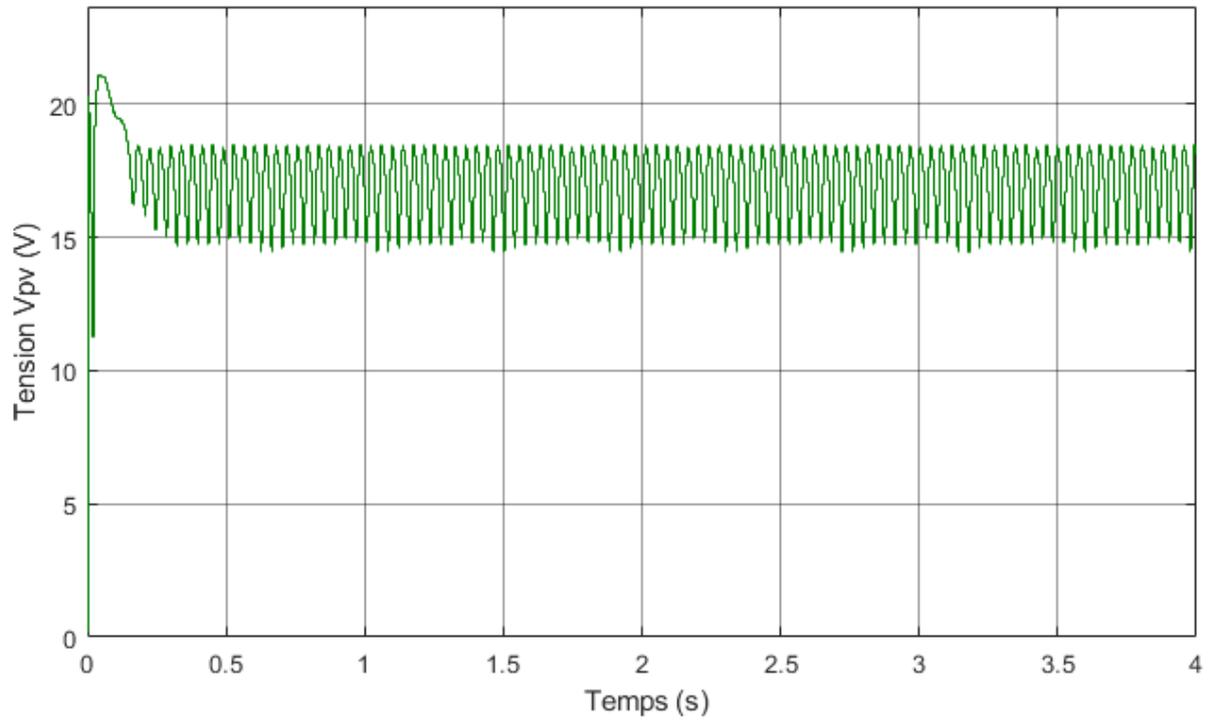


Figure IV. 37 : La puissance de sortie du convertisseur.

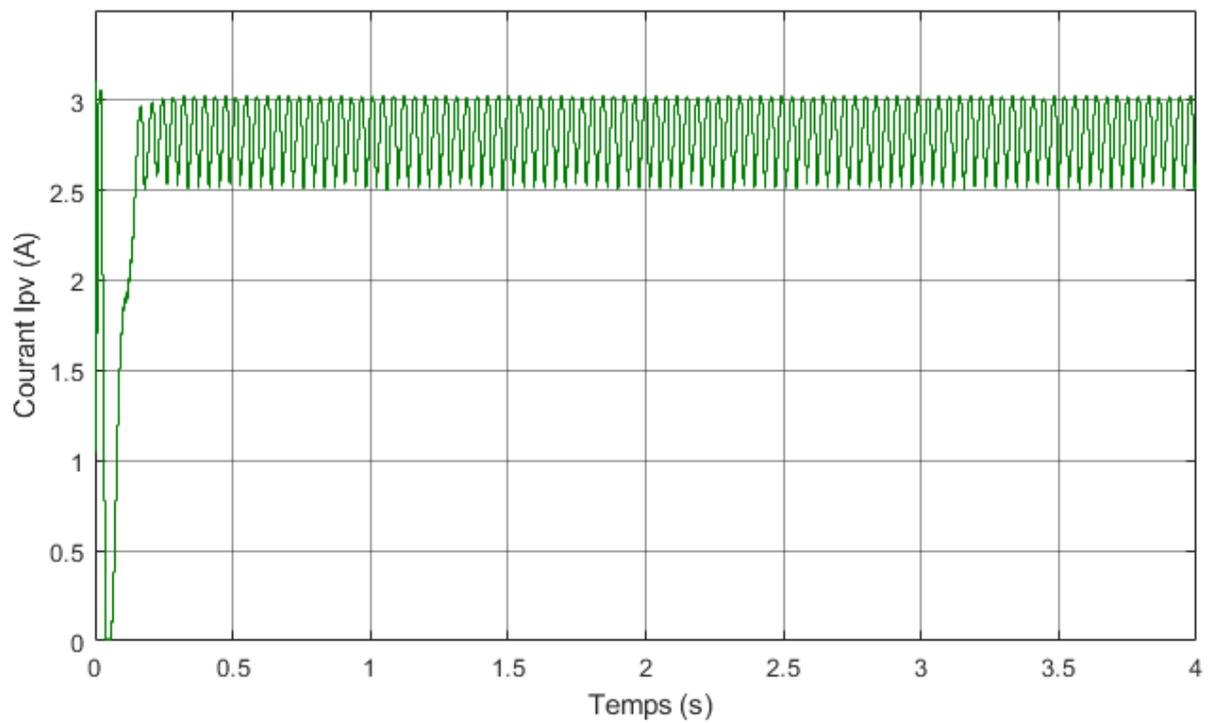


Figure IV. 38 : Le courant générée par le module photovoltaïque

## Chapitre IV : Poursuite du point de puissance maximale

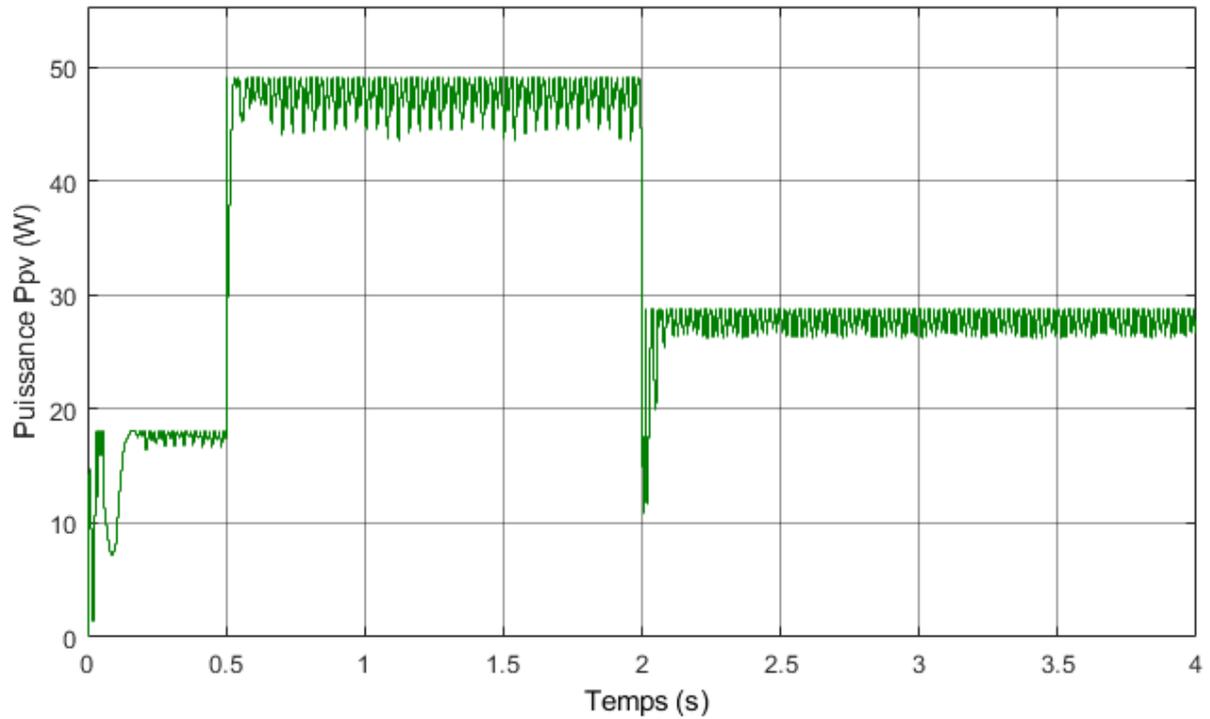


Figure IV. 39 : Courbe puissance générée par le module photovoltaïque.

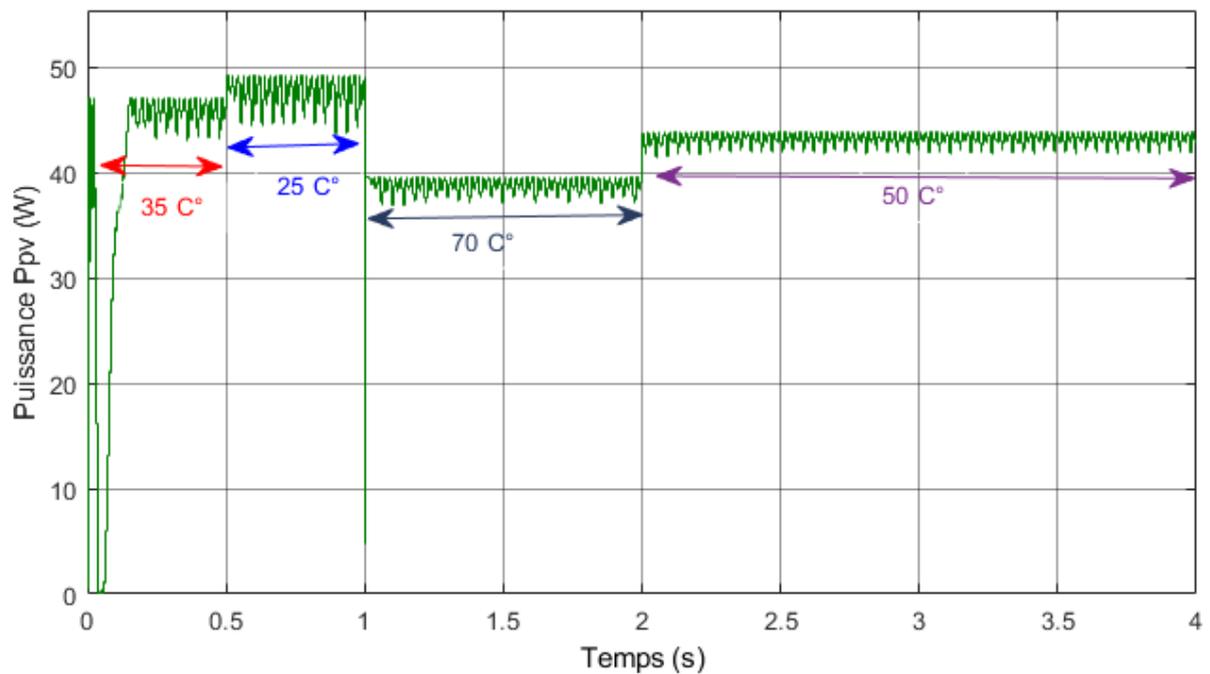


Figure IV. 40 : Courbe puissance générée par le module photovoltaïque.

### Interprétation des résultats

Le modèle à deux diodes d'un panneau pv se comporte de manière similaire au modèle à une diode lorsqu'il est utilisé avec la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) P&O

## Chapitre IV : Poursuite du point de puissance maximale

(Perturb and Observe). En effet, bien que le modèle à deux diodes offre une description plus précise des phénomènes internes de panneau, la commande P&O, qui ajuste la tension pour maximiser la puissance, n'est pas sensiblement affectée par la complexité supplémentaire du modèle à deux diodes. Par conséquent, en remarque qu'il n'y a pas de différence notable dans les performances de suivi du point de puissance maximale entre les deux modèles.

### IV.5.3. Comparaison entre les deux modèle (méthode P&O)

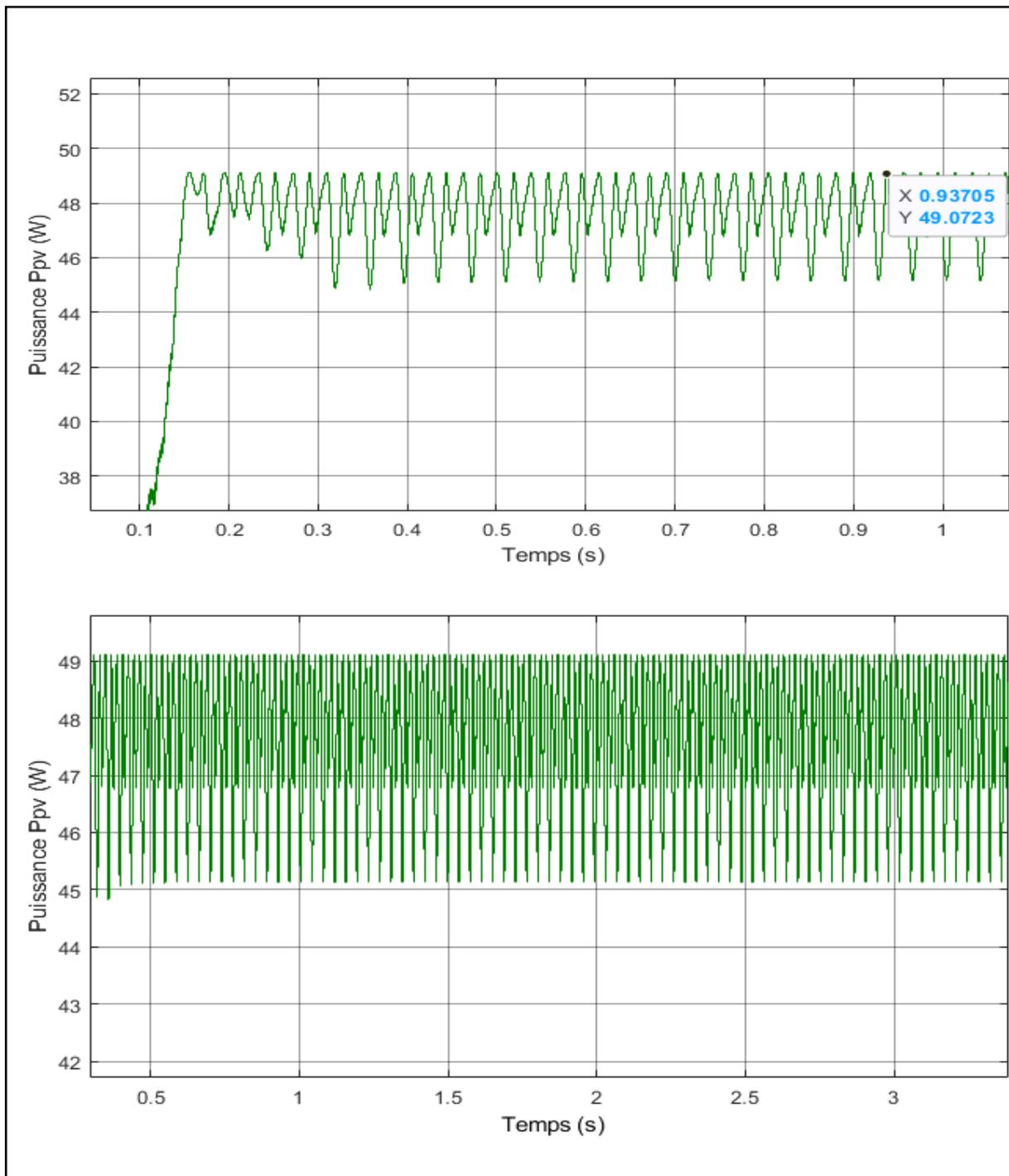


Figure IV. 41 : La puissance générée par le module photovoltaïque a une diode.

## Chapitre IV : Poursuite du point de puissance maximale

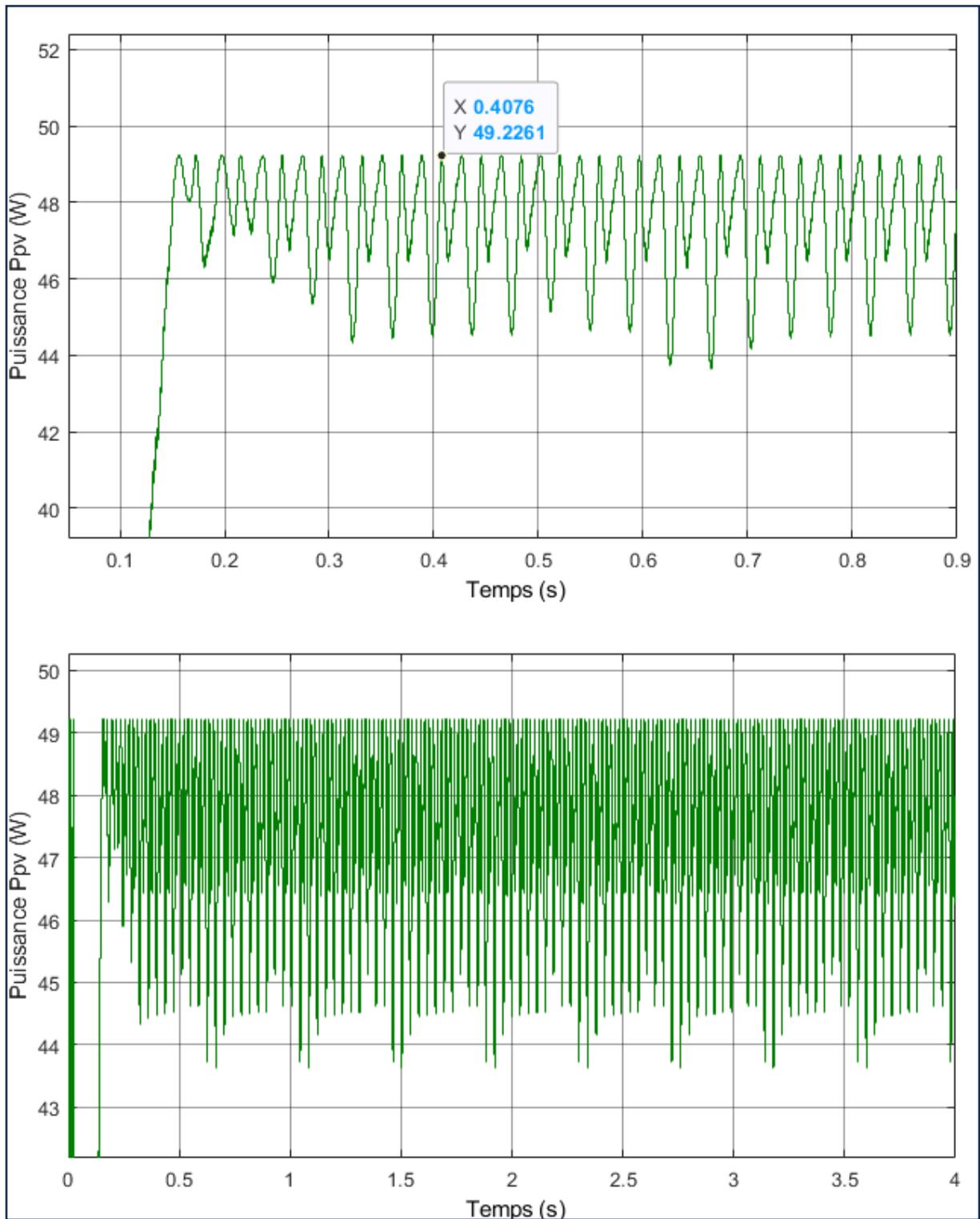


Figure IV. 42 : La puissance générée par le module photovoltaïque a deux diodes.

## Chapitre IV : Poursuite du point de puissance maximale

### Interprétation des résultats

D'après les figures IV.41, IV.42 on conclue que :

- Panneau à une diode : Moins de perturbations en général en raison de la simplicité du modèle et d'une courbe I-V plus facile à analyser pour l'algorithme.
- Panneau à deux diodes : Plus de perturbations peuvent être observées en raison de la complexité accrue de la courbe I-V et des effets non linéaires supplémentaires, qui rendent plus difficile la convergence vers le MPP optimal, surtout en conditions variables.
- De plus, on observe une légère augmentation de la puissance produite par le modèle à deux diodes par rapport à une diode.

### IV.6. Conclusion

Après une présentation théorique des algorithmes de recherche du point de puissance maximale Perturbe et Observe et Incrémental conductance, on a fait une modélisation et une simulation de ces algorithmes de commandes sous le logiciel MATLAB/Simulink.

Les résultats de simulation nous montrent que :

- ✓ L'utilisation des méthodes MPPT permet de suivre le point de puissance maximale fidèlement quels que soit la charge et les variations des conditions climatiques
- ✓ Le régulateur P&O (Perturb and Observe) est plus simple que la méthode INC (Incrémental Conductance).
- ✓ La méthode INC est plus précis que le régulateur P&O.
- ✓ Les perturbations dans le modèle à deux diodes sont plus grandes que dans le modèle à une diode.

# **Conclusion générale**

### Conclusion générale

L'énergie photovoltaïque est considérée comme l'une des sources d'énergie renouvelables les plus importantes pour la production d'électricité. Cependant, la production d'énergie photovoltaïque dépend essentiellement des conditions environnementales. L'optimisation de cette production revient à concevoir un système PV performant capable de faire face aux changements atmosphériques.

L'objectif principal de ce présent travail consiste à la modélisation et la simulation d'un panneau photovoltaïque afin de prédire ses caractéristiques (courant-tension et puissance-tension), sous différentes conditions météorologiques.

Pour effectuer ce travail, en premier lieu, nous avons abordé quelques généralités sur l'énergie photovoltaïque puis nous avons défini l'effet photovoltaïque, nous avons aussi décrit le principe de conversion photovoltaïque et les technologies de fabrication de cellules PV.

Ensuite, nous avons approfondi notre étude en analysant différents modèles mathématiques à savoir le modèle à une seule diode et celui à deux diodes. Ces modèles constituent une base essentielle pour la simulation et l'analyse des performances des systèmes photovoltaïques.

Après l'étape de modélisation, nous avons utilisé Matlab/Simulink pour simuler et évaluer les performances de deux modèles de panneaux photovoltaïques sous différentes conditions météorologiques. Il a été observé que les performances du panneau photovoltaïque sont significativement affectées par les conditions climatiques, en particulier l'irradiation solaire et la température du module PV.

Nous nous sommes aussi intéressés au problème de maximisation de la puissance délivrée par le panneau PV. Pour ce faire, nous avons simulé deux méthodes MPPT classiques à savoir la méthode Perturbation et Observation et Incrémental Conductance.

Les résultats de simulation montrent que les méthodes MPPT, testées sous les conditions atmosphériques standards et variables atteignent le point MPP avec succès pour les deux modèles électriques. Cependant, nous avons constaté qu'elles présentent des oscillations autour du MPP et que la puissance délivrée dans le modèle à deux diodes est un peu plus grande que celle du modèle à une diode.

Comme perspective de ce travail :

- ✓ Réalisation pratique des commandes MPPT afin de valider les résultats obtenus.
- ✓ Étude d'autres types de sources énergétiques (Éolienne, hybride, ...etc.) ;

# Bibliographie

[1] : S. ABADA, « Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic » Mémoire maitre es Sciences, Université laval, Québec Canada 2011.

[2] : J. Royer, T. Djiako, E. Schiler et B. Sadasy, « Le pompage photovoltaïque » université d'Ottawa ,1998.

[3] : K. Kassmi, M. Hamdaoui et F. Olivié, « Conception et modélisation d'un système Photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique » Université Mohamed Premier, Faculté des Sciences, Département de physique, LEPAS, Oujda, Maroc. Revue des energies renouvelables, 451-462, 2007.

[4] : M. Dahbi, « Etude et optimisation d'une installation Hybride PV-Eolienne Autonome », mémoire de magister, option physique énergétique ,2007.

[5] : RAHMANI Nassima, « Modélisation des panneaux solaires en vue de leurs implémentations dans le circuit FPGA », Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas Sétif, 2012.

[6] : N. Benalouache, “L'énergie solaire pour la production d'électricité au Maghreb : transition énergétique et jeux d'échelles”, Thèse Doctorat de l'université de Sfax 2017. Français.

[7] : BENBEKHTI Fatiha, « Etude, modélisation et simulation de cellules photovoltaïques de 3<sup>ème</sup> génération à base de couches minces et de nano fils sur substrat en silicium », Thèse de Doctorat, Université Aboubakr Belkaïd de Tlemcen, 2017.

[8] : Santo Martinuzzi, <Les cellules solaires au silicium cristallin> Dossier Photovoltaïque, 2007.

[9] : Mohand CHERIFI, Houa OUNOUH, <Étude du refroidissement par eau d'un panneau solaire photovoltaïque>, Mémoire master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou,2018.

[10] : Safi Riyadh, « Effet de la pression sur la structure et les propriétés diélectrique du composé semiconducteur binaire CdTe » Mémoire master, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi de Bordj Bou Arréridj, 2021.

[11] : Zerfaoui Hana, « Etude, analyse et optimisation des propriétés des matériaux à couches minces pour les applications photovoltaïques », Thèse de Doctorat, Université de Larbi Tébessi de Tébessa, 2020.

[12] : Lachaume, R. « Contribution à la caractérisation électrique et à la simulation numérique des cellules photovoltaïques silicium à hétérojonction », Doctoral dissertation, Grenoble, 2014.

[13] : P. Bessemoulin, J. Oliviéri. Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette. La météorologie 8e série n° 31 septembre 42-59 (2000).

[14] : S. NAOUAL, "Modélisation et Extraction Automatique des Paramètres d'un Générateur," Université Ferhat Abbas de Sétif, Mémoire de Magister, département d'électrotechnique, 2010.

[15] : AYAT Rahma, « Utilisation des techniques intelligentes (PSO/GA) en vue de la supervision d'une installation de production d'énergie renouvelable », Mémoire de Magister, UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS de SÉTIF, 2014.

[16] : Dris Mida, « Contribution à la Modélisation d'un Système de Production d'Énergie Électrique Hybride (Éolien – Photovoltaïque) » Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, 2019.

[17] : BELLABACI Anouar, « Contribution à la modélisation du rayonnement solaire comme un paramètre climatologique pour des applications photovoltaïques en Algérie », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Boudiaf de M'sila, 2021.

[18] : [www.greenpeace.ca](http://www.greenpeace.ca)

[19] : DJESSAS Zahira, « Extraction Des Paramètres Physiques D'une Cellule Solaire A Deux Exponentiels Par La Méthode Des Algorithmes Génétiques », Thèse de Magister, Université Ferhat Abbas SETIF, 2018.

[20] : Yacine MAROUF, « Etude et simulation des cellules solaires multi-jonctions à base de matériaux semi-conducteurs III-V. », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider 3 Biskra, 2019.

[21] : BELHADJ DJILALI Abdel-Kader, « Contribution à l'optimisation de la Commande MPPT dans une Installation Hybride (Photovoltaïque-Diesel) », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique Alger, 2019.

[22] : S. Silvestre, A. Boronat, A. Chouder, "Study of bypass diodes configuration on PV modules", Applied Energy, Volume 86, Issue 9, September 2009, Page(s): 1632–1640.

[23] : <https://www.dsnsolar.com/info/pv-junction-box-s-bypass-diode-for-solar-panel-54221818.html>

[24] : S. HADJI "Optimisation de la conversion énergétique pour les systèmes à énergie Photovoltaïque", Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas Sétif 1, 2018.

[25] : MUSTAPHA BELARBI, « Contribution à l'étude d'un générateur solaire pour site autonome », Thèse de Doctorat, Université des sciences et de la technologie d'Oran, 2015.

[26] : Helali Kamelia « Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative. », Mémoire de MAGISTER en électrotechnique, université Mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou, 2012.

[27] : Azizi Amina « Modélisation Optimisation D'un Système De Production D'énergie Photovoltaïque Avec Un Système De Stockage Hybride », Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 2019.

[28] : MEFLAH Aissa « Etude des performances de modules photovoltaïques au Silicium (monocristallin, à couches minces et à hétérojonction) et caractérisation du carbure de silicium microcristallin hydrogéné », Thèse de Doctorat, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2017.

[29] : Habbati Bellia Assia, Moulay Fatima, « Detailed modeling of two diode photovoltaic module using MATLAB Simulink », International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDES), Vol. 10, No. 3, pp. 1603~1612,2019

[30] : SLAMA Fateh, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique », Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas Sétif, 2012.

[31] : A. Tchapo singo « système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome », Thèse de doctorat université Henri Poincaré 2010.

[32] : BELHADJ DJILALI Abdelkadir, « Contribution à l'optimisation de la Commande MPPT dans une Installation Hybride (Photovoltaïque-Diesel) », Thèse de Doctorat, Université Univ Chlef, 2019.

[33] : Cabal, C. « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque », Doctoral dissertation, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier,2008.

**[34] : LAMRI Billel, « Analyse énergétique et intégration de la sûreté de fonctionnement dans un système photovoltaïque connecté au réseau électrique », Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 2018.**

**[35] : BENKAID ali Islam, BOULALA Sidahmed « Application de l'onduleur à z-source au système photovoltaïque », Mémoire Master, Université YAHIA Fares de médéa, 2022.**

**[36] : AOUCHICHE Nedjma, « Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque », Thèse de Doctorat, Université Bourgogne-Franche-Comté, 2020.**

## Résumé

### Résumé :

Dans notre mémoire, nous avons réalisé à l'aide de Matlab/Simulink la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque (PV) en utilisant deux modèles de diode différents : un modèle à une diode et un modèle à deux diodes. L'examen de ces modèles a été réalisé afin de déterminer leur réaction à diverses variations de luminosité et de température.

Pour maximiser la puissance générée par notre panneau photovoltaïque, nous avons introduit une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) en utilisant deux méthodes classiques : Perturb and Observe (P&O) et Incremental Conductance (IncCond). L'efficacité de ces deux algorithmes a été comparée pour optimiser le point de puissance maximale.

En outre, nous avons procédé à une comparaison détaillée des performances des deux modèles de panneau (une diode et deux diodes) lorsqu'ils sont utilisés avec la méthode P&O. Cette analyse comparative nous a permis de déterminer les avantages et les limitations de chaque configuration en termes d'efficacité énergétique et de stabilité du système.

En conclusion, notre étude nous a permis de mieux comprendre la modélisation des panneaux photovoltaïques, l'optimisation de la puissance à travers la commande MPPT, ainsi que la comparaison des performances entre différents modèles et algorithmes de commande.

**Mots clés :** Système Photovoltaïque (PV) – Commande MPPT – Simulation – Matlab/Simulink

### Abstract :

In our dissertation, we carried out the modeling and simulation of a photovoltaic panel using two different diode models: a one-diode model and a two-diode model. Examination of these models was carried out to determine their response to various variations in light and temperature.

To maximize the power generated by our photovoltaic panel, we introduced MPPT (Maximum Power Point Tracking) control using two classic methods: Perturb and Observe (P&O) and Incremental Conductance (IncCond). The efficiency of these two algorithms was compared to optimize the maximum power point.

Additionally, we conducted a detailed performance comparison of the two panel designs (one diode and two diodes) when used with the P&O method. This comparative analysis allowed us to determine the advantages and limitations of each configuration in terms of energy efficiency and system stability.

In conclusion, our study allowed us to better understand the modeling of photovoltaic panels, the optimization of power through MPPT control, as well as the comparison of performances between different models and control algorithms.

**Keywords :** Photovoltaic (PV) system – MPPT control – Simulation – Matlab/Simulink