

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد حطاب البلدية  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Master

Option Électronique

Spécialité SIGNAUX ET INGENIERIE DES SYSTEMES EN INFORMATIQUE INDUSTRIEL

présenté par

ZAOUI CHEMS EDDIN

&

RAHLI IBRAHIM

---

# Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque muni d'une commande MPPT basée sur les méthodes perturbation & observation et logique floue

---

Proposé par : Mr BAHOURA MOHAMMED

Année Universitaire 2015-2016



## Introduction générale

Au cours de ces dernières années, le coût des énergies classiques ne cessent d'augmenter, de plus les ressources de ces énergies sont limitées. Par conséquent, l'énergie renouvelable devient de plus en plus la solution, avec tous les avantages qu'elle présente, comme l'abondance, l'absence de la pollution, le coût et la disponibilité.

Parmi les sources d'énergies renouvelables on cite le vent, la géothermie, les chutes d'eau, les marées ou la biomasse. L'avantage de l'exploitation de ces énergies est qu'elle n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes, donc nous pouvons dire que ce sont les énergies de l'avenir et que le monde doit se diriger vers leurs exploitations. Cependant, ces énergies ont des inconvénients comme le prix du générateur qui est un peu élevé ainsi que le rendement énergétique relativement bas. Ces énergies regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie et son rendement. La filière que nous avons étudiée dans notre travail est l'énergie solaire, vue le développement important de l'exploitation de cette énergie [1].

Le présent travail est basé sur l'étude et la comparaison entre deux techniques de poursuite de la puissance maximale délivrée par un générateur photovoltaïque. Ces méthodes (Perturbation & Observation et logique floue), ont été comparées afin de connaître les avantages et les inconvénients de chaque d'elle, ainsi, nous avons structuré notre mémoire en trois chapitres.

Dans le premier chapitre, nous avons introduit des généralités concernant les cellules photovoltaïque y compris l'influence des conditions climatiques sur les performances de notre système. Dans le deuxième chapitre nous avons exposé les techniques de suivi du point de la puissance maximale «MPPT» appliquée et simulée dans ce travail, de plus nous avons simulé le fonctionnement de convertisseur élévateur «BOOST» ainsi que le panneau photovoltaïque utilisé dans notre travail. En fin, dans le troisième chapitre, nous avons simulé dans l'environnement MATLAB/SIMULINK les deux méthodes MPPT pour effectuer la recherche du point de la puissance maximale d'un générateur photovoltaïque. La simulation du modèle est faite pour les commandes Perturbations & observation (P&O) et la logique floue sous les

mêmes conditions météorologiques afin d'entamer la comparaison des résultats obtenus. En conclusion générale, nous présentons les principaux résultats et les perspectives projetées.

## ملخص

تعتبر الطاقة الشمسية من اهم الطاقات المتجددة من الناحية البيئية من خصائص الالواح الشمسية ،انها لا تعطي استطاعتها العظمى الا في نقطة عمل معينة تلك النقطة غير ثابتة بل تتحرك مع الظروف الجوية من شدة الضوء والحرارة لذلك وجب الامثل للطاقة المتوفرة . في هذه المذكرة سنقوم بدراسة ومحاكاة نظامين للتعقب بحيث استعمال نظام تعقب للاستغلال عملية و فعالة و بسعر منخفض.

كلمات مفتاحية : محول مستمر\_مستمر،تعقب الاستطاعة القصوى،كهروضوى

## Résumé:

L'électricité solaire est vue comme étant une importante source d'énergie renouvelable. Le générateur photovoltaïque est une source caractérisée par un certain point de fonctionnement où la puissance générée est maximale. Ce point se déplace en fonction des conditions atmosphériques ; et un mécanisme de poursuite s'avère alors indispensable pour que le générateur photovoltaïque travaille avec une meilleure efficacité. Le but de ce mémoire est l'étude et la simulation de deux mécanismes de poursuite.

*Mots clés: Convertisseur DC-DC, MPPT, Photovoltaïque, Poursuite.*

## Abstract:

Solar electricity is seen as an important source of renewable energy. The photovoltaic array is an unstable source of power. Since the peak power point depends on the cell temperature and the insolation level. A maximum peak power point tracking is then necessary for maximum efficiency. The aim of this Master thesis is to study and simulate two peak power point tracking methods, in order to make solar energy more efficient.

*Keywords: DC-DC Converter, MPPT, Photovoltaic, Tracking.*

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I Étude des systèmes photovoltaïques.....</b>	<b>3</b>
<b>1.1 Introduction.....</b>	<b>4</b>
<b>1.2 Energie solaire.....</b>	<b>4</b>
<b>1.3 Effet photovoltaïque.....</b>	<b>5</b>
<b>1.4 Cellule photovoltaïque.....</b>	<b>6</b>
1.4.1 Technologie d'une cellule photovoltaïque.....	7
a) Silicium mono cristallin.....	7
b) Silicium poly cristallin.....	7
c) Silicium amorphe (a-Si).....	7
d) technologie de silicium.....	8
1.4.2 Caractéristique électrique des cellules photovoltaïques.....	9
<b>1.5 Regroupement des cellules.....</b>	<b>12</b>
1.5.1 Regroupement en série.....	12
1.5.2 Regroupement en parallèle.....	13
1.5.3 Regroupement combiné (série & parallèle).....	14
<b>1.6 Influence de l'enseillement et de la température.....</b>	<b>15</b>
1.6.1 Influence de l'enseillement.....	15

## Table de matières

---

1.6.2 Influence de la température.....	16
a) Influence de la température sur les courbes I(V) et P(V) .....	17
1.6.3 Influence des résistances série et shunt sur les caractéristiques I-V et P-V.....	19
a) Influence de la résistance série $R_s$ .....	19
b) Influence de la résistance $R_{sh}$ .....	19
<b>1.7 Conclusion .....</b>	<b>20</b>
<b>Chapitre II Technique de maximisation de la puissance .....</b>	<b>21</b>
<b>2.1 Introduction.....</b>	<b>21</b>
<b>2.2 Simulation du panneau solaire PB SX 150 .....</b>	<b>22</b>
2.2.1 Circuit équivalent de la cellule utilisé dans la simulation .....	23
<b>2.3 Convertisseurs DC-DC .....</b>	<b>25</b>
2.3.1 Convertisseur BOOST.....	26
a) Principe de fonctionnement .....	26
2.3.2 Propriétés de convertisseur BOOST.....	28
2.3.3 Simulation du convertisseur BOOST .....	28
<b>2.4 Techniques «MPPT» à algorithmes performants.....</b>	<b>31</b>

## Table de matières

---

2.4.1 Methode de perturbation et observation (P&O) .....	33
2.4.2 Méthode basée sur la logique floue .....	34
a) Exemple d'application sur la table de vérité .....	37
<b>2.5 Conclusion .....</b>	<b>37</b>
<b>Chapitre III Simulation des techniques MPPT de types P&amp;O et logique floue...38</b>	
<b>3.1 Introduction .....</b>	<b>38</b>
<b>3.2 Simulation du système photovoltaïque .....</b>	<b>38</b>
3.2.1 Simulation sans MPPT (connexion directe) .....	39
3.2.2 Simulation avec MPPT (P&O) .....	41
a) Code MATLAB de la méthode P&O .....	42
b) Discussion des résultats obtenus dans les figures 3.5, 3.6 et 3.7 .....	43
3.2.3 Simulation du système PV avec MPPT (logique floue).....	<b>Erreur ! Signet non défini.48</b>
a) Résultat de simulation .....	<b>Erreur ! Signet non défini.49</b>
<b>3.3 Comparaison entre les commandes (P&amp;O et la logique floue) .....</b>	<b>51</b>
3.3.1 Discussion des résultats de la comparaison.....	52
<b>3.4 Conclusion.....</b>	<b>52</b>

## Table de matières

---

**Conclusion générale .....54**

**Bibliographie.....56**

## Liste des tableaux

---

<b>Tableau (1.1)</b> Avantage et inconvénient des cellules photovoltaïques.....	(8)
<b>Tableau (2.1)</b> Caractéristiques électriques du panneau PB SX 150.....	(22)
<b>Tableau (2.2)</b> Variation de la valeur moyenne de la tension et du courant en fonction de rapport cyclique.....	(31)
<b>Tableau (2.3)</b> Table de vérité de la logique floue.....	(36)
<b>Tableau (3.1)</b> Connexion directe du panneau avec la charge Rc.....	(40)
<b>Tableau (3.2)</b> Connexion indirecte avec commande P&O.....	(43)
<b>Tableau (3.3)</b> Connexion indirecte avec commande logique floue.....	(50)
<b>Tableau (3.4)</b> Comparaison entre la commande P&O et la logique floue.....	(52)

<b>Figure (1.1)</b> : Spectre d'irradiance solaire.....	(5)
<b>Figure (1.2)</b> : Cellule PV.....	(6)
<b>Figure (1.3)</b> : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.....	(9)
<b>Figure (1.4)</b> : Caractéristique courant tension de Ns cellule en série.....	(13)
<b>Figure (1.5)</b> : Caractéristique courant tension de (Np) cellule en parallèle.....	(14)
<b>Figure (1.6)</b> : Courbes I(V) d'un panneau à divers ensoleillements à T=25°.....	(15)
<b>Figure (1.7)</b> : Courbes P(V) d'un panneau à divers ensoleillements à T=25°.....	(16)
<b>Figure (1.8)</b> : Courbes I(V) d'un générateur PV pour différentes températures.....	(17)
<b>Figure (1.9)</b> : Courbes P(V) d'un générateur PV pour différentes températures.....	(18)
<b>Figure (1.10)</b> : Influence de $R_s$ sur la caractéristique I-V et P-V d'une cellule T=25°C.....	(19)
<b>Figure (1.11)</b> : Influence de $R_{sh}$ sur la caractéristique I-V et P-V d'une cellule =25°C.....	(20)
<b>Figure (2.1)</b> : Le schéma block du système de contrôle avec rétroaction de puissance.....	(21)
<b>Figure (2.2)</b> :Schéma équivalent de la cellule solaire à une diode utilisé dans la simulation	(23)
<b>Figure (2.3)</b> : Schéma block du panneau PV (PB SX 150 ).....	(24)
<b>Figure (2.4)</b> : Schéma bloc du panneau avec $V_{pv}$ et $P_{pv}$ .....	(25)
<b>Figure (2.5)</b> : Electrique du convertisseur BOOST.....	(26)
<b>Figure (2.6)</b> : Formes d'ondes en conduction continue.....	(27)
<b>Figure (2.7)</b> : Schéma bloc du convertisseur BOOST.....	(28)
<b>Figure (2.8)</b> : Courant délivré par la source d'entrée.....	(29)
<b>Figure (2.9)</b> : Tension aux bornes de la source d'entrée.....	(29)
<b>Figure (2.10)</b> : Valeur du courant traversant la charge de sortie.....	(30)

<b>Figure (2.11) :</b> Valeur de la tension aux bornes de la sortie.....	(30)
<b>Figure (2.12) :</b> Principe de tâtonnement du contrôleur MPPT .....	(32)
<b>Figure (2.13) :</b> Organigramme de la méthode P&O.....	(34)
<b>Figure (2.14) :</b> Structure de la commande par logique floue.....	(35)
<b>Figure (2.15) :</b> Fonctions d'appartenances pour les entrées/sorties d'un contrôleur flou....	(36)
<b>Figure(3.1) :</b> Schéma synoptique du système PV contrôlé par une commande MPPT.....	(38)
<b>Figure (3.2) :</b> Schéma block pour la connexion directe du générateur PV .....	(39)
<b>Figure (3.3):</b> Valeurs des (courant, tension et puissance) produites par le GPV sans MPPT	(41)
<b>Figure (3.4) :</b> Schéma block de système PV avec MPPT (P&O).....	(42)
<b>Figure (3.5) :</b> Courant de charge et de GPV .....	(44)
<b>Figure (3.6) :</b> Tension de charge et de GPV.....	(44)
<b>Figure (3.7) :</b> Puissance de charge et de GPV .....	(45)
<b>Figure (3.8) :</b> Puissance de GPV avec et sans MPPT.....	(46)
<b>Figure (3.9) :</b> Puissance à la sortie du système PV.....	(47)
<b>Figure (3.10) :</b> Schéma block de système PV avec commande logique floue.....	(48)
<b>Figure (3.11) :</b> Schéma block pour la commande logique floue.....	(49)
<b>Figure (3.12) :</b> Courant, tension et puissance au niveau de la charge Rc.....	(50)
<b>Figure (3.13):</b> Puissance fournie a la charge pour les commandes P&O et logique floue...	(51)

## 1.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque est la transformation du rayonnement solaire en énergie électrique exploitable. Cette conversion d'énergie est faite à travers une cellule photovoltaïque appelée PV. Cette dernière est basée sur un phénomène physique nommé effet photovoltaïque. Ce chapitre présente les concepts théoriques nécessaires à la compréhension du fonctionnement des cellules photovoltaïques constituées de semi-conducteur en silicium [1].

## 1.2 L'énergie solaire

L'énergie solaire est la fraction de l'énergie du rayonnement solaire qui apporte l'énergie thermique et la lumière parvenant à la surface de la Terre, après filtrage par l'atmosphère terrestre [2]. La densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère est appelée la constante solaire qui est égale à 1360 W/h, cela à cause de l'absorption dans l'atmosphère. Le physicien allemand Albert Einstein a découvert, en étudiant l'effet photo-électricité, que l'énergie de la lumière est portée par des particules qui sont les photons. La relation qui donne l'énergie d'un photon est [3] :

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (1.1)$$

Où :

- $h$  : la constante de Planck. =  $6,625 \times 10^{-34}$  J.s
- $c$  : la vitesse de la lumière. =  $3 \times 10^8$  m/s
- $\lambda$  : longueur d'onde de la lumière

Plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande [4]. Cette énergie peut être exprimée autrement par la relation :

$$E = \frac{19.89 \times 10^{-26}}{\lambda} \quad (1.2)$$

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique (voir la figure 1.1) comprise dans une bande de longueur d'onde variant de 200 à 1400 nanomètre [4].

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

- 9% dans la bande des ultraviolets (<400 nm).
- 47% dans la bande visible (400 à 800 nm).
- 44% dans la bande des infrarouges (> 800 nm).

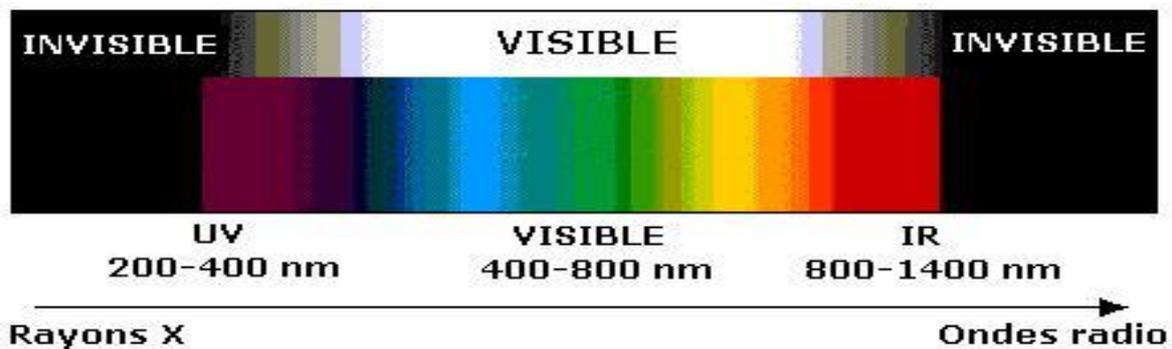


Figure 1.1 : Spectre d'irradiance solaire [3].

### 1.3 Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est mis en œuvre dans la cellule photovoltaïque pour produire de l'électricité à partir des rayonnements solaires. Alors, les modules photovoltaïques se composent des cellules solaires ou photopiles afin de réaliser cette transformation de l'énergie [5].

Lorsqu'on expose la surface de la cellule photovoltaïque à la lumière, son effet consiste à établir une force électromotrice. La tension générée peut prendre des valeurs comprises entre 0.3 V et 0.7 V. Ces valeurs dépendent du matériau semi-conducteur utilisé ainsi que de la température de la cellule et de son vieillissement [6]. La figure 1.2 illustre les détails de constitution d'une cellule photovoltaïque.

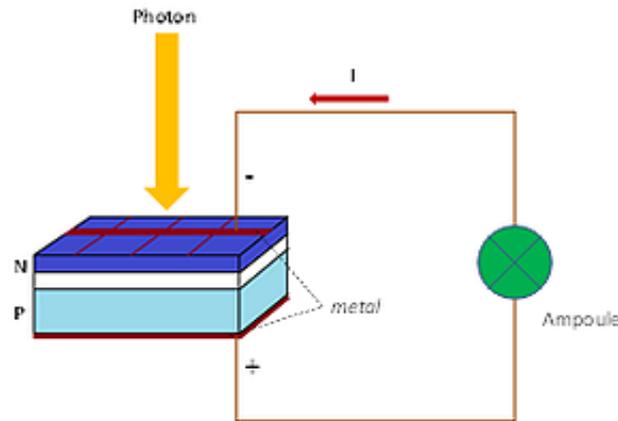


Figure 1.2 : Structure de base d'une Cellule PV [9].

## 1.4 Cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque ou cellule solaire est un composant à base de semi-conducteur qui produit de l'électricité lorsqu'il est exposé à la lumière ; et cela grâce à l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène. La tension délivrée par la cellule photovoltaïque est continue et le courant obtenu est proportionnel à la puissance délivrée par le panneau photovoltaïque [7].

Le principe de fonctionnement de la cellule fait appel aux propriétés d'absorption du rayonnement lumineux en utilisant des matériaux semi-conducteurs. Lorsqu'une cellule est exposée à la lumière du soleil, cette dernière peut être reflétée, absorbée, ou bien passer à travers la cellule, mais il n'y a que la lumière absorbée qui peut générer l'électricité par l'effet photovoltaïque [8].

L'énergie de la lumière absorbée est reçue par les électrons de la cellule. Ces derniers quittent la bande énergétique initiale et passent à la bande suivante de conduction et participent au flux électrique, ou bien au courant, dans un circuit électrique préétabli. Une propriété électrique particulière de la cellule *PV*, appelée «Champs électrique interne», la tension nécessaire afin de faire parcourir le courant à travers la charge externe connectée au panneau [8].

### 1.4.1 Technologie d'une cellule photovoltaïque

Les performances de rendement énergétique atteintes industriellement par les cellules dépendent du type du matériau qui les compose. Le rendement énergétiques de 13 à 14% pour le monocristallin, 11 à 12% pour le silicium polycristallin est et enfin de 7 à 8% pour le silicium amorphe en films minces [10]. Le générateur photovoltaïque se base essentiellement sur la photopile ou cellule solaire [11].

#### a) Silicium monocristallin

Malgré la disponibilité de plusieurs matériaux, ce type de silicium est maintenant le plus utilisé pour les cellules commerciales. Tous les atomes dans le matériau PV actif font partie d'une structure cristalline simple, c'est ce qu'implique le terme « monocristallin » [4].

#### b) Silicium polycristallin

Ce type est composé de petits grains de silicium cristallin. À partir du silicium poly-Si, on peut avoir des cellules qui sont moins efficaces que celles du silicium monocristallin. La composition de ce type de silicium influe sur l'écoulement des électrons et aussi abaisse le rendement de puissance de la cellule, et cela à cause des joints de grains. La conversion photovoltaïque pour la cellule est comprise entre 10 et 14% [4].

#### c) Silicium amorphe (a-Si)

Ce type de silicium est un mauvais semi-conducteur à cause de sa composition sous formes de couche mince sur une plaque de verre et de l'organisation irrégulière de ses atomes. En cas où on recherche de solution économique ou lorsqu'on veut débiter un taux réduit d'électricité, les cellules à base de silicium amorphe sont souvent utilisées. On prend comme exemples : l'alimentation des montres, des calculatrices, ou bien les luminaires de secours. Ces cellules présentent l'avantage d'avoir un coefficient d'absorption élevé et des très faibles épaisseurs, de l'ordre du micron. L'inconvénient est le faible rendement de conversion (de 7 à 10 %) et aussi la dégradation rapide de ces cellules sous la lumière [4].

### d) Technologie de silicium

Le domaine de l'optoélectronique a connu un développement permanent dans l'utilisation des matériaux organiques, avec des perspectives d'électronique organique voire moléculaire. En effet, les technologies avancées de ce domaine ont participé à la progression dans le domaine du photovoltaïque malgré que les optimisations des matériaux à mettre en œuvre ne sont pas les mêmes. Ainsi, les progrès annuels sont aussi importants, bien que la filière de l'optoélectronique soit vraiment récente. Les matériaux organiques ou moléculaires, à base de carbone, d'hydrogène et d'azote, sont particulièrement intéressants en termes d'abondance, de coût, de poids et de conception [12]. Le tableau (1.1) présente les propriétés des cellules photovoltaïques, ainsi que leurs domaines d'application.

Tableau (1.1) Propriétés des cellules photovoltaïques.

Type de cellule	Rendement des cellules PV			Domaines d'applications
	Théorique	En laboratoire	disponible	
Mono- Si (silicium monocristallin)	27,0 %	24,7 %	13-14%	Modules de grandes Dimensions pour toits et façades, appareils de faibles puissances,
Poly- Si (silicium polycristallin)	27,0 %	19,8 %	11-12%	Modules de grandes Dimensions pour toits et façades, générateurs de toutes tailles
a- Si (silicium amorphe)	25,0 %	13,0 %	7 - 8%	Appareils de faible Puissance production d'énergie embarquée (calculatrice, montres...) modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)

### 1.4.2 Caractéristiques électriques des cellules photovoltaïques

Le schéma équivalent simplifié d'une cellule photovoltaïque est donné par la figure 1.3 [13] [14] [15] [16]. Il fait apparaître le générateur de courant dont la valeur  $I_{sc}$  est proportionnelle à l'irradiation,

- la diode a une valeur de tension directe qui vaut 0,6 volts.
- la résistance en série  $R_s$  représentant les diverses résistances de contacts et de connexions.

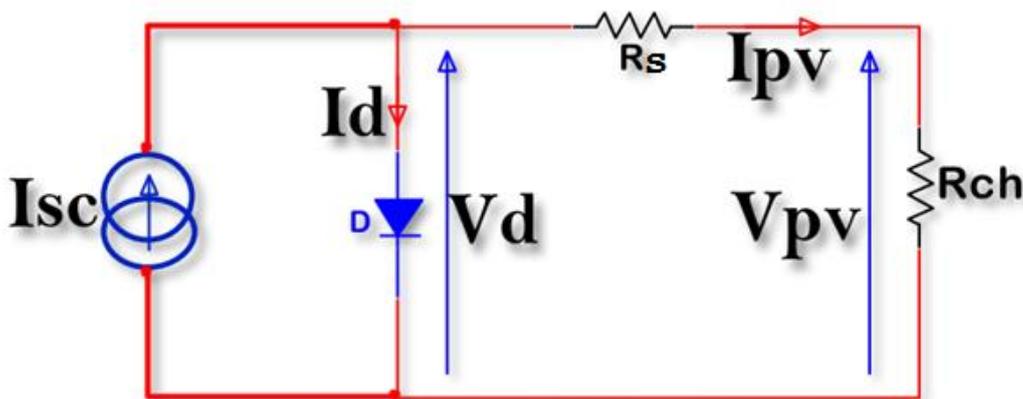


Figure 1.3. Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.

Le courant généré par la cellule  $I_{pv}$  est donné par :

$$I_{PV} = I_{sc} - I_d \quad (1.3)$$

- $I_{sc}$  : le courant fourni par la cellule lorsqu'elle est mise en court-circuit.
- $I_d$  : courant dans la diode.

La tension aux bornes de la diode est donnée par :

$$V_d = V_{PV} + R_s \times I_{PV} \quad (1.4)$$

Le courant de diode  $I_d$  est donné par la caractéristique I-V de la diode :

$$I_d = I_0 \times \left[ e^{q \left( \frac{V_{PV} + R_s \times I_{PV}}{nkT} \right)} - 1 \right] \quad (1.5)$$

Le remplacement de l'équation (1.5) dans l'équation (1.3) donne la caractéristique courant-tension de la cellule :

$$I_{PV} = I_{sc} - I_0 \times \left[ e^{q \left( \frac{V_{PV} + R_s \times I_{PV}}{nkT} \right)} - 1 \right] \quad (1.6)$$

$$V_{PV} = \frac{nkT}{q} \ln \left[ 1 + \frac{I_{sc} - I_{pv}}{I_0} \right] - R_s \times I_{pv} \quad (1.7)$$

On note que :

- **$I_0$** : courant de saturation de la diode (A).
- **$q$** : la charge d'électron.  $1.6 \cdot 10^{-19}$  (C)
- **$V_{PV}$** : la tension aux bornes de la cellule (V).
- **$R_s$** : la résistance série de la cellule ( $\Omega$ ).
- **$n$** : le facteur d'idéalité de la diode qui il peut prend des valeurs entre 1 et 2, pour la diode idéale,  $n=1$ .
- **$k$** : constante de Boltzmann égale à :  $1.38 \cdot 10^{-23}$  J.K<sup>-1</sup>.
- **$T$** : la température de la jonction en Kelvin.

Le courant de saturation de la diode ( **$I_0$** ) est constant sous une température constante. Dans le cas de circuit-ouvert, l'équation (1.6) devient :

$$0 = I_{sc} - I_0 \left( e^{q \left( \frac{V_{oc}}{nkT} \right)} - 1 \right) \quad (1.8)$$

où  $V_{co}$  est la tension du circuit-ouvert

$$I_{sc} = I_o \left( e^{q \left( \frac{V_{co}}{nkT} \right)} - 1 \right) \quad (1.9)$$

$$I_o = \frac{I_{sc}}{\left( e^{q \left( \frac{V_{co}}{nkT} \right)} - 1 \right)} \quad (1.10)$$

Le courant de court-circuit est proportionnel à l'ensoleillement. À un ensoleillement donné ( $G$ ), il est donné par :

$$I_{sc-G} = \left[ \frac{G}{G_o} \right] \times I_{sc-G_o} \quad (1.11)$$

où

$I_{sc-G_o}$  est le courant de court-circuit à l'ensoleillement standard  $G_o = 1000 \text{ W/m}^2$ .

D'abord, on calcule le courant de court-circuit  $I_{sc-T}$  à une température connue pour la cellule

$$I_{sc-T} = I_{sc-Tréf} \times [1 + \alpha(T - T_{réf})] \quad (1.12)$$

- $I_{sc-Tréf}$  : est donné dans la fiche technique (*data-sheet*) pour un ensoleillement  $1000 \text{ W/m}^2$ .
- $T_{réf}$  : est la température de référence de la cellule en Kelvin ( $298 \text{ K} = 25^\circ \text{C}$ ).
- $\alpha$  : est le coefficient de température.

Le courant de saturation de la diode à la température de référence  $T_{réf}$  peut être obtenu par l'équation (1.10). Le courant ( $I_o$ ) à la température  $T$  est calculé par l'équation suivante :

$$I_{o-T} = I_{o-Tréf} \left[ \frac{T}{T_{réf}} \right]^{\frac{3}{n}} e^{\frac{-qEg}{nK} \left[ \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{réf}} \right]} \quad (1.13)$$

où :

- **n**: facteur d'idéalité de la diode.
- **Eg**: l'énergie de gap (1.12 eV pour Si).
- **q** : la charge d'électron ( $1.602 \times 10^{-19}$  C).
- **k** : la constante de Boltzmann ( $1.381 \times 10^{-23}$  J/K ).

La résistance série **Rs** est déduite en différenciant l'équation (1.6) et en la réarrangeant en termes de **Rs**.

$$dI = 0 - I_0 \times q \times \left( \frac{(dV_{pv} + R_s \times dI_{PV})}{nkT} \right) \times e^{q \left( \frac{(V_{pv} + R_s \times I_{PV})}{nkT} \right)} \quad (1.14)$$

$$R_s = - \left( \frac{dv}{dI} \right) - \frac{\frac{nkT}{q}}{I_0 e^{\frac{qV_{co}}{nkT}}} \quad (1.15)$$

## 1.5 Regroupement des cellules

### 1.5.1 Regroupement en série

Le but de l'association de  $N_s$  cellules en série, comme le montre la figure 1.4, est de donner la possibilité d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Le courant circulant dans les cellules est le même, cependant, la tension résultante du groupement série est obtenue par l'addition des tensions élémentaires des cellules.

La caractéristique électrique de l'association série de ( $N_s$ ) cellules est donnée par l'équation suivante [17] :

$$V_{SCO} = N_s \times V_{CO} \quad (1.16)$$

$$I_{SCC} = I_{CC} \quad (1.17)$$

**$V_{SCO}$**  : Somme des tensions en circuit ouvert de  $N_s$  cellules en série.

**$I_{SCC}$**  : Courant de court-circuit de  $N_s$  cellules en série

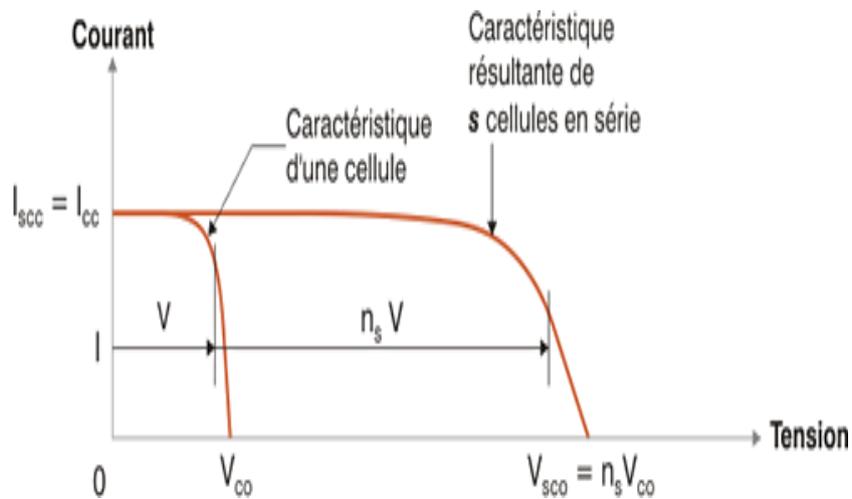


Figure 1.4 Caractéristique courant tension de  $N_s$  cellule en série [12]

### 1.5.2 Regroupement en parallèle

Dans le but d'augmenter le courant de sortie du générateur ainsi créé, il est possible aussi de faire l'association parallèle de  $N_p$  cellule comme le montre la figure 1.5. Toutes les cellules identiques connectées en parallèle dans un groupement sont soumises à la même tension et le courant résultant du groupement est obtenue par l'addition des courants [16].

$$I_{PCC} = N_P \times I_{SC} \quad (1.18)$$

$$V_{PCO} = V_{oc} \quad (1.19)$$

Avec :

- $I_{PCC}$  : la somme des courants de court circuit de ( $N_p$ ) cellule en parallèle
- $V_{PCO}$  : tension du circuit ouvert de ( $N_p$ ) cellules en parallèle

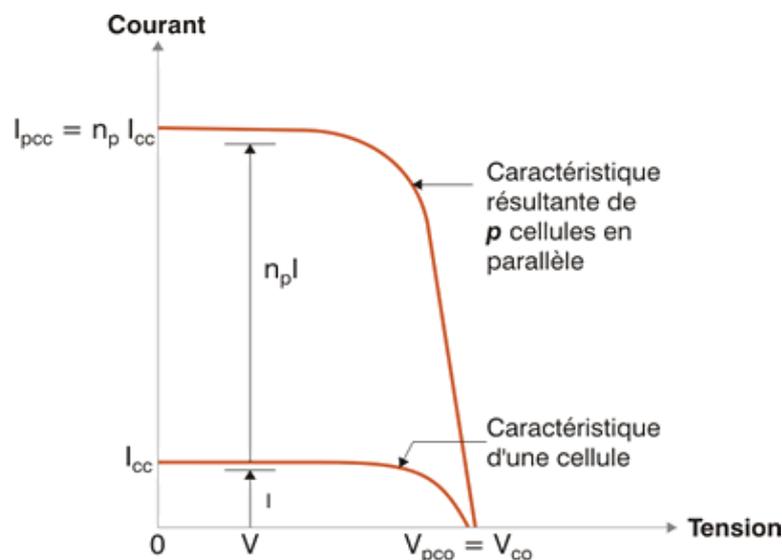


Figure 1.5 : Caractéristique courant tension de  $N_p$  cellules en parallèle [12]

### 1.5.3 Regroupement combiné (série & parallèle)

Le but de ce genre de regroupement est d'avoir à la fois plus de tension et plus de courant. Le regroupement série augmente la valeur de tension en faisant la somme de toutes les tensions et maintient le même courant traversant une cellule. Cependant, l'association de plusieurs modules solaires en parallèle nous donne un courant plus grand. Afin d'augmenter la valeur de

la puissance de quelques KW, il est nécessaire d'associer tous les modules en panneaux et placer ces derniers en rangés de panneaux série et parallèle ; un tel regroupement est dit générateur photovoltaïque [18].

## 1.6 Influence de l'ensoleillement et de la température

### 1.6.1 Influence de l'ensoleillement

L'ensoleillement a une influence très importante sur le courant produit par le panneau, s'il augmente cela entraîne une augmentation dans le courant, donc la variation de ce dernier est proportionnelle au changement de l'ensoleillement appliqué.

L'influence de l'ensoleillement sur la tension n'est pas importante par rapport à celle du courant. La variation de l'ensoleillement engendre un décalage du point de puissance maximale vers des puissances inférieures ou supérieures, dépendamment du sens de variation de l'ensoleillement. Les figure 1.6 et 1.7 montrent l'influence sur les caractéristiques I (V) et P(V) sous la même température  $T=25^{\circ}\text{C}$  [19].

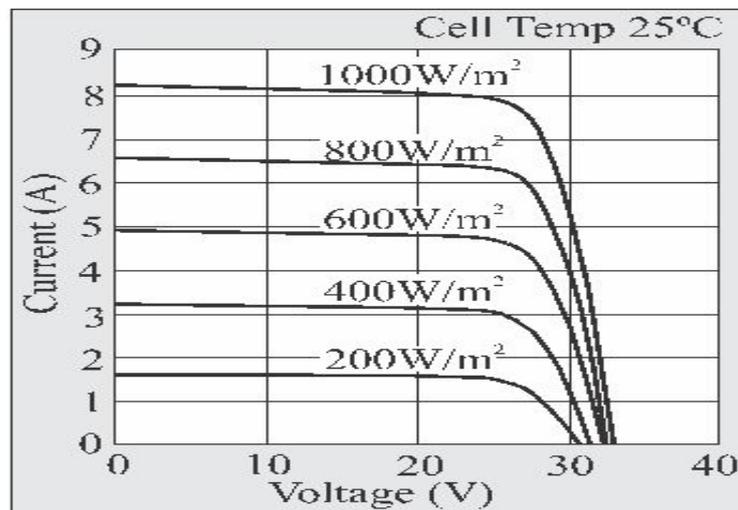


Figure 1.6 : Courbes I(V) d'un panneau à divers ensoleillements à  $T=25^{\circ}\text{C}$  [20].

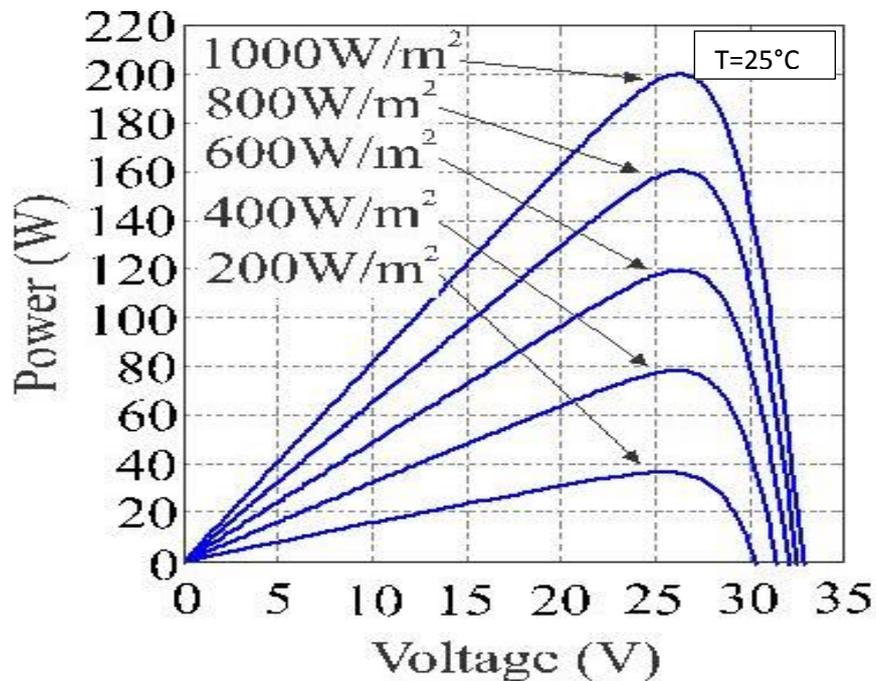


Figure 1.7 : Courbes P(V) d'un panneau à divers ensoleillements à T=25°C [20].

À partir des figure 1.6 et 1.7, nous constatons que la valeur du courant de court-circuit dépende directement de la variation de l'ensoleillement. Ainsi, la puissance fournie par le panneau croit proportionnellement avec l'intensité de l'ensoleillement.

La variation dans la valeur de la tension de circuit-ouvert n'est pas importante par rapport aux autres variations et les différentes puissances maximales possèdent des tensions très proches. On note aussi que pour un ensoleillement au-dessous de 100W/m², même si la tension varie à son tour, cette intensité de l'ensoleillement est très faible.

### 1.6.2 Influence de la température

La température a une influence considérable sur le comportement de la cellule et donc sur son rendement [21]. Sa variation influe légèrement sur les valeurs du courant fourni. Pour vérifier l'influence entraînée par le changement de la température sur les caractéristiques I(V) et P(V), on met le panneau sous différentes températures de 25°C à 75 °C. On s'aperçoit que la tension du circuit-ouvert diminue avec l'augmentation de la température, ce qui entraîne aussi la diminution de la puissance du panneau.

**a) Influence de la température sur les courbes I(V) et P(V)**

La figure 1.8 illustre la caractéristique I (V) pour trois températures 25°C, 50°C et 75°C et pour un ensoleillement constant. On voit que les valeurs des courants changent très peu malgré le changement de la température, par contre la variation de la tension de circuit ouvert est très importante et opposée à la variation de température.

La figure 1.9 présente l'influence marquée sur la caractéristique P(V) et on conclut que l'augmentation de la température provoque une diminution dans la puissance

On note aussi que pour chaque degré d'augmentation de la température au-dessus de 25 °C, il y a une perte dans la puissance du panneau d'environ 20% [21]. Mais on peut réduire cette perte en utilisant les cellules au silicium amorphe, car elles assurent un bon fonctionnement grâce à une forte tension. Donc, le choix de type du silicium est très important lors de la conception des cellules.

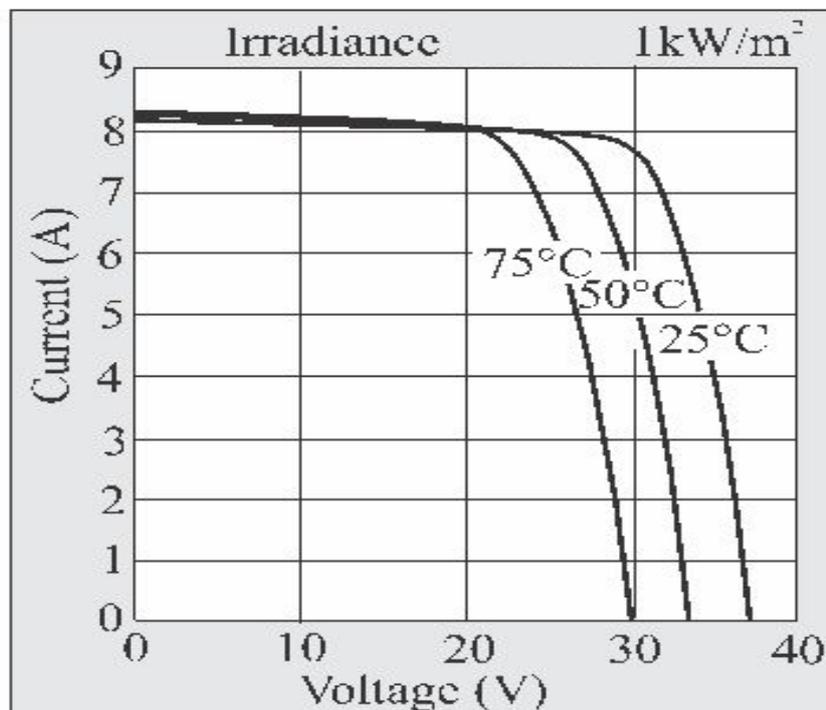


Figure 1.8 Courbes I(V) d'un générateur PV pour différentes températures à  $G=1000\text{W/m}^2$  [20].

La perte de tension d'un module ou d'une cellule peut être estimée par la formule suivante :

$$V(T^\circ) = V(25^\circ\text{C}) + (\Delta T^\circ * a) \quad (1.20)$$

Avec :

- $\Delta T$  : augmentation de la température [K]
- $a$  : coefficient de température [mV/K], valeur fournie par le fabricant [22].

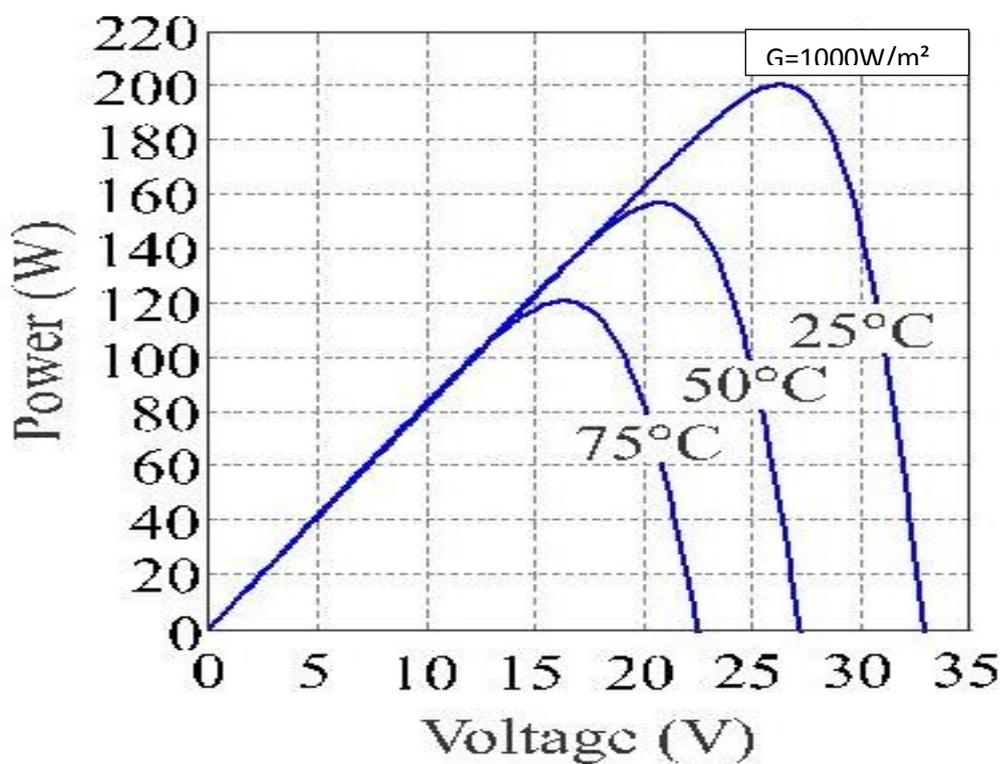


Figure 1.9 Courbes P(V) d'un générateur PV pour différentes températures à  $G=1000\text{W/m}^2$  [20].

### 1.6.3 Influence des résistances série et shunt sur les caractéristiques I-V et P-V

#### a) Influence de la résistance série $R_s$

La résistance série  $R_s$  ne présente pas d'influence sur le courant, mais son influence est marquée très légèrement sur la variation de la tension à vide  $V_{co}$  qui diminue pour une certaine valeur de  $R_s$ , voir la figure 1.10 [5].

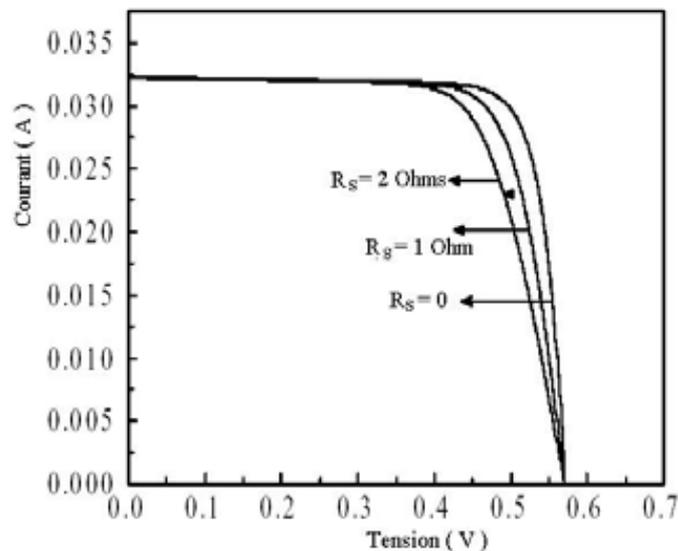


Figure 1. 10 : Influence de  $R_s$  sur la caractéristique I-V d'une cellule ( $G=1\text{KWm}^2$  et  $T=25\text{C}^\circ$  [23]).

#### b) Influence de la résistance $R_{sh}$

L'influence de la résistance  $R_{sh}$  s'apparaît surtout en présence des défauts de structures. Comme le montre la figure 1.11 l'influence de  $R_{sh}$  ne se fait pas sentir pour des grandes valeurs, mais pour les faibles, on constate que la tension décroît légèrement [5].

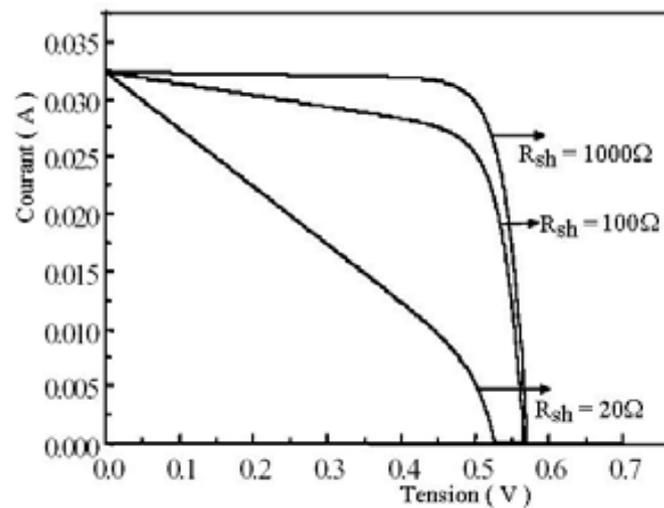


Figure (1.11) Influence de  $R_{sh}$  sur la caractéristique I-V d'une cellule ( $G=1\text{KWm}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ ) [23].

## 1.7 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la cellule photovoltaïque et sa conversion d'énergie qui est basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. Nous avons abordé aussi les technologies des cellules et les matériaux de conception qui déterminent la tension générée. Nous avons aussi présenté le regroupement des cellules qui augmente la tension dans le cas du regroupement série et le courant s'il s'agit d'un regroupement parallèle.

Enfin, nous avons présenté des fortes influences exercées par les conditions climatiques, particulièrement l'ensoleillement solaire et la température sur les différentes caractéristiques du panneau photovoltaïque.

## 2.1 Introduction

Plusieurs publications ont traité et expliqué le fonctionnement des commandes basées sur le suivi du point de puissance maximale (MPPT). En réalité, ces types de commandes sont des systèmes de contrôle. En effet, les techniques MPPT qui diffèrent les unes des autres ont de nombreuses dans le domaine de l'énergie solaire, tel que la simplicité d'application, la rapidité de la réponse, le coût, l'efficacité et le type de recherche effectué [23].

Ces techniques sont classées en deux grandes catégories, dépendamment du type de contrôle : le contrôle direct et le contrôle indirect. Dans ce chapitre nous allons expliquer le fonctionnement du système photovoltaïque composé d'un panneau photovoltaïque (PV) de type PB SX 150W, un convertisseur DC-DC de type BOOST et un bloc de commande MPPT. Nous allons faire une simulation pour chaque bloc de notre système. Nous allons présenter aussi deux types de commandes : la perturbation et observation (P&O) et la commande basée sur la logique floue. La figure ci-dessous illustre les différents blocs du système PV

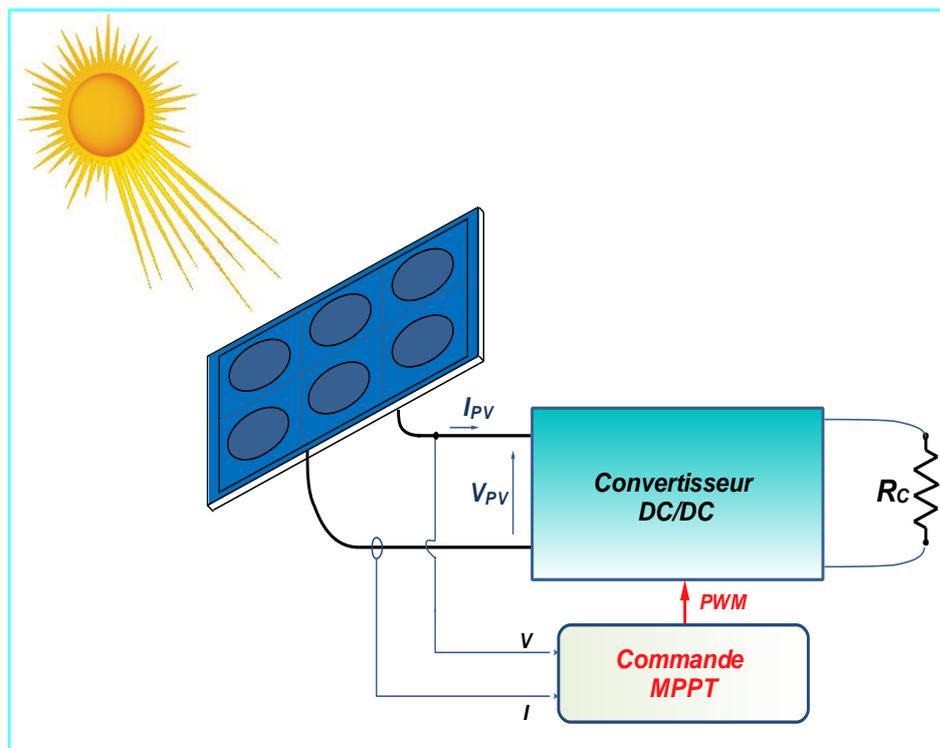


Figure (2.1) Le schéma block du système de contrôle avec rétroaction de puissance [30].

## 2.2 Simulation du panneau solaire PB SX 150

Dans notre travail, nous avons choisi le model du panneau solaire PB SX 150, qui est composé de 72 cellules connectées en série ayant une puissance maximale de 150w et considéré dans les conditions standards  $G=1000\text{w/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ . Pour faire la simulation de ce module, nous avons utilisé MATLAB/SIMULINK comme outil de tests.

Tableau (2.2) Caractéristiques électriques du panneau PB SX 150 [23].

Puissance maximale	$(P_{max})$	150w
Tension à vide	$(V_{co})$	43.5 v
Courant de court-circuit	$(I_{sc})$	4.75 A
Tension au point de puissance maximale	$(V_{mpp})$	34.5V
Courant au point de puissance maximale	$(I_{mpp})$	4.35V
coefficient de Température pour le courant	$(I_{sc})$	$0.065 \pm 0.015\%/^\circ\text{C}$
coefficient de Température pour la tension	$(V_{co})$	$- 160 +20 \text{ mv}/^\circ\text{C}$
Coefficient de Température pour la puissance		$- 0.5 \pm 0.05\%/^\circ\text{C}$

2.2.1 Circuit équivalent de la cellule utilisé dans la simulation

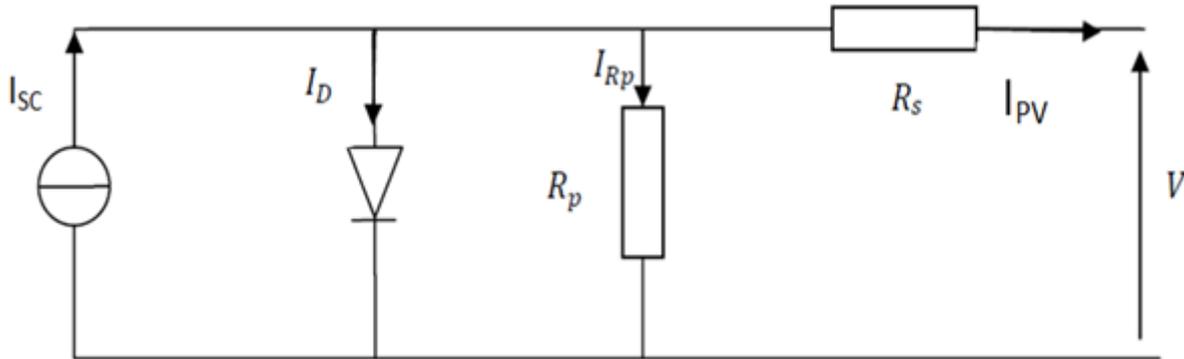


Figure (2.2): Schéma équivalent de la cellule solaire à une diode utilisé dans la simulation

Le courant de saturation de la diode est donné par la relation :

$$I_0 = \frac{I_{sc}}{\left(\frac{qV}{nkT} - 1\right)} \quad (2.1)$$

Le courant fourni par la cellule est donné par :

$$I = I_{sc} - I_0 \left( e^{\frac{(V+I \times R_s)}{nkT}} - 1 \right) - \frac{(V+I \times R_s)}{R_p} \quad (2.2)$$

Le courant issu du panneau étant donné par la relation :

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{(V_{pv}/N_s + I R_s)}{nV_T}} - 1 \right) - \frac{(V_{pv}/N_s + I R_s)}{R_p} \quad (2.3)$$

où :  $V_T = \frac{kT}{q}$  est l'énergie thermique (approximativement de 26 mV).

À partir de l'équation (2.3), nous obtenons le schéma bloc suivant :

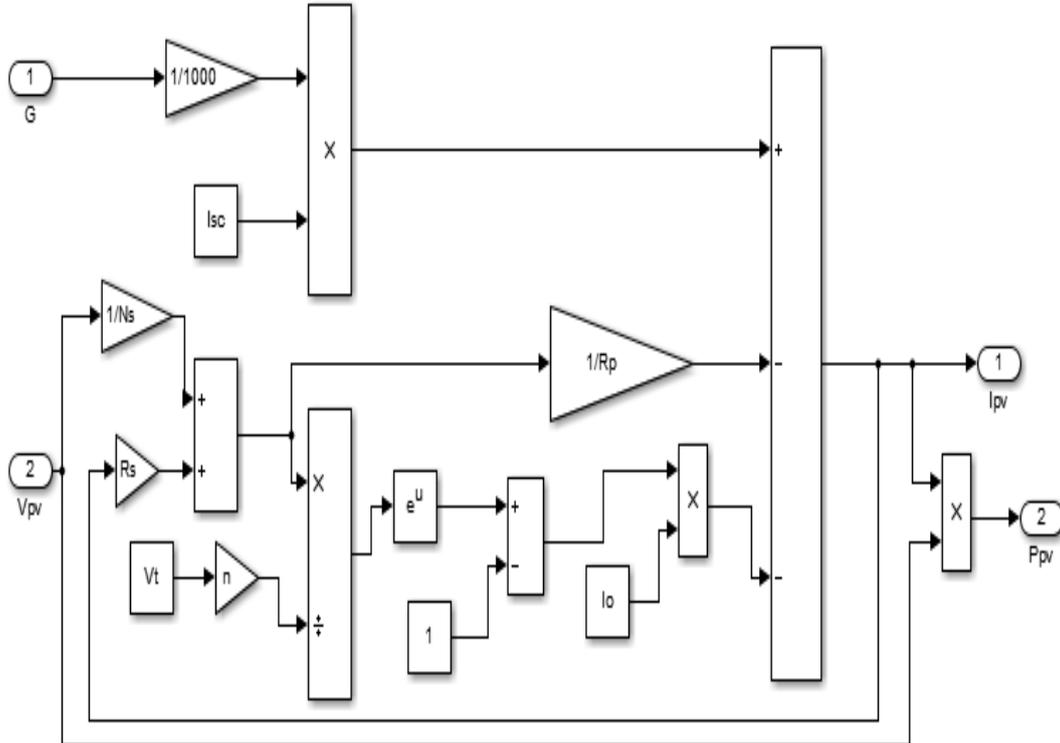
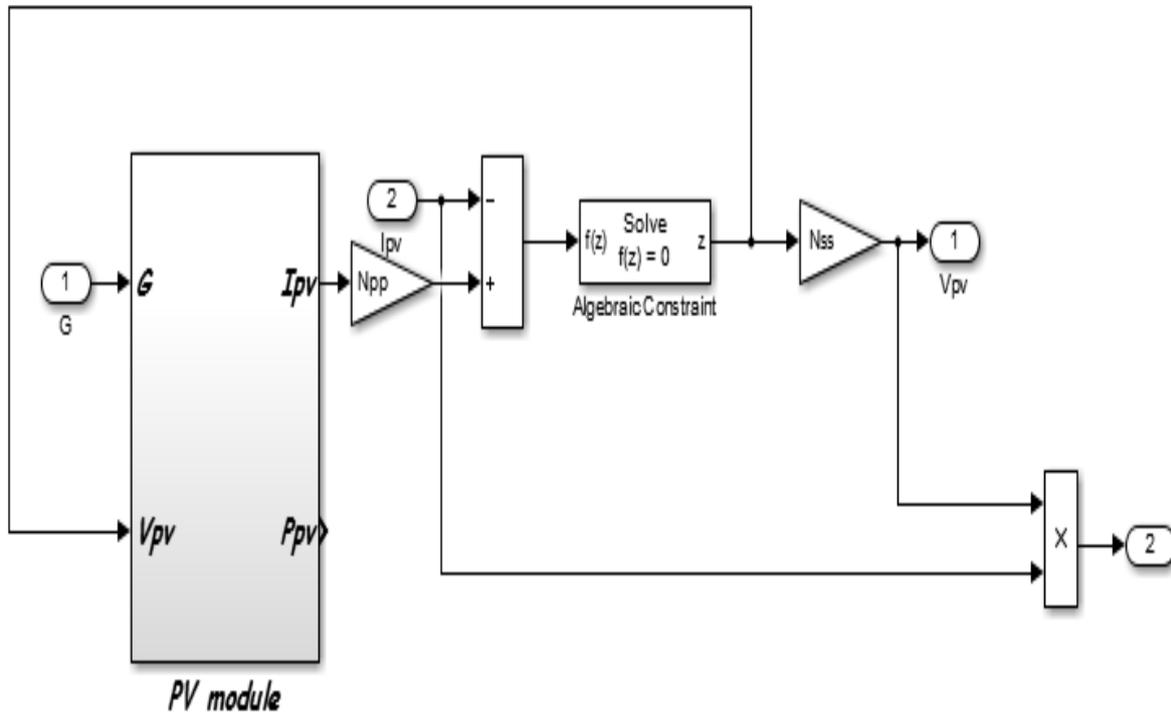


Figure 2.3 schéma block du panneau PV (PB SX 150 )

Avec:

- I: Courant fourni par la cellule (A)
- $I_{ph} = I_{sc} \times (G/1000)$  le Photo-courant dépendant de l'éclairement (G). (A)
- $I_o$ : Courant de saturation de la diode (A)
- k : Constant de «Boltzmann» ( $1,38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ )
- q : Facteur Charge d'électron  $= 1,602 \times 10^{-19} \text{ (C)}$
- n : Facteur de qualité de diode
- T: Température de cellule en kelvin (K)
- $R_s = 0.0091 \Omega$  la résistance série de la cellule
- $R_p = 9.6 \Omega$  : la résistance parallèle de la cellule
- $N_s$  : Nombre de cellule connecté en série dans notre cas 72 cellules

Figure 2.4 Schéma bloc du panneau avec  $V_{pv}$  et  $P_{pv}$ 

Où :

- $N_s$ : Nombre de module connecté en série (dans notre cas =1)
- $N_p$ : Nombre de module connecté en parallèle (dans notre cas =1)

### 2.3 Les Convertisseurs DC-DC

On appelle point de fonctionnement, le point où la puissance fournie est maximale. Notre but est de poursuivre ce point et de maintenir la puissance correspondante, en agissant sur la tension de sortie fournie à la charge.

Cette adaptation de charge s'effectue par le biais d'un convertisseur en s'assurant aussi que les pertes soient les plus faibles possibles.

### 2.3.1 Le convertisseur BOOST

C'est un convertisseur continue/continue permettant la conversion de l'énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant) de valeur plus forte. Donc, l'utilisation de ce convertisseur est alors très nécessaire pour le stockage d'énergie photovoltaïque ou pour d'alimenter une charge en continu [25].

Nous pouvons représenter ce type de convertisseur par le circuit de la figure 2.3. C'est un convertisseur direct DC-DC. Dans le quelle en trouve à l'entrée une source de type courant continu (inductance L en série avec une source de tension). La tension de sortie est continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). Comme le courant est positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage), on remplace l'interrupteur par un transistor.

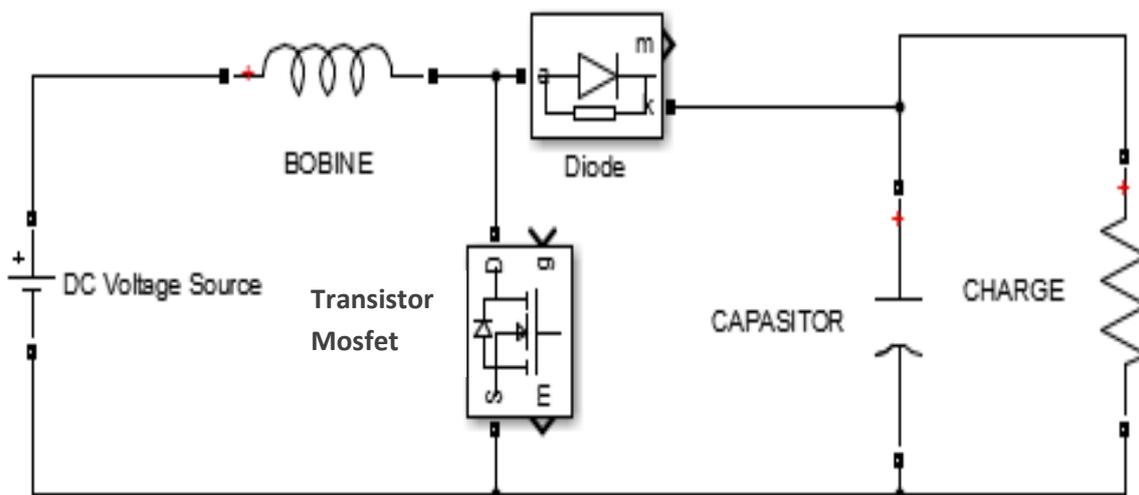


Figure 2.5 Schéma du convertisseur BOOST

#### a) Principe de fonctionnement

Le circuit est alimenté par une source de tension  $V_e$ , la sortie est chargée par une résistance  $R_c$ . L'interrupteur, dans ce cas est un transistor MOSFET, est périodiquement conducteur avec un rapport cyclique  $D$  et une fréquence  $F = 1/T$ .

On distingue deux phases de fonctionnement, selon l'état de l'interrupteur :

- Lorsque l'interrupteur est fermé (état passant), le courant de l'inductance augmente et l'énergie va être emmagasinée sous forme magnétique. La diode se bloque et l'interrupteur reste fermé pendant une durée  $D$ , représentant le rapport cyclique (fraction de la période  $T$ ).
- Lorsque l'interrupteur est ouvert (état bloqué), il se crée l'effet survolteur qui est l'addition des deux tensions séries générées par l'inductance et la source de tension et l'énergie produite, va être déchargé vers le condensateur et la charge de sortie. La figure 2.5 représente les formes d'ondes en conduction continue. La valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance s'annule dans le régime permanent.

Ce qui donne la relation suivante :

$$V_s = \frac{1}{1-D} \times V_e \quad (2.5)$$

$$V_e = V_s \times (1 - D) \quad (2.6)$$

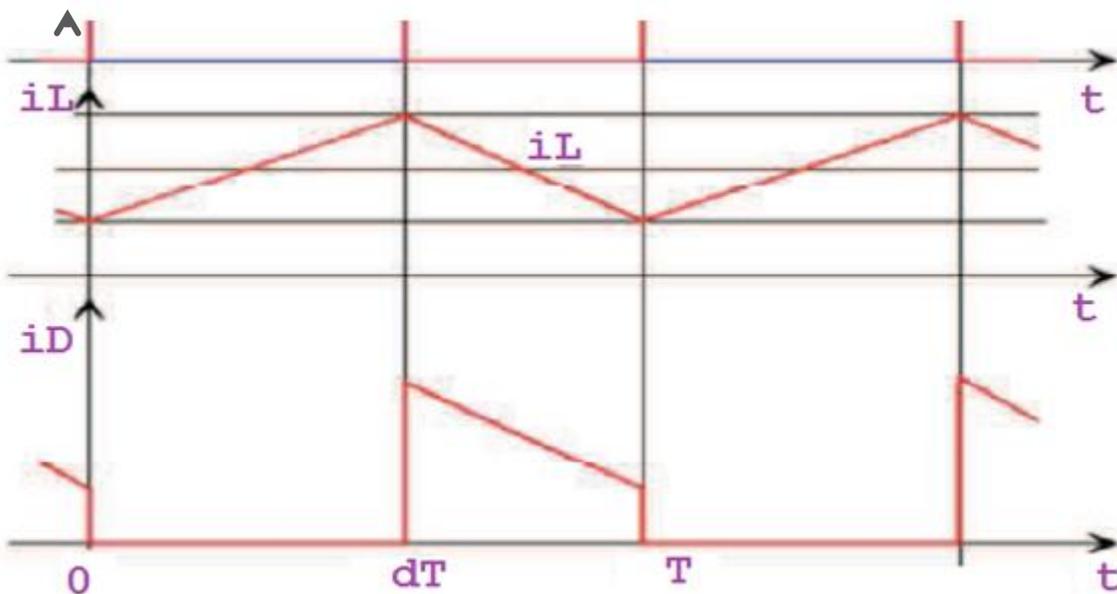


Figure 2.6 Formes d'ondes en conduction continue

### 2.3.2 Propriétés de convertisseur BOOST

Contrairement aux autres convertisseurs, le convertisseur élévateur (BOOST) est souvent utilisé dans les systèmes photovoltaïques avec le suiveur MPPT, car il fonctionne en mode de courant continu ayant autant de puissance que possible. Par conséquent, le rendement énergétique du convertisseur BOOST est aussi très important. Généralement il est employé pour avoir une tension plus élevée à la sortie [26].

### 2.3.3 Simulation du convertisseur BOOST

Le schéma bloc de la figure 2.6 est réalisé dans l'environnement MATLAB/SIMULINK afin de tester notre convertisseur BOOST.

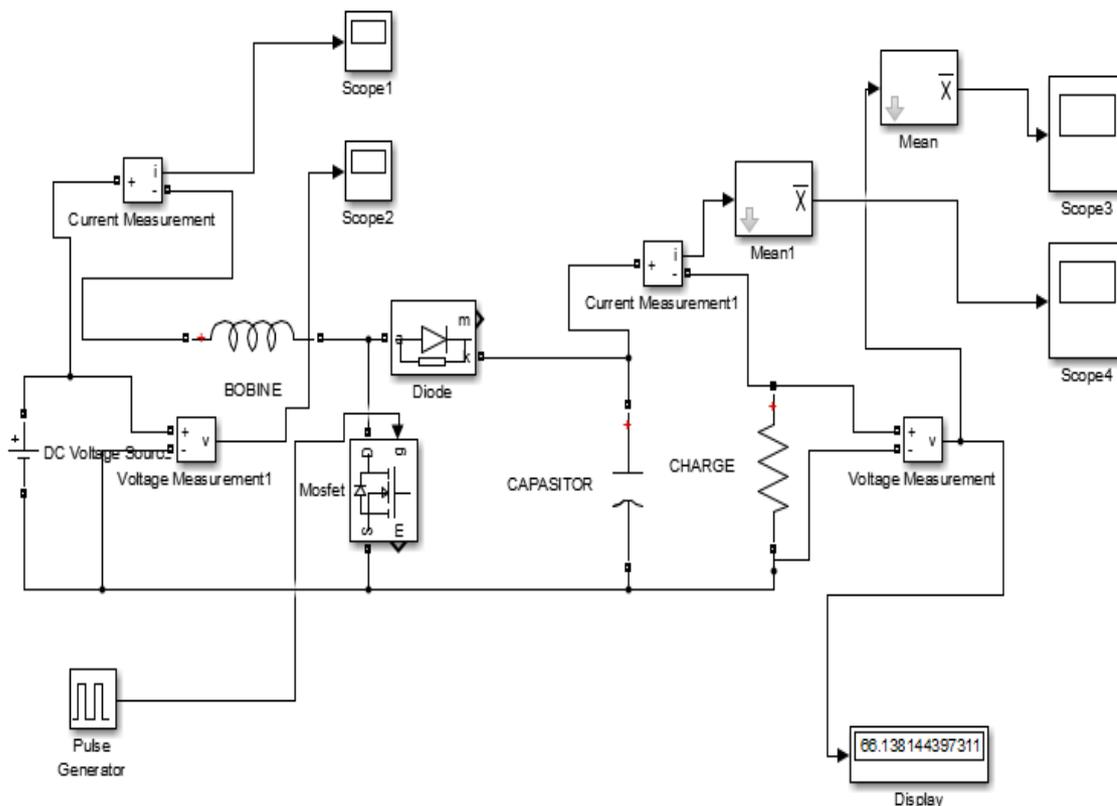


Figure 2.7 Schéma bloc du convertisseur BOOST

Les figures 2.8 à 2.11 présentent les résultats de simulation.

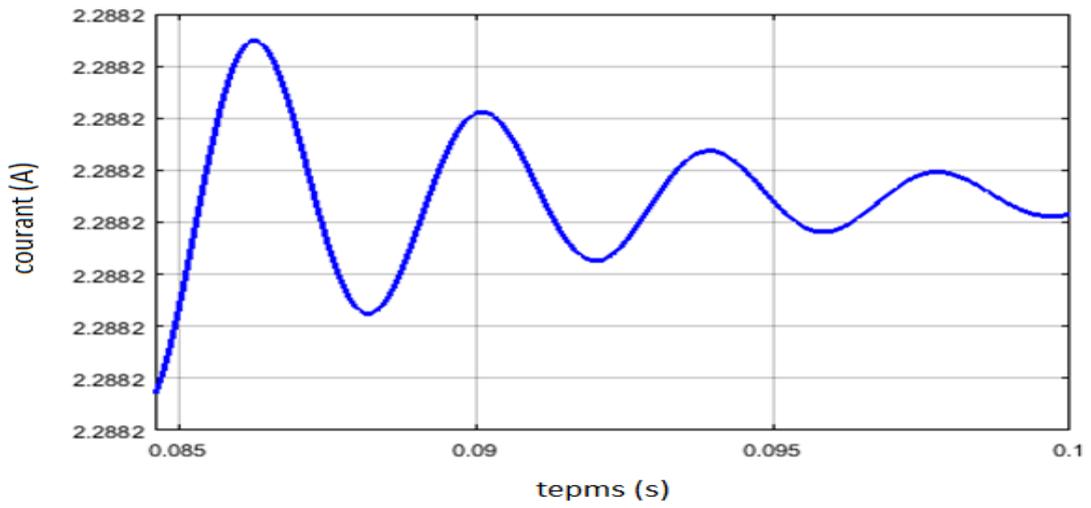


Figure 2.8 Courant délivré par la source d'entrée

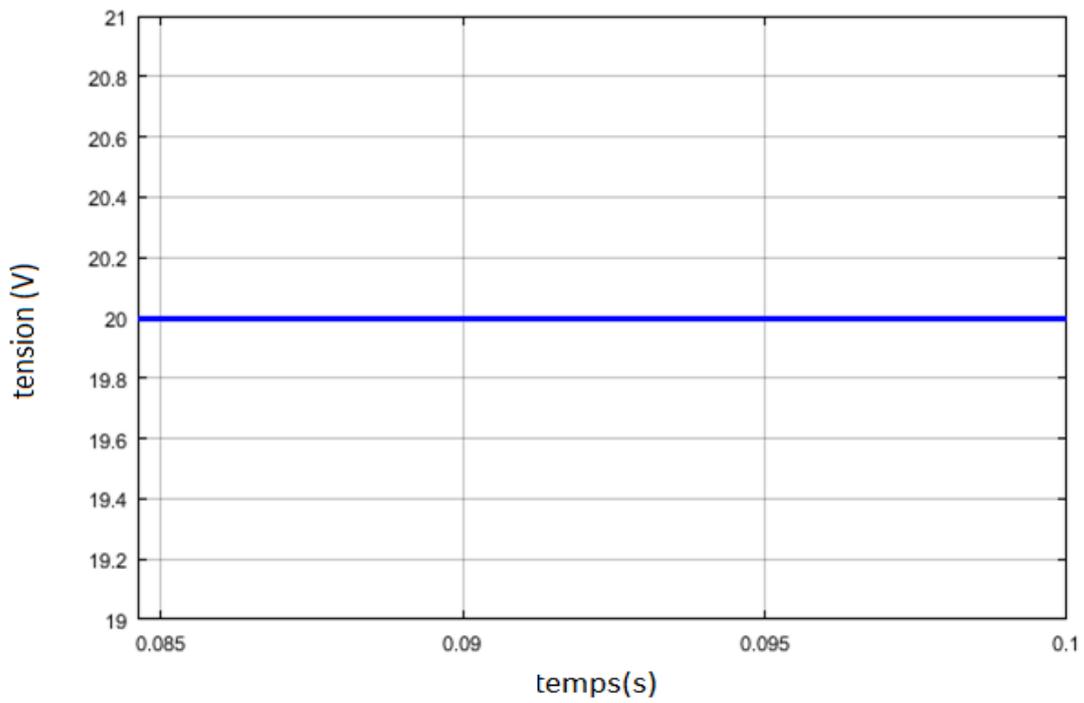


Figure 2.9 Tension aux bornes de la source l'entrée

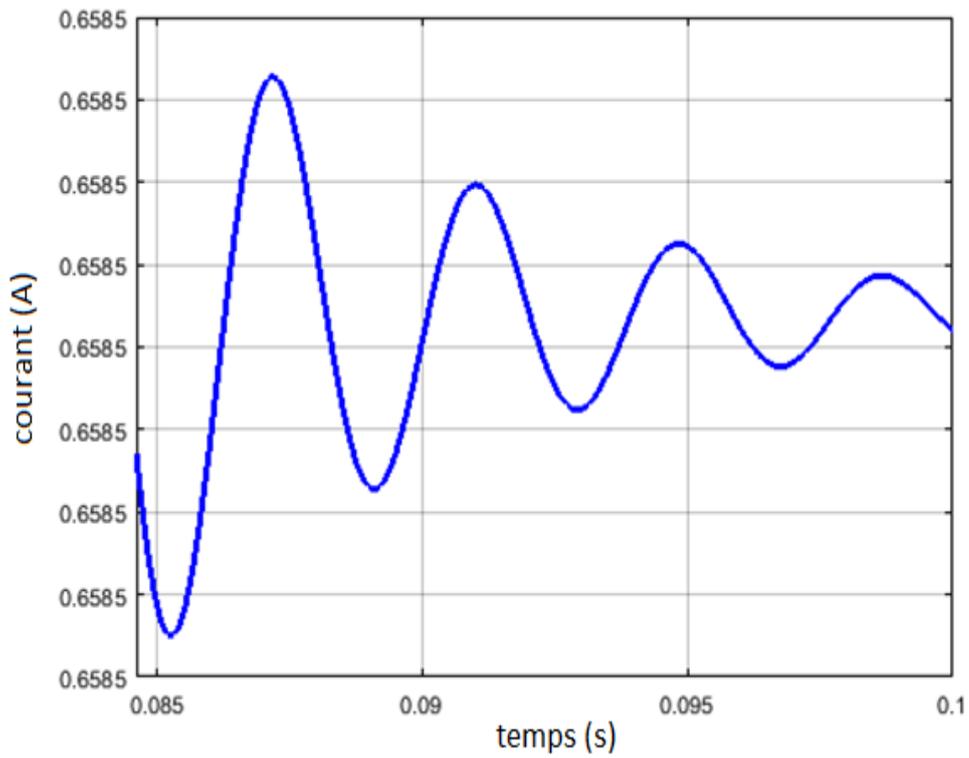


Figure 2.10 Valeur du courant traversant la charge de sortie

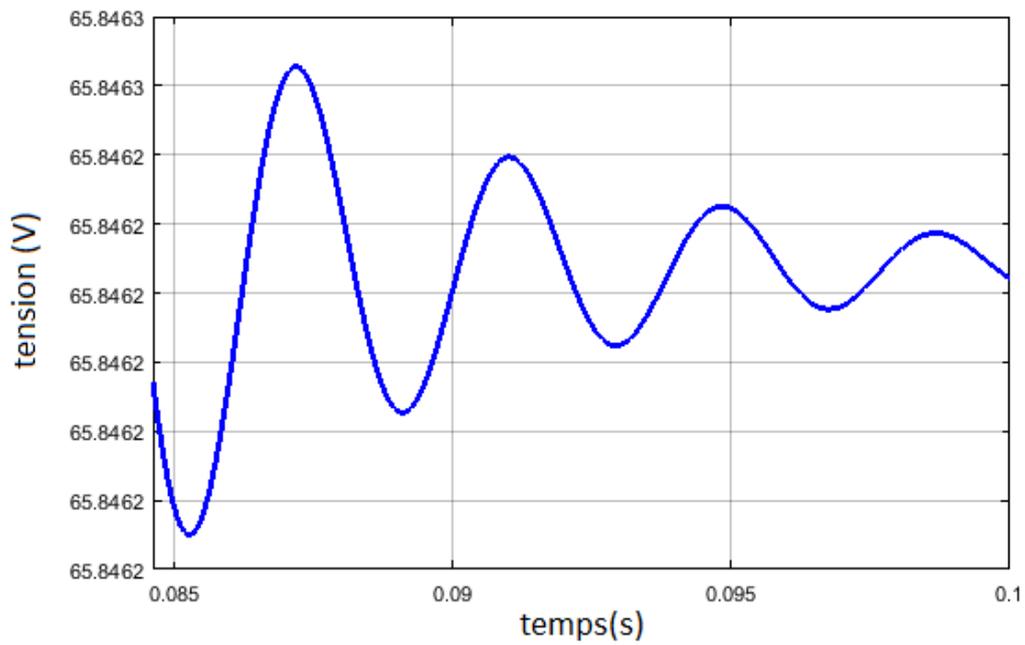


Figure 2.11 Valeur de tension aux bornes de la charge de sortie

Le tableau 2.2 représente les valeurs de la tension moyenne et du courant moyen en fonction de rapport cyclique :

Tableau 2.2 Variation de la valeur moyenne de tension &amp; courant en fonction de rapport cyclique

D	0.20	0.30	0.40	0.5
$U_{cmoy} (V)$	1.86	7.27	9.67	12.07
$I_{cmoy}(A)$	0.16	0.24	0.32	0.40

À partir de ce tableau, nous pouvons constater que la tension aux bornes de la résistance de charge augmente avec l'augmentation du rapport cyclique D, d'où le rôle de ce dernier dans la commande du système photovoltaïque.

## 2.4 Techniques MPPT à algorithmes performants

Lors de la recherche du point de la puissance maximale (MPP), les commandes MPPT utilisent la méthode « essai-erreur ». La figure 2.12 illustre le principe de cette méthode qui sert à localiser le PPM et maintenir la puissance maximale en contrôlant les variations du courant et de la tension de façon permanente et automatique. Notre système sera testé avec deux commandes MPPT qui sont basées sur le même principe de la méthode essai-erreur, mais avec deux algorithmes différents.

Le tâtonnement se fait par le calcul de la puissance pour des valeurs successives des courants et des tensions afin de poursuivre le point de fonctionnement, la commande MPPT agit sur le rapport cyclique D pour contrôler la puissance fournie par le système photovoltaïque.

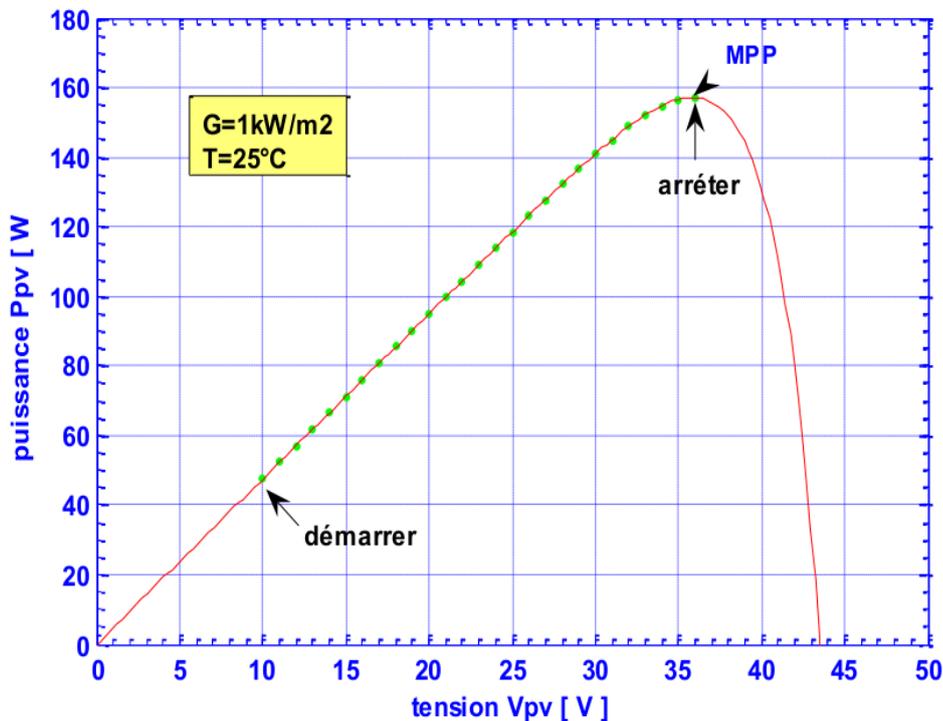


Figure 2.12 Principe de tâtonnement du contrôleur MPPT

Comme le montre la courbe, la poursuite du PPM démarre à un point  $P(1)$  imposé par la charge de sortie. Au début du test, notre commande MPPT choisit un sens initial d'ajustement qui incrémente ou décrémente par pas ( $Cte$ ). Le contrôle commence par comparer la valeur de la puissance instantanée  $P(n)$  avec la valeur qui précède  $P(n-1)$  :

- Si  $P(n) > P(n-1)$ , alors on incrémente  $D$  avec une valeur de  $(+ Cte)$ .
- Si  $P(n) < P(n-1)$ , alors on décrémente  $D$  avec une valeur de  $(-Cte)$ .

Le test s'arrête dans le deuxième cas et prend automatiquement le sens opposé d'ajustement et l'on recommence les mêmes étapes du test.

Parmi les techniques MPPT, nous avons étudié dans notre travail la méthode de perturbation et observation (P&O) et la méthode basée sur la logique floue.

### 2.4.1 Méthode de perturbation et observation (P&O)

Le point de puissance maximal d'un panneau photovoltaïque est représenté par la caractéristique  $P(V)$  dans laquelle le rapport  $(\Delta P/\Delta V)$  est nul. C'est la pente horizontale de la tangente qui passe par le point PPM. Cette condition est nécessaire pour toutes les valeurs des courants, tensions et de l'intensité d'ensoleillement [27].

Le calcul de ce rapport peut être fait à des intervalles de temps consécutifs  $(n-1)$  et  $(n)$ . La relation correspondante étant donnée par :

$$\frac{\Delta P(n)}{\Delta V(n)} = \frac{P(n)-P(n-1)}{V(n)-V(n-1)} \quad (2.7)$$

Avec

$$P(n) = V(n) \times I(n) \quad (2.8)$$

La méthode « perturbation et observation » (P&O) est une approche largement utilisée [28]. L'objectif de cette méthode est de faire osciller le rapport  $(\Delta P/\Delta V)$  autour de zéro en agissant automatiquement sur le rapport cyclique  $D$ . Si la perturbation instantanée fait augmenter ou diminuer la puissance de sortie, la perturbation juste après est appliquée en gardant ou en changeant le sens de l'ajustement correspondant. Notre suiveur ajuste la puissance en permanence [29].

L'organigramme de la figure 2.13 illustre la démarche de la méthode P&O qui sera simulé dans le troisième chapitre.

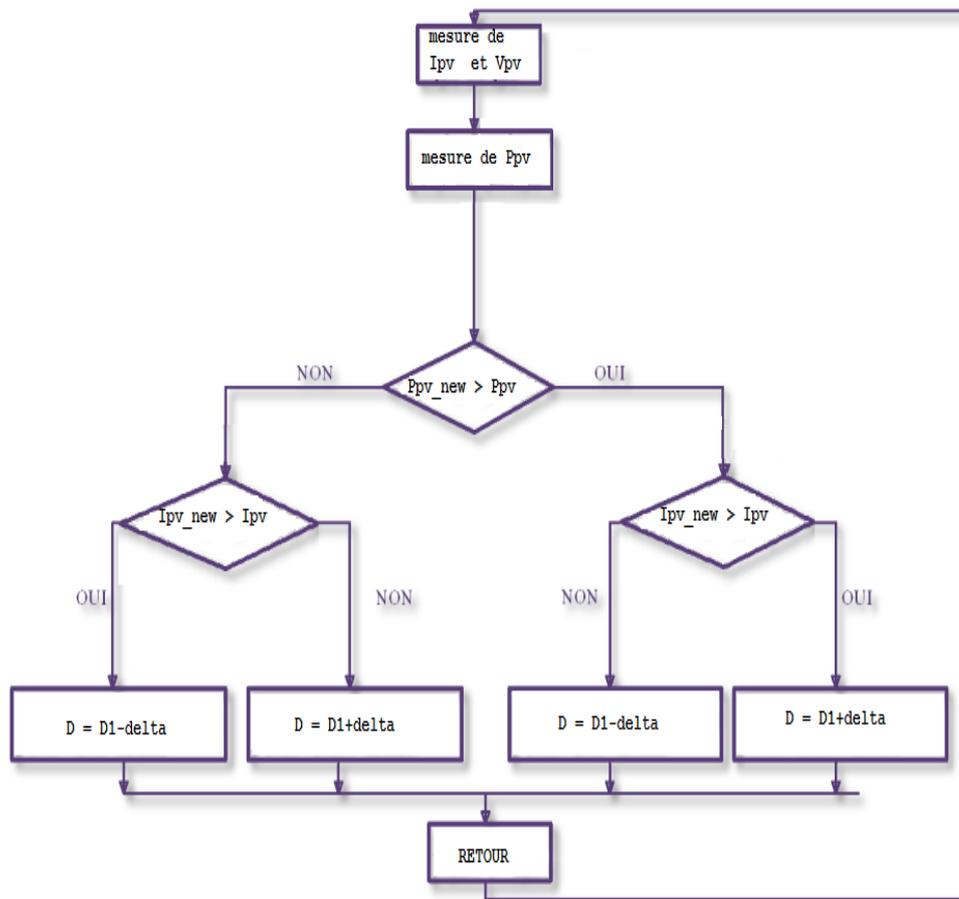


Figure 2.13 Organigramme de la méthode P&amp;O

### 2.4.2 La méthode basée sur la logique floue

Les commandes basées sur la logique floue sont en évolution permanente et largement utilisées. L'avantage de cette commande est que d'une part, elle ne nécessite pas un modèle mathématique précis et d'autre part, elle peut s'appliquer pour des entrées floues [30].

Comme indique la figure 2.14, les entrées principales de cette commande sont l'erreur  $E$  et la variation d'erreur  $\Delta E$  avec une seule sortie qui est la variation du rapport cyclique  $\Delta D$  qui commande le convertisseur, elle peut être déterminée en utilisant la table de vérité. Cette méthode est basée sur trois étapes principales qui sont :

- *Fuzzification*,
- Lecture de la table de vérité,
- *Defuzzification*

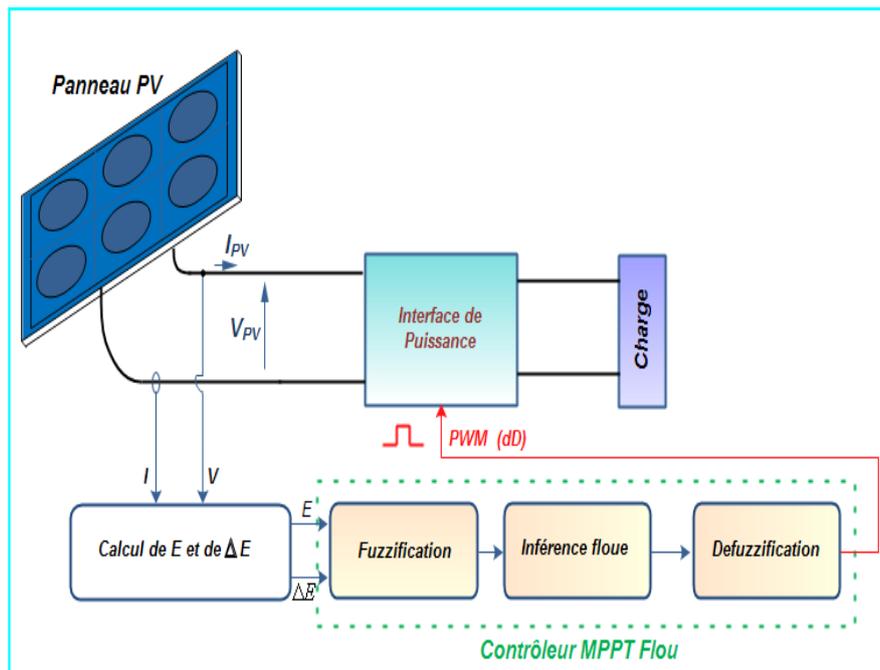


Figure 2.14 Structure de la commande par logique floue [30].

La *fuzzification* est l'étape au niveau de laquelle les variables d'entrées numériques sont converties en variables linguistiques, en utilisant les fonctions d'appartenance. Comme le montre la figure 2.15, on distingue cinq niveaux flous qui sont :

- NB : *Négative Big*.
- NS : *Négative Small*.
- ZE : *Zéro*.
- PS : *Positive Small*.
- PB: *Positive Big*.

On peut utiliser plusieurs niveaux de flou dans la même figure pour avoir plus de précision. Pour choisir les valeurs de a et b en se base sur variation des valeurs d'entrée [30]. Pour mettre en équation les deux entrées du contrôle MPPT flou, E et  $\Delta E$ , on se base sur la condition que  $(\Delta P/\Delta V)$  est proche de zéro lorsque la puissance est proche du MPP.

Nous pouvons donc définir les deux entrées suivantes :

$$E(n) = \frac{P(n)-P(n-1)}{V(n)-V(n-1)} \tag{2.3}$$

$$\Delta E(n) = E(n) - E(n - 1) \tag{2.4}$$

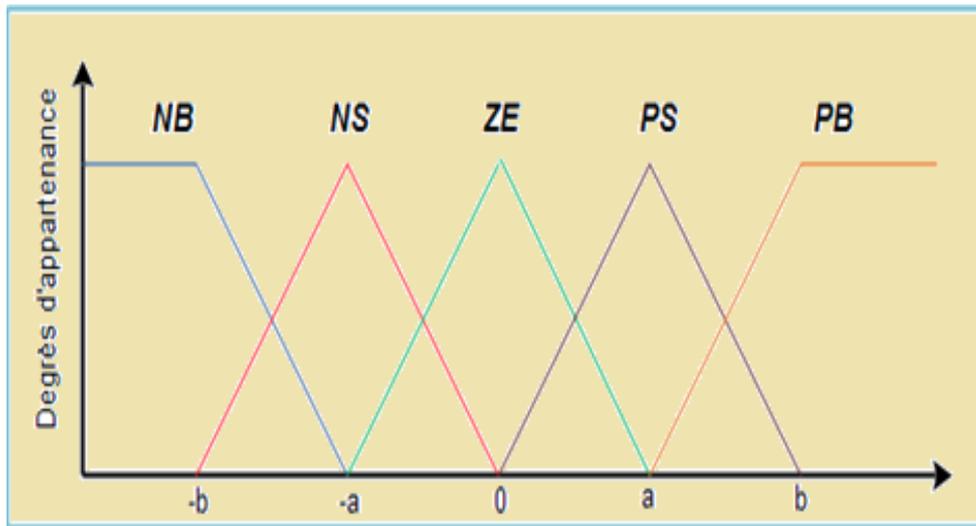


Figure 2.15 Fonctions d'appartenances pour les entrées/sorties d'un contrôleur flou [30].

La sortie de notre bloc MPPT flou est la variation du rapport cyclique  $\Delta D$ . Pour déterminer sa valeur, on utilise les deux variables d'entrée après leurs conversions en variables linguistiques et on extrait notre valeur de sortie à travers le tableau 2.2 ci-dessous [21] :

Tableau 2.2 Table de vérité de la logique floue

$\Delta E$ \ E	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE

### a) Exemple d'application sur la table de vérité

La valeur linguistique correspondante à  $\Delta D$  est l'une des vingt-cinq combinaisons probables entre les entrées  $E$  et  $\Delta E$ , comme le montre le tableau 2.2. On suppose que la valeur linguistique  $PB$  associée à l'entrée  $E$  et que la valeur  $NB$  est associée à la variation d'entrée  $\Delta E$ . Cette combinaison  $(\Delta E, E)$  qui représente  $(NB, PB)$  nous permet de tirer de la table la valeur linguistique de  $\Delta D$  qui est  $NB$ . Cela veut dire que le  $\Delta D$  doit subir une grande variation négative pour atteindre le MPP. Cette variation est relative à la différence entre le point actuel du teste est le MPP.

Après avoir déterminé la valeur linguistique  $\Delta D$ , elle est convertie en une valeur numérique, c'est la phase de la *defuzzification*. Cette phase ne s'applique qu'à la variable de sortie  $\Delta D$ , Noppadol a démontré en 2004 que l'emploi d'une commande «MPPT» basée sur le principe de la logique floue permet d'améliorer d'un facteur important le temps de réponse par rapport à une commande P&O classique [31] [32].

## 2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des techniques à algorithmes performants, en particulier les méthodes à commandes P&O et celle à base de logique floue. Nous avons expliqué le fonctionnement du convertisseur BOOST et son avantage avec une simulation dans l'environnement MATLAB/SIMULINK ainsi que l'influence du rapport cyclique sur la puissance fournie à la sortie. Nous avons présenté aussi les caractéristiques principales d'un panneau photovoltaïque avec une simulation dans MATLAB/SIMULINK.

### 3.1 : Introduction

Dans ce chapitre, notre travail consiste à simuler un système photovoltaïque (PV) fonctionnant en régime continu dans les conditions optimales indépendamment des conditions météorologiques et de la variation de la charge.

Plus particulièrement, nous prenons un système photovoltaïque qui se compose d'un générateur PV (PB SX 150), d'un convertisseur d'énergie DC-DC élévateur BOOST avec  $C=220 \mu\text{F}$ ,  $L=15\text{mH}$  et d'une charge résistive  $R_c= 100 \Omega$  adaptée par une commande MPPT. La figure ci-dessous illustre les différentes parties de notre système.

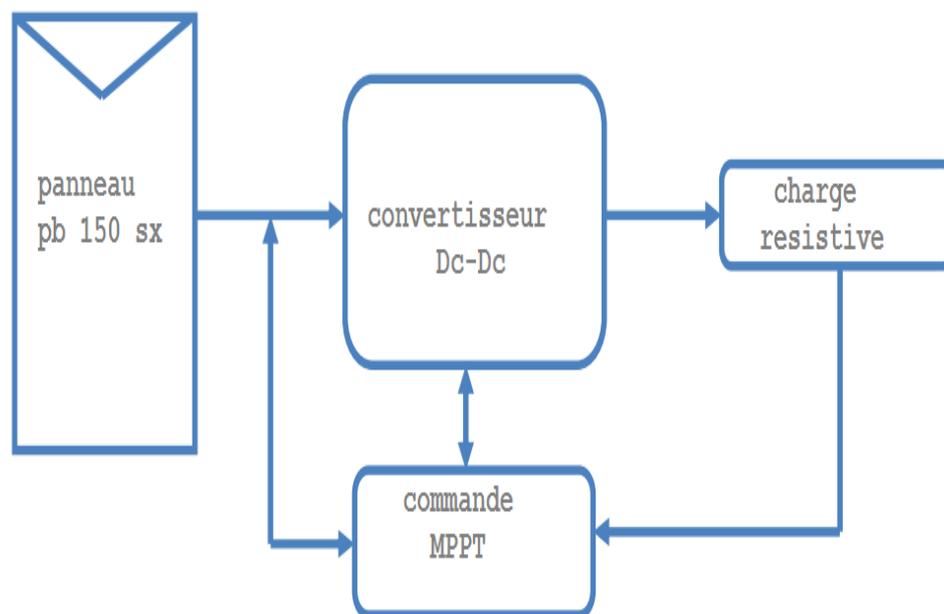


Figure 3.1 Schéma synoptique du système PV contrôlé par une commande MPPT

### 3.2 Simulation du système photovoltaïque

Pour faire cette simulation, nous avons utilisé le logiciel MATLAB/SIMULINK R2015 comme outil de simulation et de test.

### 3.2.1 Simulation sans MPPT (connexion directe)

La connexion directe du panneau solaire est présentée dans la figure 3.2. Ce mode de fonctionnement est le moins cher, car il ne possède pas la commande MPPT et son utilisation est très limitée. L'inconvénient de ce fonctionnement est que la puissance fournie par le système PV dépend de la charge de sortie. Pour observer la puissance maximale produite par le panneau photovoltaïque, nous le connectons directement à la charge de sortie  $R_c$  et nous avons prélevé les mesures représentées dans le tableau 3.1.

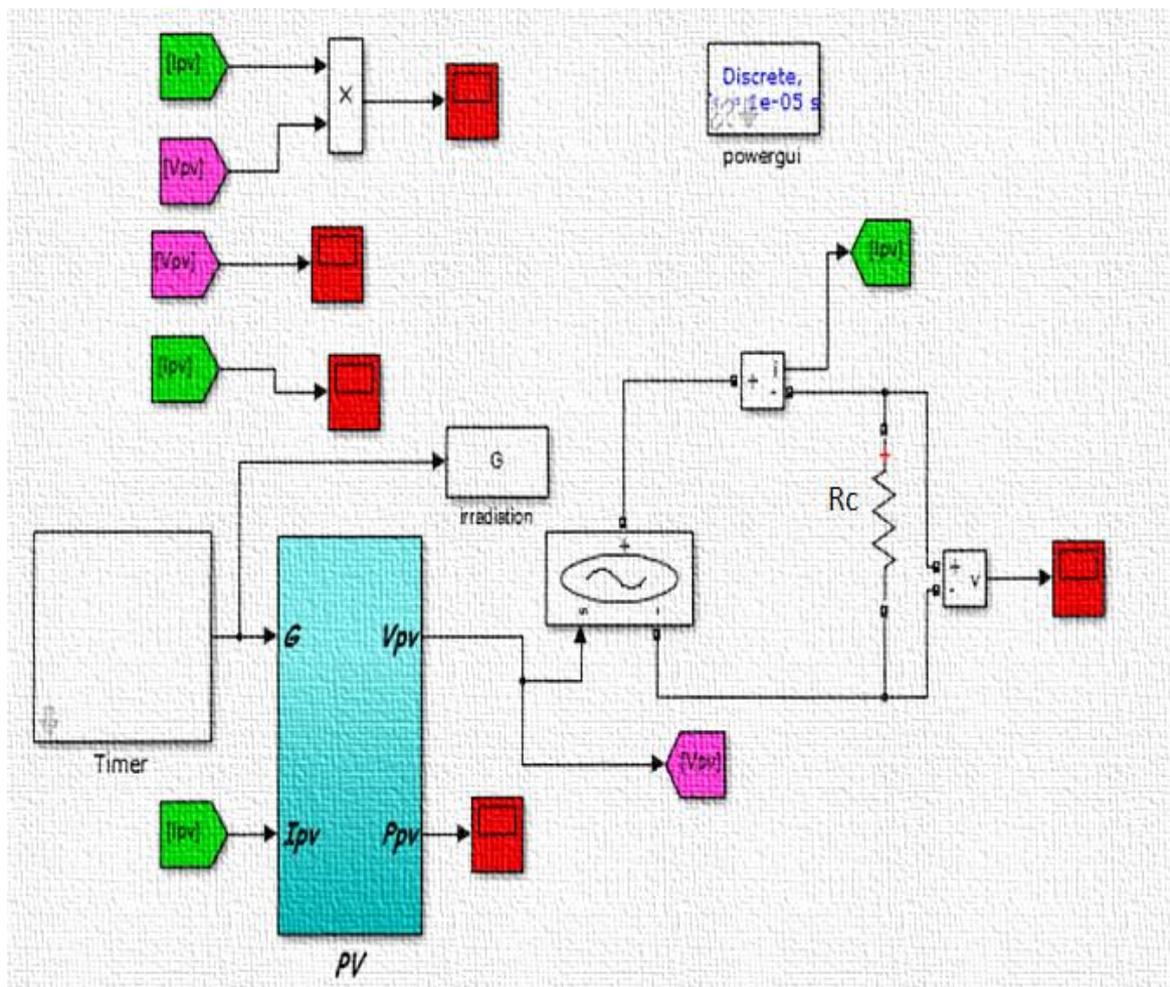


Figure 3.2 Schéma block pour la connexion directe du générateur PV

### Chapitre III Simulation des techniques MPPT de types P&O et logique floue

Tableau 3.1 Connexion directe du panneau avec la charge Rc

Résistance ( $\Omega$ )	Courant (A)	Tension (V)	Puissance (W)
100	0.43	43.5	18.8
20	2.1	41.2	84.7
8.5	4.2	35.6	149
5	4.7	23.5	110.5

À partir des résultats de ce tableau, nous constatons que :

- Lorsque la résistance Rc augmente, le courant tend vers la valeur '0', et la tension s'approche de Vco
- Lorsque la résistance Rc diminue, la puissance Ppv augmente est atteint son maximum pour Rc=8.5  $\Omega$ .
- Lorsque la résistance Rc augmente, la puissance diminue.

Comme nous avons observé dans le tableau 3.1, le courant est presque nul  $I_{pv}=0.4A$  suite à une augmentation de Rc et cela a entraîné une diminution de puissance  $P_{pv}=18.8W$ . Cette valeur est très faible par rapport à la puissance nominale du système qui vaut 150W.

La figure 3.3 présente les valeurs atteintes de la puissance, le courant et la tension du panneau lorsque le système photovoltaïque est connecté directement avec la charge c'est-à-dire sans MPPT. La puissance maximale atteint 18.8W pour un ensoleillement de  $G=1000w/m^2$  et une température de  $T=25^{\circ}C$ .

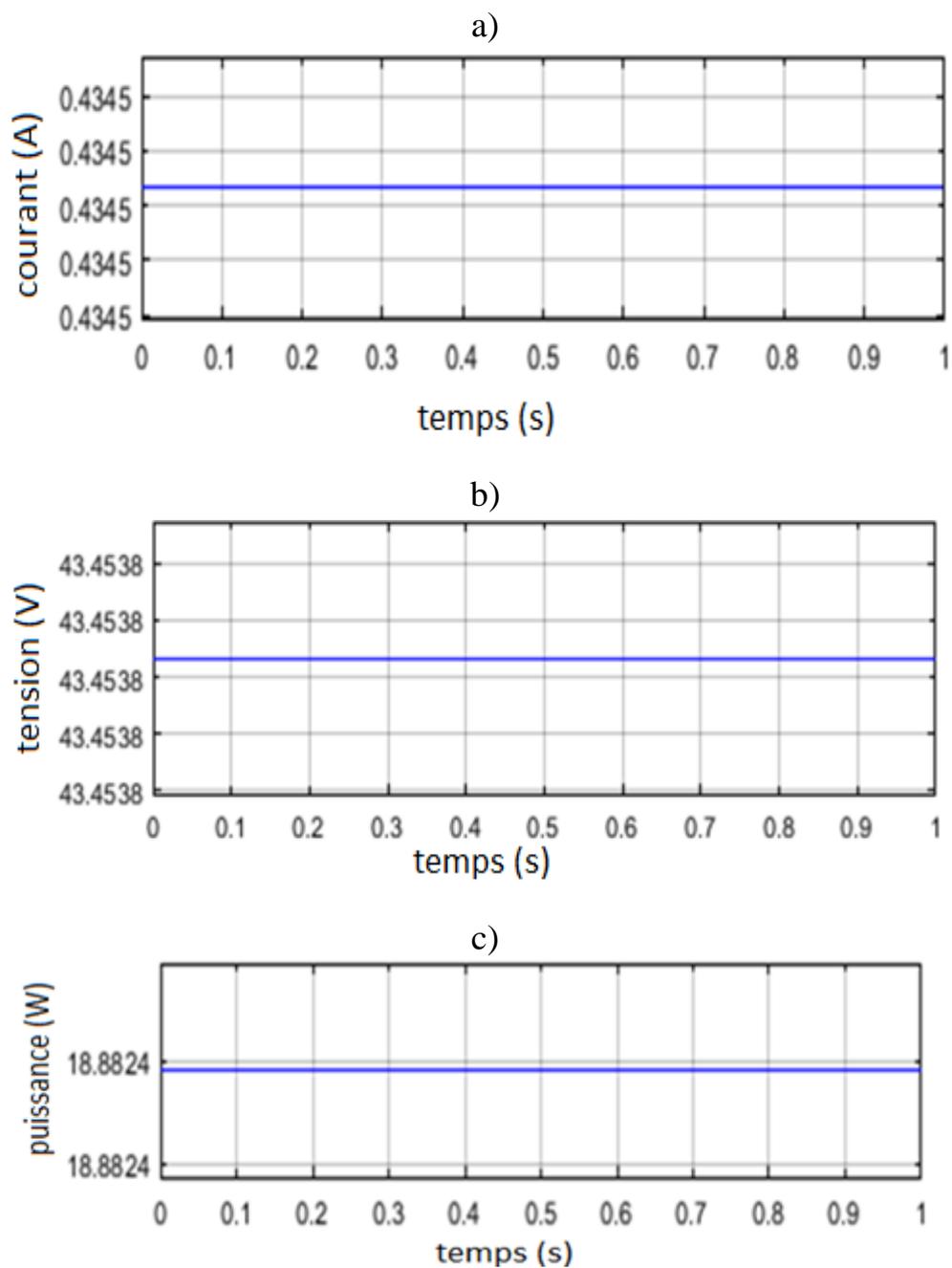


Figure 3.3 Valeurs du courant (a), de la tension (b) et de puissance (c) produites par le GPV sans MPPT

### 3.2.2 Simulation avec MPPT (P&O)

Le générateur photovoltaïque (PV) fonctionne dans les conditions optimales, il doit être doté d'un étage d'adaptation (figure 3.4) et cela pour trouver automatiquement le point de MPP du générateur PV.

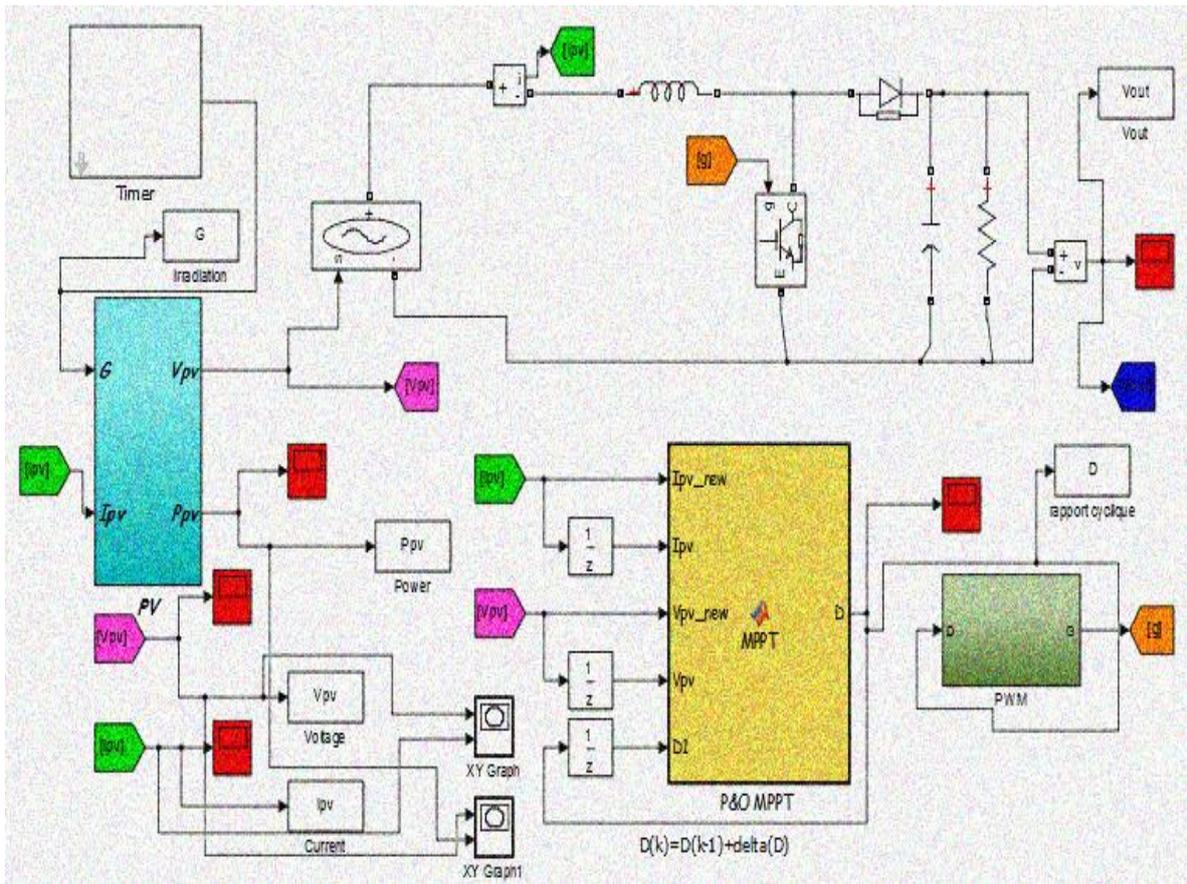


Figure 3.4 Schéma block de système PV avec MPPT (P&O)

### a) Le code MATLAB de la méthode P&O

Le code MATLAB suivant traduit l'algorithme de la figure 2.13

```
function D = MPPT( Ipv_new, Ipv, Vpv_new, Vpv, D1)
delta=0.0022;
Ppv=Ipv*Vpv;
Ppv_new=Ipv_new*Vpv_new;
if Ppv_new>Ppv
    if Ipv_new>Ipv
        D=D1+delta;
    else
        D=D1-delta;
    end
else
    if Ipv_new>Ipv
        D=D1-delta;
    else
        D=D1+delta;
    end
end
end
```

## Chapitre III Simulation des techniques MPPT de types P&O et logique floue

Pour tester la fiabilité de notre bloc MPPT (P&O) de la figure 3.4, nous avons mesuré les grandeurs (puissance, le courant et la tension) pour différentes valeurs de la résistance de charge  $R_c$  et pour un ensoleillement constant  $G=1000\text{W/m}^2$

Voir le tableau 3.2 contient les mesures obtenues pour une connexion avec commande MPPT.

Tableau 3.2 Mesures obtenus pour la connexion indirecte avec commande P&O

Résistance (Ohm)	Courant (A)	Tension (V)	Puissance (W)
100	1.2	118.2	141.8
60	1.52	94.3	141.9
30	2.2	64.5	141.9

À partir du tableau ci-dessus, nous pouvons voir que, pour différentes valeurs de  $R_c$ , la puissance fournie par le générateur PV est constante  $P_{pv}=142\text{ W}$ . Donc, le MPPT (P&O) est performant.

### b) Discussion des résultats obtenus dans les figures 3.5, 3.6 et 3.7

Pour un éclairage  $G= 1000\text{ W/m}^2$  et une température  $T=25^\circ\text{C}$ , l'analyse des résultats de la simulation du système contrôlé par la commande MPPT (P&O) permet de constater que :

- Les différentes grandeurs électriques (puissances, tensions et courants) au niveau du GPV et de la charge  $R_c$  se stabilisent autour des valeurs fixées. La commande (P&O) oscille le point de fonctionnement autour du MPP et cela après un régime transitoire de durée de 0.06s et la valeur puissance fournie par le générateur PV se stabilise à 149W et celle fournie à la charge atteint une valeur de 142W.
- À la sortie du panneau, la tension atteint 34.5V et le courant se stabilise à la valeur 4.3A. Au niveau de la charge, la tension générée est de 117V et le courant égal à 1.2A.

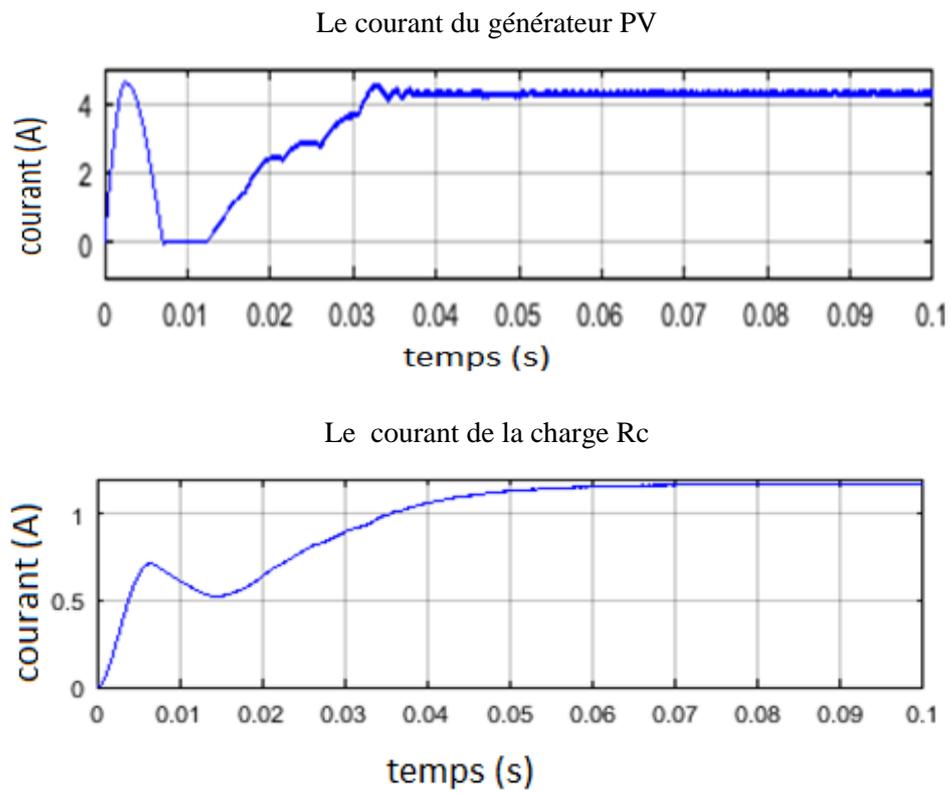


Figure 3.5 Courants de charge et de GPV

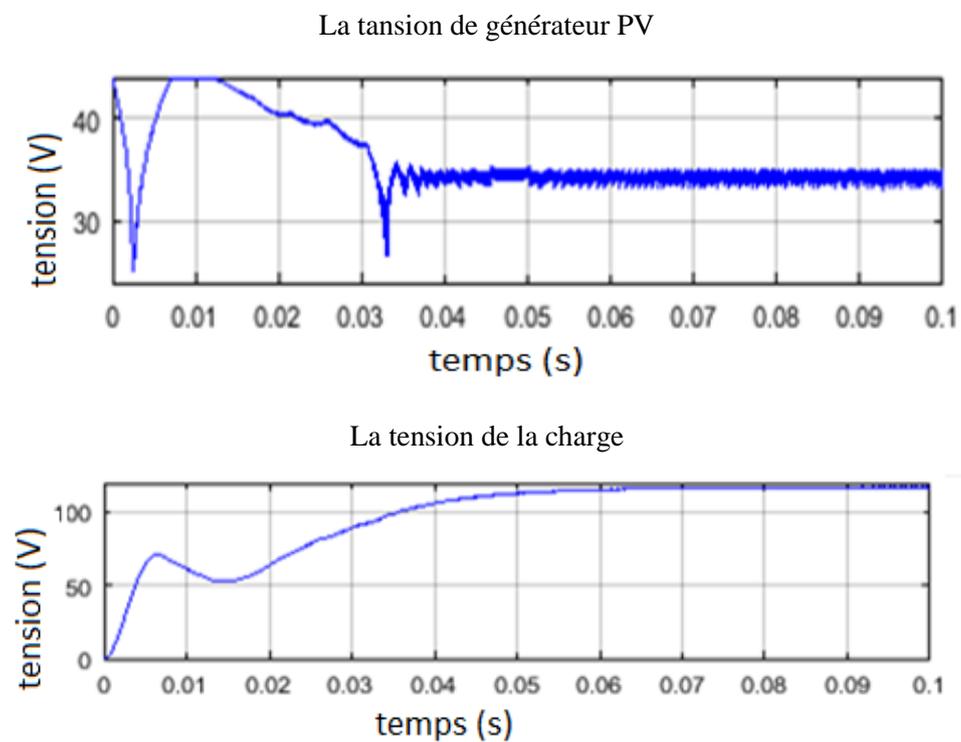


Figure 3.6 Tensions de charge et de GPV

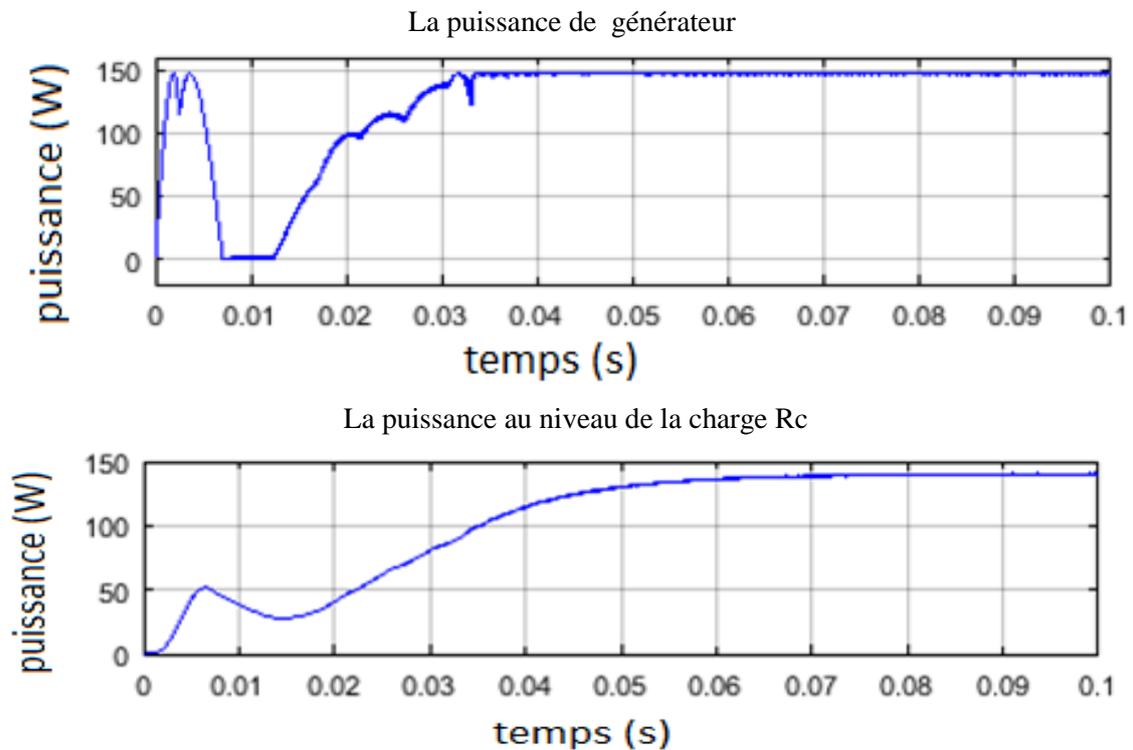


Figure 3.7 Puissances de charge et de GPV

Nous notons que la différence entre la puissance de sortie du panneau et celle fournie à la charge reste dans la limite de 6 Watts. Ces pertes causées par la commutation et par la conduction dans le transistor MOSFET et aussi dans la diode et dans les différents composants de la commande MPPT.

La figure 3.8 montrent que le système sans MPPT n'est pas performant à cause de l'absence de l'adaptation contrairement à la connexion indirecte qui a donné de meilleurs résultats.

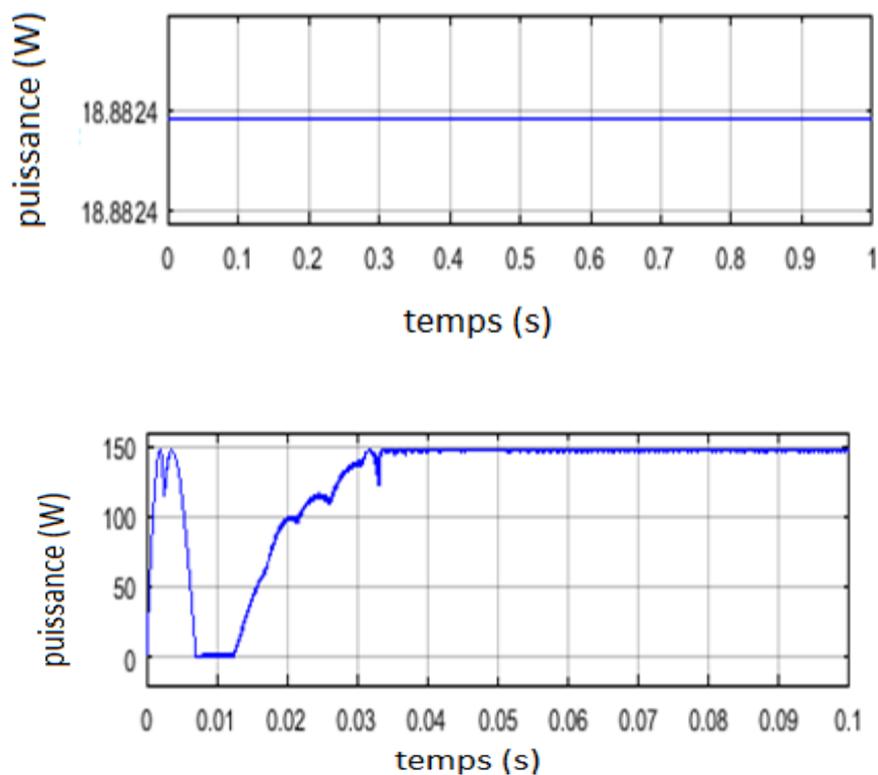


Figure 3.8 puissances de GPV avec et sans MPPT

En cas de la connexion directe sans MPPT, nous avons obtenu  $I_{pv}=0.43A$ ,  $V_{pv}=43.5V$  et  $P_{pv}=18.8W$ . Dans le cas de la connexion avec MPPT, nous avons prélevé  $I_{pv}=4.3A$ ,  $V_{pv}=34.3V$  et  $P_{pv}=149 W$ .

Pour bien montrer l'influence de l'éclairement sur la puissance fournie par le système PV, nous avons pris différents valeurs éclairagements à une température fixe  $T=25^{\circ}C$ . Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure 3.9.

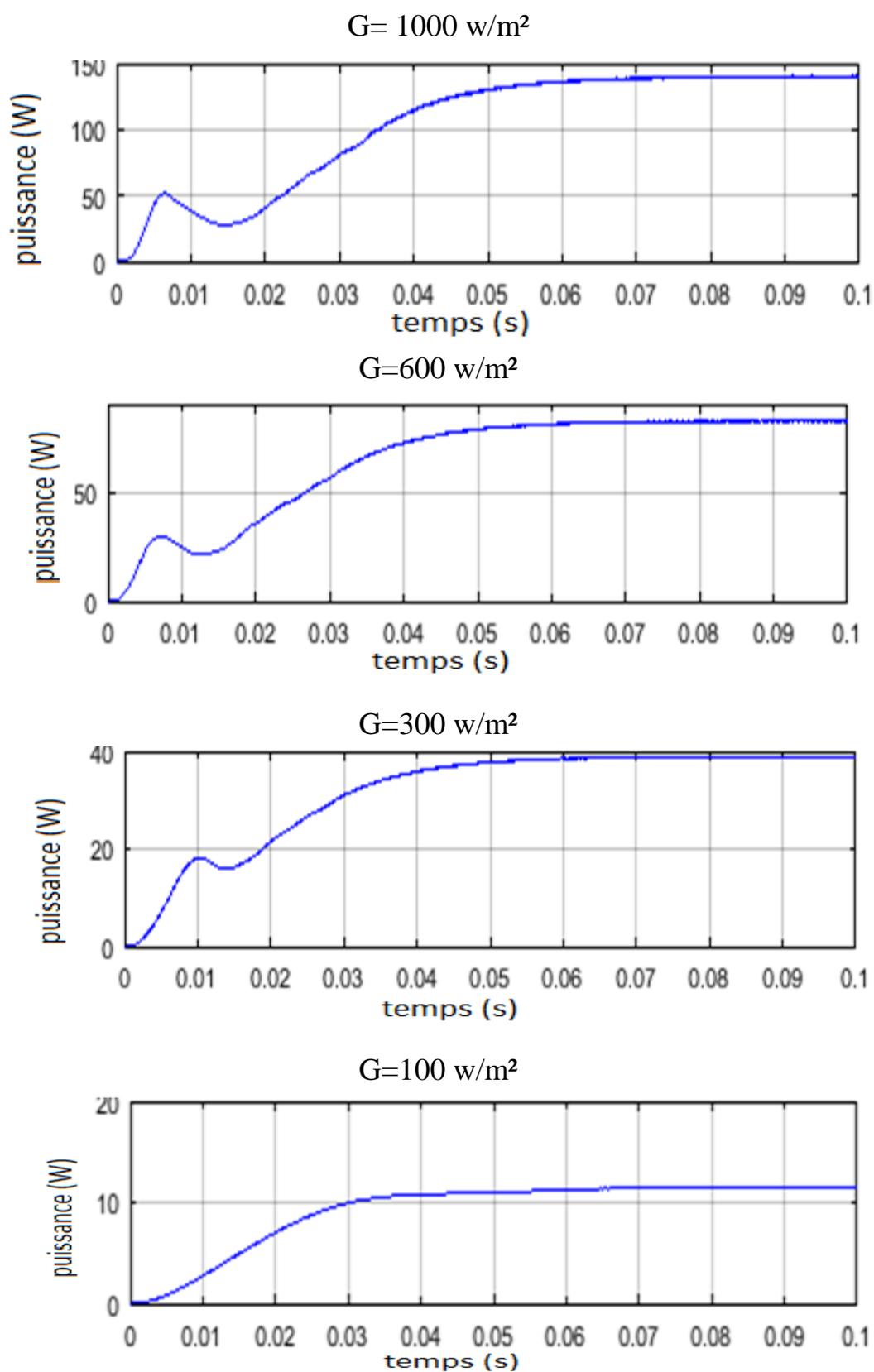


Figure 3.9 Puissance de sortie du système PV

## Chapitre III Simulation des techniques MPPT de types P&O et logique floue

À partir de ces résultats, nous pouvons dire que notre MPPT (P&O) est très performant comparativement au cas de connexion directe.

### 3.2.3 Simulation du système PV avec MPPT (logique floue)

Comme pour la méthode P&O, la logique floue est aussi applicable pour la -poursuite du point de puissance maximal. Nous voulons appliquer cette méthode pour voir quel est son avantage ou inconvénient par rapport à la commande P&O.

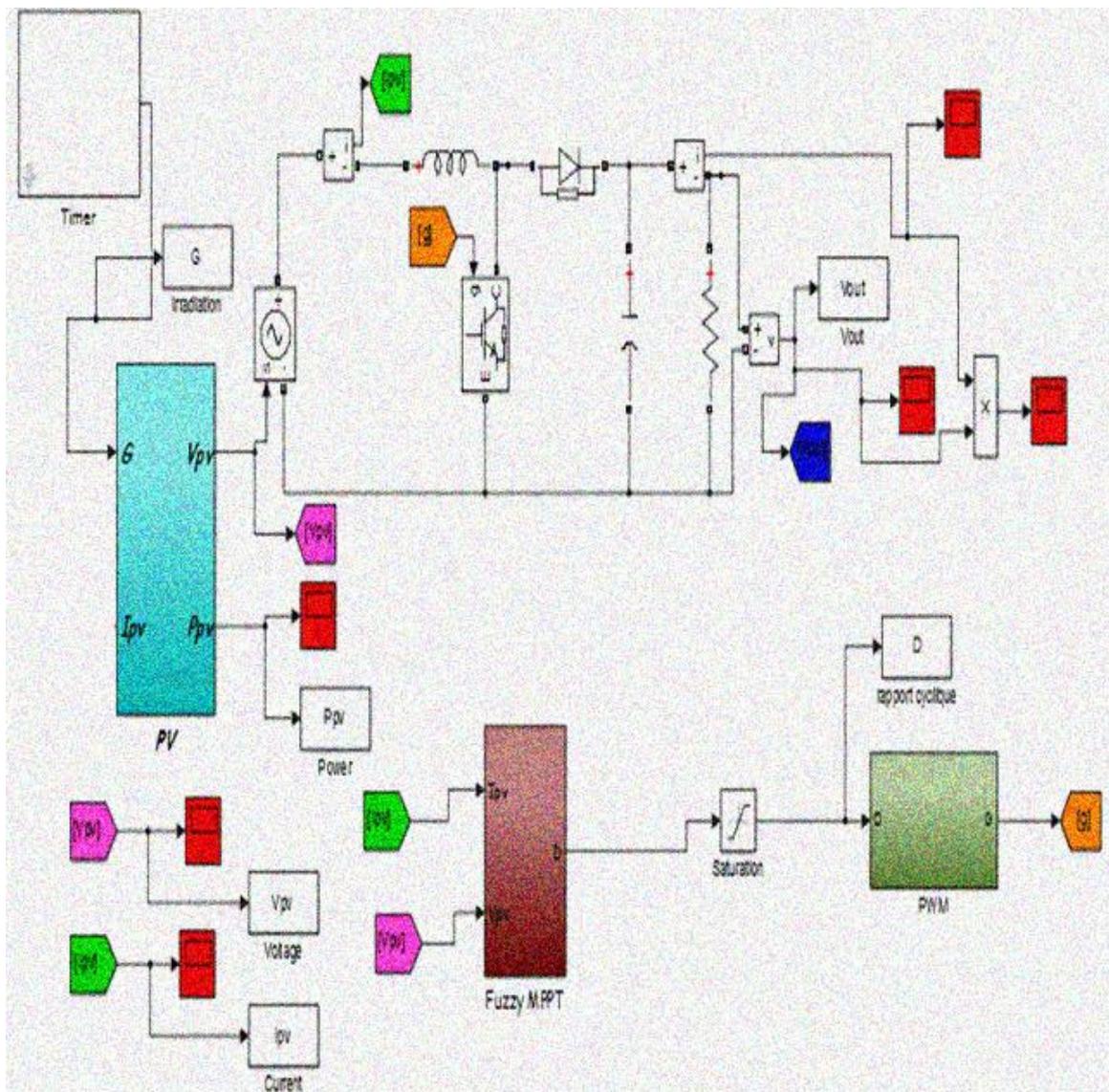


Figure 3.10 Schéma bloc de système PV avec commande logique floue

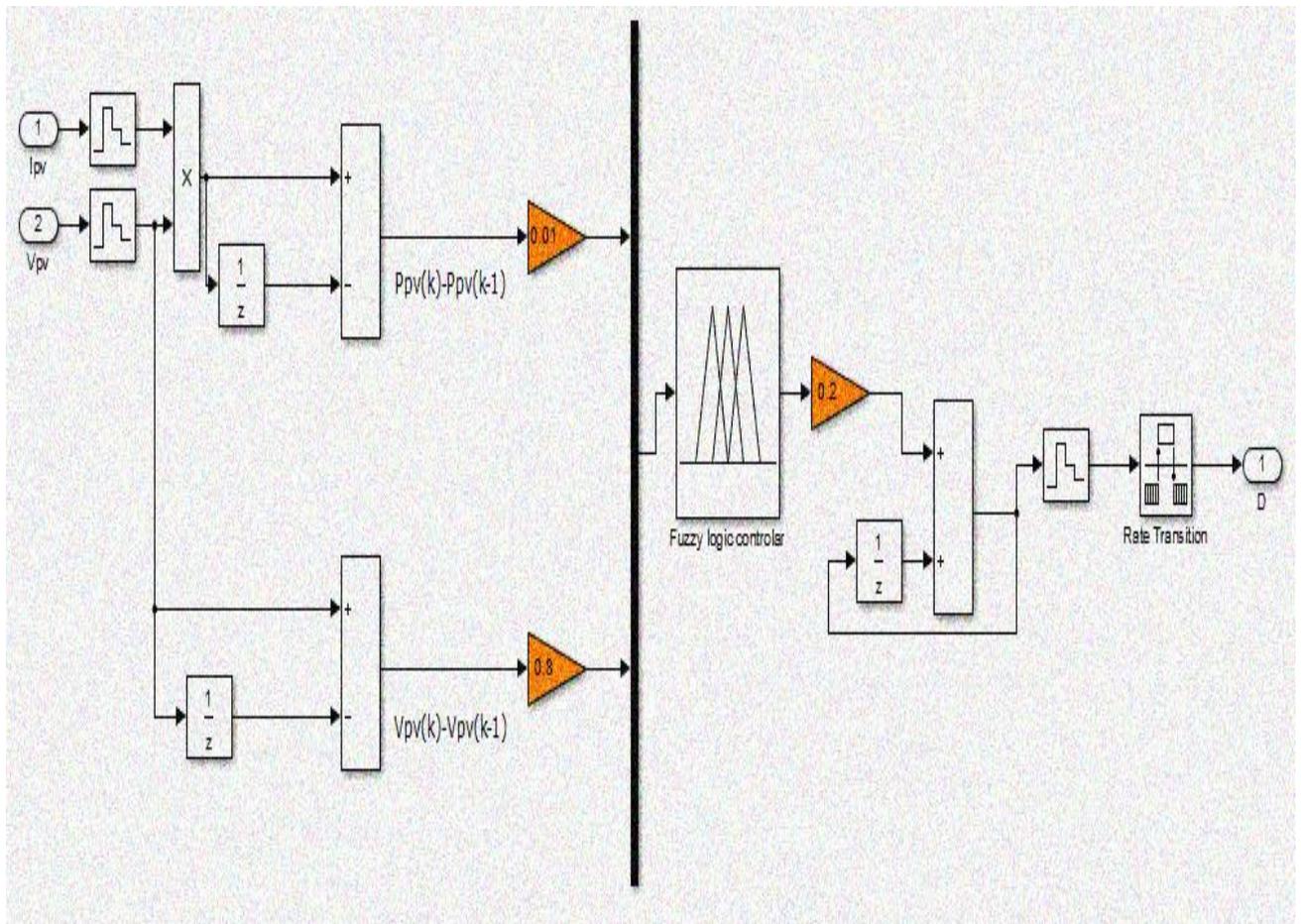


Figure 3.11 Schéma block pour la commande logique floue

### a) Résultat de simulation

À partir des résultats du tableau 3.3, nous constatons que pour différentes valeurs de la résistance  $R_c$  la puissance fournie est égale à 141W. Cette valeur est presque la plus proche possible de la puissance maximale  $P_{pv}=149w$  et cette différence de 8 watts entre la puissance  $P_{pv\_max}$  et la puissance au niveau de la charge  $R_c$ , peut être due au pas dynamique de la méthode.

## Chapitre III Simulation des techniques MPPT de types P&O et logique floue

Tableau 3.3 Connexion indirecte avec commande logique floue

Eclairement (W/m <sup>2</sup> )	1000	1000	1000	1000
Résistance (Ohm)	100	80	60	40
Courant (A)	1.2	1.3	1.5	1.9
Tension (V)	117.5	108.3	94	74
Puissance (W)	141	140.9	141	140.6

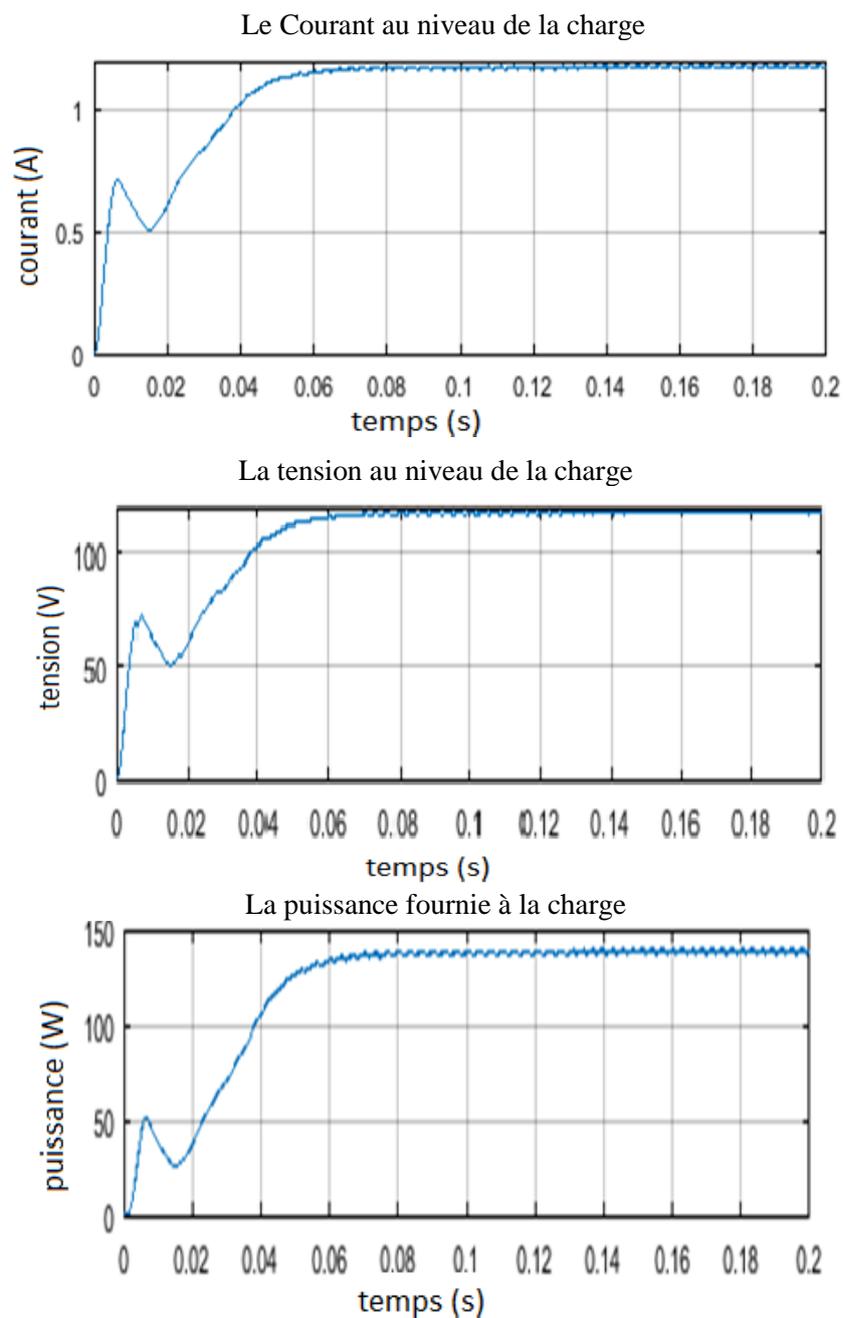


Figure 3.12 Courant, Tension et Puissance au niveau de la charge Rc

## Chapitre III Simulation des techniques MPPT de types P&O et logique floue

Les grandeurs mesurées se stabilisent à des valeurs constantes au bout de 0.06 s, la puissance atteinte est de 141w, la tension est de 117.5v et le courant parcouru dans la charge  $R_c$  est de 1.2A

### 3.3 Comparaison entre les commandes (P&O et la logique floue)

Pour faire une comparaison entre les deux commandes, nous avons pris des mesures de la puissance, de la tension et du courant au niveau du générateur photovoltaïque (GPV) et à la sortie de notre système pour les deux commandes. La figure 3.13 montre le temps de réponse permettant d'atteindre les valeurs stables des puissances.

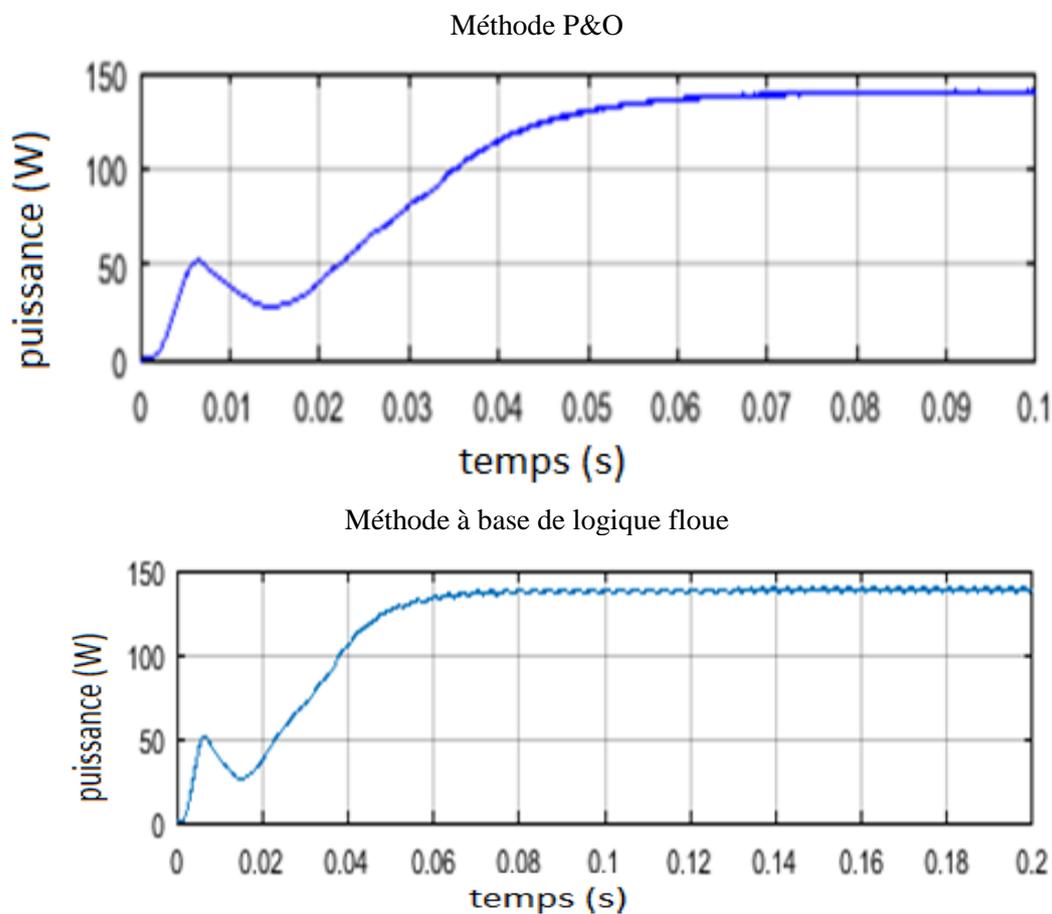


Figure 3.13 Puissance fournie a la charge pour les commandes P&O (haut) et logique floue (bas).

Les résultats sont représentés dans le tableau 3.4 suivant.

## Chapitre III Simulation des techniques MPPT de types P&O et logique floue

Tableau 3.4 Comparaison entre la commande P&O et la logique floue

Type de commande Utilisée	P&O	Logique floue
Courant de charge (A)	1.2	1.2
La tension aux bornes de la charge (V)	119	117.5
La puissance fournie a la charge (W)	143	141
Le temps réponse pour la stabilisation (s)	0.072	0.06

### 3.3.1 Discussion des résultats de la comparaison

Le courant traversant la charge est égale à 1.2 A pour les deux méthodes. Nous avons la tension aux bornes de la charge est de 119V pour le P&O et 117.5V pour la logique floue. Pour la puissance, nous avons 142W pour le cas de P&O et 141 W pour la logique floue. Enfin, les mesures des temps de réponses donnent 0.072s pour le P&O et 0.06s pour la logique floue.

Nous notons aussi que dans le cas de P&O, la différence entre la puissance fournie à la charge et la puissance maximale du panneau est d'environ 7 watts, dans le cas de logique floue la différence est 8 watts.

### 3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la simulation d'un système photovoltaïque (PV) avec et sans MPPT. Nous concluons qu'un système de conversion d'énergie, constitué par un panneau PV, un convertisseur DC-DC et un suiveur du point de puissance maximale (MPPT) conduit à un fonctionnement optimal du système. En utilisant la commande P&O, le système converge vers les conditions optimales dans une durée de 0.072s pour fournir une puissance de 6 watts. Cependant le système converge vers les conditions optimales dans une durée de 0.06s pour fournir une puissance de 8 watts. Les résultats obtenus montrent que la commande par logique floue a opéré rapidement, contrairement à la commande P&O, mais cette dernière réduit

### **Chapitre III Simulation des techniques MPPT de types P&O et logique floue**

---

les pertes en puissance. Cette méthode présente un inconvénient majeur qui se résume au fait que sa réponse est lente, en cas de variation rapide des conditions atmosphériques.

Vu le changement des conditions météorologiques qui nécessitent une rapidité lors de la recherche automatique du point de puissance maximal. Nous concluons que la commande par logique floue est plus performante en termes de temps de réponse.

[1] : R. Andoulsi «Etude d'une classe de systèmes photovoltaïques par une approche bond graph modélisation, analyse et commande», Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille 2001.

[2] : <http://phys.org/news/2006-03-probing-earth-core.html>.

[3] : J. Royer et T. Djiako et E. Schiller, B. Sada Sy. «Le pompage photovoltaïque : Manuel de cours », Université d'Ottawa, 1998.

[4] : S. Abada, «Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic», Mémoire Maître ès Sciences, Université Laval, 2011.

[5] : C. Benmoussa, S. Amara, et A. Zerga «Etude comparative des modèles de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire au silicium monocristallin», Revue des Energies Renouvelables ICRES-07 Tlemcen (2007), pp. 301– 306.

[6] : A. Labouret et M. Viloz «Energie solaire photovoltaïque», livre 4 édition, 2008.

[7] : H.L. Tsai, C.S. Tu, and Y. J. Su «Development of Generalized photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK» Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008, October 22 - 24, 2008, WCECS San Francisco, USA.

[8] : B. Flèche & D. Delagnes, « Energie solaire photovoltaïque », juin 2007.

[9] : H. Yongji, and L. Deheng, «A new method for optimal output of a solar cell array», Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Xian, China, 1992, pp. 456 -45.

[10] : M. Belhad «Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome», Mémoire de magister, Université de Béchar ,2008.

[11] : S. Petibon «Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse, 2009.

- [12] : A. Ricaud «Convertisseurs photovoltaïques», Nov. 2007.
- [13] : M. Djarallah « Contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels Couplés au réseau électrique», Thèse de Doctorat, Université de Batna, 2008.
- [14] : M .Louazene «Contribution à l'optimisation des systèmes photovoltaïques utilisés pour l'irrigation dans les zones sahariennes – Application zone de Ouargla» Thèse de Doctorat, Université El hadj lakhdar – Batna.
- [15] : H. Belghitri. «Modélisation, simulation et optimisation d'un système Hybride éolien-photovoltaïque», Mémoire de magister, Université de Tlemcen, 2010.
- [16] : E. Bernard, «énergie solaire photovoltaïque : volume1 physique et technologie de la conversion Photovoltaïque », Ellipses, 1998.
- [17] : R. Chenni, L. Zarour, E. Matagne, T. Kerbache «Optimisation d'un système de pompage photovoltaïque », Sciences & Technologie B-N°26, décembre 2007, pp. 49-54.
- [18] : D. Salim «Simulation d'un système photovoltaïque Alimentant une machine asynchrone», Mémoire de magistère, Université de Setif 2011.
- [19] : <http://www.intechopen.com/books/sustainable-energy-recent-studies/an-optimized-maximum-power-point-tracking-method-based-on-pv-surface-temperature-measurement>.
- [21] : C.Y. Won, D.H. Kim, S.C. Kim, W.S. Kim, and H.S. Kim, «A new maximum power point tracker of photovoltaic arrays using fuzzy controller», Proceedings of the 25th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Taipei, Taiwan, 1994, pp. 396–403.
- [22] : <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16697>.
- [23] : T. Esmar, P.L. Chapman, «Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques» IEEE transactions on energy conversion, vol. 22, Issue 2, 2007, pp.439-449.
- [24] : S. Abouda «Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques: application aux systèmes de pompage» Thèse du doctorat, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, 2015.
- [25] : C. Bernard, C. Sebrao, O.B. Laval, C. Vaudouer « Gestion énergétique des panneaux photovoltaïques » Université de Sfax école nationale d'ingénieurs de Sfax, 2008-2009.

[26] : H. Lequeu – [DIV435] – Fichier : IUT-EDP-9, 2004/2005.

[27] : C-C Hua, J. Lin, and C. Shen, «Implementation of a DSP controlled photovoltaic system with peak power tracking», IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 45, no. 1, 1998, pp. 99 -107.

[28] M.L. Chiang, C .C. Hua, and J. R Lin, «Direct power control for distributed PV power system», Proceedings of 2002 Power Conversion Conference, Osaka, Japan, 2002, pp. 311-315.

[29] : M. Veerachary, T. Senjyu, and K. Uezato, «Neural-network-based maximum-power-point tracking of coupled-inductor interleaved-boost converter-supplied PV system using fuzzy controller», IEEE Transactions on Industrial Electronics, 50 (4), 2003, pp. 749-758.

[30] : C. Cabal “optimisation énergétique de l’étage d’adaptation électronique dédiée à la conversion photovoltaïque ”, Thèse de doctorat de l’Université de Toulouse 2008.

[31] : M. S. Aït Cheikh, C. Larbes, G.F. Tchoketch Kebir and A. Zerguerras Maximum power point tracking using a fuzzy logic control scheme ”, Revue des Energies Renouvelables Vol. 10, (2007) 387 – 395.

## Nomenclature

---

<b><math>h</math></b> :	Constante de PLANCK	[J/s]
<b><math>C</math></b> :	La vitesse de propagation de la lumière	[m/s]
<b><math>I_{pv}</math></b> :	Le courant fourni par la cellule	[A]
<b><math>I_{sc}</math></b> :	Courant de court-circuit de la cellule	[A]
<b><math>I_d</math></b> :	Courant dans la diode	[A]
<b><math>I_0</math></b> :	Courant de saturation de la diode	[A]
<b><math>I_{mp}</math></b> :	Courant maximale de la cellule	[A]
<b><math>N_s</math></b> :	Nombre de cellules en série.	
<b><math>N_{ss}</math></b> :	Nombre de panneaux en série.	
<b><math>N_{pp}</math></b> :	Nombre de panneaux en parallèles.	
<b><math>V_{cell}</math></b> :	Tension aux bornes de la cellule	[V]
<b><math>V_{co}</math></b> :	Tension a circuit-ouvert	[V]
<b><math>V_d</math></b> :	Tension aux bornes de la diode	[V]
<b><math>V_{pm}</math></b> :	Tension maximale de la cellule	[V]
<b><math>P_{max}</math></b> :	Puissance maximale disponible	[W]
<b><math>P_{pv}</math></b> :	Puissance délivrée par le GPV	[W]
<b><math>R_S</math></b> :	Résistance série par cellule	[ $\Omega$ ]
<b><math>R_{SH}/R_P</math></b> :	Résistance shunt par cellule	[ $\Omega$ ]
<b><math>q</math></b> :	Charge d'électron	[C]
<b><math>n</math></b> :	Facteur d'idéalité de la diode.	
<b><math>k</math></b> :	Constante de Boltzmann	[J/s]
<b><math>E_g</math></b> :	L'énergie de gap	[eV]

## Nomenclature

---

<b>T<sub>réf</sub> :</b>	Température de référence	[K]
<b>T :</b>	Température	[K]
<b>G<sub>0</sub> :</b>	L'ensoleillement de référence	[W/m <sup>2</sup> ]
<b>G :</b>	L'ensoleillement	[W/m <sup>2</sup> ]
<b>α :</b>	Coefficient de température	[mA/cm <sup>2</sup> /°C]
<b>MPPT :</b>	Maximum power point tracking.	
<b>GPV :</b>	Générateur photovoltaïque.	
<b>PPM/MPP :</b>	point de fonctionnement optimal.	
<b>DC-DC :</b>	Conversion continu-continu.	
<b>P&amp;O :</b>	Perturb and Observe.	
<b>D :</b>	Rapport cyclique.	
<b>T :</b>	Période de commutation du convertisseur.	[S]
<b>I<sub>o</sub> :</b>	Courant à la sortie du convertisseur	[A]

### Conclusion générale

Actuellement, les besoins mondiaux en énergies augmentent rapidement et la consommation est de plus en plus grande. Les ressources naturelles de l'énergie tels que le pétrole, l'uranium et le gaz naturel diminuent à cause du grand développement de l'industrie ces dernières années. Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches sont orientés vers l'énergie renouvelable. Parmi les énergies renouvelables qui peuvent satisfaire la demande, on trouve l'énergie solaire photovoltaïque; c'est une énergie silencieuse, propre, disponible et gratuite. D'ailleurs, c'est ce qui explique que son utilisation connaît une croissance significative dans le monde.

Cependant, l'utilisation d'énergie solaire comme source d'énergie alternative souffre du coût élevé des cellules solaires, de faible rendement et de la puissance intermittent selon la fluctuation des conditions atmosphériques. Alors, n'importe quelle conception de système d'application d'énergie solaire, devrait prendre en compte tous ces inconvénients. Dans ce travail, il s'agit de l'implémentation de la comparaison entre deux types de commande MPPT.

Ce travail concerne plus particulièrement la problématique du couplage entre un générateur photovoltaïque et une charge de type continu. En effet, ce type de couplage souffre encore du problème du transfert de puissance du générateur photovoltaïque à la charge, qui est souvent très loin des possibilités du générateur.

Tout d'abord, nous avons étudié le système photovoltaïque et les caractéristiques des cellules photovoltaïques. Ceci s'avérer nécessaire pour acquérir une connaissance approfondie de notre système. Ainsi, nous avons établi des programmes de calculs et de simulations dans l'environnement MATLAB/SIMULINK qui permettent de tracer les caractéristiques I, V et P pour différents éclairagements et de calculer la puissance maximale délivrée par le système photovoltaïque.

Dans le deuxième chapitre, nous avons expliqué le fonctionnement des différents blocs qui constituent le système photovoltaïque. Pour mieux analyser les contraintes de l'exploitation d'un système photovoltaïque, nous avons étudié deux méthodes pour la poursuite du point de la puissance maximale «MPP».

## Conclusion générale

---

Dans le troisième chapitre, nous avons analysé dans le simulateur MATLAB/SIMULINK R2015 le fonctionnement du système photovoltaïque dont le contrôle de puissance est effectuée à travers deux types de commande MPPT (P&O et logique floue) suites aux variations des conditions météorologiques (éclairage) et de la charge.

Les résultats obtenus montrent que le point de fonctionnement du module photovoltaïque oscille instantanément autour du MPP, indépendamment des variations de l'éclairage et de la charge. Le bon fonctionnement du convertisseur DC-DC BOOST et les faibles pertes de puissances fournies par ce module nous ont permis de conclure le bon fonctionnement et les performances satisfaisantes du système photovoltaïque (PV) simulé durant ce travail.