

FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT: Génie Électrique  
FILIERE : Electrotechnique  
SPECIALITE : Commande Electrique  
N° : Cde07



كلية التكنولوجيا  
قسم : الهندسة الكهربائية  
الشعبة : كهرب وتقتي  
التخصص : تحكم كهربائي

**Mémoire pour l'obtention du diplôme  
de MASTER en Electrotechnique  
Option : Commande Electrique**

Présenté par :

YAHIAOUI SALAH EDDINE  
LAOUIDJI MOULOU

Thème

**Modélisation et contrôle optimal  
d'un système photovoltaïque**

Devant le jury composé de :

Mr. CHAKROUN Salim	Prof.	Président
Mr. LAAMARI Yahia	MCA	Rapporteur
Mr. BENDAIKHA Abdlmalik	MCA	Examineur

Année universitaire : 2021 /2022

A decorative border with intricate floral and scrollwork patterns in a reddish-brown color, framing the central text. The border is set against a light beige background.

# Dédicace

Je dédie ce modeste travail à  
la mémoire de ma grand-mère  
mes très chers parents  
mes chères sœurs  
(khwla , bouchra et zeyneb)  
ma chère tante habiba  
tous mes amis  
ceux qui m'ont soutenu pendant  
toute la durée de mes études



## *Dédicaces*

*Nous dédions ce travail à ... ma  
mère et mon père qui me  
soutiennent toujours*

*À nos frères et sœurs qui nous ont  
aidés*

*À nos amis et collègues qui ont été  
le meilleur soutien pour nous*

*Pour l'enseignant superviseur qui  
était le meilleur supporter*

*Pour tous les enseignants,  
employés et la famille  
universitaire*



# Remerciement

AvAnt tout, nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné la volonté et le courage de mener à bien ce travail. nous tenons à témoigner notre gratitude et reconnaissance à notre encadreur « Pr LAAMARI YAHIA » pour nous avoir accompagné tout le long de ce mémoire, pour la confiance qu'il nous a transmis et d'avoir mis à notre disposition tout son savoir faire et ses qualités intellectuelles, professionnelles et humaines. nos vifs remerciements vont aux membres du jury de nous avoir fait l'honneur d'évaluer notre travail et d'avoir contribué à son aboutissement. un grand merci à nos familles et à tous nos amis (es) qui nous ont soutenu, aidé et encouragé tout le long de notre parcours.

# Sommaire

---

DEDICACES	
RESUME	
SOMMAIRE	
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES SYMPOLE	
INTRODUCTION GENERALE .....	A-B
I CHAPITRE I .....	
<b>I.1 Introduction .....</b>	<b>1</b>
<b>I.2 Energies renouvelables .....</b>	<b>1</b>
I.2.1 Energie éolienne .....	1
I.2.2 Energie hydraulique .....	2
I.2.3 Energie biomasse .....	3
I.2.4 Energie géothermique .....	3
I.2.5 Energie solaire .....	5
I.2.6 Energie solaire thermique .....	5
<b>I.3 Energie solaire photovoltaïque .....</b>	<b>6</b>
I.3.1 Rayonnement solaire .....	6
I.3.2 L'effet photovoltaïque .....	7
I.3.3 Le principe de conversion photovoltaïque .....	8
<b>I.4 Module photovoltaïque .....</b>	<b>11</b>
I.4.1 Caractéristiques d'un module photovoltaïque .....	12
<b>I.5 Association des cellules photovoltaïques .....</b>	<b>13</b>
I.5.1 Association en série .....	11
I.5.2 Association en parallèle .....	14
I.5.3 Association hybride (en série et en parallèle) .....	14
I.5.4 Zones de fonctionnement du module solaire .....	15
<b>I.6 Influence de la température, l'ensoleillement et <math>R_s</math> .....</b>	<b>15</b>
I.6.1 Influence de la température sur la caractéristique photovoltaïque .....	16
I.6.2 Influence de l'éclairement sur la caractéristique photovoltaïque .....	16
I.6.3 Influence de la résistance série $R_s$ .....	17
<b>I.7 Connexion directe source-charge .....</b>	<b>17</b>
I.7.1 Définition de l'étage d'adaptation entre une source et une charge .....	19
<b>I.8 Convertisseurs DC/DC (hacheurs) .....</b>	<b>19</b>
I.8.1 Hacheur parallèle (survolteur) .....	20
I.8.2 Hacheur série (dévolteur) .....	20
<b>I.9 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque .....</b>	<b>20</b>
I.9.1 Avantages de l'énergie photovoltaïque .....	20
I.9.2 Inconvénients de l'énergie photovoltaïque .....	21
<b>I.10 Conclusion .....</b>	<b>21</b>

# Sommaire

---

<b>II</b>	<b>CHAPITRE II</b> .....	
<b>II.1</b>	<b>Introduction</b> .....	<b>22</b>
<b>II.2</b>	<b>Le générateur photovoltaïque</b> .....	<b>22</b>
<b>II.3</b>	<b>Paramètres de la cellule photovoltaïque</b> .....	<b>23</b>
<b>II.4</b>	<b>Modèle mathématique d'une cellule solaire</b> .....	<b>24</b>
<b>II.5</b>	<b>Modèle mathématique d'un panneau solaire de Ns cellules en série</b> .....	<b>25</b>
<b>II.6</b>	<b>Modèle mathématique d'un générateur photovoltaïque</b> .....	<b>27</b>
<b>II.7</b>	<b>Les Hacheurs :</b> .....	<b>28</b>
II.7.1	Hacheur série (Buck) .....	28
II.7.2	Hacheur parallèle (BOOST) .....	29
II.7.3	Modélisation du hacheur BOOST .....	30
II.7.4	Avantages du convertisseur « BOOST » .....	32
<b>II.8</b>	<b>Commande MPPT</b> .....	<b>32</b>
II.8.1	Principe de la commande MPPT .....	33
II.8.2	Différentes commandes MPPT .....	33
<b>II.9</b>	<b>Conclusion</b> .....	<b>37</b>
	<b>Chapitre III</b> .....	
<b>III.1</b>	<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>38</b>
<b>III.2</b>	<b>SYNTHÈSE DES DIFFÉRENTES TECHNIQUES DE MAXIMISATION DE LA PUISSANCE</b> .....	<b>38</b>
III.2.1	LES MÉTHODES INDIRECTES .....	39
III.2.2	LES MÉTHODES DIRECTES .....	<b>39</b>
III.2.2.1	La méthode Perturbe & Observe (P&O) .....	40
III.2.2.2	Simulation de la méthode MPPT par l'algorithme P&O : .....	<b>43</b>
III.2.2.3	L'incrément de conductance .....	<b>44</b>
III.2.2.4	Simulation de la méthode L'incrément de conductance: .....	<b>47</b>
III.2.2.5	Commande MPPT basée sur la logique floue : .....	47
III.2.2.6	Simulation de la méthode MPPT par logique floue.....	<b>51</b>
<b>III.3</b>	<b>RÉSULTATS DE SIMULATION</b> .....	<b>53</b>
<b>III.4</b>	<b>CONCLUSION</b> .....	<b>61</b>
	<b>Bibliographies</b>	

# Liste des Figure

## CHAPITRE I

Figure(I.1) Eoliennes à axe horizontal.....	1
Figure(I.2) Centrale hydroélectrique .....	2
Figure(I.3) Photo d'une source de l'énergie biomasse : les copeaux de bois .....	3
Figure(I.4) Energie géothermique .....	4
Figure(I.5) Champ photovoltaïque.....	5
Figure(I.6) Energie solaire thermique.....	6
Figure(I.7) Analyse spectrale du rayonnement solaire .....	7
Figure(I.8) Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque.....	8
Figure(I.9) Cellule photovoltaïque.....	8
Figure(I.10) Principedefonctionnement d'unecellulephotovoltaïque.....	9
Figure(I.11)Modules photovoltaïques .....	11
Figure(I.12)Module photovoltaïque.....	11
Figure(I.13)Caractéristique I (V) .....	12
Figure(I.14) Caractéristiques $P_{pv}$ ( $V_{pv}$ ) d'un panneau solaire.....	12
Figure(I.15) Caractéristique résultante d'un groupement en série de $n_s$ cellules identiques.....	13
Figure(I.16) Caractéristique d'un groupement en parallèle de $n_p$ cellules Identiques .....	13
Figure(I.17) Caractéristique d'un groupement hybride de $(n_p + n_s)$ cellules identiques .....	14
Figure(I.18) Les différentes zones de la caractéristique I (V), ( $T=25^\circ\text{C}$ , $E_s=1000\text{W}/\text{m}^2$ ).....	15
Figure(I.19) influence de la variation de la température sur la caractéristique courant –tension à éclairement constant.....	15
Figure(I.20) influence de la variation de la température sur la caractéristique puissance–tension à éclairement constant... ..	15
Figure(I.21) influence de la variation de l'éclairement sur la caractéristique puissance–tension à température constante... ..	16
Figure(I.22) influence de la variation de l'éclairement sur la caractéristique courant–tension à température constante .....	16
Figure(I.23) Caractéristique I-V d'un module photovoltaïque pour différentes valeurs de la résistance série .....	17
Figure(I.24) Caractéristique P-V d'un module photovoltaïque pour différents valeurs de la résistance série.....	17
Figure(I.25) Connexion directe GPV-Charge par le biais d'une diode .....	18
Figure(I.26) Points de fonctionnement d'un GPV en fonction de la charge en connexion directe .....	18
Figure(I.27) Etage d'adaptation jouant le rôle d'interface de puissance entre un GPV et une charge pour le transfert de $P_{MAX}$ du GPV.....	19
Figure(I.28) Schéma d'un hacheur parallèle .....	19
Figure(I.29).Schéma d'un hacheur série .....	20

## CHAPITRE II

Figure(II.1) Groupement de panneaux solaires photovoltaïques a) Série b) Parallèle c) Série/Parallèle .....	22
Figure(II.2) les différentes zones de la caractéristique I(V)... ..	23
Figure(II.3)Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire PV .....	26
Figure(II.4) Circuit équivalent d'une cellule solaire.....	25
Figure(II.5) Groupement de $N_s$ cellules en série .....	27
Figure(II.6) Matrice solaire formée de plusieurs groupes de colonnes.....	27
Figure(II.7) Convertisseur DC-DC Deux .....	28
Figure(II.8) schéma d'un convertisseur Buck.....	28
Figure(II.9) schéma équivalent lorsque $K1$ est fermé.....	29
Figure(II.10) schéma équivalent lorsque $K1$ est ouvert .....	29
Figure(II.11) forme d'onde typique du convertisseur Buck.....	29
Figure(II.12) schéma d'un convertisseur BOOST.....	29
Figure(II.13) schéma équivalent lorsque $S=1$ .....	29
Figure(II.14) schéma équivalent lorsque $S=0$ .....	30
Figure(II.15) Organigramme de l'algorithme MPPT (P&O).....	34

# Liste des Figure

---

<i>Figure(II.16) Organigramme de l'algorithme MPPT (INC-CONDUCTANCE).....</i>	<i>35</i>
<i>Figure(II.17) Organigramme de l'algorithme MPPT (commande en circuit ouvert).....</i>	<i>36</i>
<i>Figure(II.18) Organigramme de l'algorithme MPPT (commande en court circuit).....</i>	<i>37</i>
<b>CHAPITRE III</b>	
<i>Figure (III.1) : Recherche du PPM par la méthode (P&amp;O).....</i>	<i>40</i>
<i>Figure (III.2):Algorithme de la méthode P&amp;O.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure (III.3) : Divergence de la commande P&amp;O lors de variations d'irradiation.....</i>	<i>42</i>
<i>Figure (III.4): DC-DC Boost Converter.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure(III.5) pv array.....</i>	<i>44</i>
<i>Figure(III.6): Principe de fonctionnement de l'algorithme INC.....</i>	<i>45</i>
<i>Figure(III.7): Algorithme de l'incrément de conductance.....</i>	<i>46</i>
<i>figure (III.8): Bloc simulink de suivi du point de puissance maximale par méthode de conductance incrémentale.....</i>	<i>47</i>
<i>Figure (III.9) Configuration globale du contrôleur à logique floue sous Matlab/Simulink.....</i>	<i>48</i>
<i>Figure (III.10) Schéma synoptique général d'un contrôleur flou.....</i>	<i>49</i>
<i>Figure (III.11) Fonctions d'appartenance pour les variables d'entrée et de sortie du contrôleur flou : <math>E=Vn</math>, <math>\Delta E=Pn</math> et <math>D</math>...</i>	<i>51</i>
<i>Figure(III.12) Surface caractéristique du régulateur flou.....</i>	<i>51</i>
<i>Figure (III.13) : Modèle Simulink d'un générateur PV relié à une charge à travers un convertisseur DC-DC Boost contrôlé par MPPT à logique floue.....</i>	<i>52</i>
<i>Figure (III.15) Résultats de simulation de la commande MPPT_P&amp;O.....</i>	<i>53</i>
<i>Figure (III.16) Résultats de simulation de la commande MPPT_INC.....</i>	<i>54</i>
<i>Figure (III.17), Résultats de simulation de la commande MPPT_Fuzzy.....</i>	<i>55</i>
<i>Figure (III.18) Résultats de simulation de la commande MPPT_P&amp;O.....</i>	<i>56</i>
<i>Figure (III.19) Résultats de simulation de la commande MPPT_INC.....</i>	<i>57</i>
<i>Figure (III.20) Résultats de simulation de la commande MPPT_Fuzzy.....</i>	<i>58</i>
<i>Figure ( III.21 ) Tension à la sortie du hacheur et rapport cyclique.....</i>	<i>59</i>
<i>Figure (III.22) Résultats de simulation de la commande MPPT_P&amp;O.....</i>	<i>59</i>
<i>Figure (III.23) Résultats de simulation de la commande INC_MPPT.....</i>	<i>60</i>
<i>Figure (III.24) Résultats de simulation de la commande MPPT_Fuzzy.....</i>	<i>61</i>

## Liste des symboles

---

<b>PV</b>	Photovoltaïque
<b>MPP</b>	Point de puissance maximale
<b>MPPT</b>	Maximum power point tracking
<b>h</b>	Constante de Plank
<b>V<sub>oc</sub></b>	Tension de circuit
<b>I<sub>cc</sub></b>	Courant de court circuit
<b>AC</b>	Courant alternatif
<b>P<sub>m</sub></b>	Puissance maximale
<b>V<sub>m</sub></b>	Tension maximale
<b>FF</b>	Facteur de forme
<b>η</b>	Rendement
<b>G</b>	Irradiation
<b>I<sub>L</sub></b>	Courant d'obscurité
<b>R<sub>s</sub></b>	Résistance interne de la cellule
<b>R<sub>p</sub></b>	Résistance shunt
<b>I<sub>cell</sub></b>	Courant de sortie de la cellule PV
<b>V<sub>cell</sub></b>	Courant de sortie de la cellule PV
<b>K</b>	Constante de Boltzman
<b>n</b>	Facteur d'idéalité de la diode
<b>N<sub>s</sub></b>	Nombre de cellules en série
<b>N<sub>p</sub></b>	Nombre de cellules en parallèle
<b>ũ</b>	Variable floue de sortie
<b>V<sub>smax</sub></b>	Valeur maximale de la tension de référence
<b>I<sub>o</sub></b>	Courant de saturation de la diode
<b>V<sub>t</sub></b>	Tension thermique

## Liste des symboles

---

<b>T</b>	Température instantannée
<b>T<sub>std</sub></b>	Température condition standard du module PV
<b>G<sub>std</sub></b>	Condition standard d'irradiation
<b>N<sub>ss</sub></b>	Nombre de panneaux en série
<b>N<sub>pp</sub></b>	Nombre de panneaux en parallèle
<b>K<sub>1</sub></b>	Coefficient de température du courant de court circuit
<b>K<sub>v</sub></b>	Coefficient de température de la tension à circuit ouvert
<b>D</b>	Rapport cyclique
<b>P&amp;O</b>	Perturbation et Observation
<b>V<sub>PV</sub></b>	Tension de sortie du GPV
<b>P<sub>PV</sub></b>	Puissance de sortie du GPV



***INTRODUCTION  
GENERALE***

# Introduction générale

---

## Introduction générale

Aujourd'hui, l'électricité est la forme d'énergie la plus aisée à exploiter. Mais avant de la consommer il fallait la produire, généralement dans des unités de production de grande puissance, la transporter, puis la distribuer aux consommateurs. Un recours systématique aux carburants fossiles, tels que le pétrole, le charbon et le gaz naturel, permet d'avoir des coûts de production faibles mais conduit à un dégagement important de gaz polluant. Or, la production de l'électricité à partir de combustibles fossiles est à l'origine de 40 % des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> [Web\_EDF]. En outre, le coût de production du combustible est prépondérant ce qui produit, compte tenu du caractère sensible de ces matières premières, des oscillations continues et une instabilité à long terme.

Quant aux combustibles nucléaires, qui ne rejettent directement pas de gaz carbonique, ils souffrent généralement d'une mauvaise image médiatique. En effet, les conséquences d'un accident, même très peu probable, seraient désastreuses et le traitement des déchets, issus de ce mode de production, est très coûteux. De plus, l'accès à cette ressource aux pays en voie de développement nécessite des investissements lourds et un niveau de technicité qu'ils sont souvent loin d'avoir. Enfin, contrairement à une idée fréquemment répandue, les réserves d'uranium sont, comme celles de pétrole, limitées (moins de 100 ans au rythme actuel de la consommation) [Gergaud2002].

Pour pallier aux difficultés précédentes, le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. En effet, les énergies renouvelables constituent une très bonne alternative aux énergies fossiles, elle permet la production d'électricité décentralisée et offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement.

Parmi les sources d'énergies renouvelables disponibles dans notre environnement et permettant de produire de l'électricité on cite : l'eau, le soleil et le vent. Le rayonnement solaire représente une ressource renouvelable d'énergie énorme, de loin la plus importante. Toutefois, la production d'électricité par générateur photovoltaïque (GPV) est liée à l'intensité, à la durée de l'ensoleillement et à l'orientation du panneau par rapport au soleil. Cependant, le caractère aléatoire de cette source nous impose d'établir des règles de dimensionnement et d'utilisation de ce système pour l'exploiter au mieux. Alors, c'est dans ce

## Introduction générale

---

contexte que s'inscrit notre modeste contribution. Nous souhaitons que le GPV fournira la puissance maximale théoriquement obtenue pour des conditions météorologiques données (c.à.d un ensoleillement et une température donnés) et ce grâce au contrôle par poursuite du point de puissance maximale d'un système (MPPT : Maximum Power Point Tracking) qui permet de chercher le point de fonctionnement optimal du GPV et par conséquent, d'améliorer considérablement le rendement des installations photovoltaïque.

Dans ce présent mémoire, nous allons analyser par simulation le fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque (PV) adapté par une commande MPPT. Cette commande assure la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV et conduise sûrement à une meilleure exploitation de l'énergie solaire. En effet, ce problème de poursuite a fait l'objet de plusieurs recherches. Pour cela, dans notre cas d'étude, trois types de commande MPPT sont appliquées et commentées à savoir: la commande MPPT Perturbation & Observation (P & O) , la méthode d'incrément de conductance (INC) et celle basée sur l'utilisation de la logique floue (Fuzzy MPPT).

Pour réaliser ce travail, nous avons adopté le plan de travail suivant :

Dans le premier chapitre, après avoir présenté les différentes sources d'énergies renouvelables existantes, nous concentrons notre attention sur la production d'énergie photovoltaïque à partir des données d'ensoleillement.

Le chapitre 2, sera consacré à la modélisation et simulation des divers éléments constitutifs d'un système photovoltaïque complet (modules et générateurs photovoltaïques, hacheurs survolteur à commande MPPT).

Une synthèse des différentes techniques d'optimisation MPPT avec application au GPV et charge connectée sous conditions de température et d'ensoleillement variables sera évoqué au chapitre 3.

Enfin on terminera par une conclusion générale, où nous présenterons une synthèse des travaux effectués ainsi que les principaux résultats obtenus.

# **CHAPITRE I**



## I.1 Introduction

Les énergies renouvelables sont des énergies inépuisables. Elles sont issues des éléments naturels : le soleil, le vent, les chutes d'eau, les marées, la chaleur de la terre, la croissance des végétaux...etc. L'exploitation des énergies renouvelables contrairement à celle des énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz, uranium), n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes. Ce sont les énergies de l'avenir, mais elles sont encore sous-exploitées par rapport à leur potentiel puisque ces énergies ne couvrent que 20 % de la consommation mondiale d'électricité. Les énergies renouvelables sont également désignées par les termes « énergies vertes » ou « énergies propres ». Le rayonnement solaire représente une ressource renouvelable d'énergie énorme, de loin la plus importante.

Dans ce premier chapitre, nous présentons les différentes sources d'énergies renouvelables existantes avec une attention particulière à la production d'énergie solaire photovoltaïque.

## I.2 Energies renouvelables

### I.2.1 Energie éolienne



**Figure (I.1)** Eoliennes à axe horizontal

On appelle énergie éolienne, la conversion de la force des vents en énergie mécanique, énergie électrique ou énergie cinétique. C'est une énergie renouvelable car sa source est inépuisable mais intermittente (le vent ne souffle pas toujours). Le principe de l'énergie éolienne est connu depuis l'antiquité. C'est la deuxième énergie la plus ancienne exploitée par l'homme après le feu. On utilise l'énergie éolienne directement pour propulser des bateaux en récupérant la force cinétique des vents pour la transférer au navire. L'utilisation de voiles fixées perpendiculairement sur un axe tournant (rotor) est à l'origine de la récupération en énergie mécanique de l'énergie éolienne. Cette technique a permis à l'homme

de construire des moulins à vent pour moudre le grain en convertissant l'énergie du vent en énergie mécanique.

La force mécanique transmise au rotor d'une éolienne permet également d'effectuer des pompages d'eau pour alimenter des retenues ou des réseaux d'irrigation. Le principe du moulin a été perfectionné de nos jours pour produire de l'électricité à partir d'éoliennes (figure I.1) munies de rotor à pales faisant tourner un générateur électrique. [Web\_ER

Web\_EDFENR]

## I.2.2 Energie hydraulique

L'énergie hydraulique est une énergie qui utilise la force de l'eau, son débit ou sa puissance de chute en cas de différence de hauteur, pour actionner des mécanismes permettant de produire de l'énergie.

L'énergie hydraulique est une technique qui date de l'époque romaine, époque durant laquelle on avait découvert le potentiel de la force de l'eau pour faire tourner des moulins. Ainsi, il y eut un premier passage des moulins mécaniques vers les moulins actionnés par le courant de l'eau de manière régulière permettant ainsi de moudre la farine de manière efficace.

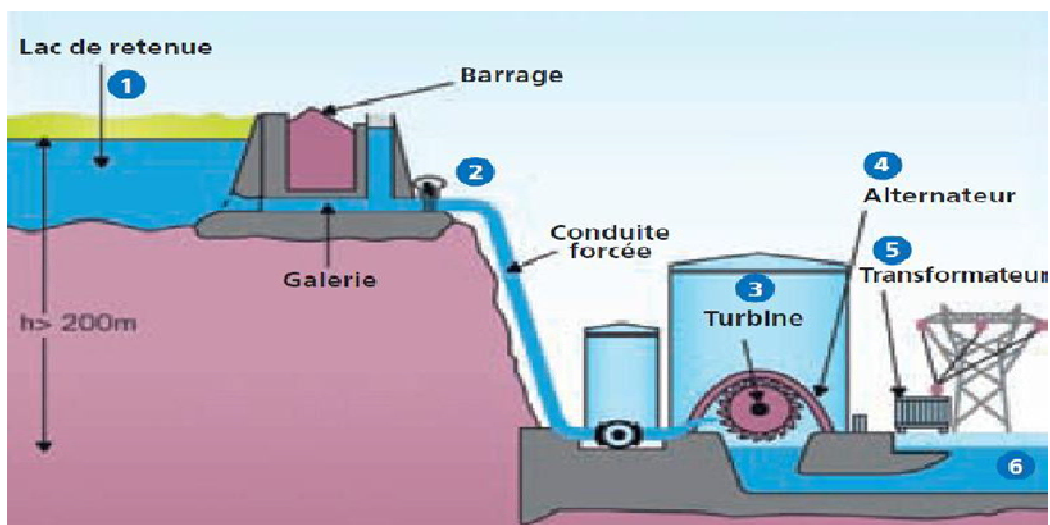


Figure (I.2) Centrale hydroélectrique

Aujourd'hui, l'énergie hydraulique renouvelable est produite dans des centrales hydrauliques, de très gros moulins, qui captent l'énergie cinétique de l'eau, son courant naturel, ou sa puissance lors des chutes d'eau répétées comme c'est le cas dans les reliefs montagneux, pour faire tourner de grandes turbines comme le montre la figure (I.2) ci-dessus.

Ces dernières entraîneront avec elles des générateurs électriques qui produiront de l'électricité qui pourra être injectée sur le réseau. Il s'agit d'une réelle énergie renouvelable, au même titre que le photovoltaïque ou l'éolien, puisque sa source primaire ne se tarit pas. En

effet, les centrales laissent s'écouler l'eau après en avoir capté l'essentiel de la force nécessaire pour actionner les éléments à l'intérieur de la centrale.[ Web\_TDE]

### I.2.3 Energie biomasse

La biomasse est l'une des sources d'énergie qui se réfère au matériel biologique dérivé d'organismes vivants tels que le bois et les déchets comme le montre la figure (I.3). Cette énergie n'est pas seulement utilisée pour produire de l'électricité car elle est également capable de produire de la chaleur. L'énergie de la biomasse a une très longue histoire et a été utilisée sous des formes primitives depuis les premiers jours de l'humanité. La combustion du bois dans une grotte est également une forme d'énergie de biomasse, une simple conversion d'une matière organique en chaleur.



**Figure (I.3)** Photo d'une source de l'énergie biomasse : les copeaux de bois

L'autre chose qu'il faut savoir sur la biomasse est que l'énergie de la biomasse provient de cinq sources d'énergie distinctes: les ordures, le bois, les déchets, les gaz d'enfouissement et les carburants à base d'alcool. La biomasse peut être relativement facilement convertie en d'autres formes d'énergie utilisables comme le méthane ou des carburants de transport comme l'éthanol et le biodiesel. La plupart des scientifiques vous diront toujours que la biomasse présente de nombreux avantages par rapport aux combustibles fossiles et qu'elle contribue à réduire la quantité d'émissions de carbone [Web\_OurE].

### I.2.4 Energie géothermique

L'énergie géothermique est la chaleur dérivée de la sous-surface de la terre (figure I.4). L'eau et/ou la vapeur transportent l'énergie géothermique à la surface de la Terre. Selon ses caractéristiques, l'énergie géothermique peut être utilisée à des fins de chauffage et de refroidissement ou être exploitée pour produire de l'électricité propre. Cependant, pour

l'électricité, des ressources de production à haute ou moyenne température sont nécessaires, qui sont généralement situées à proximité de régions tectoniquement actives.



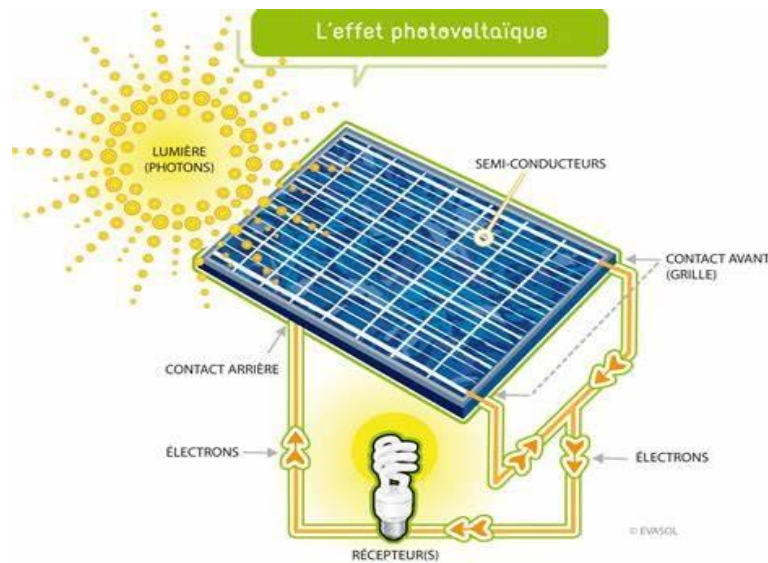
**Figure(I.4) Energie géothermique**

Il existe différentes technologies géothermiques avec des niveaux de maturité distincts. Les technologies à usage direct comme le chauffage urbain, les pompes à chaleur géothermiques, les serres et pour d'autres applications sont largement utilisées et peuvent être considérées comme matures. La technologie de production d'électricité à partir de réservoirs hydrothermaux à perméabilité naturellement élevée est également mature et fiable et fonctionne depuis 1913. La plupart des centrales électriques en service aujourd'hui sont des centrales à vapeur sèche ou des centrales flash (simples, doubles et triples) exploitant des températures de plus de 180 °C. Cependant, les champs à température moyenne sont de plus en plus utilisés pour la production d'électricité ou pour la production combinée de chaleur et d'électricité grâce au développement de la technologie du cycle binaire, dans lequel le fluide géothermique est utilisé via des échangeurs de chaleur pour chauffer un fluide de processus en boucle fermée.

Pour promouvoir un développement plus large de l'énergie géothermique, l'IRENA coordonne et facilite le travail de la Global Géothermal Alliance (GGA) - une plateforme pour un dialogue et un partage des connaissances améliorés pour une action coordonnée afin d'augmenter la part de l'électricité géothermique installée et de la production de chaleur dans le monde.[ Web\_irena]

### I.2.5 Energie solaire :

L'énergie solaire est une énergie qui dépend du soleil, bien que cette dernière distante de plus de (150) millions de kilomètres de nous, demeure notre plus grande source d'énergie même si elle est intermittente. Cette énergie permet de produire de l'électricité à partir des panneaux photovoltaïques comme le montre la figure (I.5), grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires qui permet de récupérer l'énergie du soleil et de produire de l'électricité, sans pièces tournantes et sans bruit et elle n'émet aucun gaz à effet de serre. L'électricité produite peut être soit stockée dans des batteries pour les installations autonomes, soit injectée dans le réseau.



**Figure (I.5)** Champ photovoltaïque

Par sa souplesse et sa facilité d'installation et de maintenance, l'énergie solaire est une solution technique et économique pour l'électrification des sites isolés. On peut distinguer trois types d'énergie solaire : le solaire photovoltaïque, le solaire passif et le solaire thermique.

### I.2.6 Energie solaire thermique

Le soleil est l'une des principales sources d'énergies renouvelable. Son rayonnement est un formidable vecteur d'énergie thermique figure(I.6) . L'utilisation de cette énergie est un bon moyen de lutter contre l'effet de serre et de s'inscrire dans les démarches actuelles de développements durables. Inépuisable, l'énergie solaire permet de respecter l'environnement et de préserver les ressources énergétiques. Elle est une source d'énergie gratuite à la disposition de tous.

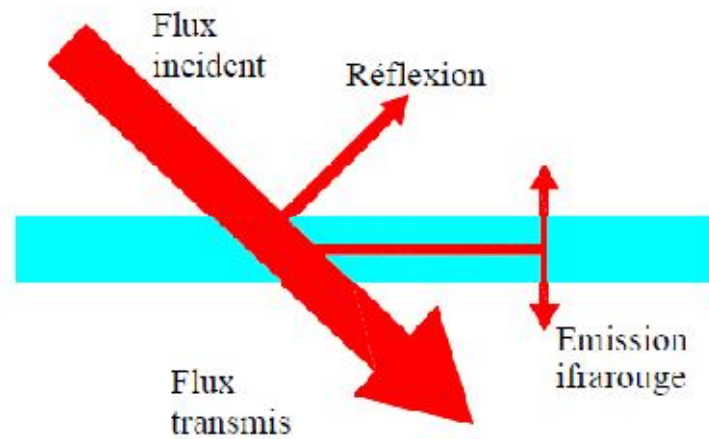


Figure (I.6) Energie solaire thermique

### I.3 Energie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium ou recouverts d'une mince couche métallique. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. C'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons, (composants de la lumière) qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique. Ce courant continu de micropuissance calculé en watt crête (Wc) peut être transformé en courant alternatif grâce à un onduleur.

Dans cette partie, avant de détailler la production de l'énergie solaire photovoltaïque, il nous semble opportun de décrire le principe photovoltaïque permettant de transformer la lumière en électricité ainsi que les différents paramètres pouvant influencer son fonctionnement.

#### I.3.1 Rayonnement solaire

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de  $0,22\mu\text{m}$  à  $10\mu\text{m}$ . La figure (I.7) représente la variation de la répartition spectrale énergétique.

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

- 9% dans la bande des ultraviolets ( $<0,4\mu\text{m}$ ),
- 47% dans la bande visible ( $0,4\text{à}0,8\mu\text{m}$ ),
- 44% dans la bande des infrarouges ( $>0,8\mu\text{m}$ ).

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de  $1,37\text{kilowatt}$  au mètre carré ( $\text{kW}/\text{m}^2$ ), à plus ou moins 3 %, selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du

soleil dans sa rotation autour de celui-ci. L'atmosphère en absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement  $1200\text{W/m}^2$ . La rotation et l'inclinaison de la terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison. Enfin, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et divers autres phénomènes météorologiques causent des variations horaires et quotidiennes qui tantôt augmentent, tantôt diminuent le rayonnement solaire et le rendent diffus.

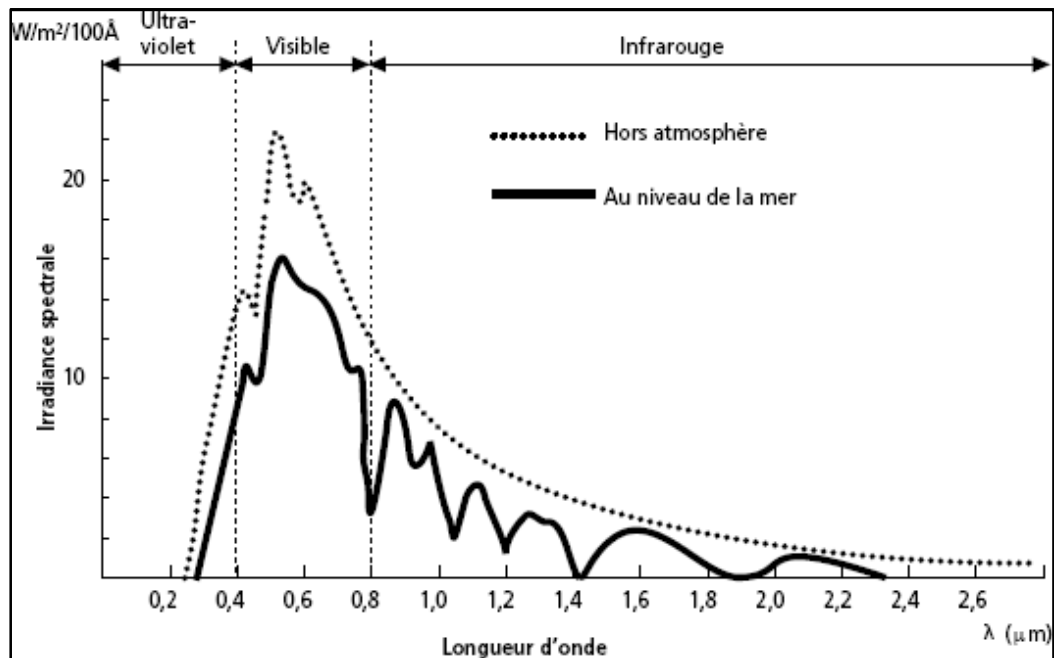


Figure (I.7) Analyse spectrale du rayonnement solaire

### I.3.2 L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un processus de transformation de l'énergie émise par le soleil, sous forme de photons, en énergie électrique à l'aide de composant semi-conducteur appelé cellule solaire.

L'effet photovoltaïque ne peut se produire que s'il existe une barrière de potentiel dans le semi-conducteur avant qu'il ne soit éclairé. Une telle barrière existe, par exemple, à l'interface entre deux volumes dopés différemment c'est à dire où l'on a introduit deux types différents d'impuretés à concentration différente, par exemple de type P-N. Si ce matériau est éclairé, les charges électriques, rendus mobiles par la lumière (l'effet photoélectrique), seront séparées par la barrière avec d'un côté les charges positives et de l'autre côté les charges négatives [Pastor2004].

Parmi les matériaux semi-conducteurs les plus utilisés on trouve le silicium, le germanium, le sulfure de Gallium et l'arséniure de Gallium.

### I.3.3 Le principe de conversion photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière (figure I.8). Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériaux un diffusent dans le matériaux.

La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction (dite p-n) a été formée [Blavi2002]. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi un pair électron - trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel courant électrique circule .

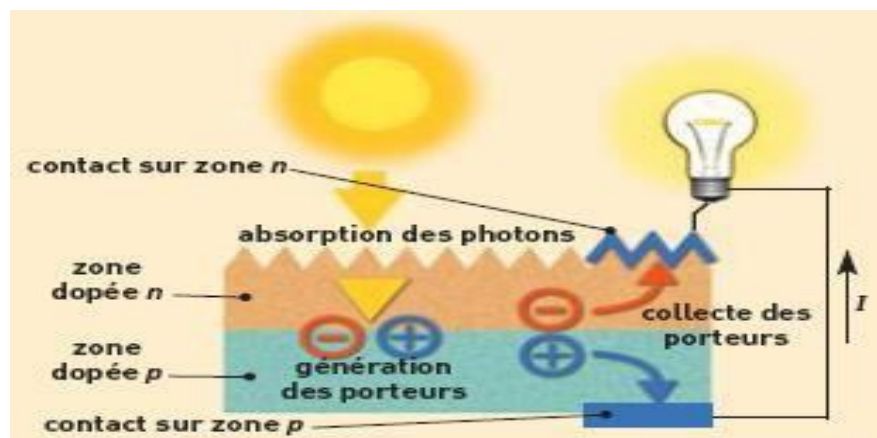


Figure (I.8) Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque

#### I.3.3.1 Cellule photovoltaïque :

##### a) Définition

Encore appelée photopile. C'est une mince couche d'un métal semi-conducteur (souvent le silicium) traitée pour pouvoir convertir la lumière en courant continu (figure I.9).

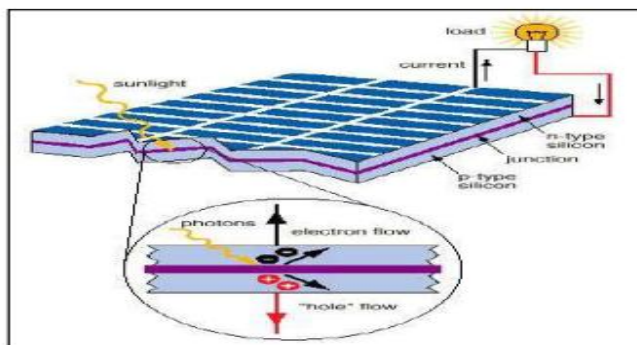


Figure (I.9) Cellule photovoltaïque

**b) Comment fonctionne une cellule photovoltaïque ?**

Lorsque les photons qui constituent la lumière solaire viennent frapper la cellule PV, ils sont absorbés en grande partie par celle-ci. Ce phénomène libère les électrons contenus dans le matériau. En se déplaçant, ces électrons créent un courant électrique. En plaçant des contacts métalliques sur la face supérieure et inférieure de la cellule, ce courant peut alors être capté et utilisé à l'extérieur de cette cellule comme le montre la figure( I.10) . La tension générée peut varier entre 0.3V et 0.7V en fonction du matériau et de sa disposition ainsi que la température de la cellule et du vieillissement de la cellule.

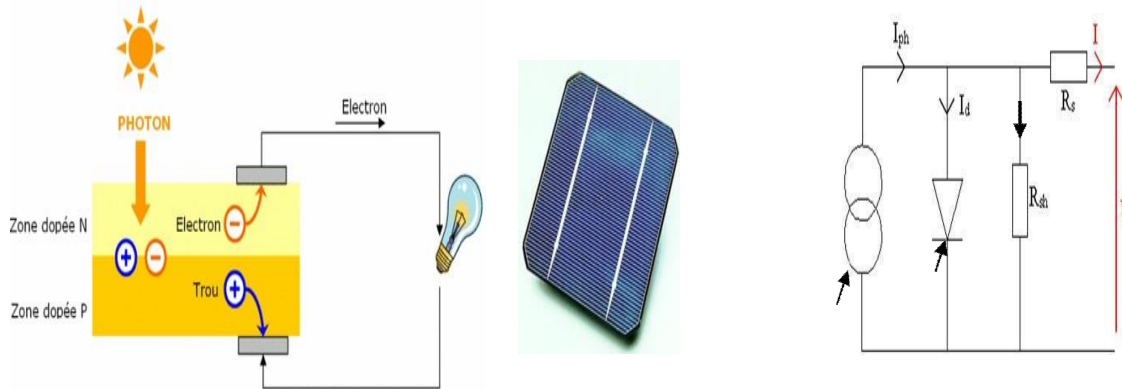



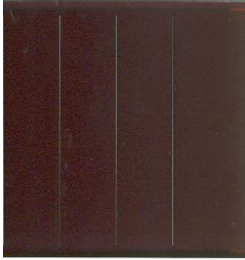


Figure (I.10) Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

**I.3.3.2 Différents types des cellules photovoltaïques**

Les différents types de cellules photovoltaïques	Définition	Avantages	Inconvénients
<p><b>Cellule multi-jonction</b></p> 	<p>Les cellules multi-jonction sont composées de différentes couches qui permettent de convertir différentes parties du spectre solaire et ainsi d'obtenir les meilleurs rendements de conversion.</p>	<p>Rendement inégalé</p>	<p>Pas d'application commerciale Rendement record en laboratoire : environ 40% Développé pour les applications spatiales, ce type de cellule n'est pas encore commercialisable</p>

<p><b>Cellule en silicium monocristallin</b></p> 	<p>Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme.</p>	<p>Très bon rendement</p> <p>Durée de vie importante (+/- 30 ans)</p>	<p>Coût élevé</p> <p>Rendement faible sous un faible éclairement</p> <p>Rendement module commercial : 12 à 20%</p> <p>Rendement record en laboratoire : environ 25% éclairement</p>
<p><b>Cellule en silicium poly cristallin</b></p> 	<p>Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.</p>	<p>Bon rendement</p> <p>Durée de vie importante (+/- 30 ans)</p> <p>Meilleur marché que le monocristallin</p>	<p>Rendement faible sous un faible éclairement</p> <p>Rendement module commercial : 11 à 15%</p> <p>Rendement record en laboratoire : environ 20%</p> <p>Ce type de cellules ont pour l'instant le meilleur rapport qualité / prix</p>
<p><b>Cellule sans silicium en couche mince CIS</b></p>	<p>Les cellules CIS représentent la nouvelle génération de cellules solaires sous forme de films minces, de type cuivre-indium-sélénium (CIS). Les matières premières nécessaires à la fabrication des cellules CIS sont plus faciles à se procurer que le silicium utilisé dans les cellules photovoltaïques classiques. De plus, leur efficacité de conversion énergétique est la plus élevée à ce jour pour des cellules photovoltaïques en couche mince.</p>	<p>Permet d'obtenir les meilleurs rendements par rapport aux autres cellules photovoltaïques en couche mince</p> <p>Permet de s'affranchir du silicium</p> <p>Les matériaux utilisés ne causent pas de problème de toxicité</p>	<p>Les cellules en couche mince nécessitent une surface plus importante pour atteindre les mêmes rendements que les cellules épaisses</p> <p>Rendement module commercial : 9 à 11%</p> <p>Rendement record en laboratoire : environ 19,3%</p>
<p><b>Cellule silicium amorphe en couche mince</b></p>	<p>Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé ou marron. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites "solaires".</p>	<p>Fonctionnent avec un éclairement faible</p> <p>Bon marché par rapport aux autres types de cellules</p> <p>Moins sensible aux températures</p>	<p>Rendement faible en plein soleil</p> <p>les cellules en couche mince nécessitent une surface plus importante pour atteindre les mêmes rendements que les cellules épaisses</p> <p>Durée de vie courte</p>

		élevées	(+/- 10 ans), performances qui diminuent sensiblement avec le temps Rendement module commercial : 5 à 9% Rendement record en laboratoire : environ 13,4%
---	--	---------	---



*Silicium Amorphe, silicium monocristallin, silicium polycristallin*

**Figure (I.11)** Modules photovoltaïques

#### I.4 Module photovoltaïque

Afin d'augmenter la tension d'utilisation, les cellules PV sont connectées en série. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge, les modules ont généralement 36 ou 60 cellules. De plus, la fragilité des cellules au rupture et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique. Le tout est appelé un module photovoltaïque.

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation. Toutefois, il est important de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dus à de l'ombrage, de la poussière, etc.) peuvent endommager les cellules de façon permanente.

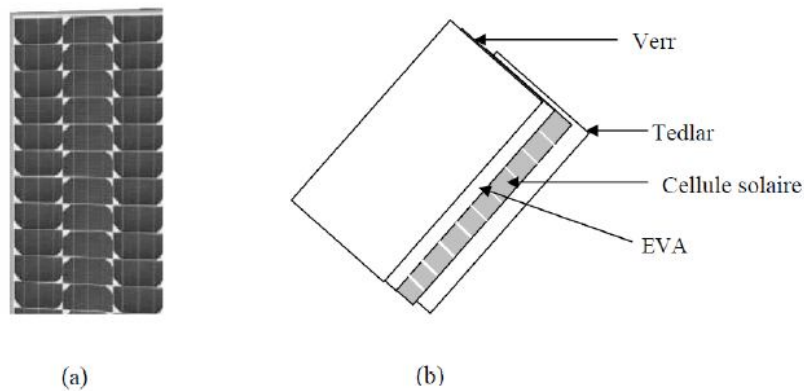


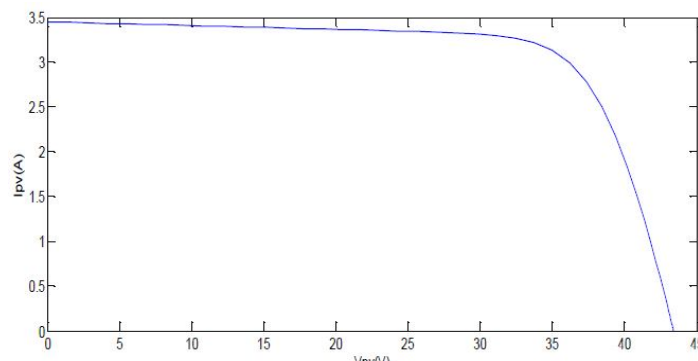
Figure (I.12) Module photovoltaïque

### I.4.1 Caractéristiques d'un module photovoltaïque

#### a) Caractéristique courant-tension $I(V)$ .

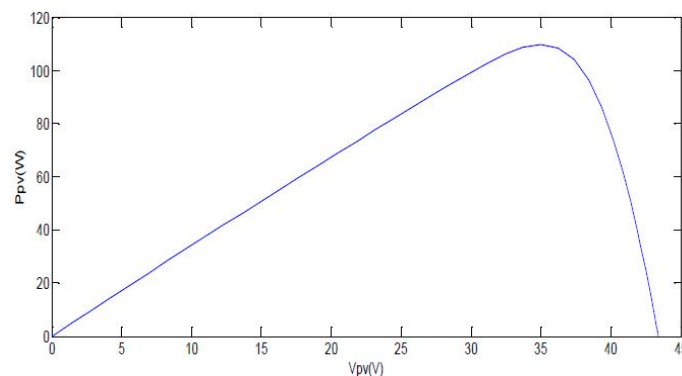
Elle est identique à celle d'une jonction P-N avec un sens bloqué, mais décalé le long de l'axe du courant d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement.

Elle se trace sous un éclairement fixe et une température constante (figure I.13).

Figure (I.13) Caractéristique  $I(V)$ 

#### b) Caractéristique puissance-tension (P-V)

La puissance débitée par le module photovoltaïque dépend du point de fonctionnement de cette dernière ; c'est le produit de l'intensité de courant et de la tension entre ses bornes (Figure I.14).

Figure (I.14) Caractéristiques  $P_{pv}(V_{pv})$  d'un panneau solaire.

### c) Le rendement

Ce facteur définit le taux de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique, il représente le rapport de la puissance fournie rapportée à celle du rayonnement incident :

$$\eta = \frac{I_{op} \times V_{op}}{E_s \times A} \quad (I.1)$$

$I_{op}$  : le courant optimal

$V_{op}$  : la tension optimal

$E_s$  : l'ensoleillement.

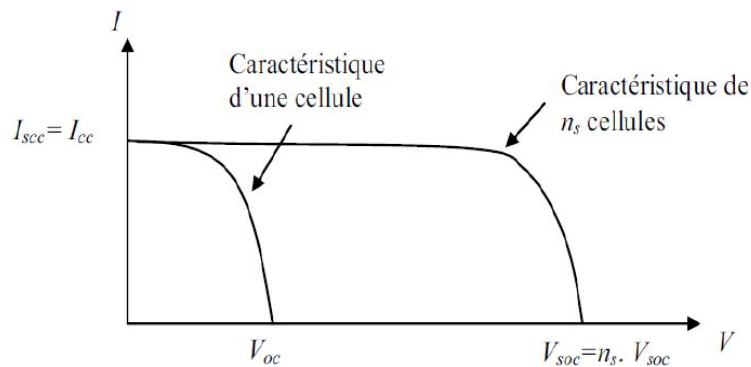
$A$  : la surface du module solaire .

Ce rendement varie généralement entre 8 à 13% pour le silicium mono-cristallin, entre 7 à 11% pour le poly-cristallin et entre 4 et 9% pour la cellule au silicium amorphe .

## I.5 Association des cellules photovoltaïques

### I.5.1 Association en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. La figure (I-15) montre la caractéristique résultante obtenue en associant en série  $n_s$  cellules identiques.



**Figure (I.15)** Caractéristique résultante d'un groupement en série de  $n_s$  cellules identiques.

### I.5.2 Association en parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante de groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée.

La figure (I-16) montre la caractéristique résultante obtenue en associant en parallèles  $n_p$  cellules identiques.

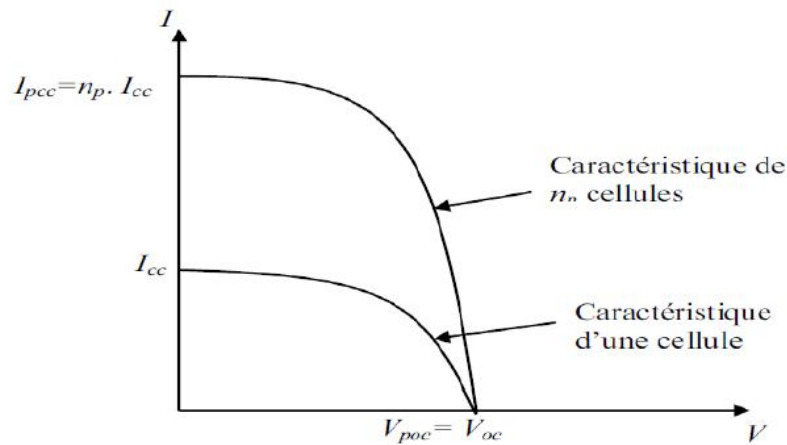


Figure (I.16) Caractéristique d'un groupement en parallèle de  $n_p$  cellules Identiques

### I.5.3 Association hybride (en série et en parallèle)

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à vide totale sont données par les relations :

$$I_{cc}^t = n_p \times I_{cc} \tag{I.2}$$

$$V_{oc}^t = n_s \times V_{oc} \tag{I.3}$$

Avec :

$n_p$  : nombre des cellule en parallèle,

$n_s$  : nombre des cellule en série.

La figure (I-17) montre la caractéristique résultante obtenue en associant, en série  $n_s$  et en parallèle  $n_p$ , cellules identiques.

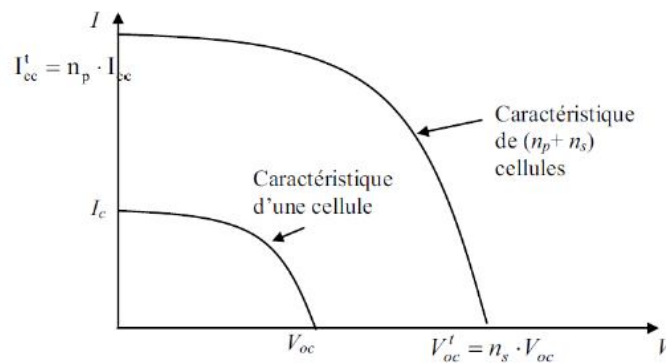


Figure (I.17) Caractéristique d'un groupement hybride de  $(n_p + n_s)$  cellules identiques.

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit  $I_{cc}$  et de la tension à vide  $V_{oc}$  sont plus ou moins importantes (figure (I-10)). La caractéristique d'un générateur PV constitué de plusieurs cellules a une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule (irradiation et température uniformes) .

### I.5.4 Zones de fonctionnement du module solaire

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement; seule la courbe  $I_{pv}$  ( $V_{pv}$ ) est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque. La figure (I.18) représente trois zones essentielles :

- **La zone (I)** : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- **La zone (II)** : correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.
- **La zone (III)** : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

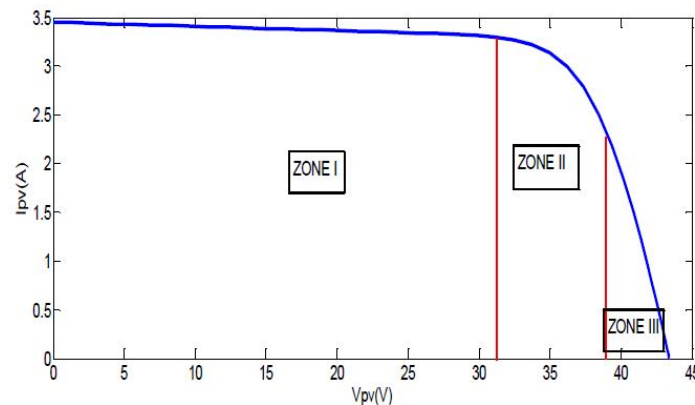


Figure (I.18) Les différentes zones de la caractéristique  $I$  (V), ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $E_s=1000\text{W}/\text{m}^2$ ).

## I.6 Influence de la température, l'ensoleillement et $R_s$

### I.6.1 Influence de la température sur la caractéristique photovoltaïque

Les caractéristiques électriques d'une cellule PV dépendent de la température de jonction au niveau de la surface exposée. Les figures (I-19) et (I-20) donnent l'allure générale des caractéristiques électriques d'un générateur photovoltaïque pour différentes valeurs de températures et un éclairement constant. On remarque, que lorsque la température augmente, le courant photogénéré augmente très légèrement alors que la tension de circuit ouvert diminue considérablement.

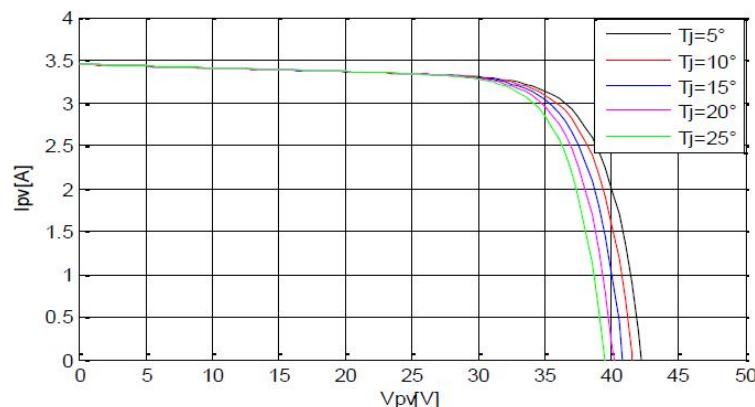


Figure (I.19) Influence de la variation de la température sur la caractéristique courant –

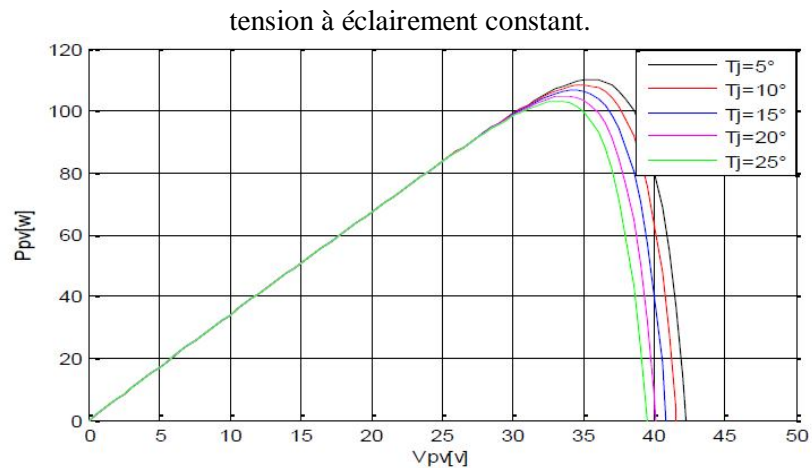


Figure (I.20) influence de la variation de la température sur la caractéristique puissance-tension à éclairement constant.

### I.6.2 Influence de l'éclairement sur la caractéristique photovoltaïque :

Les figures (I. 21) et (I.22) représentent successivement les caractéristiques (P-V) et (I-V) pour différentes valeurs de l'éclairement, à une température constante.

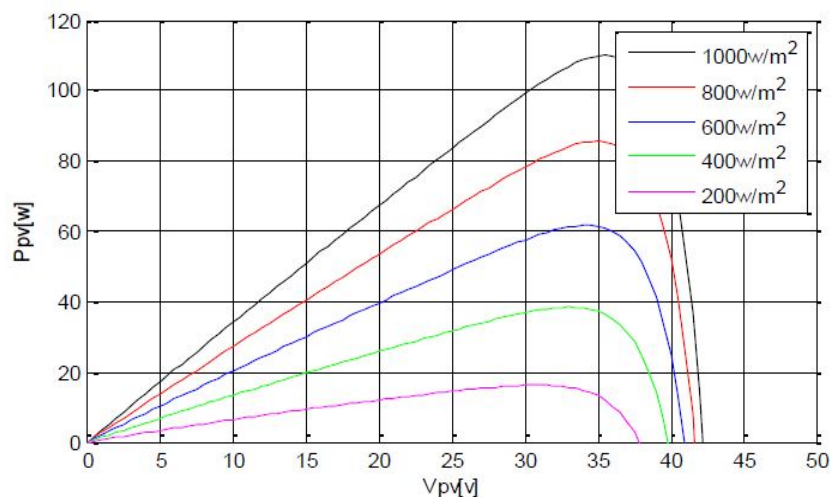


Figure (I.21) influence de la variation de l'éclairement sur la caractéristique puissance-tension à température constante.

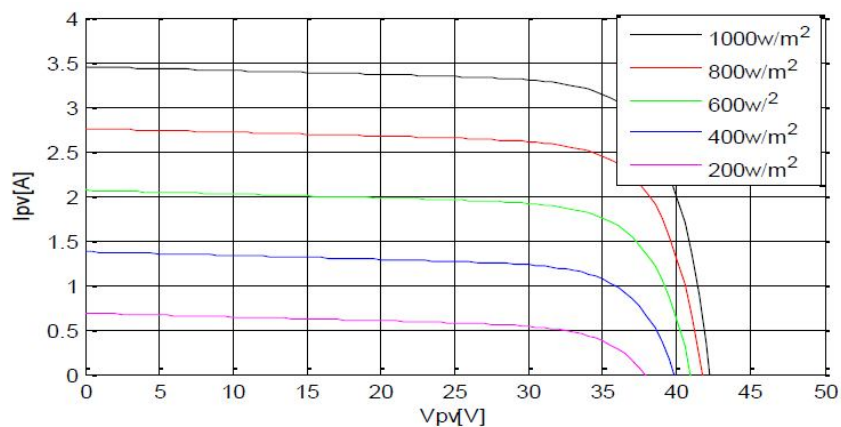
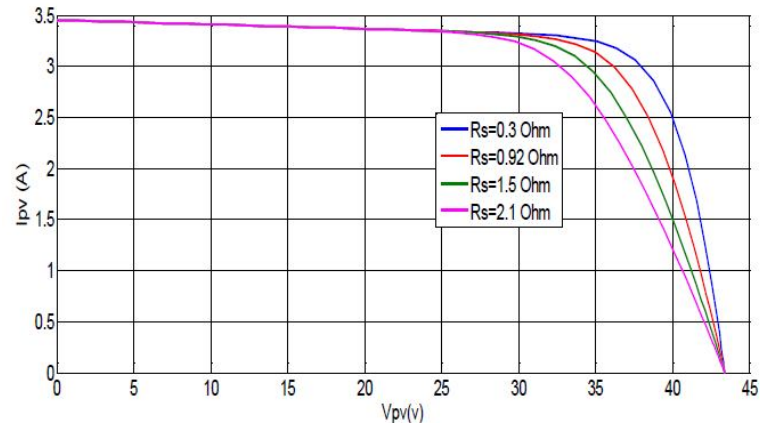


Figure (I.22) influence de la variation de l'éclairement sur la caractéristique courant-tension à température constante

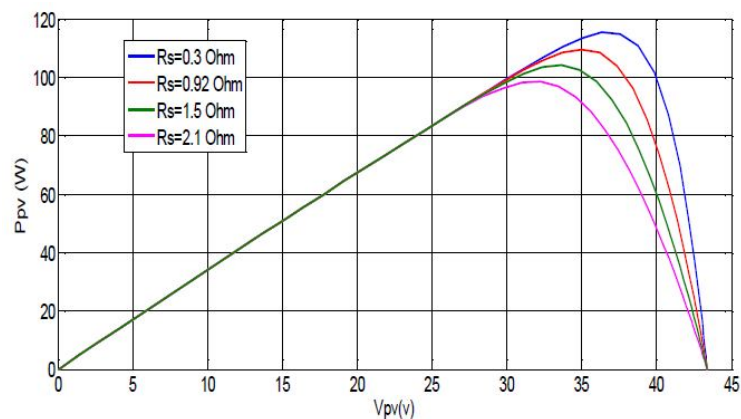
On remarque que la variation de l'éclairement influe visiblement sur le courant de court circuit et peu sur la tension de circuit ouvert par conséquent la variation de PPM proportionnellement à l'éclairement.

### I.6.3 Influence de la résistance série $R_s$ :

Nous avons tracé les caractéristiques P-V et I-V, avec la variation de la résistance série, et nous avons obtenu les figures (I.23 - I.24) :



**Figure (I.23)** Caractéristique I-V d'un module photovoltaïque pour différentes valeurs de la résistance série ( $R_s=0.3, 0.92, 1.5, 2.1 \Omega$ )



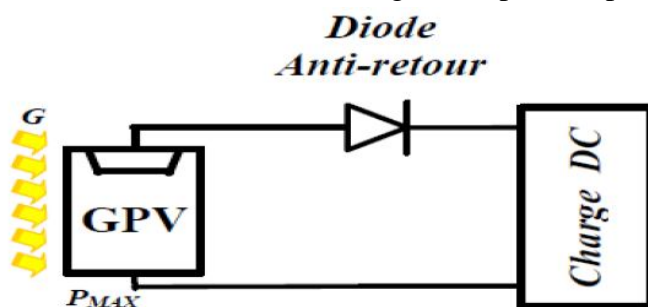
**Figure (I.24)** Caractéristique P-V d'un module photovoltaïque pour différents valeurs de la résistance série. ( $R_s=0.3, 0.92, 1.5, 2.1 \Omega$ ).

D'après ces résultats, nous remarquons que la résistance série provoque des pertes localisés dans le panneau photovoltaïque, ce qui engendre la délocalisation de point de puissance maximale.

## I.7 Connexion directe source-charge

Actuellement, il reste encore beaucoup d'applications où une connexion directe entre un GPV et une charge est effectuée. Ce choix est principalement lié à la simplicité de l'opération et le très haut degré de fiabilité, dû fondamentalement à l'absence d'électronique, sans parler d'un faible coût. Si cette charge était une batterie, lorsque le module n'est pas éclairé, celui-ci pourrait fonctionner en tant que récepteur, la batterie pourrait donc se décharger sur le générateur PV et en plus l'endommager irréversiblement. Ainsi, pour éviter cette situation, la

connexion doit être assurée à l'aide d'une diode anti-retour placée entre le GPV et la charge. Cette configuration est illustrée à la figure (I.25). L'inconvénient de cette configuration, c'est qu'elle n'offre aucun type de limitation et/ou réglage de la tension de la batterie. Le transfert de  $P_{MAX}$  disponible aux bornes du GPV vers la charge n'est pas non plus garanti.



**Figure (I.25)** Connexion directe GPV-Charge par le biais d'une diode

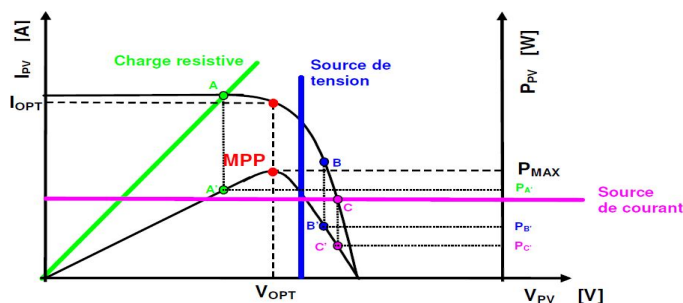
En effet, le point de fonctionnement du GPV résulte de l'intersection entre la caractéristique (I-V) du GPV et la caractéristique (I-V) de la charge.

Nous supposons que la nature de la charge est continue (DC). En effet, une charge de type alternative n'est pas du tout compatible avec la connexion directe car le GPV fournit un courant continu. Pour la connexion d'un GPV à une charge alternative, nous avons obligatoirement besoin d'un étage d'adaptation spécifique [Blavi2002- Pastor2004] de type onduleur.

Trois types de charges DC typiques existent : une charge purement résistive, une charge de type source de tension et une charge de type source de courant. Sur la figure (I.19), nous avons représenté les caractéristiques I(V) et P(V) d'un GPV ainsi que les caractéristiques I(V) des trois types de charges. Tout d'abord, nous pouvons identifier le point de fonctionnement où la puissance fournie par le générateur est maximale ( $P_{MAX}$ ) pour un courant optimal ( $I_{OPT}$ ) et une tension optimale ( $V_{OPT}$ ), point nommé PPM. Ensuite, nous pouvons trouver le point d'intersection entre les caractéristiques I(V) du générateur et celles des trois types de charges :

- **point A** pour une charge résistive,
- **point B** pour une charge de type source de tension,
- **point C** pour une charge en source de courant.

Pour ces trois points, la puissance fournie par le générateur est respectivement  $P_A'$ ,  $P_B'$  et  $P_C'$ , que comme l'illustre la figure (I.26) correspondant à des valeurs de puissance inférieures à la puissance maximale disponible  $P_{MAX}$ . Donc, une perte d'une partie de la puissance délivrable aux bornes du générateur PV implique à la longue des pertes de production énergétiques importantes.

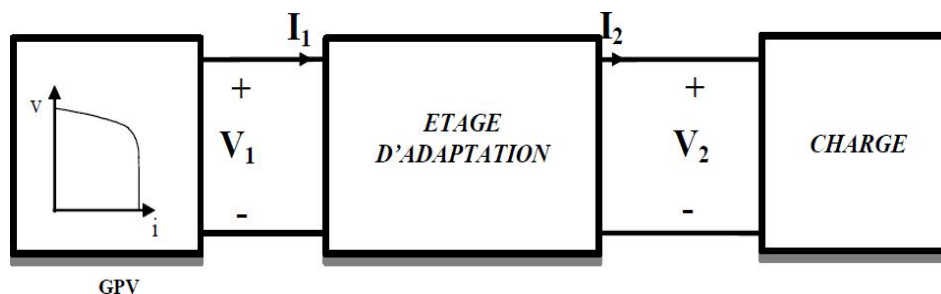


**Figure(I.26)** Points de fonctionnement d'un GPV en fonction de la charge en connexion directe.

### I.7.1 Définition de l'étage d'adaptation entre une source et une charge

Comme nous l'avons vu, un GPV présente des caractéristiques  $I(V)$  non linéaires avec des PPM. Ces caractéristiques dépendent entre autres d'un niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe.

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le GPV et la charge comme décrit dans la figure (I-27). Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de  $P_{max}$  disponible [Singer 1985, Singer 1987].



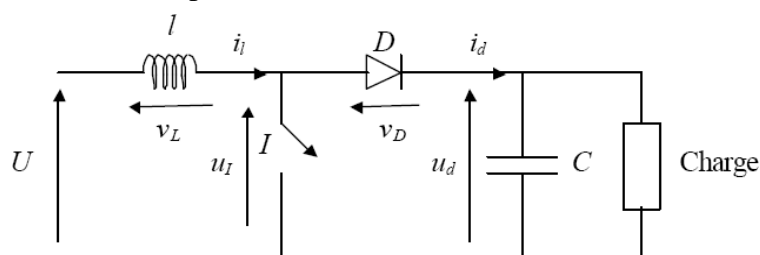
**Figure (I.27)** Etage d'adaptation jouant le rôle d'interface de puissance entre un GPV et une charge pour le transfert de  $P_{MAX}$  du GPV.

## I.8 Convertisseurs DC/DC (hacheurs)

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques qui sont alimentés par des sources de tension continue et produisent aux bornes d'une charge une tension unidirectionnelle de valeur moyenne réglable. On peut imaginer un grand nombre de dispositifs électroniques réalisant cette fonction. On présentera les types de montages les plus utilisés ainsi que quelques applications. Ces montages utiliseront des interrupteurs unidirectionnels statiques pour alimenter des appareils spéciaux, à savoir [Markvard 2000]:

### I.8.1 Hacheur parallèle (survolteur)

Ce type sert à produire une tension plus élevée que celle fournie par les panneaux ou les batteries de stockage, leur réalisation est basée sur un interrupteur commandé à l'amorçage et au blocage (MOSFET, IGBT, Bipolaire,.....) et une diode.



**Figure (I.28)** Schéma d'un hacheur parallèle

### I.8.2 Hacheur série (dévolteur)

Il délivre une tension a la sortie plus basse que celle de l'entrée (panneaux ou batteries), sa structure demande un interrupteur a amorçage et a blocage commande (transistorbipolaire, transistor, IGBT,.....) et une diode.

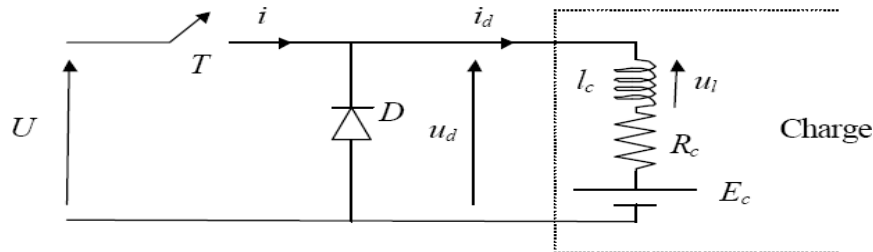


Figure (I.29) Schéma d'un hacheur série.

## I.9 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

### I.9.1 Avantages de l'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque offre de multiples avantages :

- ✓ La production de cette électricité renouvelable est propre et n'est pas toxique .
- ✓ Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- ✓ L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains, dus à leur petite taille, et leur opération silencieuse .
- ✓ 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 .
- ✓ Les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques (notamment à la grêle) .
- ✓ La durée de vie des panneaux photovoltaïques est très longue.

Certains producteurs garantissent les panneaux solaires pour une durée de 25 ans.

### I.9.2 Inconvénients de l'énergie photovoltaïque

**L'énergie photovoltaïque a aussi quelques inconvénients**

- ✓ Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- ✓ Le coût très élevé.
- ✓ Faible rendement de conversion .
- ✓ S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente.

## **I.10 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons fait un aperçu général sur les énergies renouvelables et aussi les systèmes photovoltaïques. Nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire et le principe de conversion de l'énergie photovoltaïque; puis nous avons présenté le générateur photovoltaïque et les paramètres qui influent sur ses caractéristiques électriques. Les différents couplages du générateur photovoltaïque avec une charge ainsi que l'étage d'adaptation ont été aussi présentés.

## **Chapitre II**



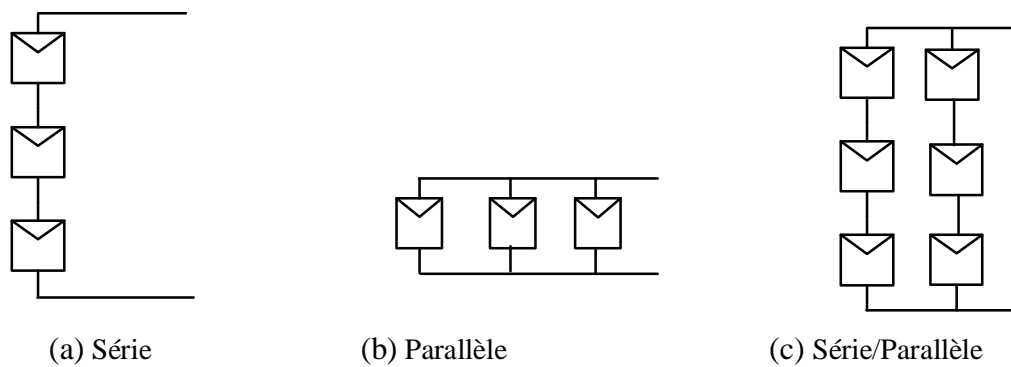
## II.1 Introduction :

Les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque. Un générateur photovoltaïque est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel. Les modules photovoltaïques sont habituellement branchés en série-parallèle pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur. Les modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu, cet ensemble est souvent désigné par champ de modules [Yahya2008]. Cette association permet de créer des panneaux solaires disposant de caractéristiques électriques susceptibles de répondre à nos besoins et présentant une grande fiabilité permettant une garantie des caractéristiques pour une longue durée.

Dans ce chapitre, nous rappelons la modélisation électrique de la cellule photovoltaïque et les types d'hacheurs les différentes méthodes de suivie du point de maximum de puissance.

## II.2 Le générateur photovoltaïque :

Dans des conditions d'ensoleillement standard ( $1000\text{W/m}^2$  ,  $25^\circ\text{C}$  , AM1.5), la puissance maximale délivrée par une cellule silicium de  $150\text{ cm}^2$  est d'environ  $2.3\text{ W}$  sous une tension de  $0.5\text{V}$ . Cette faible puissance est insuffisante pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Le générateur photovoltaïque est donc constitué d'un réseau série-parallèle de nombreux modules photovoltaïques, regroupés en panneaux photovoltaïques constitués de modules identiques. Lorsque les panneaux solaires sont assemblés en série (groupement de  $N_s$  panneaux en série) les tensions s'additionnent, alors que le courant les traversant reste le même, par contre s'ils sont montés en parallèle (groupement de  $N_p$  panneaux solaires en parallèle), les courants s'additionnent, alors que la tension reste la même. Le câblage série-parallèle est donc utilisé pour obtenir globalement un générateur photovoltaïque aux caractéristiques souhaitées. Les cellules qui constituent le panneau doivent avoir les mêmes caractéristiques.



Figure( II.1) Groupement de panneaux solaires photovoltaïques

### II.3 Paramètres de la cellule photovoltaïque :

La cellule solaire photovoltaïque est caractérisée par plusieurs paramètres qui seront décrits comme suit, figure (II.2) :

- **Tension de circuit ouvert  $V_{co}$**  : C'est la tension continue obtenue aux bornes d'un panneau PV sous un ensoleillement constant sans aucune circulation de courant. On appelle cette tension la tension de circuit ouvert.
- **Courant de court-circuit  $I_{sc}$**  : C'est le courant qui circule dans la cellule lorsque la tension appliquée aux bornes de la cellule est nulle. Sa valeur nous informe sur le niveau d'ensoleillement auquel la cellule est exposée.
- **Puissance maximale** : C'est l'expression de la puissance au point maximale de puissance de la courbe  $P(V)$  :

$$P_m = V_m \times I_m \quad (II.1)$$

Où  $V_m$  est la tension au point maximal de puissance et  $I_m$  le courant correspondant.

- **Facteur de forme** : Il est défini comme étant le rapport entre une puissance maximale fournie par la cellule et le produit du courant de court circuit par la tension de circuit ouvert, il est donnée par :

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} \times I_{sc}} \quad (II.2)$$

Ce facteur indique la performance du module, plus il s'approche de l'unité plus le module est performant.

- **Rendement de la cellule  $\eta$**  C'est le rapport entre la puissance électrique effectivement délivrée par la cellule photovoltaïque et la quantité d'énergie solaire reçue.

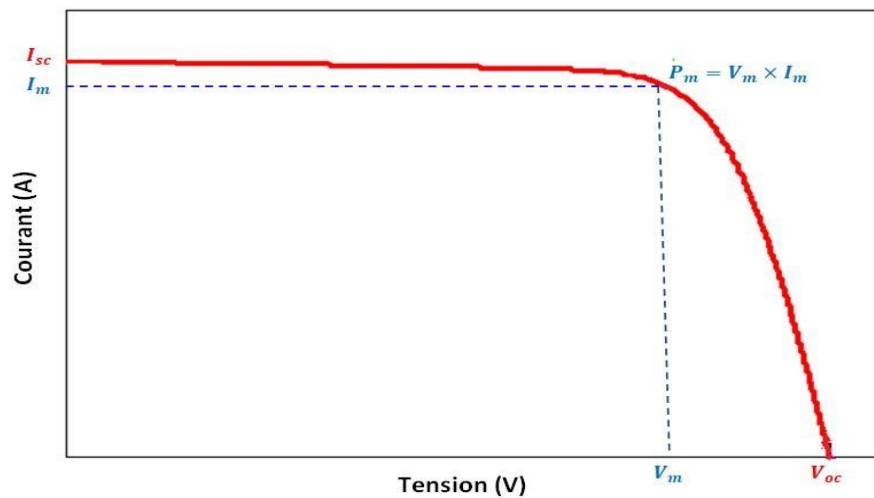
$$\eta = \frac{P_m}{V_{co} \times I_{sc}} \quad (II.3)$$

Où :

$P_m$  : Puissance électrique délivrée par le panneau photovoltaïque (W)

$S$  : Surface effective du panneau photovoltaïque ( $m^2$ )

$G$  : Irradiation ( $W/m^2$ ).



Figure( II.2) Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire PV

#### II.4 Modèle mathématique d'une cellule solaire :

La figure (II.3), représente le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque à une diode, celle-ci est composée d'une diode, une source de courant une résistance en série et une résistance en parallèle [Web\_EDF - B. Djamil]. Le courant d'obscurité de la diode ( $I_L$ ) est une fonction de l'irradiation solaire incidente et de la température de la cellule.

La jonction p-n de la cellule PV est représentée par la diode. La résistance série ( $R_s$ ) est la résistance interne de la cellule, elle dépend principalement de la résistance du semiconducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles. De plus, une résistance shunt ( $R_p$ ) qui est due à un courant de fuite au niveau de la jonction.

Ce modèle n'est pas universel, de nombreux auteurs [Zerga1998], ont proposés des modèles plus sophistiqués qui présentent avec plus de précision le phénomène photovoltaïque. On recense ainsi deux autres modèles:

- Le modèle à deux diodes: cette diode supplémentaire permettant de reproduire dans le schéma équivalent les effets chimiques de recombinaison des électrons.
- Le modèle à trois diodes: la troisième diode incluant dans le schéma équivalent les effets non pris en compte dans les autres modèles (ex: courant de fuite liés aux diodes).
- Le modèle à une diode offre un bon compromis entre simplicité et précision. Les équations mathématiques développées pour la modélisation de la cellule

photovoltaïque sont basées sur la caractéristique courant - tension. Le courant généré par la cellule photovoltaïque est donné par la première loi de Kirchoff :

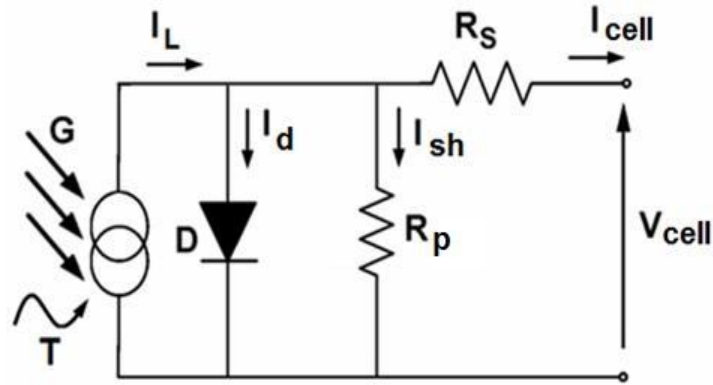


Figure (II.3) Circuit équivalent d'une cellule solaire

$$I_{cell} = I_L - I_d - I_{sh} \quad (II.4)$$

$$OU \quad I_d = I_0 \left( e^{\frac{V_d}{nV_t}} - 1 \right) \quad (II.5)$$

$$I_{sh} = V_d / R_p \quad (II.6)$$

$$V_d = V_{cell} - R_s I_{cell} \quad (II.7)$$

$$V_t = \frac{kT}{q} \quad (II.8)$$

$I_{cell}$  et  $V_{cell}$  sont le courant de sortie et la tension de sortie de la cellule PV respectivement,  $V_t$  est la tension thermique,  $I_0$  est le courant de saturation de polarisation inverse de la diode,  $q$  est la charge élémentaire ( $1.6 \times 10^{-19}$  C),  $k$  est la constante de Boltzman ( $1.38 \times 10^{-23}$  J/°K),  $T$  est la température de la cellule (°K), et  $n$  est le facteur d'idéalité de la diode.

Ainsi les caractéristiques  $I-V$  de la cellule PV sont données par :

$$I_{cell} = I_L - I_0 \left( e^{\frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{nV_t}} - 1 \right) - \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_p} \quad (II.9)$$

## II.5 Modèle mathématique d'un panneau solaire de $N_s$ cellules en série :

Le panneau solaire photovoltaïque est par définition un ensemble de cellules photovoltaïques assemblées pour générer une puissance électrique exploitable lors de son

exposition à la lumière. En effet, une cellule photovoltaïque élémentaire ne génère pas suffisamment de tension : entre 0.5 et 1.5V selon les technologies. Il faut presque toujours plusieurs cellules en série pour avoir une tension utilisable [Labouret2005].

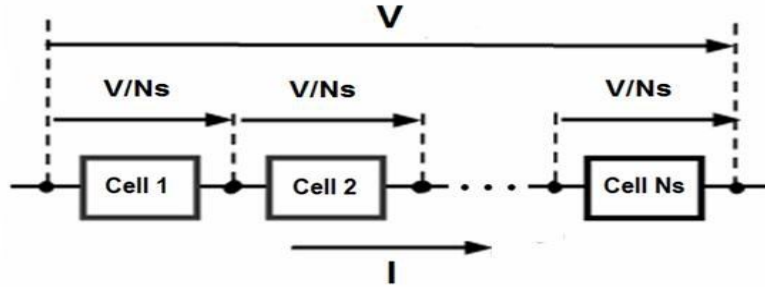


Figure (II.4) Groupement de Ns cellules en série

Un panneau photovoltaïque est composé de Ns cellules solaires en série, il a le même courant de sortie et l'équation de la tension de sortie est donnée par :

$$V = N V_{cell} \tag{II.10}$$

L'équation de la caractéristique I-V est alors :

$$I = I_L - I_0 \left( e^{\frac{V + N_s R_s I}{n V_t N_s}} - 1 \right) - \frac{V + N_s R_s I}{N_s R_p} \tag{II.11}$$

A partir de l'équation 2.11, pour  $V=0$ , l'expression du courant de court circuit  $I_{sc}$  du panneau photovoltaïque est ainsi obtenue :

$$I_{sc} = I_L - I_0 \left( e^{\frac{R_s I_{sc}}{n V_t}} - 1 \right) - \frac{R_s I_{sc}}{R_p} \tag{II.12}$$

Pour une cellule solaire idéale ( $R_s \rightarrow 0$ ,  $R_p \rightarrow \infty$ ) nous pouvons écrire :

$$I_L = I_{sc} \tag{II.13}$$

Alors l'équation 2.11 devient:

$$I = I_{sc} - I_0 \left( e^{\frac{V + N_s R_s I}{n V_t N_s}} - 1 \right) - \frac{V + N_s R_s I}{N_s R_p} \tag{II.14}$$

La valeur instantanée du courant de court circuit peut être trouvée en utilisant l'équation suivante [Hecktheuer2002]:

$$I_{sc} = (I_{sc, stc} + \alpha(T + T_{stc})) \cdot \frac{G}{G_{stc}} \tag{II.15}$$

Où  $I_{sc, stc}$  est le courant de court-circuit dans les conditions standard du module photovoltaïque qui est fourni par le fabricant de ce module photovoltaïque,  $G$  et  $G_{stc}$  sont respectivement l'instantané et la condition standard d'irradiation solaire du module photovoltaïque,  $T$  et  $T_{stc}$  sont respectivement les températures instantanée et la condition standard du module photovoltaïque et  $D$  le coefficient de température du court-circuit d'une cellule photovoltaïque. Puisque  $G_{stc} 1000 \text{ W/m}^2$  et l'effet de la variation de la température sur la valeur es  $I_{sc}$  est négligeable (moins de 1%), nous pouvons écrire :

$$I_L = \frac{G}{1000} I_{sc, stc} \tag{II.16}$$

$$I_0 = \frac{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{N_s R_p}}{\frac{V_{oc}}{e n V_t N_s} - 1} \tag{II.17}$$

Où  $V_{oc}$  est la tension de circuit ouvert du module photovoltaïque.

### II.6 Modèle mathématique d'un générateur photovoltaïque :

Lorsque les panneaux photovoltaïques sont groupés en série-parallèle en formant ainsi un générateur photovoltaïque. La tension  $V_A$  fournie par ce générateur, le courant  $I_A$  et la puissance  $P_A$  sous irradiation uniforme peuvent être obtenus à partir de la tension  $V$  et le courant  $I$  du module photovoltaïque comme suit :

$$\begin{cases} V_A = N_{ss} \times V \\ I_A = N_{pp} \times I \\ P_A = V_A * I_A = N_{ss} \times N_{pp} * V \times I \end{cases} \tag{II.18}$$

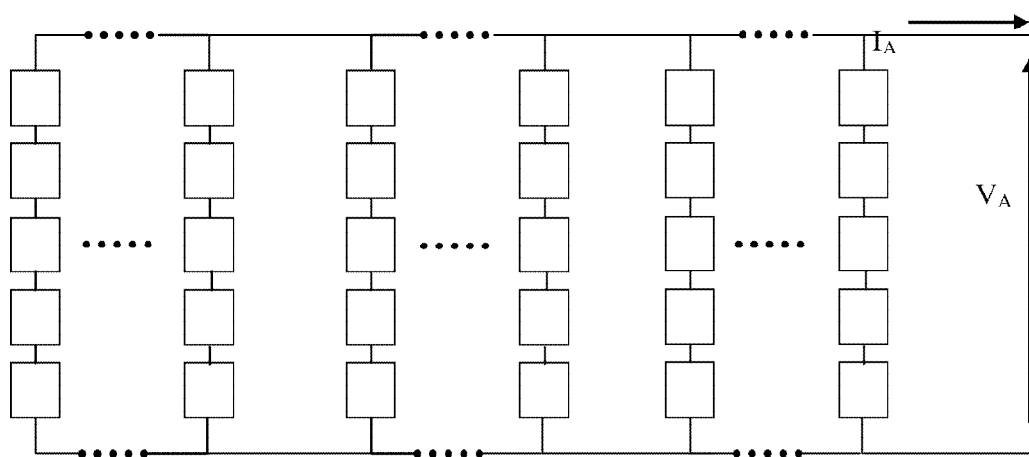


Figure (II.5) Matrice solaire formée de plusieurs groupes de colonnes

Où  $N_{ss}$  et  $N_{pp}$  sont respectivement le nombre de panneaux PV en série et parallèle du générateur photovoltaïque. Un programme sous Matlab a été écrit dans le but de résoudre les

équations (II.14) et (II.18) dans l'ordre et puis tracer les courbes  $I-V$  et  $P-V$  du générateur photovoltaïque sous radiation constante. Le facteur d'idéalité  $n$  de la diode a été pris comme unité.

La solution de l'équation (II.14) est obtenue pour une grille de valeurs du courant  $I$ , en utilisant la méthode de bisection pour résoudre l'équation non linéaire  $f(V)=0$  dans l'intervalle  $[0 V_{oc}]$  où  $f(V)$  est donnée par :

$$f(V) = I - I_{sc} + I_0 \left( e^{\frac{V + N_s R_s I}{n V_t N_s}} - 1 \right) + \frac{V + N_s R_s I}{N_s R_p} \quad (II.19)$$

### II.7 Les Hacheurs :

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). [les hacheurs]

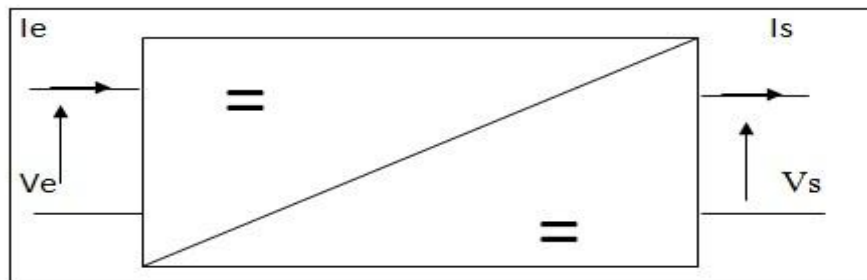
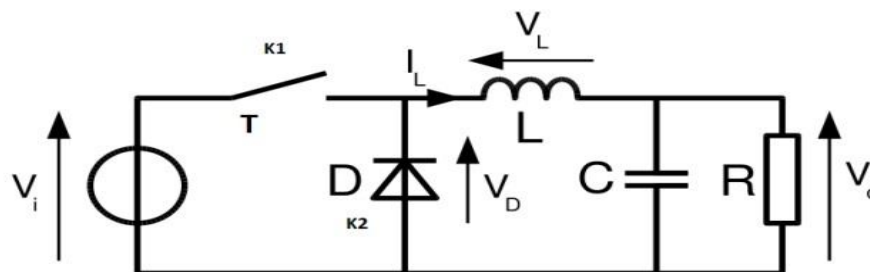


Figure (II.6) Convertisseur DC-DC

Deux types d'hacheurs seront étudiés dans ce chapitre.

#### II.7.1 Hacheur série (Buck) :

Un convertisseur Buck, ou hacheur série, est un appareil qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur.



Figure( II.7) schéma d'un convertisseur Buck

#### Fonctionnement :

L'interrupteur K1 est fermé pendant la fraction T de la période de hachage. La source d'entrée fournit l'énergie à la charge R à travers l'inductance L.

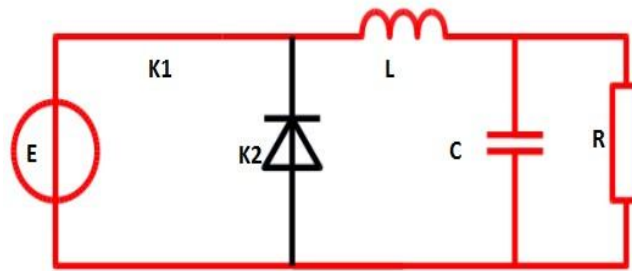


Figure (II.8) schéma équivalent lorsque K1 est fermé

Lors du blocage du transistor, la diode (K2) assure la continuité du courant dans l'inductance. L'énergie emmagasinée dans cette inductance est alors déchargée dans le condensateur et la résistance de charge.

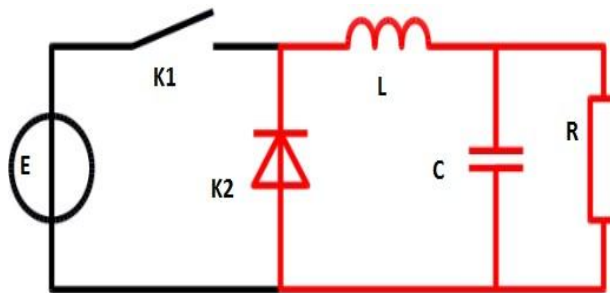


Figure (II.9) schéma équivalent lorsque K1 est ouvert

Les formes d'ondes en conduction continue sont représentées à la figure )II.10).

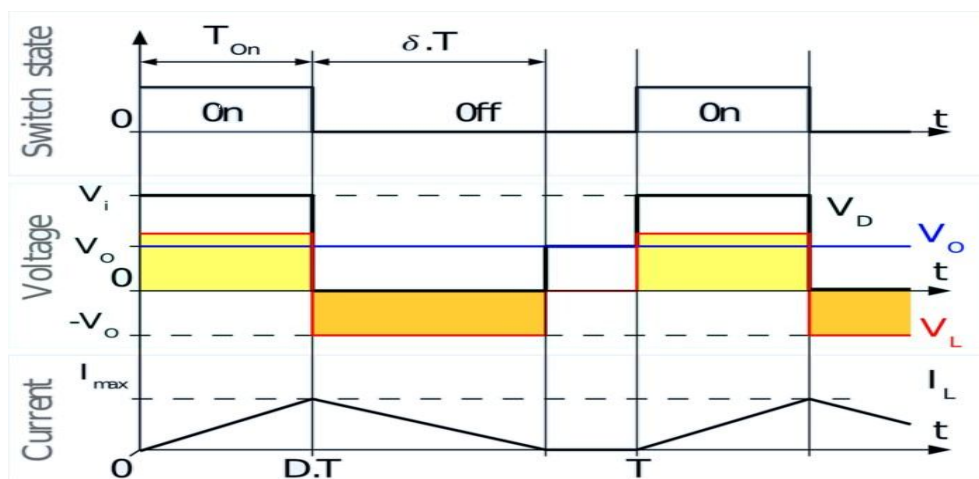


Figure (II.10) forme d'onde typique du convertisseur Buck

### II.7.2 Hacheur parallèle (BOOST) :

Le hacheur « BOOST » est connu par le nom d'élévateur de tension, la figure )II.11) représente un schéma simple du circuit électrique d'un « BOOST ».

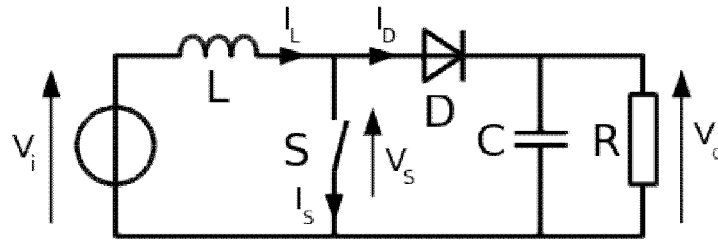


Figure (II.11) schéma d'un convertisseur BOOST

Cet hacheur comporte trois composants :

Une inductance L, une capacité C et un interrupteur S qui peut prendre deux états 1 et 0

**Fonctionnement :**

Le principe de fonctionnement de ce type d'hacheur peut être expliqué de la manière suivante :

Quand l'interrupteur est en position 1, le circuit est séparé en deux parties : à gauche, la source charge l'inductance, pendant ce temps, la capacité à droite maintient la tension de sortie utilisant l'énergie précédemment stockée. [Les hacheur 2 boost]



Figure (II.12) schéma équivalent lorsque S=1

Quand l'interrupteur change de position vers 0, la source DC et l'énergie stockée dans l'inductance vont ensemble alimenter le circuit à droite, d'où une augmentation de la tension de sortie. [les hacheur 2 boost]

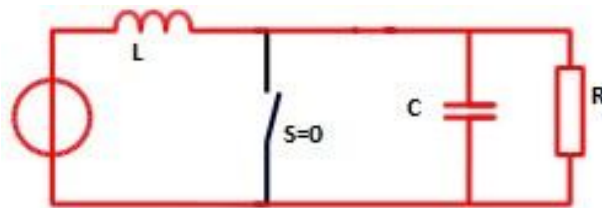


Figure (II.13) schéma équivalent lorsque S=0

**II.7.3 Modélisation du hacheur BOOST :**

Dans les conditions idéales, c'est à dire : interrupteur idéal, capacité idéale et inductance idéale, le hacheur Boost peut être modélisé en utilisant les équations différentielles ordinaires suivantes :

$$C \frac{dV_c}{dt} = (1 - \mu) i_l - \frac{V_c}{R} - i_o \tag{II.20}$$

$$L \frac{di_l}{dt} = V_{in} - (1 - \mu)V_c \quad (\text{II.21})$$

$$V_0 = Ri \quad (\text{II.22})$$

Dans les conditions idéales, c'est à dire : interrupteur idéal, capacité idéale et inductance idéale, le hacheur Boost peut être modélisé en utilisant les équations différentielles ordinaires suivantes :

$$C \frac{dV_c}{dt} = (1 - \mu)i_l - \frac{V_0}{R} - i_0 \quad (\text{II.23})$$

$$L \frac{di_l}{dt} = V_{in} - (1 - \mu)V_0 - R_l i_l \quad (\text{II.24})$$

$$V_0 = V_c + R_c C \frac{dV_c}{dt} \quad (\text{II.25})$$

En insérant (2.6) dans (2.1) :

$$C \frac{dV_c}{dt} = (1 - \mu)i_l - \frac{V_c}{R} - \frac{R_c}{R} - \frac{R_c}{R} C \frac{dV_c}{dt} - i_0 \quad (\text{II.26})$$

Ce qui donne :

$$\left(1 + \frac{R_c}{R}\right) C \frac{dV_c}{dt} = (1 - \mu)i_l - \frac{V_c}{R} - i_0 \quad (\text{II.27})$$

Et :

$$\left(\frac{R+R_c}{R}\right) C \frac{dV_c}{dt} = (1 - \mu)i_l - \frac{V_c}{R} - i_0 \quad (\text{II.28})$$

D'où :

$$C \frac{dV_c}{dt} = \frac{R+R_c}{R} (1 - \mu)i_l - \frac{V_c}{R+R_c} - \frac{RR_c}{R+R_c} i_0 \quad (\text{II.29})$$

L'expression (2.6) devient :

$$V_0 = V_c + \frac{RR_c}{R+R_c} (1 - \mu)i_l - \frac{R_c}{R+R_c} - \frac{RR_c}{R+R_c} i_0 \quad (\text{II.30})$$

En développant cette expression de  $V_0$  on obtient :

$$V_0 = \frac{RV_c + R_c V_c - R_c V_c}{R+R_c} + \left(\frac{RR_c}{R+R_c}\right) [(1 - \mu)i_l - i_0] \quad (\text{II.31})$$

Et donc :

$$V_0 = \frac{RV_c}{R+R_c} + \left(\frac{RR_c}{R+R_c}\right) [(1 - \mu)i_l - i_0] \quad (\text{II.32})$$

L'expression (2.5) devient :

$$i_l = \frac{1}{T} \int (V_{in} - (1 - \mu)V_0 - R_l) dt \tag{II.33}$$

Avec :

u : position de l'interrupteur (0 ou 1)

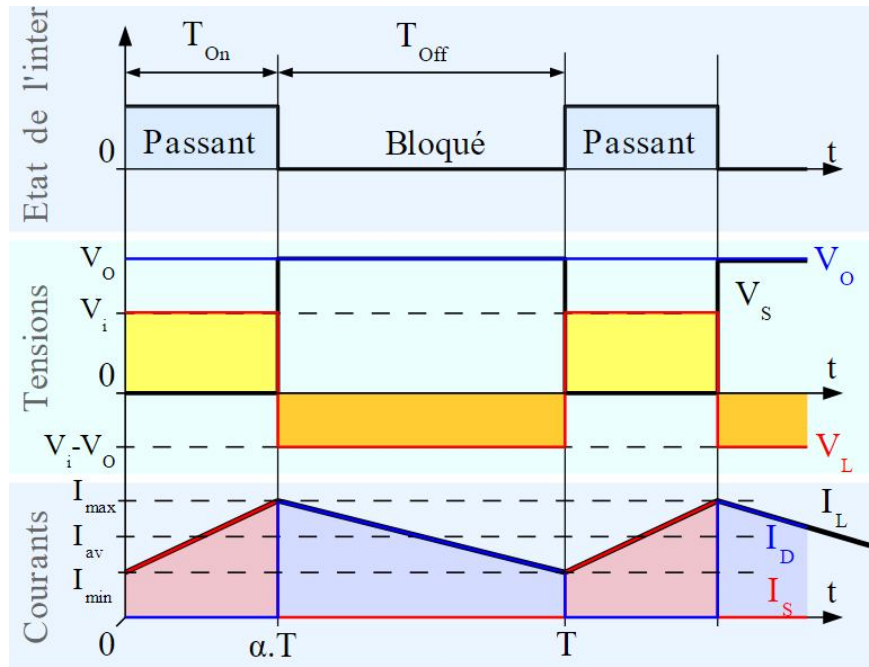


Figure (II.14) Forme d'ondes courant/tension du convertisseur Boost

### II.7.4 Avantages du convertisseur « BOOST » :

On utilise un convertisseur boost lorsqu'on désire augmenter la tension disponible d'une source continue. Les systèmes alimentés par batterie d'accumulateurs utilisent souvent plusieurs accumulateurs en série, afin de disposer d'un niveau de tension suffisamment élevé. La place disponible étant souvent limitée, il n'est pas toujours possible de disposer d'un nombre suffisant d'éléments. Un convertisseur boost permet d'augmenter la tension fournie par les batteries et ainsi diminuer le nombre d'éléments nécessaires pour atteindre le niveau de tension désiré. Les systèmes photovoltaïques sont des exemples typiques d'utilisation des convertisseurs boost.[avantage boost]

### II.8 Commande MPPT :

La commande MPPT, (Maximum Power Point Tracking), 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  $\alpha$  en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV [commande

**mppt]**. Pour cette raison, on va présenter et étudier par la suite les algorithmes de commande les plus populaires.

### II.8.1 Principe de la commande MPPT :

De nombreuses méthodes de poursuite de point de puissance maximale (MPPT) ont été développées pour permettre au système d'extraire le maximum de puissance du générateur photovoltaïque. Le principe de ces méthodes est de déplacer le point de fonctionnement en augmentant  $V_{pv}$ , lorsque  $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}}$  est positif ou en diminuant  $V_{pv}$ , lorsque  $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}}$  est négatif.

Lors du régime transitoire ou permanent, ces commandes doivent estimer et comparer la puissance avec celle de l'instant précédent. Les performances de celles-ci sont liées à la rapidité avec laquelle le point MPP est atteint, à la manière d'osciller autour de ce même point, mais aussi à la robustesse pour éviter une divergence lors de changements brutaux d'ensoleillement ou de charge.

### II.8.2 Différentes commandes MPPT :

#### II.8.2.1 Commande perturb & observe (P&O) :

Cette commande est un algorithme de poursuite du point de puissance maximale (PPM) le plus utilisé, et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de  $V_{ref}$  ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie en vue d'une éventuelle correction de ce rapport cyclique.

En effet, suite à cette perturbation, on calcule la puissance fournie par le panneau PV à l'instant  $k$ , puis on la compare à la précédente de l'instant  $(k-1)$ . Si la puissance augmente, on s'approche du point à maximum de puissance (PMP) et la variation du rapport cyclique est maintenue dans le même sens. Au contraire, si la puissance diminue, on s'éloigne du PMP. Alors, on doit inverser le sens de la variation du rapport cyclique.

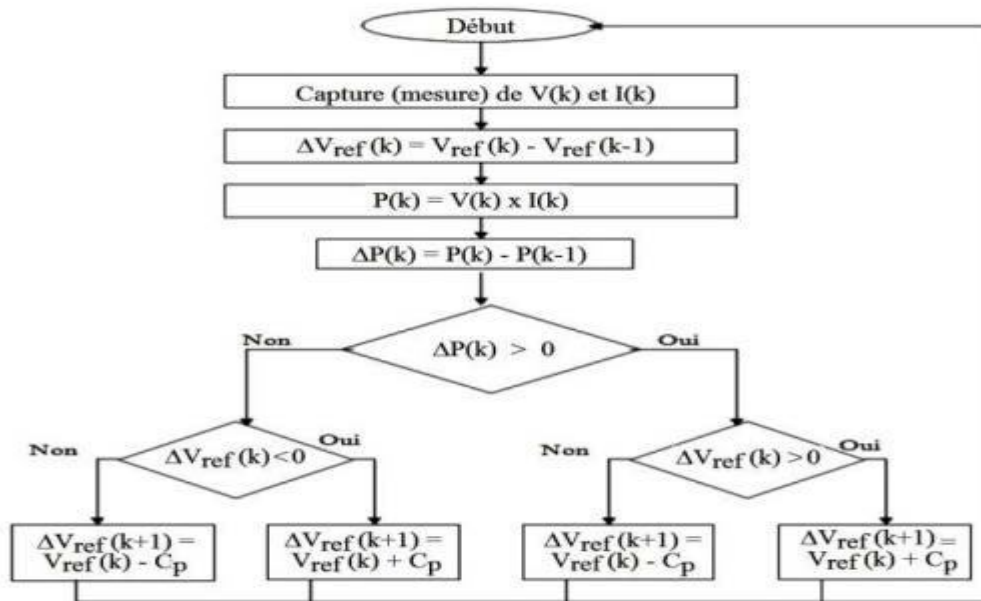


Figure (II.15) Organigramme de l'algorithme MPPT (P&O)

Ce processus fonctionne par une perturbation du système en augmentant ou en diminuant la tension de fonctionnement du module et observer son effet sur la puissance de sortie de la rangée. La figure (II.15) montre l'organigramme de l'algorithme de la méthode 'P&O', tel qu'il doit être implémenté dans le microprocesseur de contrôle. La tension et le courant  $V$  et  $I$ , sont mesurés pour calculer la puissance de sortie courante  $P(k)$  de la rangée. Cette valeur  $P(k)$  est comparée à la valeur  $P(k-1)$  de la dernière mesure. Si la puissance de sortie a augmenté, la perturbation continuera dans la même direction. Si la puissance a diminué depuis la dernière mesure, la perturbation de la tension de sortie sera renversée en direction opposée du dernier cycle.

Avec cet algorithme, la tension de fonctionnement  $V$  est perturbée à chaque cycle du MPPT. Dès que le MPP sera atteint,  $V$  oscillera autour de la tension idéale  $V_{mp}$  de fonctionnement. Ceci cause une perte de puissance qui dépend de la largeur du pas d'une perturbation simple  $C_p$ .

L'algorithme peut être représenté mathématiquement par l'expression suivante :

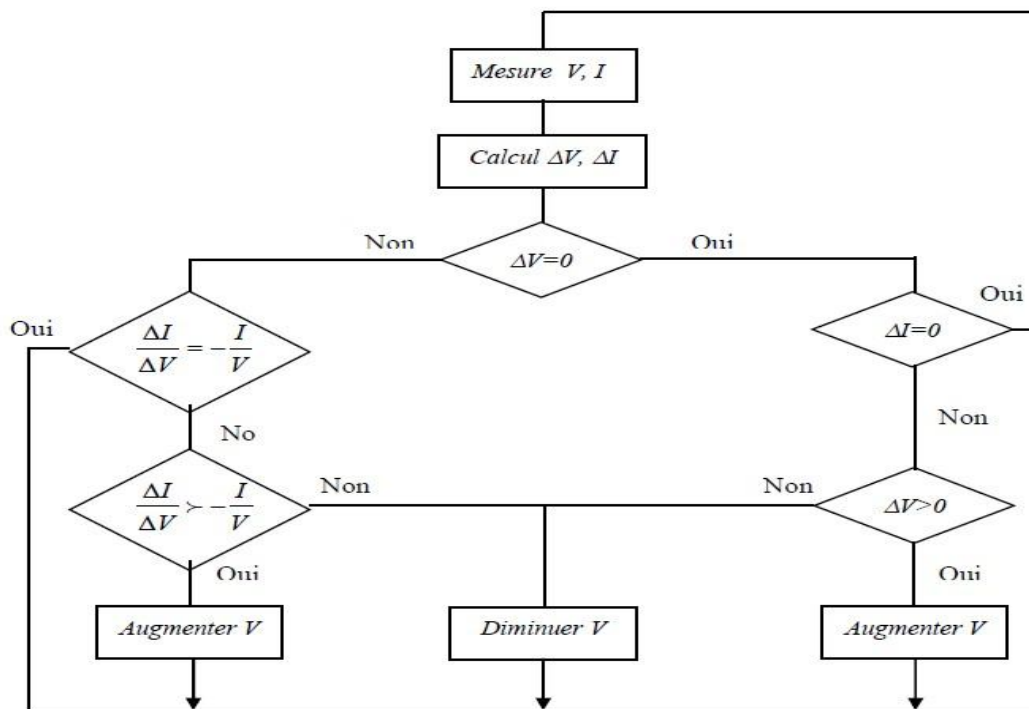
$$V_k = V_{(k-1)} + \Delta_{\theta} \times \text{signe} \left( \frac{d_p}{d_{\theta}} \right) \quad (\text{II.34})$$

Il est important de noter qu'avec l'algorithme P&O, la variable à contrôler peut être soit la tension soit le courant du GPV. Cependant, la variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui varie peu lors d'un changement climatique. La variation du rayonnement affecte davantage le courant que la tension photovoltaïque. Par contre, la variation de la température

modifie plus la tension du GPV. Néanmoins, la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV.

**II.8.2.2 Commande par incrémentation de la conductance :**

Le principe de cet algorithme est basé sur la connaissance de la valeur de la conductance  $G= I/V$  et sur l'incrément de la conductance ( $dG$ ) pour en déduire la position du point de fonctionnement par rapport au point de puissance maximale, (PMP). Si l'incrément de conductance ( $dG$ ) est supérieur à l'opposé de la conductance ( $-G$ ), on diminue le rapport cyclique. Par contre, si l'incrément de conductance est inférieur à l'opposé de la conductance, on augmente le rapport cyclique. Ce processus est répété jusqu'à atteindre le point de puissance maximale, (PMP)



**Figure (II.16)** Organigramme de l'algorithme MPPT (INC-CONDUCTANCE)

$$\frac{d_p}{d_g} = \frac{d_{(IV)}}{d_g} = (I + \vartheta) \frac{d_I}{d_g} = 0 \tag{II.35}$$

$$\frac{d_I}{d_g} = - \frac{1}{\vartheta} \tag{II.36}$$

Au MPP ces 02 membres doivent être égaux, ceci nous conduit aux équations suivantes :

$$(1 + \vartheta) \frac{d_I}{d_g} > 0 \Leftrightarrow \frac{d_I}{d_g} > - \frac{1}{\vartheta} \tag{II.37}$$

$$(1 + \vartheta) \frac{d_I}{d_g} < 0 \Leftrightarrow \frac{d_I}{d_g} < - \frac{1}{\vartheta} \tag{II.38}$$

De (4.4) le point de fonctionnement est à gauche du MPP donc il faut augmenter la tension pour atteindre le MPP.

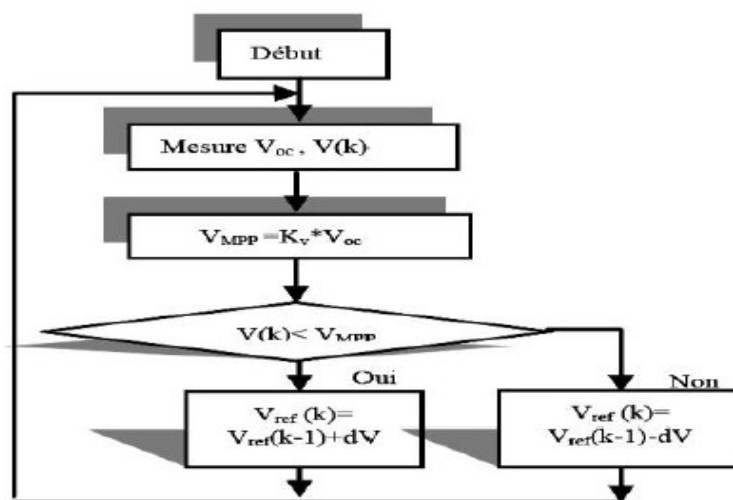
De (4.5) le point de fonctionnement est à droite du MPP donc il faut diminuer la tension pour atteindre le MPP.

**II.8.2.3 Commande en circuit ouvert :**

Cet algorithme est basé sur la relation linéaire entre la tension de circuit ouvert et la tension optimale donnée par l'équation suivante:

$$V_{MPP} = K \times V_{oc} \tag{II.39}$$

$K$  : Facteur de tension dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre 0.73 et 0.8.



**Figure (II.17)** Organigramme de l'algorithme MPPT (commande en circuit ouvert)

Pour en déduire la tension optimale, on doit mesurer la tension du circuit ouvert  $V_{oc}$ . Par conséquent, le point de fonctionnement du panneau est maintenu proche du point de puissance optimale en ajustant la tension du panneau à la tension optimale calculée. Le processus permet d'agir cycliquement sur le rapport cyclique pour atteindre la tension optimale.

**I.3.3.3 Commande en court circuit :**

Cette technique est basée sur la relation linéaire entre le courant de court-circuit et le courant optimal donné par l'équation suivante:

$$I_{MPP} = K \times I_{cc} \tag{II.40}$$

$K$  : Facteur de courant dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre 0.85 et 0.92.

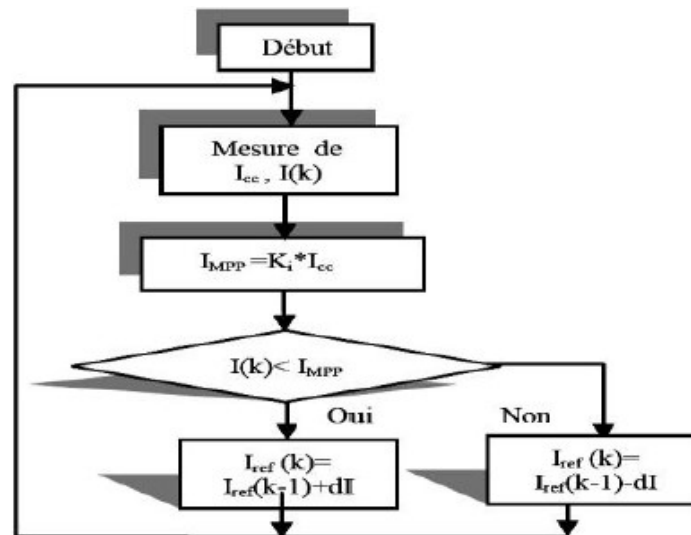


Figure (II.18) Organigramme de l'algorithme MPPT (commande en court circuit)


En effet, le point de fonctionnement optimal est obtenu en amenant le courant du panneau au courant optimal. Par conséquent, on change le rapport cyclique jusqu'à ce que le panneau atteigne la valeur optimale.

## II.9 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a fait la modélisation et la simulation d'un générateur photovoltaïque sous forme de matrice ayant  $N_{pp}$  colonnes de  $N_{ss}$  panneaux photovoltaïques en série. L'assemblage des modules photovoltaïques en matrice  $N_{pp} \times N_{ss}$  nous permet de réaliser le générateur photovoltaïque adéquat pour une alimentation voulue.

La simulation a montré que l'éclairement et la température sont des facteurs influents sur le rendement d'un générateur photovoltaïque. En plus de ces dépendances, le module solaire ne peut générer sa puissance maximale que pour une certaine tension et courant de fonctionnement, la position de ce point de fonctionnement dépendant à son tour de l'ensoleillement et de la température ainsi que de la charge. Pour que le module fournisse sa puissance maximale il faut que la charge ne soit pas directement relié au générateur PV mais adaptée en permanente par l'insertion d'un convertisseur DC-DC contrôlé par un mécanisme de poursuite MPPT (Maximum Power Point Tracking).

## Chapitre III



**Optimisation d'un  
système photovoltaïque  
par la commande  
MPPT floue.**

### **III .1. Introduction**

L'énergie solaire est l'une des sources d'énergie renouvelable les plus importantes. Malheureusement, les systèmes de génération PV ont deux problèmes principaux : le rendement de conversion de la génération d'énergie électrique est très basse (9 à 17%), particulièrement sous les basses irradiations, et la quantité d'énergie électrique développée par des panneaux solaires change sans cesse avec les conditions atmosphériques [J.Schaefer].

D'ailleurs, la caractéristique de la cellule solaire V-I est non-linéaire et change avec l'irradiation et la température. Il y a un point unique sur la courbe (V-P), appelé le point de la puissance maximale (MPP), auquel le système PV fonctionne avec un rendement maximum et produit sa puissance maximale. Par conséquent les techniques de poursuite de point maximum de puissance (MPPT) sont nécessaires pour maintenir le point du fonctionnement du panneau photovoltaïque à son MPP.

Dans ce chapitre nous avons présenté trois techniques d'optimisation à savoir deux techniques conventionnelles (P&O et INC) et une autre technique moderne basée sur l'introduction de la logique floue (MPPT Floue). Une étude comparative entre ces différentes méthodes sera établie.

### **III.2 Synthèse des différentes techniques de maximisation de la puissance**

Diverses publications sur des commandes assurant un fonctionnement de type MPPT apparaissent régulièrement dans la littérature depuis 1968, date de la publication de première commande sur ce type, adaptée à une source d'énergie renouvelable de type PV.

Dans un système électrique comprenant une source et une charge, la recherche du point de fonctionnement optimal par des techniques d'optimisation représente le point le plus important.

Dans le cas du photovoltaïque, cette démarche est plus complexe du fait que la caractéristique des cellules dépend fortement de l'ensoleillement et de la température ambiante, entre autres. Il faut trouver un dispositif permettant de fonctionner à tout moment suivant le point de fonctionnement optimal. Ces dernières années plusieurs dispositifs ont été développés, aussi élaborés les uns que les autres [A.T. Singo]. Dans la référence [V. Salas], les auteurs passent en

revue les différentes méthodes de maximisation de puissance classées en deux catégories : les méthodes indirectes et les méthodes directes.

### **III.2.1 Les méthodes indirectes**

Cette commande MPPT utilise un lien entre la variable mesurée ( $I_{sc}$  ou  $V_{co}$ ) et la position approximative du MPP qui peut être facilement déterminée. Il compte également les commandes basées sur des estimations de point de fonctionnement GPV dérivées d'un modèle de paramètres prédéfinis. Il existe également des commandes pour établir un suivi de tension optimal en ne considérant que le changement de température de la batterie donné par le capteur. L'avantage de ces commandes est qu'elles sont faciles à exécuter. Ils sont conçus pour des systèmes peu coûteux et imprécis qui doivent fonctionner dans des zones géographiques à faible changement climatique. Parmi ces méthodes, nous avons trouvé des méthodes de tension en circuit ouvert de générateur, des méthodes de court-circuit, ...etc. [F. BENADEL]

### **III.2.2 Les méthodes directes**

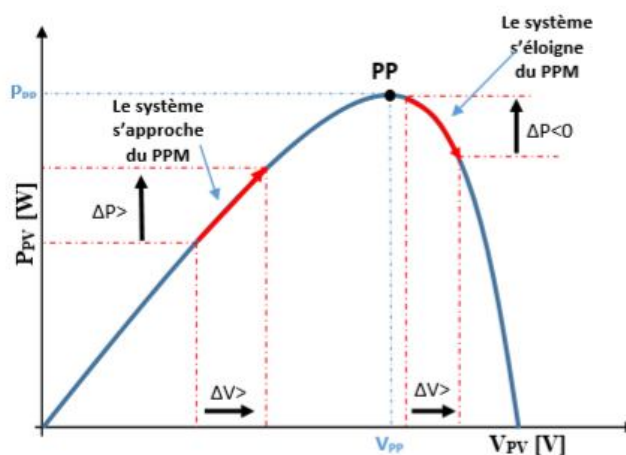
Ce type de commande MPPT détermine le meilleur point de fonctionnement (MPP) en fonction du courant, de la tension ou de la puissance mesurés dans le système. Par conséquent, il peut réagir à des changements imprévisibles dans le fonctionnement de GPV. Généralement, ces processus sont basés sur des algorithmes de recherche, avec lesquels la courbe de puissance maximale peut être déterminée sans interrompre le fonctionnement. Pour cette raison, la tension du point de fonctionnement augmentera périodiquement. Si la puissance de sortie est élevée, passez à la direction de recherche suivante, sinon elle sera inversée. Ensuite, le point de fonctionnement réel oscille autour du MPP.

D'autres algorithmes peuvent conserver ce principe de base pour éviter les malentendus. Ces erreurs se produisent, par exemple, en raison de la différence de direction de recherche, qui est provoquée par une augmentation de puissance, qui est provoquée par une augmentation rapide du niveau de rayonnement. La détermination de la valeur de puissance du générateur MP est essentiel pour la recherche du MPP, il faut mesurer la tension et le courant du générateur et le produit de ces deux variables. Parmi ces méthodes, nous avons trouvé la méthode différentielle, la méthode Perturbe & Observe (P&O), l'incrément de conductance... etc. [F. BENADEL]

### III.2.2.1 La méthode Perturbe & Observe (P&O)

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode repose sur la perturbation (une augmentation ou une diminution) de la tension  $V_{ref}$ , ou du courant  $I_{ref}$ , et l'observation de la conséquence de cette perturbation sur la puissance mesurée ( $P=VI$ ) [Hajar Bagheri]. Cependant, la variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui varie peu lors d'un changement climatique. La variation du rayonnement affecte davantage le courant que la tension photovoltaïque. Par contre, la variation de la température modifie plus la tension du GPV. Néanmoins, la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV [Dalia Al Maamoury].

Le principe de commande P&O consiste à provoquer une perturbation de faible valeur sur la tension  $V_{PV}$ , ce qui engendre une variation de la puissance [Bisker Asma, Chiri Meriem]. Figure III.5 montre qu'on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension  $V_{pv}$  engendre un accroissement de la puissance  $P_{pv}$ , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique  $P(V)$ , il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié



**Figure (III.1) : Recherche du PPM par la méthode (P&O)**

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique  $p(v)$ , il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du GPV à chaque instant. L'utilisation d'un microprocesseur est plus appropriée pour la réalisation de la méthode P&O, même si des circuits analogiques peuvent être utilisés [Akihiro Oi].

La figure (III.2) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (mesurant le courant et la tension des panneaux PV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.

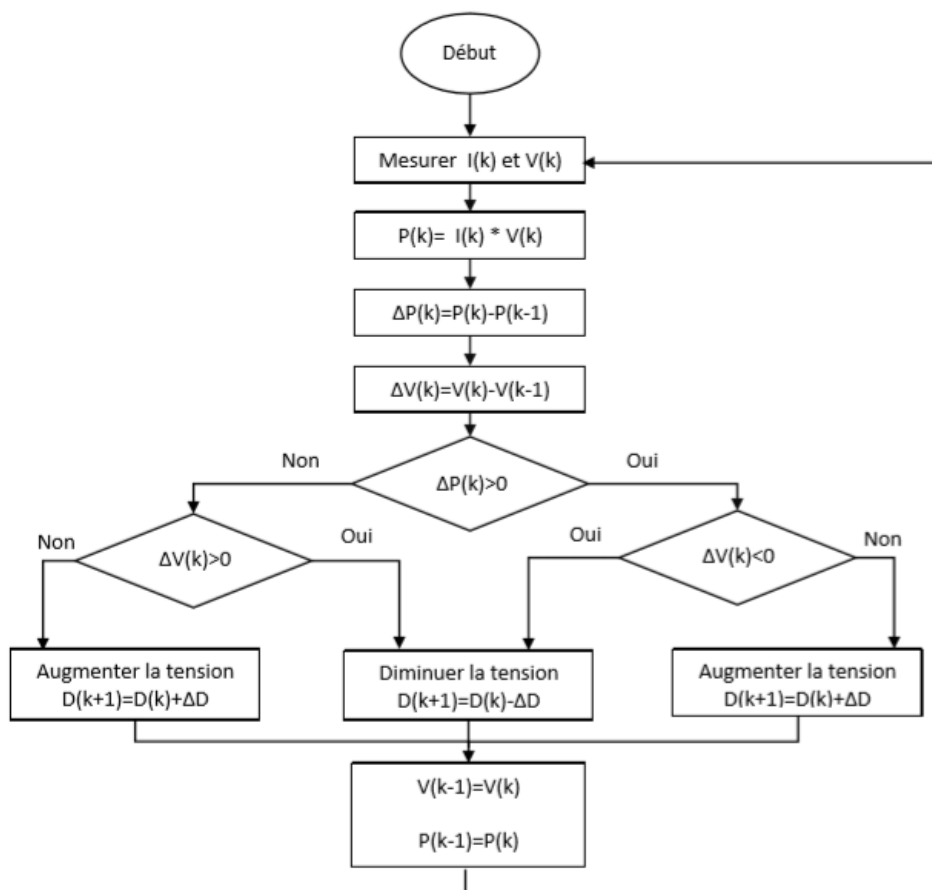
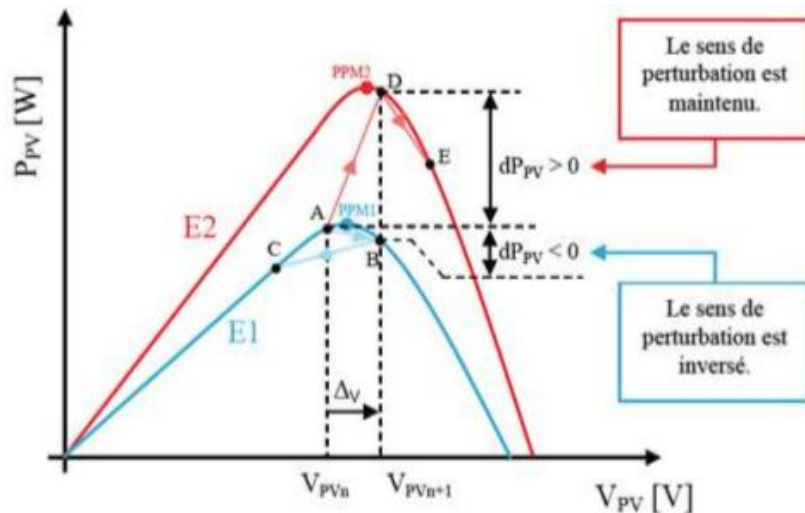


Figure (III.2): Algorithme de la méthode P&O.

Si on analyse en détail ce mode de recherche, il présente des erreurs d'interprétation au niveau de la direction à suivre pour atteindre le MPP lorsque des variations brusques des conditions climatiques et/ou de charge apparaissent, comme cela est décrit sur **la figure (III.3)**



**Figure (III.3) :** Divergence de la commande P&O lors de variations d'irradiation [Akihiro Oi].

Pour comprendre, prenons l'exemple d'un éclairement donné, noté E1, avec un point de fonctionnement se situant en A. Suite à une perturbation de tension de valeur  $\Delta V$ , ce dernier bascule en B, impliquant, dans un fonctionnement sans variation d'éclairement, une inversion du signe de la perturbation due à la détection d'une dérivée de la puissance négative. Ceci entraîne en régime d'équilibre, des oscillations autour du MPP causées par la trajectoire du point de fonctionnement entre les points B et C. On peut noter que des pertes de transfert de la puissance seront plus ou moins importantes en fonction des positions respectives des points B et C par rapport à A. Lors d'un changement d'irradiation (évolution des caractéristiques P(V) du module de E1 à E2), le point de fonctionnement se déplace alors de A vers D, qui est interprété dans ce cas-là, par une variation positive de la puissance. Le système n'ayant pas la possibilité de voir l'erreur de trajectoire liée au changement de caractéristique, le signe de la perturbation ne change pas et le système s'éloigne momentanément du MPP en direction du point E. Au mieux, ceci occasionne une non optimisation de la puissance momentanée. Au pire des cas, le système de recherche peut se perdre et se retrouver en butée, soit en circuit ouvert soit en court-circuit entraînant une perte définitive du MPP. Il en résulte donc, en cas de conditions météorologiques défavorables, de fortes lacunes au niveau de la commande.

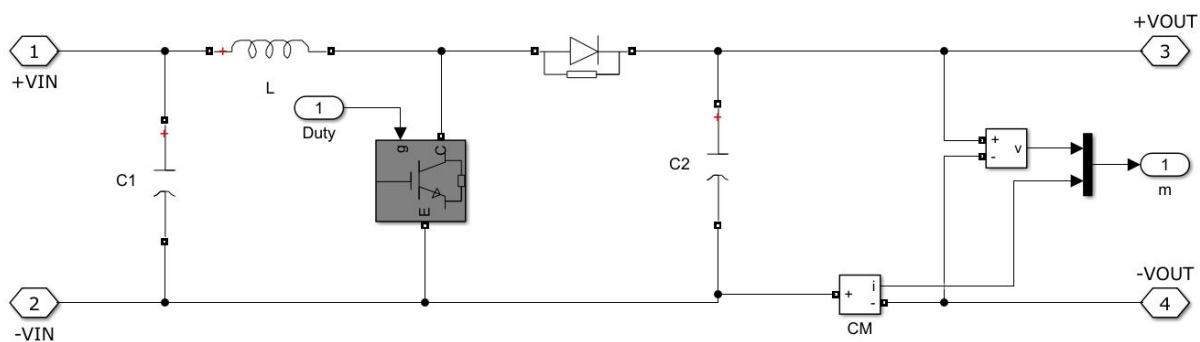
La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée de part sa facilité d'implémentation. Cependant, elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du MPP qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du MPP doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du MPP. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation.

Cependant, une faible valeur d'incrément ralentit la recherche du MPP, il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité, ce qui rend cette commande difficile à optimiser.

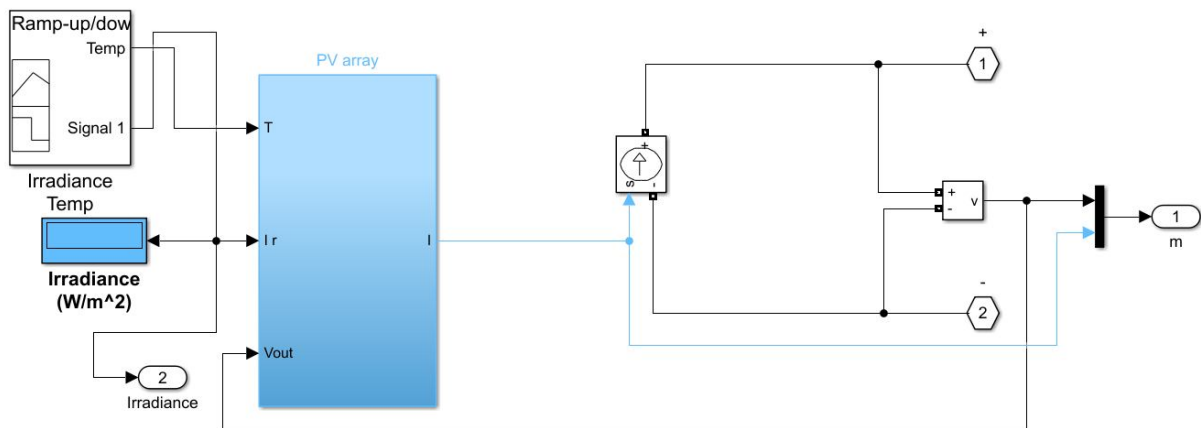
Il est connu que ce type de commande permet d'obtenir un rendement plus important durant une journée relativement ensoleillée, où le MPP évolue lentement et proportionnellement avec le soleil. Par contre, pour une journée avec de forts et fréquents changements d'irradiations, cette commande présente beaucoup plus de pertes, en raison du temps de réponse de la commande pour atteindre le nouveau MPP.

### III.2.2.2 Simulation de la méthode MPPT par l'algorithme P&O :

Le convertisseur DC-DC et le générateur photovoltaïque avec la commande MPPT en utilisant l'algorithme P&O. les deux simulations suivantes :



**Figure (III.4):** DC-DC Boost Converter.



Figure(III.5) pv array.

### III.2.2.3 L'incrément de conductance

Pour rechercher les PPM, cette autre technique se base sur la connaissance de la variation de conductance du GPV et des conséquences sur la position du point de fonctionnement par rapport à un PPM [D. Picault,]. La dérivée de la puissance de sortie du panneau est calculée en fonction de la tension  $V$  et sa différence  $dV$  et du courant  $I$  et sa différence  $dI$ .

Cette dérivée est nulle au point de puissance maximale, positive à gauche du point MPP et négative à droite (équations (III.2 – III.3), **Figure(III.6)**).

La puissance du panneau solaire est donnée par :

$$P = VI \quad (III.1)$$

La dérivé partielle  $\frac{dP}{dV}$  est donnée par :

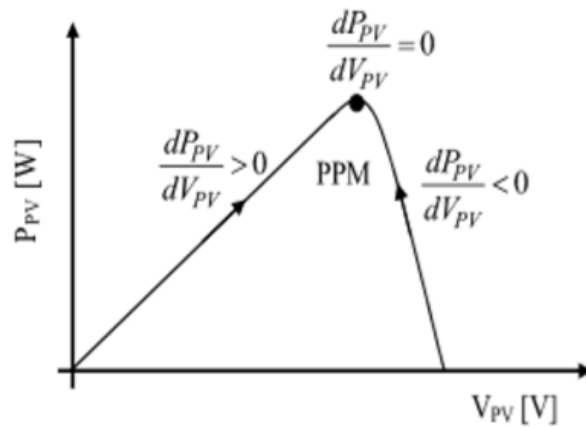
$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (III.2)$$

$$\frac{1}{V} \frac{dP}{dV} = \frac{1}{V} + \frac{dI}{dV} \quad (III.3)$$

On définit la conductance de la source  $G = \frac{1}{V}$  et l'incrémentale conductance  $\Delta G = \frac{dI}{dV}$

- Si  $\frac{dP}{dV} > 0$ , le point de fonctionnement est sur la gauche de PPM
- Si  $\frac{dP}{dV} = 0$ , le point de fonctionnement est sur PPM

- Si  $\frac{dP}{dV} < 0$ , le point de fonctionnement est sur la droite du PPM



**Figure (III.6):** Principe de fonctionnement de l'algorithme INC

L'avantage principal de cet algorithme est qu'il est adapté aux conditions climatiques instables car, théoriquement, il est possible de trouver un MPP et de s'y immobiliser si la perturbation cesse. Dans ce cas-là, la variation de tension est nulle ; l'apparition d'une variation de courant permet d'ajuster la valeur de la tension de référence pour atteindre un nouveau MPP. C'est une propriété intéressante par rapport à la P&O car en régime établi, il n'y a pas d'oscillations autour du MPP. De plus, cette méthode ne présente pas de risques de divergence par rapport au MPP. En Pratique, il existe une oscillation autour du MPP qui est néanmoins inférieure à celle de la méthode de P&O [Akihiro Oi]. **La figure (III.7)** présente le diagramme de l'algorithme de l'incrément de conductance.

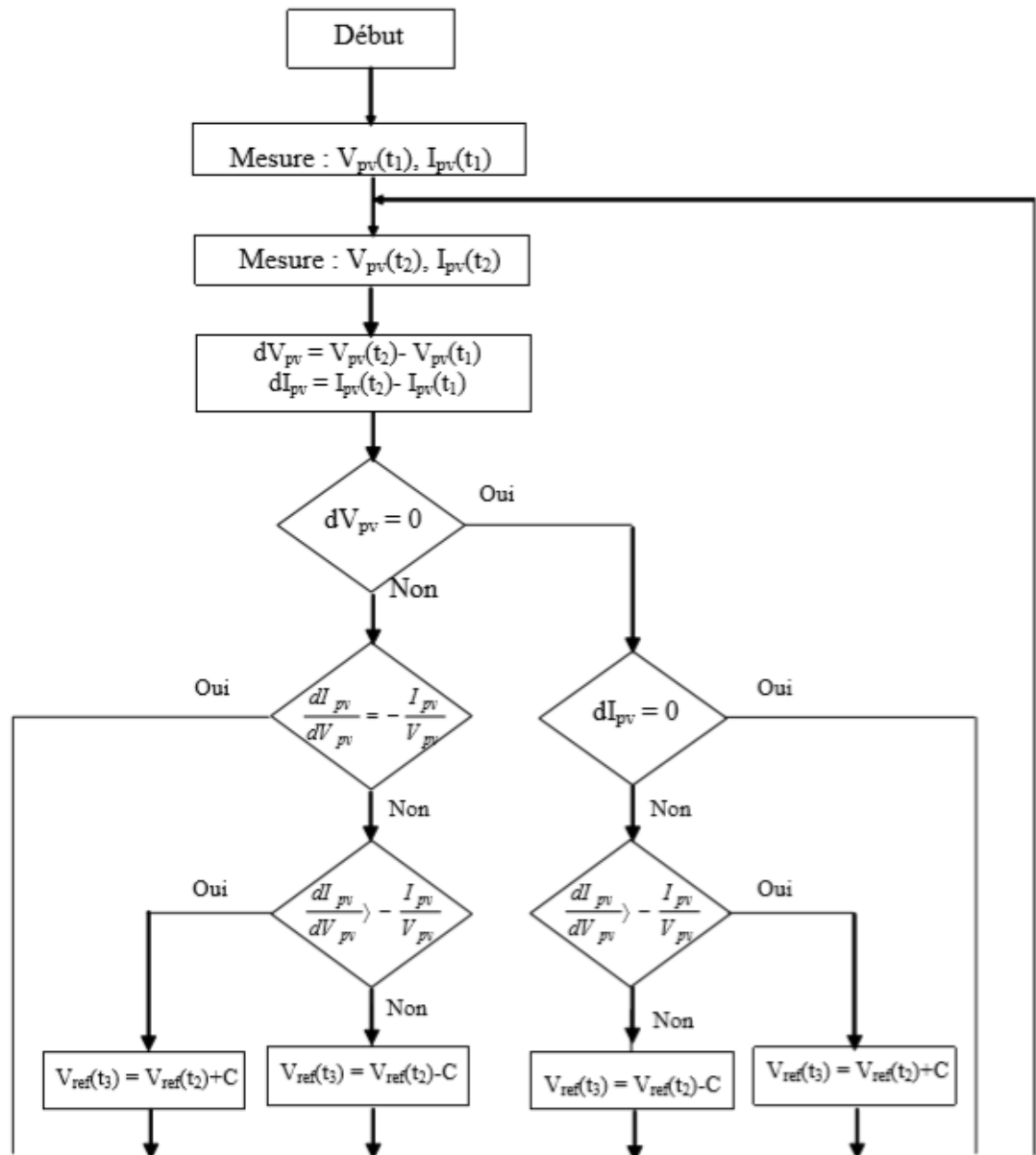
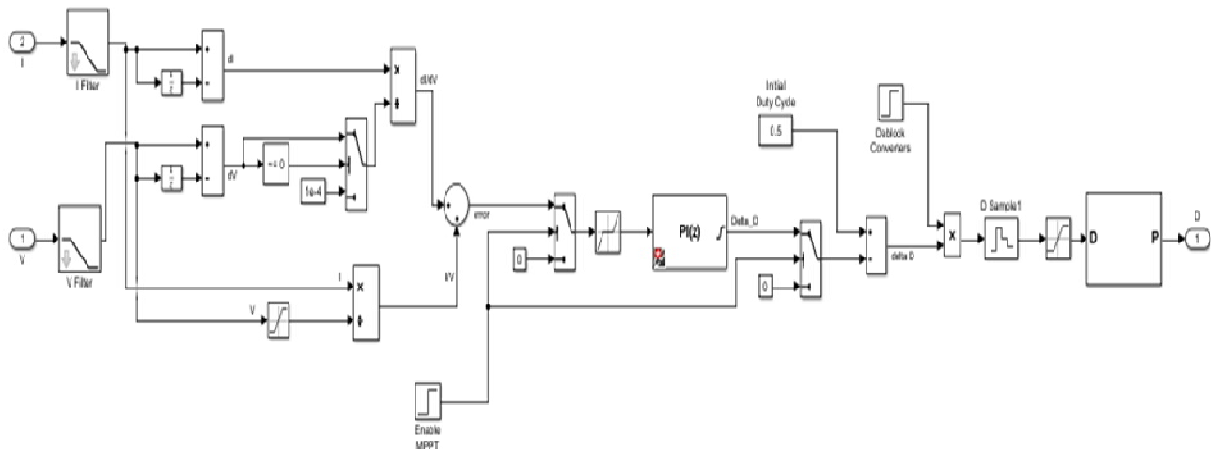


Figure (III.7) : Algorithme de l'incrément de conductance [V. Salas].

### III.2.2.4 Simulation de la méthode L'incrément de conductance:



**figure (III.8) :** Bloc simulink de suivi du point de puissance maximale par méthode de conductance incrémentale.

### III.2.2.5 Commande MPPT basée sur la logique floue :

La commande basée sur la logique floue est de plus en plus populaire grâce à l'évolution des microcontrôleurs [M. Abou El Ela, J. Roger , T. Noguchi,]. L'avantage de cette technique est qu'elle peut fonctionner avec des valeurs d'entrées peu précises et qu'elle n'a pas besoin de modèle mathématique de grande précision. De plus, elle peut traiter des non linéarités.

La logique floue est une théorie qui a connu un grand succès depuis que L. Zadeh a introduit le concept de sous-ensembles flous en 1965. Elle trouve notamment sa place dans le domaine de la commande pour une large gamme de systèmes et plus généralement en génie électrique [Ch. Hua, J. Lin, Ch. Shen].

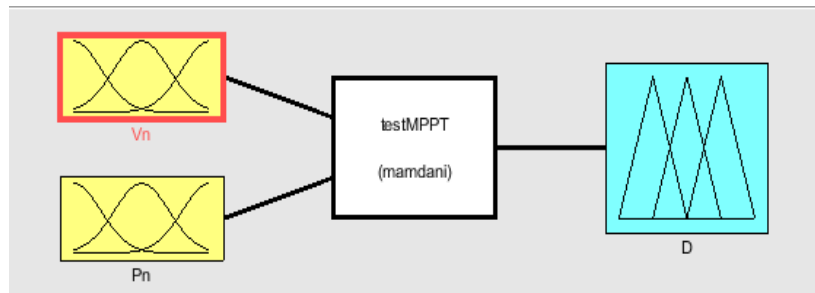
Elle présente en effet l'avantage d'utiliser des règles linguistiques simples permettant de traduire facilement le savoir faire d'un expert pour répondre à une problématique spécifique. Dans ce sens on utilise des correcteurs à base de logique floue qui améliorent de façon globale aussi bien les performances dynamiques que la robustesse des systèmes commandés, en s'appuyant sur leur connaissance à priori. Le principe d'une commande floue se base sur deux variables d'entrées qui sont l'erreur  $E$  et la variation de l'erreur  $\Delta E$  et une variable de sortie  $\Delta D$  (variation du rapport cyclique), **figure (III.9)** La valeur de la variable de sortie, qui pilote le convertisseur statique pour rechercher le PPM, est

déterminée à l'aide d'une table de décision et de l'évolution des paramètres d'entrées. L'erreur  $E$  est définie comme étant l'écart entre  $\frac{dP}{dV}(k)$  et la valeur recherchée  $\frac{dP}{dV} = 0$  qui correspond au Maximum de la courbe  $P - V$ . Si  $E$  est positif alors la valeur de  $P$  croit. Si  $E$  est négatif alors la valeur de  $P$  décroît. Quand  $E$  est aux environs de zéro alors la valeur de  $P$  est aux environs de  $MPP$ .

$$E(k) = \frac{dP}{dV}(k) - 0 = \frac{dP}{dV}(k)$$

Qui est la pente de la courbe  $P-V$  au point de fonctionnement actuel. La variation de l'écart  $\Delta E$  indique dans quel sens et dans quelle proportion l'écart se modifie à mesure que l'algorithme suit son cours. Ainsi, lorsque  $\Delta E$  tend vers 0, le système se stabilise.

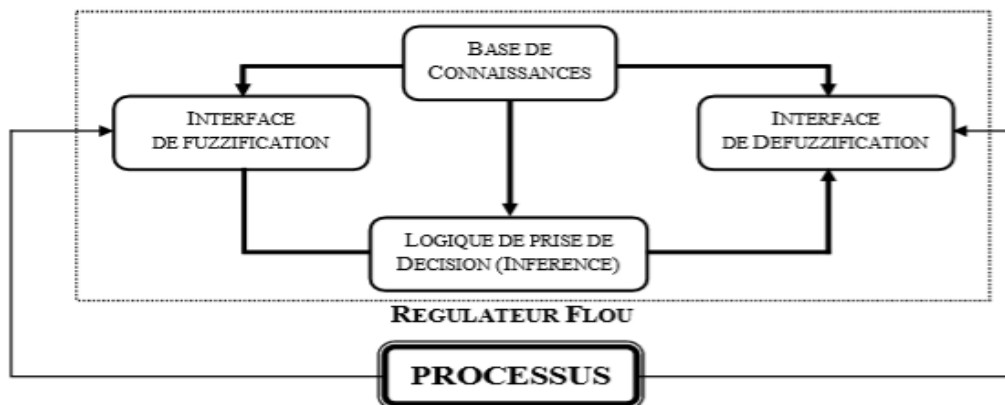
$$\Delta(k) = E(k) - E(k - 1)$$



**Figure (III.9)** Configuration globale du contrôleur à logique floue sous Matlab/Simulink

La méthode consiste à formuler un ensemble de règles de décision en termes linguistiques, utilisant les ensembles flous pour décrire les amplitudes de l'erreur, de sa variation et la commande appropriée. En combinant ces règles, on peut dresser des tables de décision permettant de donner les valeurs de la sortie du contrôleur correspondant aux situations d'intérêt.

La structure générale d'un système de commande linguistique flou peut être présentée sous la forme suivante, **figure( III.10)**.



**Figure (III.10)** Schéma synoptique général d'un contrôleur flou

Où :

- L'interface de fuzzification : consiste à transformer les entrées en variables floues (linguistiques) avec la définition des fonctions d'appartenance.
- La base de connaissances : une base de données dont laquelle se trouve les définitions nécessaires utilisées pour définir les règles de contrôle linguistiques et la manipulation des données floues dans le régulateur.
- La logique de prise de décision : c'est le noyau du régulateur, elle est capable de simuler la prise de décision de l'être humain.
- L'interface de défuzzification: son rôle est de convertir les variables de l'action de commande floue en variables de commande réelle.

Les règles d'inférences permettent de déterminer le comportement du contrôleur flou. Il doit donc inclure des étapes intermédiaires qui lui permettent de passer des grandeurs réelles vers les grandeurs floues et vice versa, ce sont les étapes de fuzzification et défuzzification [D. Sera, T. Kerekes, R. Teodorescu, F. Bładjerg].

Le contrôleur à logique floue utilisé dans ce document est défini par la figure 3.7. Il possède deux variables d'entrées  $E$  et  $\Delta E$  et une variable de sortie  $D$ . Les variables considérées vont permettre de contrôler la position du point de fonctionnement du générateur par rapport au point de fonctionnement maximal comme on l'a expliqué auparavant. Chaque variable utilise les cinq termes linguistiques suivant :

**PB**: Positive Grand, **PS**: Positif Petit, **ZE**: Environ Zéro, **NS**: Négatif Petit et **NB** : Négative Grande

La **Figure (III.11)**, donne les fonctions d'appartenance pour les variables d'entrées et de sorties du contrôleur. Les univers de discours utilisés sont  $[-5, 5]$ .

Les **49 règles d'inférence** sont récapitulées dans le tableau 3.1 ci-dessous :

Rules for a fuzzy system.

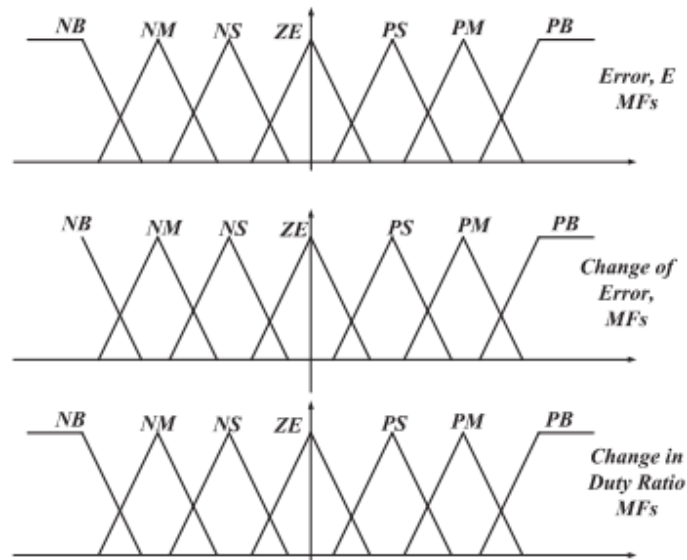
<i>E</i>	$\Delta E$						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

La détermination des règles du contrôleur proposé fait appel à l'expertise et à l'expérience. On a considéré les objectifs qu'on devait atteindre puis on a écrit les règles en conséquence.

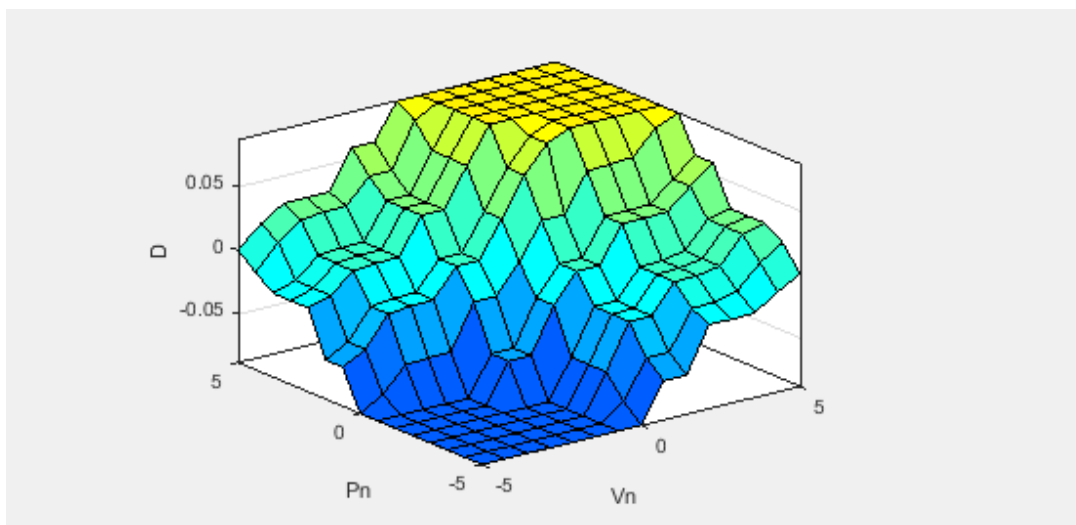
Dans le contrôleur flou proposé la méthode d'inférence utilisée est celle de max min et pour la défuzzification on a utilisé la méthode du centre de gravité.

L'instruction « fuzzy » de Matlab a été utilisée pour concevoir le contrôleur à logique flou proposé et qui a été enregistré dans le fichier « testMPPT.fis ».

La **Figure(III.12)** montre la surface caractéristique du contrôleur flou proposé, elle exprime les variations de la valeur réelle de la sortie du contrôleur en fonction des entrées quand ces dernières parcourent l'univers de discours.



**Figure (III.11)** Fonctions d'appartenance pour les variables d'entrée et de sortie du contrôleur flou :  $E=V_n$ ,  $\Delta E=P_n$  et  $D$



**Figure(III.12)** Surface caractéristique du régulateur flou

### III.2.2.6 Simulation de la méthode MPPT par logique floue

De la même manière que pour la méthode MPPT avec l'algorithme P&O, considérons un générateur PV composé de cinq colonnes de dix panneaux en série chacune, relié à une charge à travers un convertisseur DC-DC contrôlé par la commande MPPT en utilisant la logique floue. Pour pouvoir faire une comparaison des méthodes MPPT, on va effectuer les mêmes simulations que dans le cas de la méthode MPPT avec l'algorithme P&O.

La Figure(III.13) montre le modèle Simulink « MPPT\_Floue.mdl » utilisé pour les deux simulations. Le bloc MPPT floue contient le contrôleur à logique floue proposé. Ce bloc qui est représenté par la Figure(III.14) utilise le courant et la tension mesurés pour calculer les variables  $V_n$  et  $P_n$ , puis les introduit dans le contrôleur à logique floue pour calculer  $D$ . Un intégrateur de condition initiale 0.8 est utilisé pour calculer le rapport cyclique  $D$ .

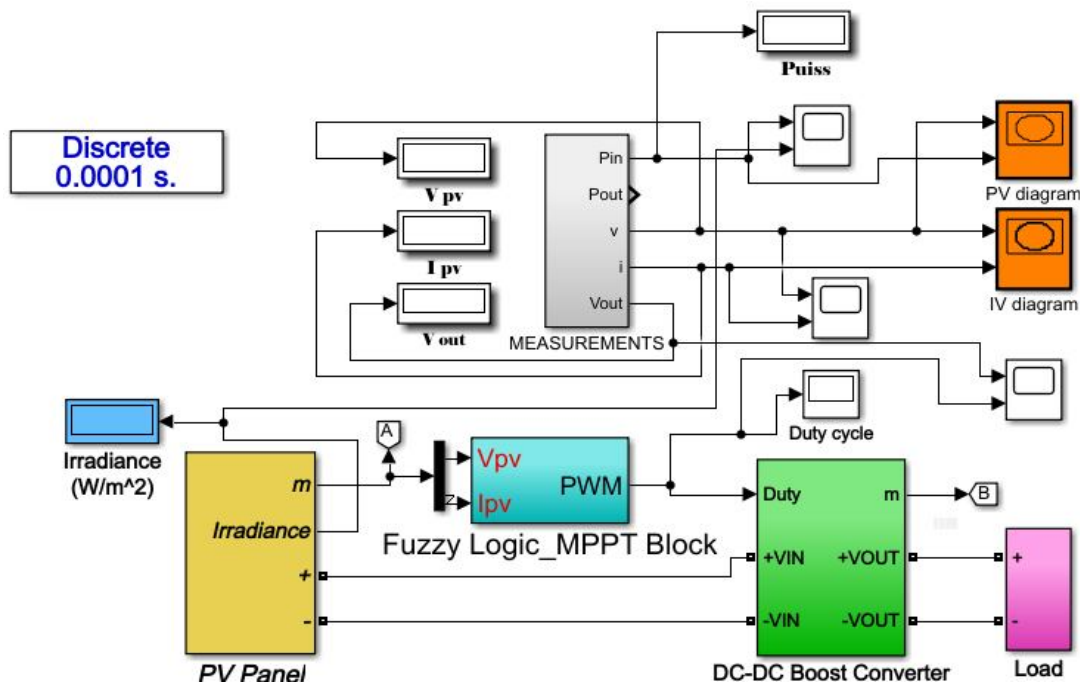
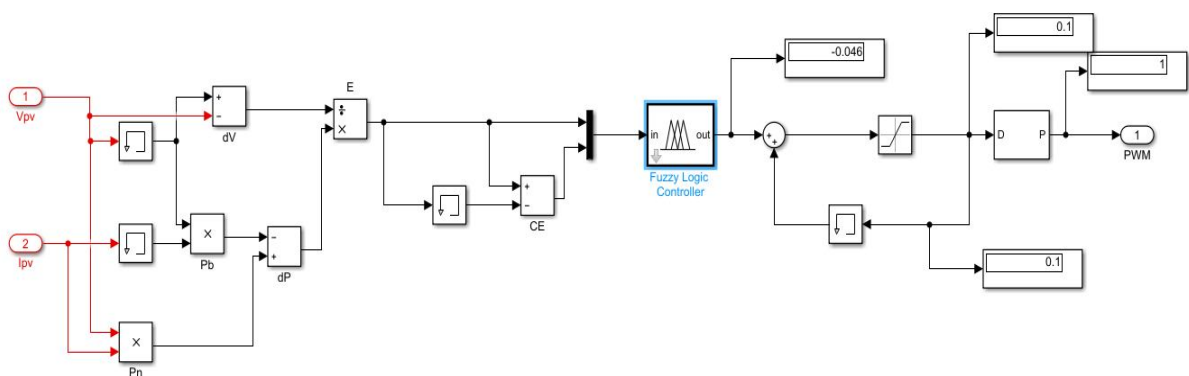


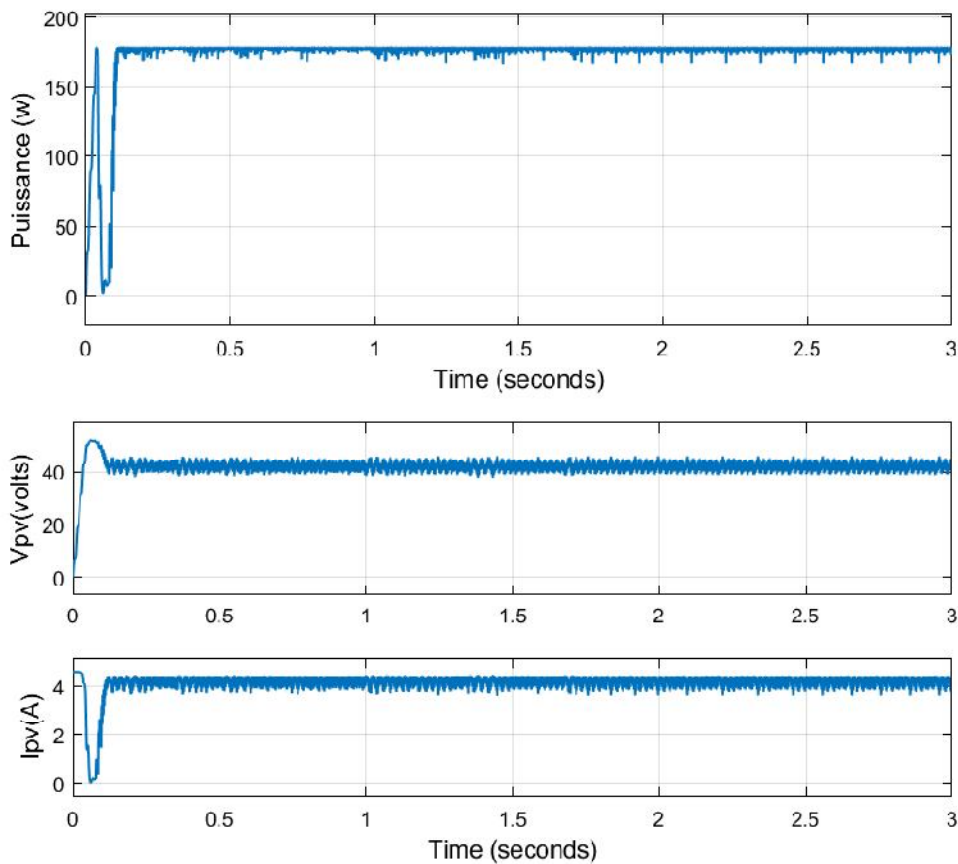
Figure (III.13) : Modèle Simulink d'un générateur PV relié à une charge à travers un convertisseur DC-DC Boost contrôlé par MPPT à logique floue



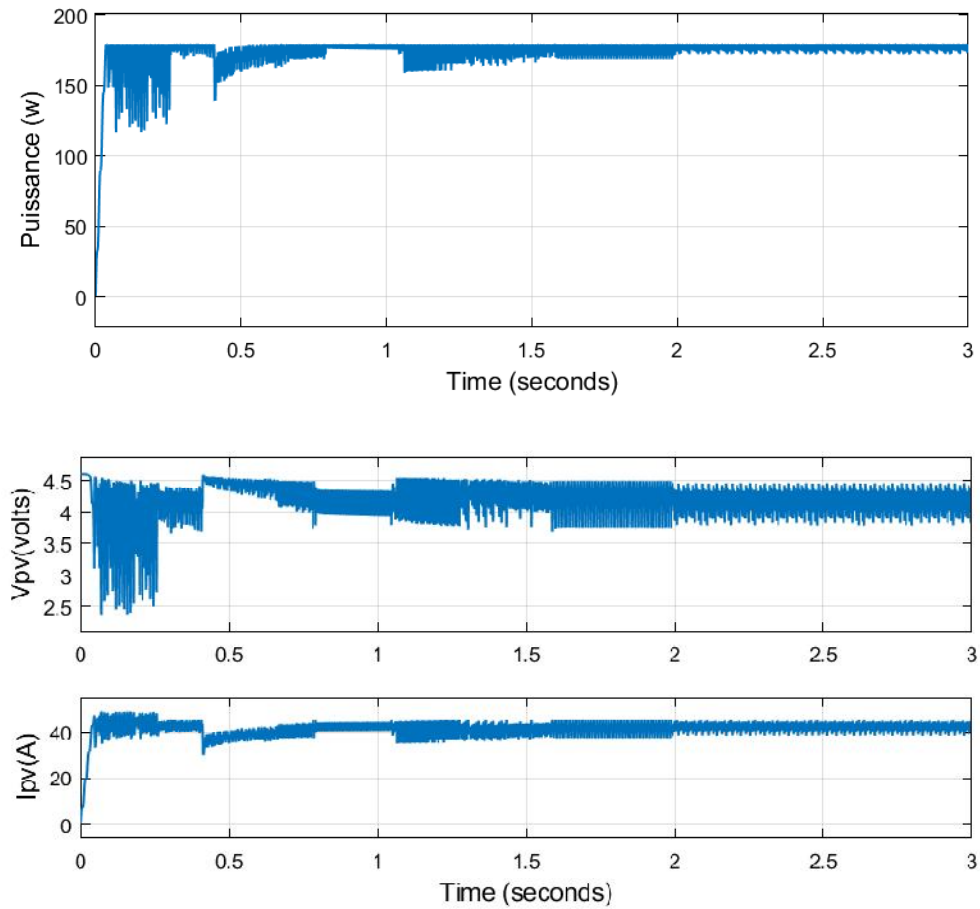
Figure(III.14) : Modèle Simulink du Bloc contrôleur MPPT floue de la Figure (III.13).

### III.3. Résultats de simulation

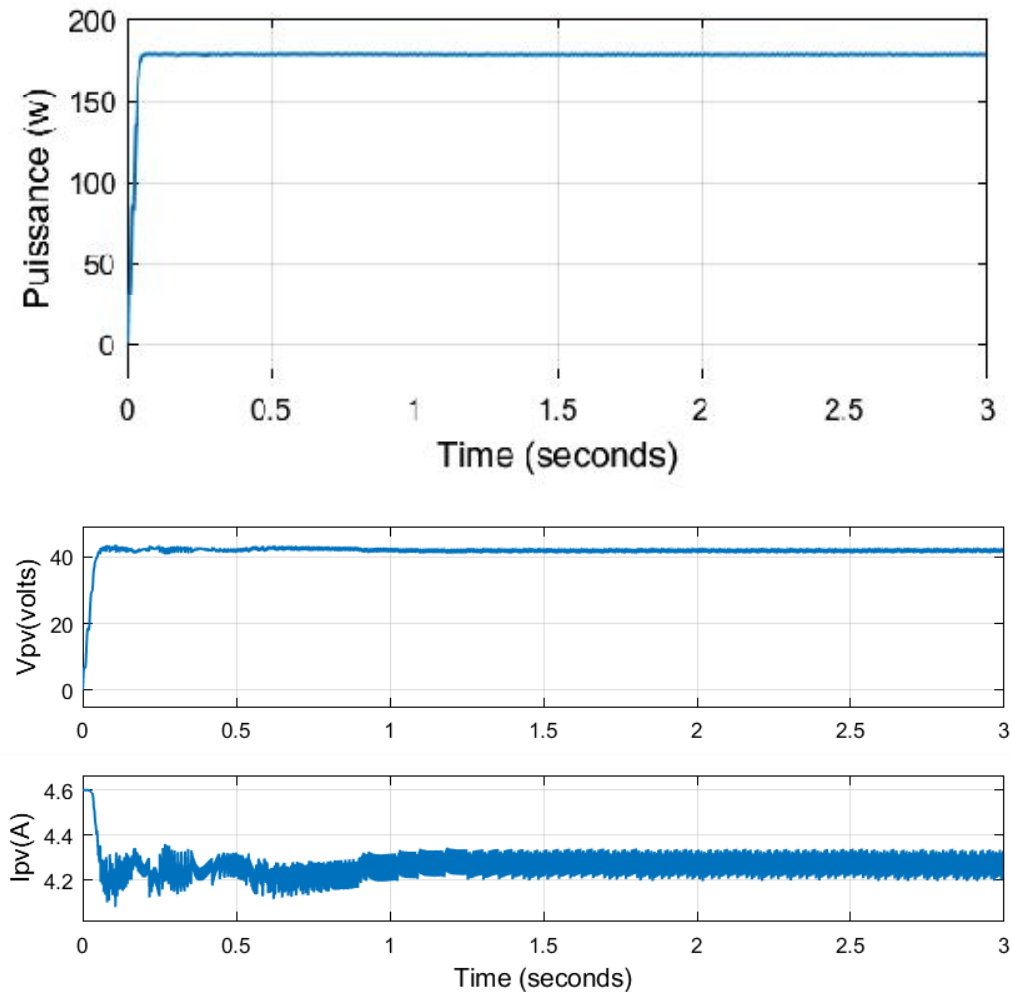
Sur les figures (III.15), (III.16) et (III.17), sont représentés respectivement, pour un éclairement constant de 1000 W/m<sup>2</sup> et une température de 25 °C, les résultats typiques de simulation, dans l'environnement Matlab/Simulink, des caractéristiques électriques à la sortie du panneau et à la sortie du hacheur de type élévateur contrôlé par la commande MPPT\_P&O, MPPT\_INC et MPPT\_Floue.



**Figure ( III.15)** Résultats de simulation de la commande MPPT\_P&O



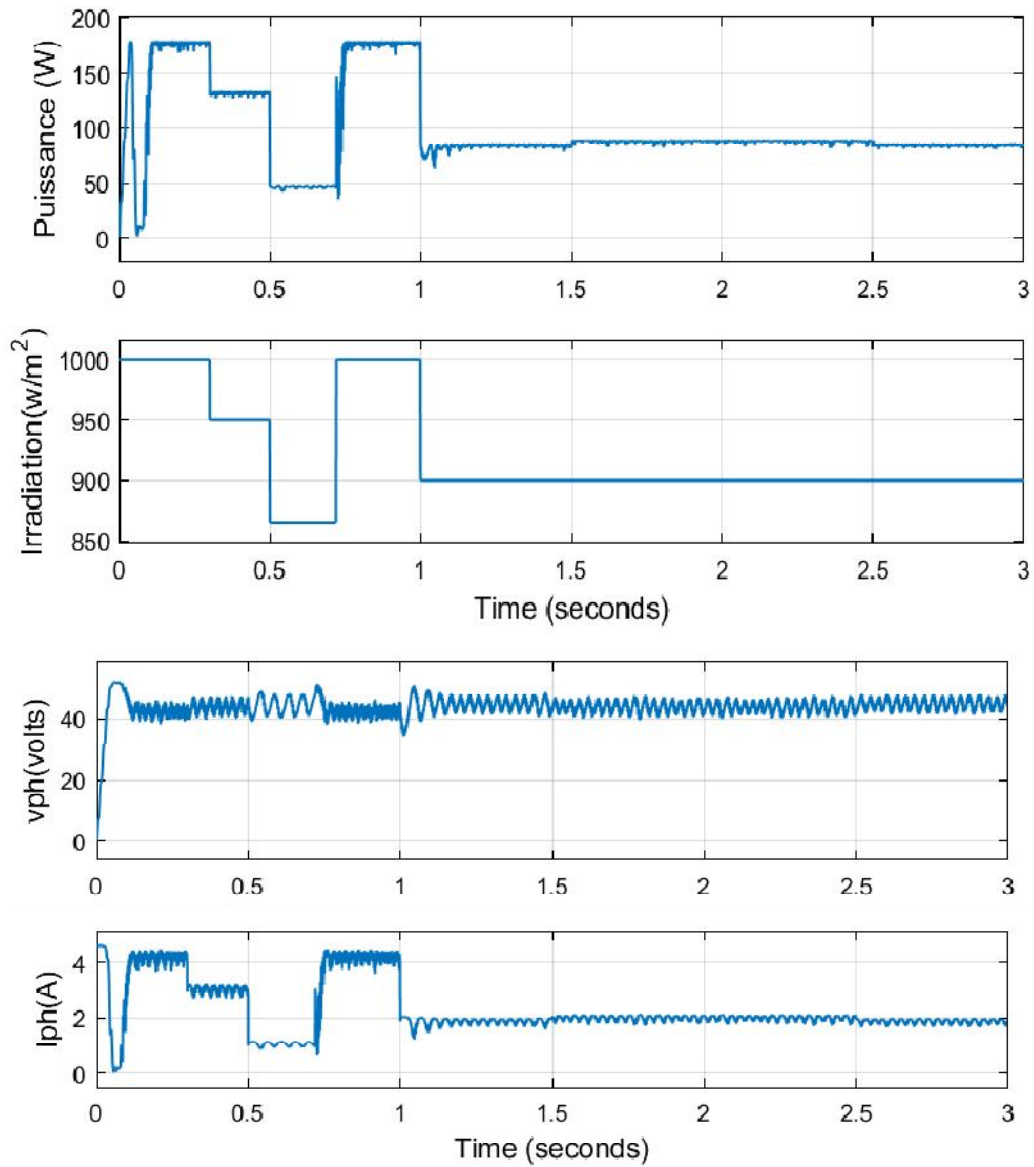
**Figure (III.16)** Résultats de simulation de la commande MPPT\_INC



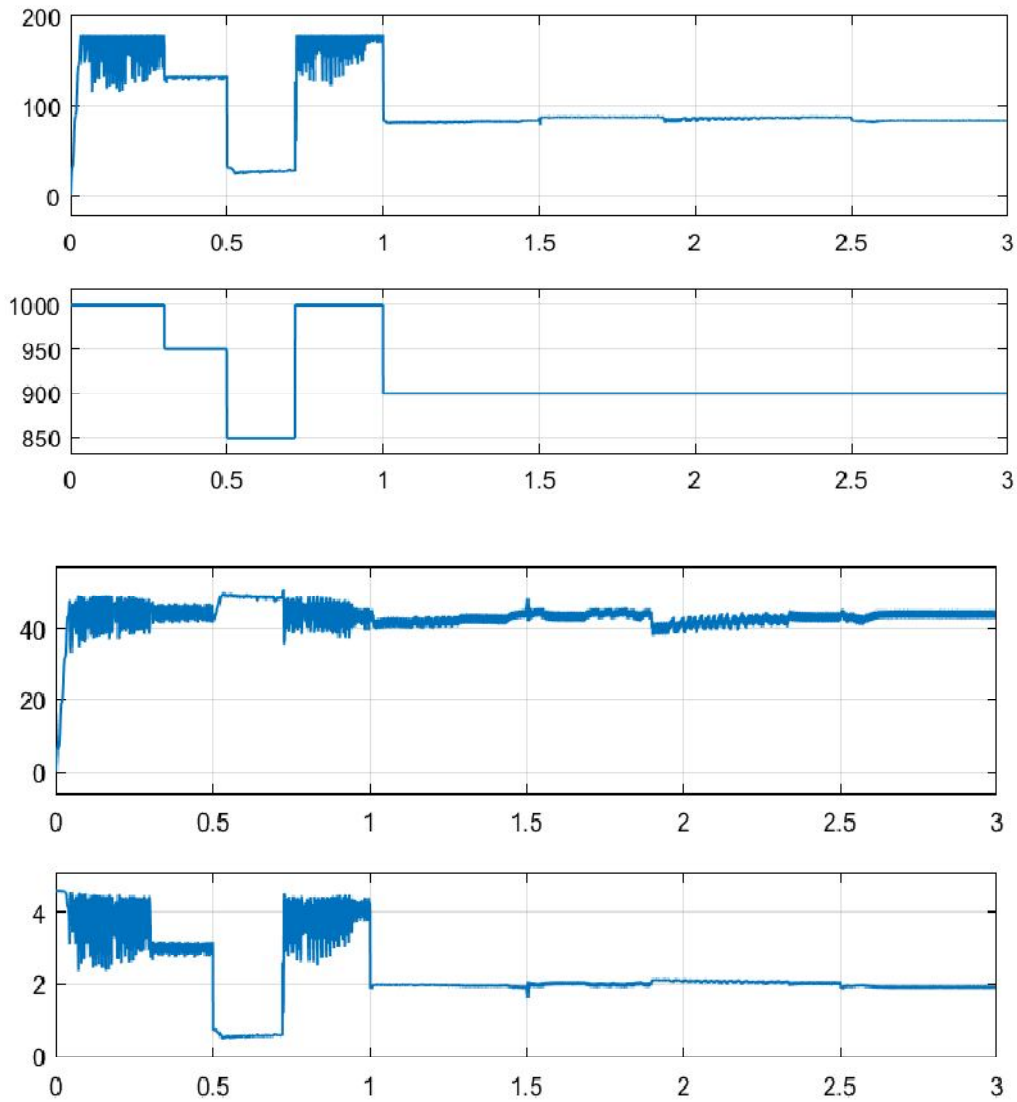
**Figure (III.17),** Résultats de simulation de la commande MPPT\_Fuzzy

On remarque bien que les contrôleurs flous sont plus rapides pour les différents niveaux de puissance ; on peut voir aussi que la PO présente des oscillations en régime permanent suite à la perturbation continue de la tension de fonctionnement, l'optimisation par la commande MPPT\_INC est plus perturbée pour les autres commandes dans la puissance et la tension.

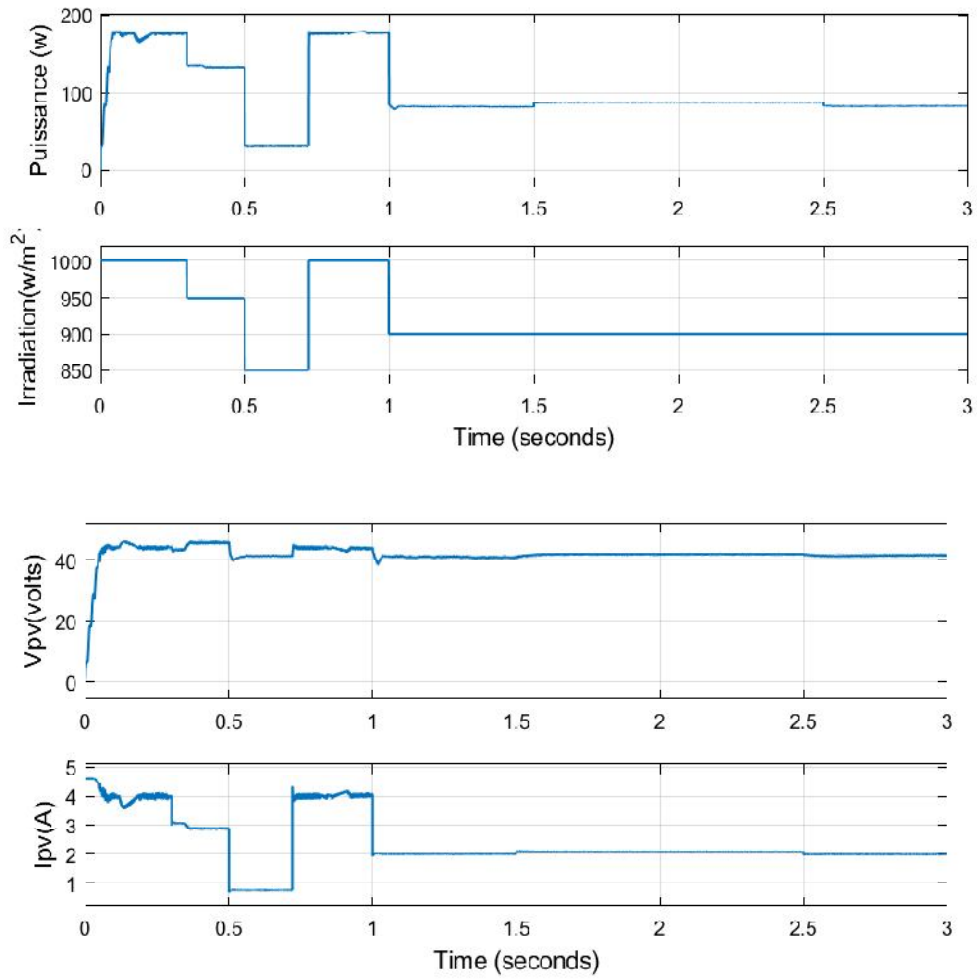
Sur les figures (III.18), (II.19) et (III.20), sont représentés respectivement, pour un éclairement variable et une température de 25 °C, (entre  $t=1.5s$  et  $t=2.5s$  on a varié la température de 25°C à 45°C), les résultats typiques de simulation, dans l'environnement Matlab/Simulink, des caractéristiques électriques à la sortie du panneau et à la sortie du hacheur de type élévateur contrôlé par la commande MPPT\_P&O, MPPT\_INC et MPPT\_Floux.



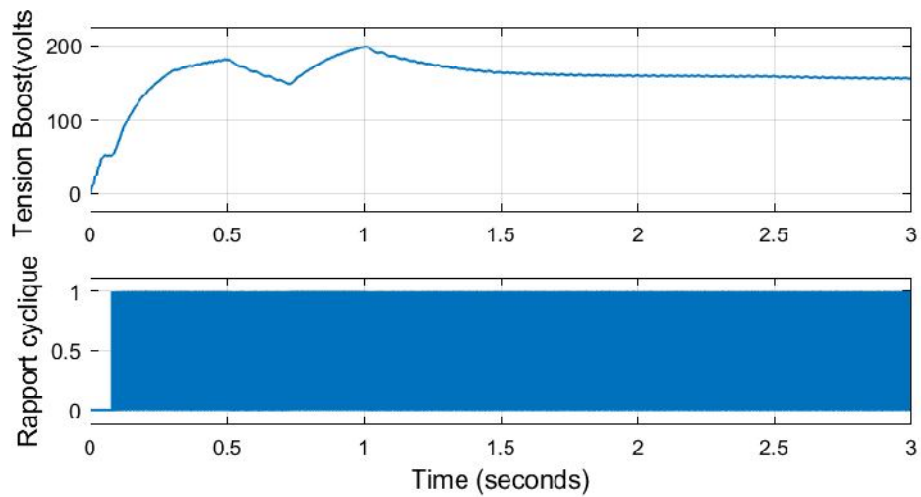
**Figure (III.18)** Résultats de simulation de la commande MPPT\_P&O

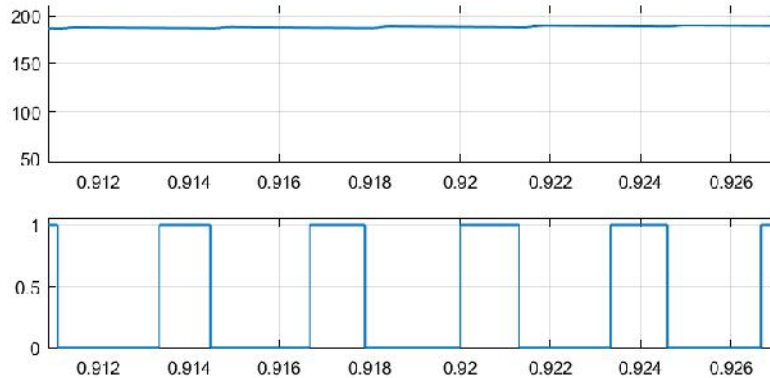


**Figure (III.19)** Résultats de simulation de la commande MPPT\_INC



**Figure (III.20)** Résultats de simulation de la commande MPPT\_Fuzzy

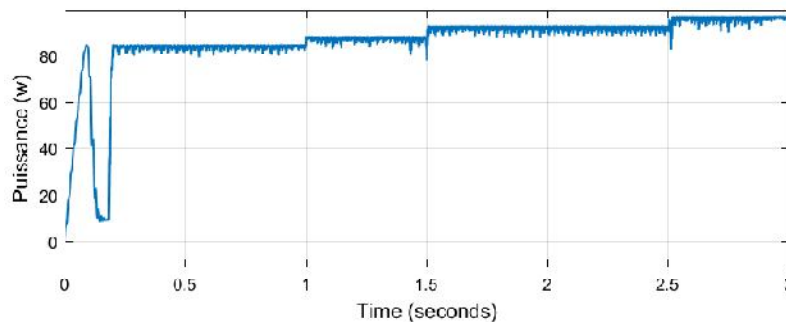


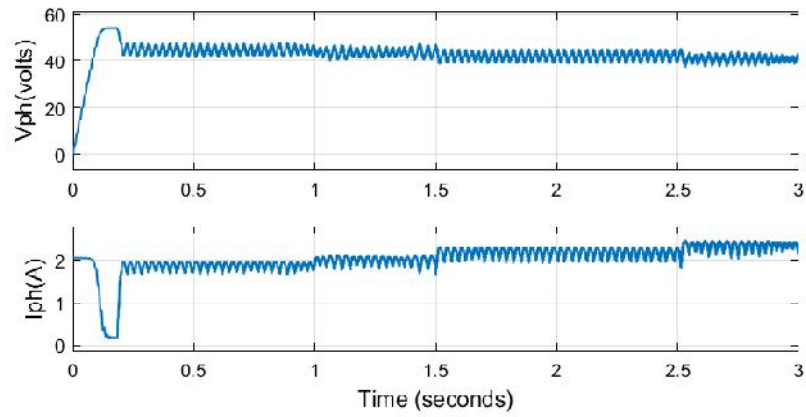


**Figure ( III.21 )** Tension à la sortie du hacheur et rapport cyclique.

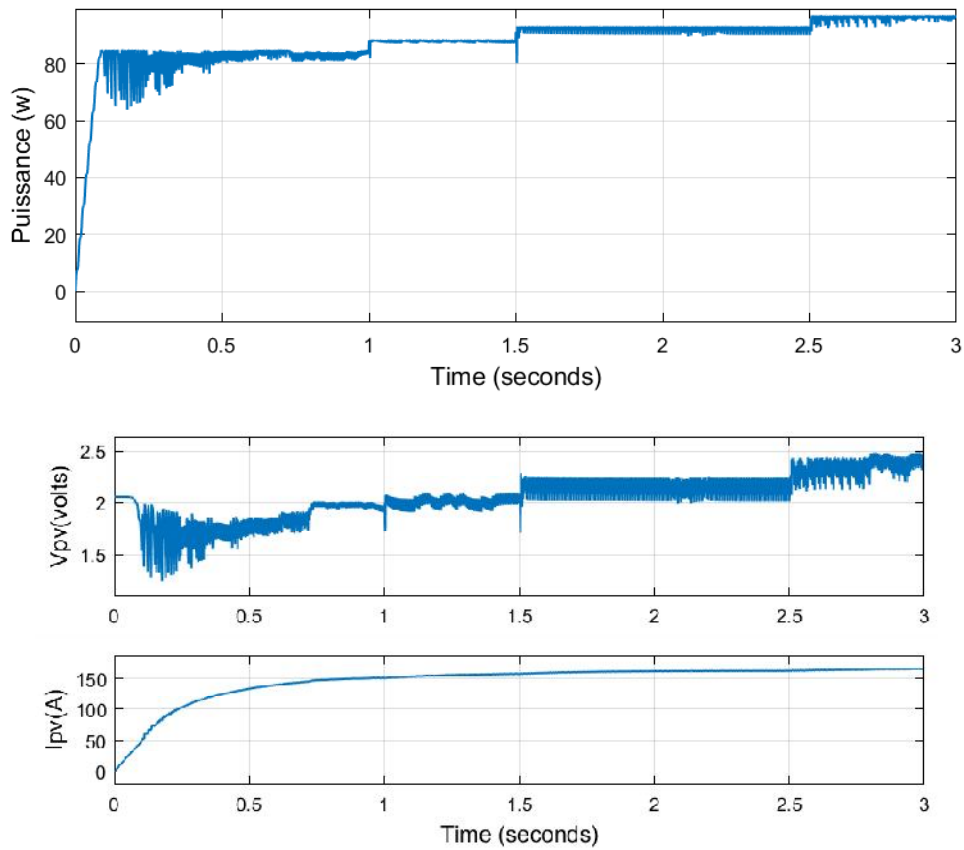
pour un éclairement variable et une température de 25 °C, (entre  $t=1.5s$  et  $t=2.5s$  on varié la température de 25°C à 45°C), On remarque bien que les contrôleurs flous sont bien meilleur et plus stable par pour les autres techniques ,Et la tension de la sorti du hacheur est constante sans perturbation .

Sur les **figures (III.22),(III.23) et(III.24)**, sont représentés respectivement, pour un éclairement fixe de  $900w/m^2$  et une température variable, les résultats typiques de simulation, dans l'environnement Matlab/Simulink, des caractéristiques électriques à la sortie du panneau et à la sortie du hacheur de type élévateur contrôlé par la commande MPPT\_P&O, MPPT\_INC et MPPT\_Floue.

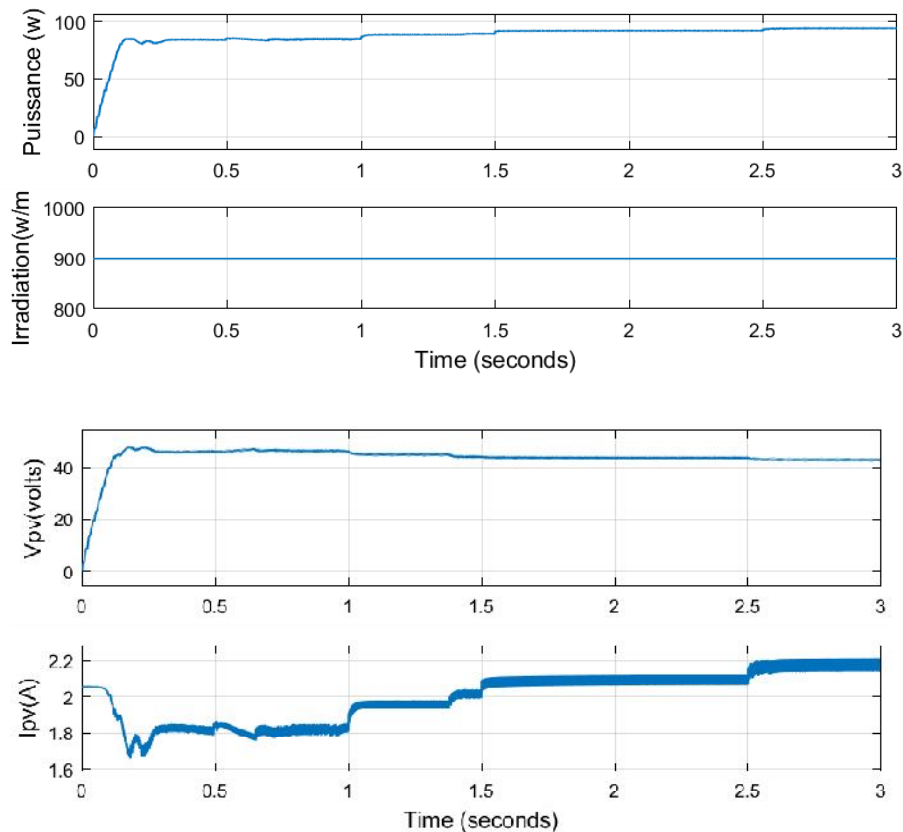




**Figure (III.22)** Résultats de simulation de la commande MPPT\_P&O



**Figure (III.23)** Résultats de simulation de la commande INC\_MPPT



**Figure (III.24)** Résultats de simulation de la commande MPPT\_Fuzzy

Nous remarquons les performances globales sont comparées, le FLC et le P&O sont supérieurs par rapport aux autres techniques MPPT car ils peuvent améliorer efficacement la vitesse de suivi et minimiser simultanément les oscillations.

#### III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, trois techniques MPPT ont été évoquées et appliquées à un générateur photovoltaïque adapté d'un hacheur avec charge connectée et fonctionnant sous conditions d'irradiation et de température variables. D'après les résultats de simulation que nous avons obtenus il est à noter que la technique MPPT basée sur l'utilisation de la logique floue présente le meilleur suivi pour la puissance maximale que les autres techniques. De plus, on peut observer que les oscillations autour de la puissance maximale sont limitées pour la technique FLC suivie des techniques P&O et INC.

Pour résumer, lorsque les performances globales sont comparées, le FLC et le P&O sont supérieurs par rapport aux autres techniques MPPT car ils peuvent améliorer efficacement la vitesse de suivi et minimiser simultanément les oscillations.

## Conclusion générale

---

### Conclusion générale

Ce travail nous a permis de faire la modélisation et d'établir le contrôle optimal d'un système photovoltaïque. Pour cela, plusieurs points ont été abordés sur l'optimisation de la conversion d'énergie et plusieurs méthodes, qui permettent d'augmenter le rendement global électrique d'un système photovoltaïque, ont été proposées et comparées.

On a d'abord commencé par une étude générale sur les différentes sources d'énergie renouvelable en se concentrant essentiellement sur l'énergie solaire photovoltaïque et le principe de fonctionnement des panneaux photovoltaïques utilisés pour sa production, puis on a présenté le module photovoltaïque, ses caractéristiques et les paramètres qui influent sur son comportement électrique.

On a ensuite développé le modèle mathématique d'un générateur photovoltaïque sous forme d'un groupement série parallèle de panneaux photovoltaïques afin de permettre la réalisation de générateur PV conforme à une alimentation donnée, puis nous avons étudié deux types de convertisseurs statiques, qu'on va utiliser dans la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque, tout en montrant l'utilité de l'utilisation d'un hacheur survolteur (BOOST) et des différentes méthodes de commande (MPPT).

Dans cette étude, trois techniques MPPT ont été évoquées et appliquées à un générateur photovoltaïque adapté d'un hacheur avec charge connectée et fonctionnant sous conditions d'irradiation et de température variables. D'après les résultats de simulation que nous avons obtenus il est à noter que la technique MPPT basée sur l'utilisation de la logique floue présente le meilleur suivi pour la puissance maximale que les autres techniques. De plus, on peut observer que les oscillations autour de la puissance maximale sont limitées pour la technique FLC suivie des techniques P&O et INC.

Enfin, après avoir présenté les concepts de différentes méthodes d'optimisation conventionnelles et avancées, une comparaison des résultats obtenus par simulation, a été faite. La méthode MPPT par la logique floue a été choisie pour la suite du travail car elle présente des meilleures performances au point de vue rapidité et robustesse, par rapport aux autres méthodes étudiées (MPPT\_INC et MPPT\_P&O).

# Bibliographies

---

## Bibliographies

- [Abou 84] M. Abou El Ela, J. Roger "Optimization of the function of a photovoltaic array using a feedback control system", Solar. Cells: Their Science, Technology, Applications and Economics 13 (2) (1984),pp. 185–195.
- [Akihiro 05] Akihiro Oi, "Design and simulation of photovoltaic water pumping system", faculty of California polytechnic state university, 2005
- [BENADEL 16] F. BENADEL « Étude Et Simulation D'une Commande MPPT pour Système PV », Mémoire de master, Université de Mohamed Boudiaf - M'SILA, 2016.
- [Bisker ] Bisker Asma, Chiri Meriem, « commande d'un système photovoltaïque en mode isolé et en mode connecté au réseau », diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique, école nationale polytechnique, 10, av. Hassen badi, elharrach, algérie, 201
- [Blavi 02] Blavi2002 Pastor2004 A. Cid-Pastor, C. Alonso, J.F. Cugat-Curto, B. Estibals, L. Martínez-Salamero, "Design of feedback laws for dc-to-ac conversion in photovoltaic systems", The 8th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, Proceedings of AMC'04 (ISBN: 07803-8300-1), Kawasaki (Japon), March 2004.
- [Cabal 08] C. Cabal "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié a la conversion photovoltaïque", Thèse de doctorat 2008, Université de Toulouse III – Paul Sabatier.
- [Chenni 07] Chenni2007 R.Chenni, "Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque dans un village solaire ", thèse Doctorat, Constantine, 2007.
- [Dalia 13 ] Dalia Al Maamoury, Muhamad Bin Mansor, Ali Assim Al Obaidi "active power control for a single-phase grid connected PV system", international journal of scientific & technology research vol. 2, issue 3, 2013
- [Djamil 07] B. Djamil «optimisation d'un système d'énergie PV application au pompage » Mémoire de Magister, Université de Constantine, 2007
- [Gergaud 02] Gergaud2002, Olivier GERGAUD "Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur", THÈSE de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan,2002.
- [Hajar 15] Hajar Bagheri "advances in electric power engineering" publisher: lulu (USA), 2015
- [Hecktheuer 02] Hecktheuer2002 L.A. Hecktheuer, A. Krenzinger, C.W.M. Prieb, "Methodology for Photovoltaic Modules Characterization and Shading Effects Analysis", Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, Vol. 24, no. 1, pp. 26-32, 2002.

## Bibliographies

---

- [Hua 98] Ch. Hua, J. Lin, Ch. Shen “Implementation of a DSP-controlled PV system with peak power tracking”, IEEE Trans. Ind. Electron. 45 (1) (1998), pp. 99–107.
- [Labouret 05] Labouret2005 Labouret, M. Viloz, ‘Energie Solaire Photovoltaïque’, 2ème édition, 2003-2005, pp. 67-85.
- [Markvard 00] Markvard2000 Markvard, T., 2000. Solar Electricity, second ed. Willey, USA.
- [Noguchi 02] T. Noguchi, et al. “Short-current pulse-based adaptive maximum power point tracking for a photovoltaic power generation system”, Elect. Eng. Japan 139 (1) (2002), pp. 65–72.
- [Pastor 04] Pastor2004 A. Cid-Pastor, C. Alonso, J.F. Cugat-Curto, B. Estibals, L. Martínez-Salamero, “Design of feedback laws for dc-to-ac conversion in photovoltaic systems”, The 8th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, Proceedings of AMC’04 (ISBN: 07803-8300-1), Kawasaki (Japan), March 2004.
- [Picault 10] D. Picault, "Reduction of Mismatch Losses in Grid-Connected Photovoltaic Systems Using Alternative Topologies," Thèse de doctorat, Laboratoire de Génie Électrique de Grenoble (G2ELAB), Université de Grenoble, 2010.
- [Royer 98] Royer1998 J. Royer, T. Djiako, E. Schiller, B. Sada Sy, "Le pompage photovoltaïque", anuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, IEPF/Université d'Ottawa /EIER/CREPA. Canada, 1998.
- [Salas 06] V. Salas, E. Olias, A. Barrado, A. Lazaro “Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems”, Solar Energy Materials & Solar Cells n°90 (2006), pp. 1555–1578
- [Schaefer 90] J. Schaefer, “Review of Photovoltaic Power Plant Performance and Economics”, IEEE Trans. Energy Convers., vol. EC-5, pp. 232-238, June, 1990.
- [Sera 06] D. Sera, T. Kerekes, R. Teodorescu, F. Blandjerg “Improved MPPT Algorithms for rapidly Changing Environmental Conditions”, Power Electronics and Motion Control Conference, 2006, EPE-PEMC 2006. 12th International, pp. 1614-1619, Aug. 2006.
- [Singo 10] A.T. Singo, "Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome", these de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, février 2010.
- [Singer 85] Singer1985 S. Singer, and A. Braunstein, “A general model of maximum power point tracking” Proceedings of MELECON’85 IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, Madrid, Spain pp 147-151.
- [Singer 87] Singer1987 S. Singer, and A. Braunstein, “Maximum power transfer from a nonlinear energy source to an arbitrary load” IEEE Proceedings, Pt G, 1987 pp 1-7.
- [Web\_EDF] Web\_EDF site Internet d'Electricité de France, [www.edf.fr](http://www.edf.fr)
- [Web\_ER] Web\_ER <https://www.energies-renouvelables.org/>
- [Web\_EDFENR] Web\_EDFENR <https://www.edfenr.com/>
- [Web\_TDE] Web\_TDE <https://total.direct-energie.com/>
- [Web\_OurE] Web\_OurE [http://www.our-energy.com/benefits\\_of\\_biomass.html](http://www.our-energy.com/benefits_of_biomass.html)

## Bibliographies

---

- [Web\_irena] Web\_irena <https://www.irena.org/geothermal>
- [Yahya 08] Yahya2008 A. O. M. Yahya, A. O. Mahmoud, I. Youm, ' Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque ', Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°3 (2008), pp.473 – 483
- [Zerga 98] Zerga1998 A. Zerga, F. Benyarou et B. Benyousef « Optimisation du rendement d'une cellule solaire NP au silicium monocristallin » Rev .Energ. Ren : physique Energétique, 1998, pp.95-100.

## Résumé :

La puissance produite par un module photovoltaïque est influencée par l'intensité de l'irradiation solaire et de la température des cellules et notamment par la charge. Alors afin de maximiser les performances des systèmes d'énergie renouvelable il est nécessaire de poursuivre le point de puissance maximale de la source d'entrée.

Dans le but d'améliorer les performances de conversion de l'énergie photovoltaïque trois méthodes de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) ont été étudiées et validées par simulation sous Matlab/Simulink.

Les résultats de simulation obtenus montrent que les performances du système optimisé en utilisant la logique floue ont été améliorées par rapport à celle d'un contrôleur MPPT basé sur la méthode Perturb and Observe (P&O) et la méthode d'incrément de conductance (INC).

**Mots clés:** Hacheur Survolteur, MPPT, Générateur photovoltaïque, Contrôleur flou, Perturbe & observe, Incrément de conductance (INC).

## Abstract :

The power produced by a photovoltaic module is influenced by the intensity of solar irradiation and the temperature of the cells and in particular by the load. So in order to maximize the performance of renewable energy systems it is necessary to track the maximum power point of the input source.

In order to improve the performance of photovoltaic energy conversion, three methods of tracking the maximum power point (MPPT) have been studied and validated by simulation under Matlab/Simulink.

The simulation results obtained show that the performance of the system optimized using fuzzy logic has been improved compared to that of an MPPT controller based on the Perturb and Observe (P&O) method and the conductance increment (INC) method.

**Keywords:** Chopper Booster, MPPT, Photovoltaic generator, Fuzzy controller, Disturb & observe, Conductance increment (INC).

## ملخص :

تتأثر الطاقة التي تنتجها الوحدة الكهروضوئية بكثافة الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة الخلايا وبالأخص بالحمل. لذلك من أجل تعظيم أداء أنظمة الطاقة المتجددة، من الضروري متابعة نقطة القوة القصوى لمصدر الإدخال.

من أجل تحسين أداء تحويل الطاقة الكهروضوئية، تمت دراسة ثلاث طرق لتتبع نقطة الطاقة القصوى (MPPT) والتحقق من صحتها عن طريق المحاكاة باستخدام Matlab / Simulink.

تظهر نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها أن أداء النظام المحسن باستخدام المنطق الضبابي قد تم تحسينه مقارنة بأداء وحدة تحكم MPPT بناءً على طريقة Perturb and Observe (P&O) وطريقة زيادة التوصيل (INC).

**الكلمات المفتاحية:** القاطع المتناوب، MPPT، المولد الضوئي، وحدة التحكم الضبابية، التوتر والمراقبة، زيادة التوصيل (INC).