

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED– NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES  
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

## MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

**Énergie renouvelable**

*Option* : **Énergie renouvelable en électrotechnique**

Intitulé :

---

**Etude et simulation de la commande P&O-MPPT pour un  
système photovoltaïque**

---

Présenté par :

- **Allaoua Nadjat**
- **Amara Mohamed**

*Soutenu le : 03/07/2022 devant le Jury :*

*Melle. Amara. Z*

*MBA*

*Centre Universitaire Naâma*

*Examineur*

*Dr. Khessam. M*

*MCA*

*Centre Universitaire Naâma*

*Président*

*Mr. Reda. L*

*MBC*

*Centre Universitaire Naâma*

*Encadreur*

Nâama – Algérie - 2022

# Remerciement

Nous remercions ALLAH  
qui nous a donné la force  
et la patience Pour terminer ce travail.

Nous exprimons nos sincères remerciements :  
A nos parents pour leur contribution pour chaque  
travail que nous avons effectué.

A notre promoteur Mr. le docteur ....  
pour son aide et son dévouement.

Nous remercierons également  
tous les membres de jury pour avoir bien voulu  
évaluer notre travail.

En fin Nous adressons notre remerciements  
les plus profonds  
et les distinguées à tous ceux  
qui nous aidons  
de proche ou de  
loin pour accomplir ce travail

# Dédicaces

Dédié à l'âme de ma chère grand-mère \*mère et toute mère\*

Tout cela est pour vous, même si cela ne vous rendra pas justice

A toi qui m'as élevé petite fille, embrassé petite fille et accompagné  
jeune femme

A toi dont les mots et les plumes sont incapables d'expliquer ce qu'il y  
a dans mon cœur

À toi, dont le cœur n'a pas pu décrire son chagrin d'amour à cause de  
ta séparation... A toi qui t'es débarrassé de tout au monde pour mon  
bonheur et ma sécurité

A toi qu'il est impossible d'oublier

Ton départ est venu de ma vie, alors comment puis-je accepter alors  
que tu es mon air et mon souffle ?

Et le destin voulait que tu quittes mon monde

Traumatisme de séparation éternel

J'ai eu les meilleurs souvenirs avec toi

Pendant de nombreuses années que nous avons partagées, tu as été la  
meilleure mère, compagne et amante

Et avant que ton âme pure ne parte pour retourner vers son Créateur,  
je t'ai tenu la main et t'ai embrassé la joue et t'ai chuchoté de la voix la  
plus forte, Ne pars pas, je n'ai rien au monde que toi.

Adieu, toi qui étais mon père, ma mère, ma sœur, mon oncle et mon  
oncle, adieu, toi qui étais le monde

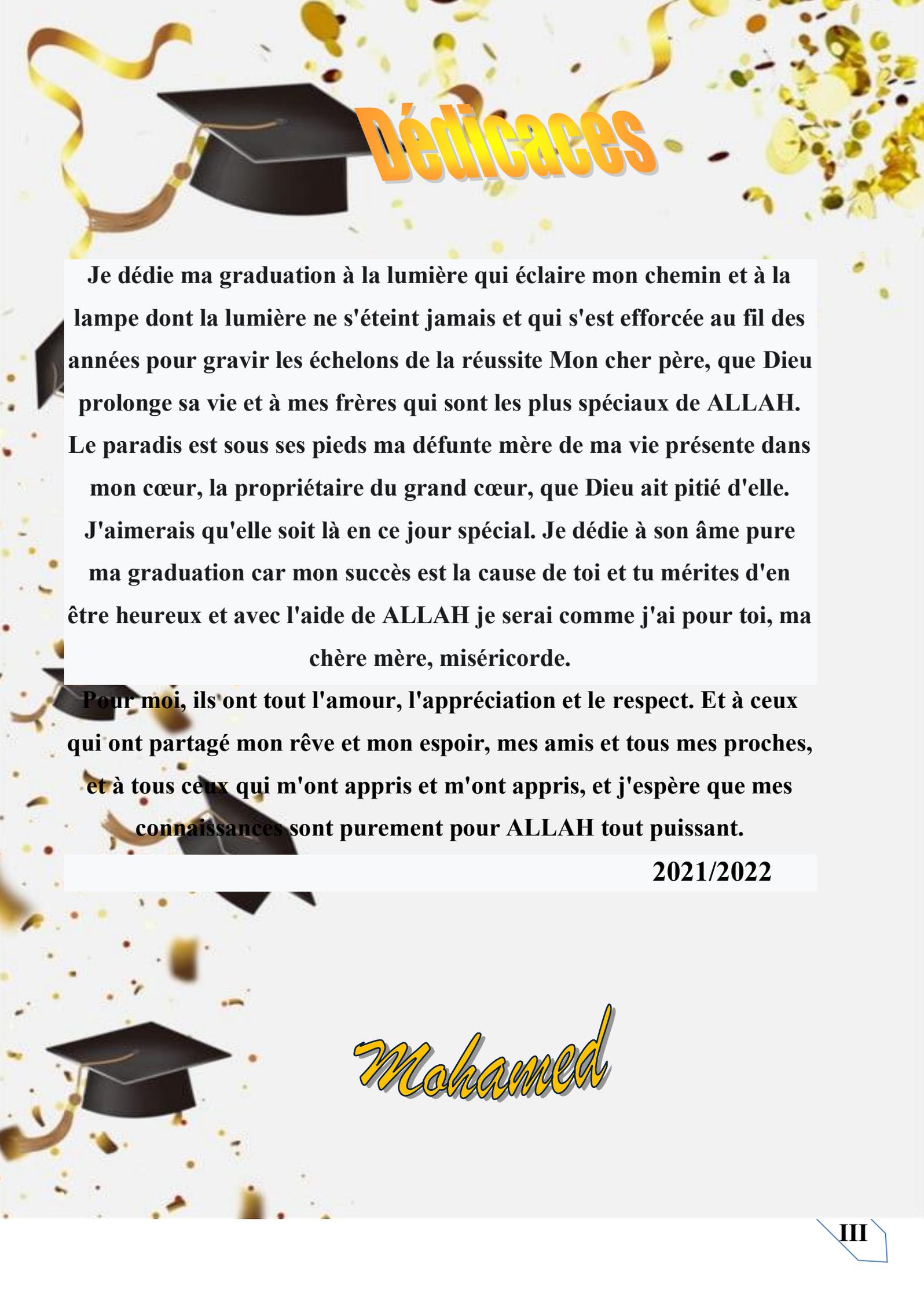
Adieu, toi qui m'as donné un amour que les standards de la vie n'ont  
pas truqué

Que Dieu ait pitié de toi, ma chérie, et te place dans ses vastes jardins,  
que Dieu ait pitié de toi et te pardonne

Ta fille Najat

2021/2022

*Najat*



# Dédicaces

**Je dédie ma graduation à la lumière qui éclaire mon chemin et à la lampe dont la lumière ne s'éteint jamais et qui s'est efforcée au fil des années pour gravir les échelons de la réussite Mon cher père, que Dieu prolonge sa vie et à mes frères qui sont les plus spéciaux de ALLAH. Le paradis est sous ses pieds ma défunte mère de ma vie présente dans mon cœur, la propriétaire du grand cœur, que Dieu ait pitié d'elle. J'aimerais qu'elle soit là en ce jour spécial. Je dédie à son âme pure ma graduation car mon succès est la cause de toi et tu mérites d'en être heureux et avec l'aide de ALLAH je serai comme j'ai pour toi, ma chère mère, miséricorde.**

**Pour moi, ils'ont tout l'amour, l'appréciation et le respect. Et à ceux qui ont partagé mon rêve et mon espoir, mes amis et tous mes proches, et à tous ceux qui m'ont appris et m'ont appris, et j'espère que mes connaissances sont purement pour ALLAH tout puissant.**

**2021/2022**

**Mohamed**

# *Sommaires*

<b>Remerciements</b>	<b>I</b>
<b>Dédicaces</b>	<b>II</b>
<b>Sommaires</b>	<b>IV</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>VIII</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>XI</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>01</b>
<b>Chapitre I : Généralités le système photovoltaïque</b>	
<b>I.1.Introduction</b>	<b>03</b>
<b>I.2.Histoire</b>	<b>03</b>
<b>I.3.généralité sur le soleil</b>	<b>03</b>
<b>I.3.1.Rayonnement solaire</b>	<b>03</b>
<b>I.3.1.1.Rayonnement direct</b>	<b>04</b>
<b>I.3.1.1.Rayonnement direct</b>	<b>04</b>
<b>I.3.1.3.Rayonnement solaire réfléchi</b>	<b>05</b>
<b>I.3.1.4.Rayonnement global</b>	<b>05</b>
<b>I.3.2.Energie solaire</b>	<b>05</b>
<b>I.3.3. Spectre du rayonnement</b>	<b>06</b>
<b>I.3.4.La cellule photovoltaïque</b>	<b>07</b>
<b>I.3.5. La conversion photovoltaïque</b>	<b>07</b>
<b>I.4. Générateur photovoltaïque</b>	<b>08</b>
<b>I.4.1.Constitution d'un générateur photovoltaïque</b>	<b>09</b>
<b>I.4.1.1. Association en série</b>	<b>09</b>
<b>I.4.1.2.Association en parallèle</b>	<b>10</b>
<b>I.4.2.Les composantes d'un système solaire</b>	<b>10</b>
<b>I.4.2.1.Les modules photovoltaïques</b>	<b>10</b>

<b>I.4.2.2.Le régulateur de charge et décharge</b>	<b>11</b>
<b>I.4.2.3.Les batteries d'accumulation</b>	<b>12</b>
<b>I.4.2.4.L'onduleur</b>	<b>12</b>
<b>I.4.2.5.Le contrôleur DC/DC</b>	<b>13</b>
<b>I.4.2.6.Les câbles électriques</b>	<b>13</b>
<b>I.4.2.7.Les récepteurs</b>	<b>13</b>
<b>I.4.3.Caractéristique électrique</b>	<b>13</b>
<b>I.4.3.1. Propriétés</b>	<b>13</b>
<b>I.4.3.2.Zones de fonctionnement du module photovoltaïque</b>	<b>14</b>
<b>I.4.3.3.Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque</b>	<b>15</b>
<b>I.5.Propriétés fondamentales des semi-conducteurs</b>	<b>17</b>
<b>I.5.1. Structure à bandes dans un semi-conducteur</b>	<b>17</b>
<b>I.5.2.Dopage d'un semi-conducteur</b>	<b>19</b>
<b>I.6.Principe de fonctionnement</b>	<b>20</b>
<b>I.6.1.La conversion de la lumière en électricité</b>	<b>20</b>
<b>I.6.2.Fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque</b>	<b>21</b>
<b>I.7.Stockage d'énergie</b>	<b>22</b>
<b>I.7.1.Les Batteries</b>	<b>22</b>
<b>I.7.2.Les Types de Batteries</b>	<b>23</b>
<b>I.8.Technologie et Type d'Accumulateurs</b>	<b>23</b>
<b>I.8.1.Les Différents types d'accumulateurs au plomb</b>	<b>23</b>
<b>I.8.1.1.La batterie au plomb ouverte</b>	<b>23</b>
<b>I.8.1.2.La batterie à recombinaison de gaz</b>	<b>25</b>
<b>I.8.1.3.La Batterie au lithium ion (Li-ion)</b>	<b>25</b>
<b>I.9.Avantages et inconvénients d'une installation photovoltaïque</b>	<b>27</b>
<b>I.9.1.Avantages</b>	<b>27</b>
<b>I.9.2Inconvénients</b>	<b>27</b>
<b>I.10.Conclusion</b>	<b>28</b>

<b>Chapitre II : La Commande MPPT</b>	
<b>II.1.Introduction</b>	<b>29</b>
<b>II.2.Principe De La Commande MPPT</b>	<b>29</b>
<b>II.3.Classification Des Commandes MPPT</b>	<b>30</b>
<b>II.3.1.MPPT indirecte</b>	<b>30</b>
<b>II.3.2.MPPT Directe</b>	<b>31</b>
<b>II.4.Les algorithmes MPPT</b>	<b>32</b>
<b>II.4.1.Méthodes a contre réaction de tension</b>	<b>32</b>
<b>II.4.2.Méthodes a contre réaction de courant</b>	<b>33</b>
<b>II.4.3.Méthodes a contre réaction de puissance</b>	<b>34</b>
<b>II.5.Perturbation Et Observation (P&amp;O, Perturb And Observe)</b>	<b>35</b>
<b>II.5.1.Raisonnement Perturb&amp;Observe</b>	<b>36</b>
<b>II.5.2.Organigramme de l'Algorithme P&amp;O</b>	<b>36</b>
<b>II.5.3.Avantages et inconvénients de P&amp;O</b>	<b>38</b>
<b>II.5.4 Autres Méthodes</b>	<b>38</b>
<b>II.6.Conclusion</b>	<b>39</b>
<b>Chapitre III : Poursuite du point de puissance maximale</b>	
<b>III.1.Introduction</b>	<b>40</b>
<b>III.2. Simulations et résultats</b>	<b>40</b>
<b>III.2.1. Simulation d'un générateur photovoltaïque</b>	<b>40</b>
<b>III.2.1.1. Cas d'une cellule idéale</b>	<b>40</b>
<b>III.2.1.2. Cas d'une cellule réelle (cinq paramètres 5P)</b>	<b>41</b>
<b>III.2.1.3. Caractéristique courant-tension</b>	<b>45</b>
<b>III.2.1.4. Caractéristique puissance-tension</b>	<b>45</b>
<b>III.2.2. simulation du convertisseur de puissance survolteur BOOST</b>	<b>46</b>
<b>III.2.3. Simulation de système photovoltaïque avec la commande</b>	<b>49</b>

<b>P&amp;O</b>	
<b>III.2.4.Résultats</b>	<b>50</b>
<b>III.2.4.1. Caractéristique de tension</b>	<b>50</b>
<b>III.2.4.2. Caractéristique de courant</b>	<b>51</b>
<b>III.2.4.3. Caractéristique de puissance</b>	<b>51</b>
<b>III.2.4.4. Effets climatiques sur le système</b>	<b>52</b>
<b>III.2.4.4.1. Influence de la température sur le système</b>	<b>52</b>
<b>III.2.4.4.2. Influence de l'éclairement sur le système</b>	<b>53</b>
<b>III.3.Conclusion</b>	<b>53</b>
<b>Conclusion Générale</b>	<b>54</b>
<b>Résumé</b>	<b>55</b>
<b>Référence bibliographique</b>	<b>56</b>

# Listes des figures

## CHAPITRE 1 : Généralité sur le système photovoltaïque

<b>Figure (I.1):</b> Composante du rayonnement global sur un plan horizontal.....	(5)
<b>Figure (I.2) :</b> Le spectre rayonnement.....	(6)
<b>Figure (I.3) :</b> schéma d'une cellule photovoltaïque.....	(7)
<b>Figure (I.4) :</b> schéma de principe de la conversion photovoltaïque.....	(8)
<b>Figure (I.5) :</b> Puissance maximale idéale et pratique.....	(9)
<b>Figure (I.6) :</b> Cellules connectées en série avec leur caractéristique courant-tension.....	(10)
<b>Figure (I.7) :</b> Cellules connectées en parallèle avec leur caractéristique courant-tension.....	(10)
<b>Figure (I.8) :</b> Réseau de modules en série-parallèle.....	(11)
<b>Figure (I.9) :</b> Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque.....	(14)
<b>Figure (I.10) :</b> Caractéristiques I(V) d'une cellule et d'une association de 3 branches en parallèle ayant chacune 2 cellules en série.....	(14)
<b>Figure (I.11) :</b> Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	(16)
<b>Figure (I.12) :</b> Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	(16)
<b>Figure (I.13) :</b> Niveaux énergétiques dans un semi-conducteur.....	(18)
<b>Figure (I.14) :</b> Niveau Donneur et accepteur dans un semi-conducteur. La	

distribution spatiale non uniforme de ces états renforce le concept qu'ils sont des états localisés.....	(20)
<b>Figure (I.15) :</b> conversion de l'énergie solaire en électricité.....	(20)
<b>Figure (I.16) :</b> Principe de la conversion photovoltaïque.....	(21)
<b>Figure (I.17) :</b> Structure d'un accumulateur acide/plomb à plaques plane.....	(23)

## CHAPITRE 2 : Généralité sur le système photovoltaïque

<b>Figure (II.1) :</b> Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.....	(29)
<b>Figure (II.2) :</b> Principe de la commande MPPT.....	(30)
<b>Figure (II.3) :</b> Organigramme de classification des commandes MPPT.....	(32)
<b>Figure (II.4) :</b> Algorithme de circuit ouvert.....	(33)
<b>Figure (II.5) :</b> Algorithme du court-circuit.....	(34)
<b>Figure (II.6) :</b> Poursuite du point de puissance maximale.....	(35)
<b>Figure (II.7) :</b> Algorithme de la méthode P&O.....	(38)

## CHAPITRE 3 : Poursuite du point de puissance maximale

<b>Figure (III.1) :</b> Schéma idéale d'une cellule photovoltaïque.....	(41)
<b>Figure (III.2) :</b> Schéma équivalent d'une cellule solaire.....	(42)
<b>Figure (III.3) :</b> Schéma bloc de générateur photovoltaïque.....	(44)
<b>Figure (III.4) :</b> Caractéristique I(V) d'un panneau.....	(45)
<b>Figure (III.5) :</b> Caractéristique P(V) d'un panneau.....	(45)

<b>Figure (III.6) :</b> Schéma de principe d'un convertisseur Boost.....	(46)
<b>Figure (III.7) :</b> Schémas équivalents du hacheur survolteur K fermé.....	(46)
<b>Figure (III.8) :</b> Schémas équivalents du hacheur survolteur K ouvert.....	(46)
<b>Figure(III.9):</b> Schéma de simulation du hacheur survolteur BOOST.....	(47)
<b>Figure(III.10):</b> Tension de sortie du hacheur survolteur.....	(48)
<b>Figure(III.11):</b> Courant de sortie du hacheur survolteur.....	(48)
<b>Figure(III.12):</b> Puissance de sortie du hacheur survolteur.....	(49)
<b>Figure (III.13) :</b> Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT (P&O).....	(49)
<b>Figure (III.14) :</b> Tension générée par la GPV pour $G=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C$ ....	(50)
<b>Figure (III.15) :</b> Tension de sortie du système pour $G=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C$ ...	(50)
<b>Figure (III.16) :</b> Courant de sortie du système pour $G=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C$ ...	(51)
<b>Figure (III.17) :</b> Puissance d'entrée et sortie du système pour $G=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C$ .....	(51)
<b>Figure (III.18) :</b> Puissance d'entrée et sortie du système pour $G=1000W/m^2$ et différentes température [0 25 50 75 100].....	(52)
<b>Figure (III.19) :</b> Puissance d'entrée et sortie du système pour $T= 25C$ et différentes irradiation [1000 800 600 400 200].....	(53)

# Listes des tableaux

## CHAPITRE 1 : Généralité sur le système photovoltaïque

**Tableau (I.1) :** Principales comparaisons des deux types de batterie au plomb... (24)

**Tableau (I.2) :** Caractéristiques de l'accumulateur Li-ion..... (26)

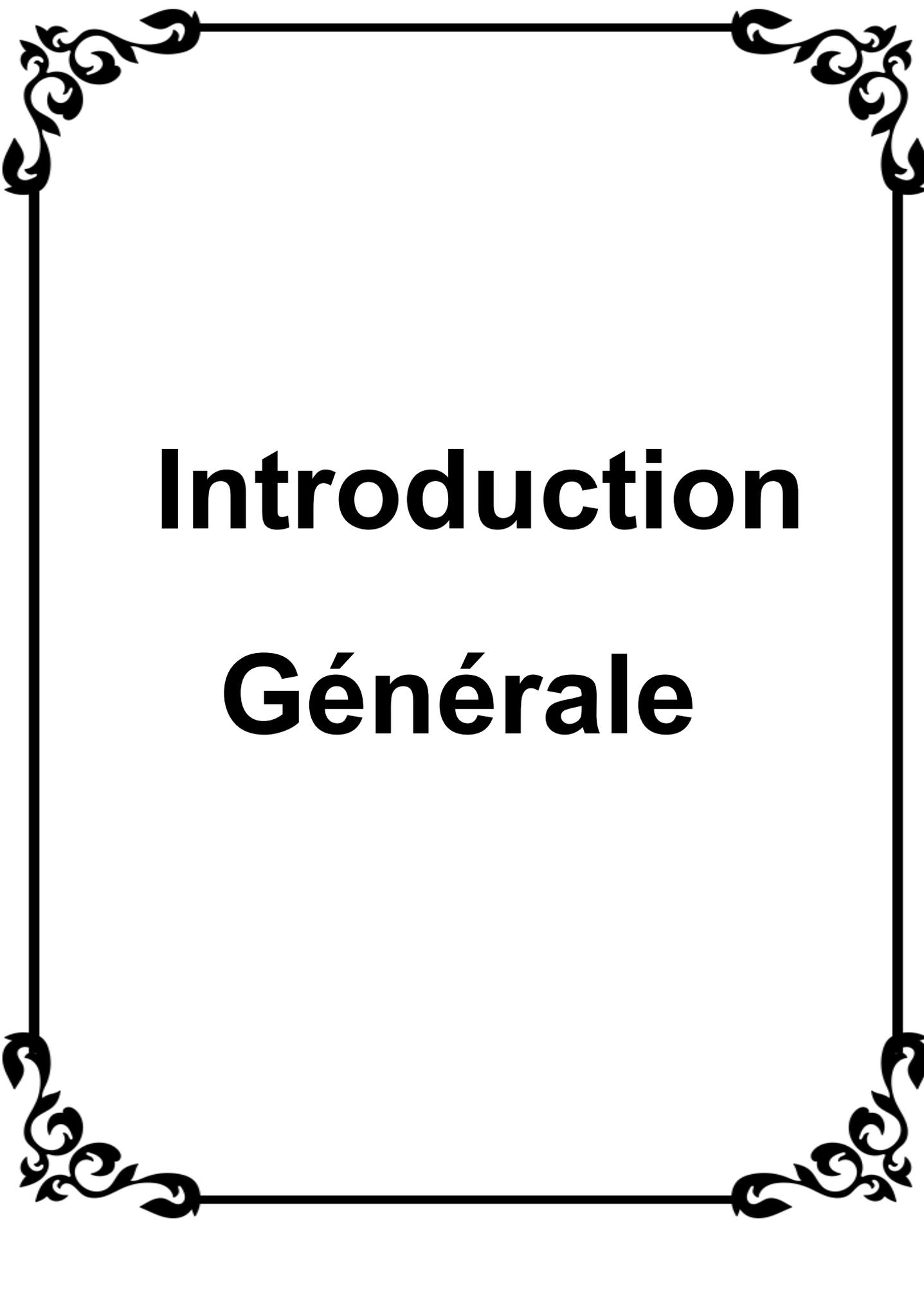
**Tableau (I.3) :** Comparaison entre les deux types d'accumulateurs..... (26)

## CHAPITRE 2 : Généralité sur le système photovoltaïque

**Tableau (II.1) :** Table de vérité de l'algorithme 'perturbation et observation..... (36)

## CHAPITRE 3 : Poursuite du point de puissance maximale

**Tableau (III.1) :** caractéristiques électriques du module photovoltaïque Dans les conditions standards «CST»..... (44)



**Introduction**

**Générale**

# Introduction générale

---

L'énergie électrique est l'une des formes d'énergie la plus consommée partout dans le monde. C'est l'un des facteurs le plus important pour le développement d'un pays. Pour disposer de cette énergie qui est si importante, elle doit nécessairement être produite dans des centrales. Pour cela, on dispose des différents types de centrales de production de l'énergie électrique, parmi lesquelles nous pouvons citer : les centrales hydrauliques, les centrales thermiques, les centrales éoliennes et les centrales nucléaires.

Les énergies renouvelables ont tout pour s'imposer, tant aux niveaux environnemental, social, qu'économique. Les énergies renouvelables devraient être le fer de lance de toute politique de lutte contre le réchauffement climatique.

L'exploitation directe de l'énergie solaire au moyen des capteurs relève de deux technologies bien distinctes : l'une produit des calories, c'est l'énergie solaire thermique, et l'autre produit de l'électricité, et c'est cette dernière énergie solaire photovoltaïque qui fait l'objet de ce mémoire.

Presque toutes les énergies renouvelables sont des dérivées de l'énergie solaire : le vent, le rayonnement solaire, la force de l'eau sont des produits directs ou indirects de l'activité solaire. Le soleil fournit une énergie lumineuse grandiose à la Terre. Mais le problème réside dans le fait que la forme sous laquelle nous recevons l'énergie n'est pas nécessairement celle sous laquelle cette énergie est utilisable. C'est pourquoi, nous devons utiliser des processus de conversion de l'énergie. Notamment, les cellules solaires photovoltaïques.

Dans la plupart des systèmes de production d'énergie photovoltaïque, on trouve une technique ou un algorithme particulier nommé « Maximum Power Point Tracking » (MPPT) qui se traduit par, poursuite du point de puissance maximale. Cette technique, comme son nom l'indique, traque le MPP dans le temps et permet de tirer le maximum de puissance que le panneau est apte à fournir. Le MPPT vise à améliorer et à optimiser l'exploitation des systèmes photovoltaïques. Il permet de faire un gain qui peut atteindre 25% d'où son importance. Techniquement, le MPPT fait appel à une interface entre le panneau et la charge qui est généralement un dispositif de conversion de puissance.

Dans ce mémoire, on a analysé la modélisation et la simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque adapté par une commande numérique

# Introduction générale

---

(commande MPPT) assurant la poursuite de la puissance maximale , c'est dans cette optique que s'inscrit ce thème de recherche.

Un aperçu de plus de trente de ces techniques MPPT a été abordé dont la technique perturbation et observation (P&O), cette technique est largement utilisée. Il existe également d'autres techniques que nous allons brièvement mentionner dans les prochains chapitres.

## Ce mémoire est divisé en deux chapitres comme suit :

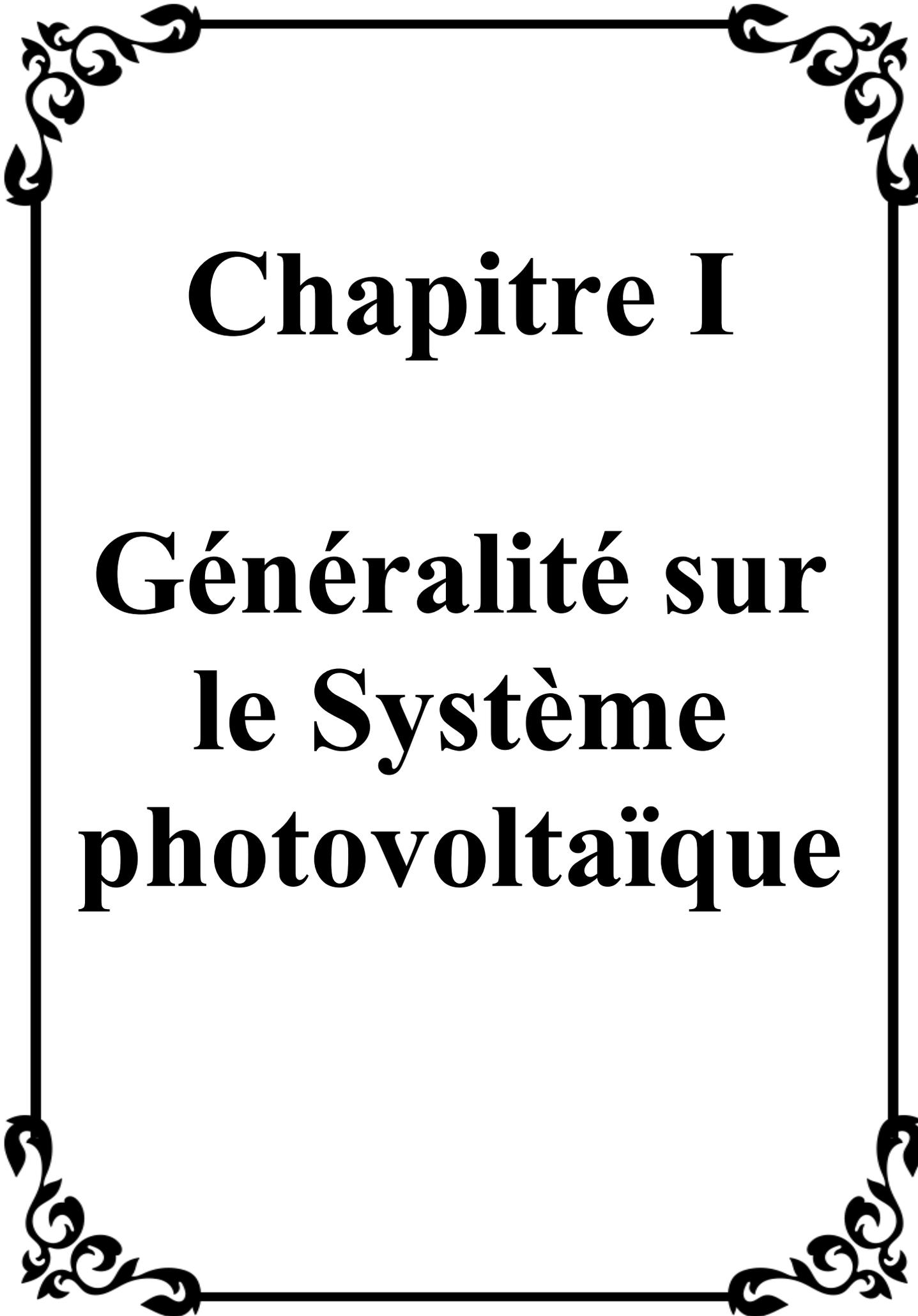
Dans **le premier chapitre**, nous présentons des notions générales sur le soleil , générateur photovoltaïque, La cellule photovoltaïque en commençant par La conversion photovoltaïque puis Jonction PN , les Caractéristique électrique , Propriétés fondamentales des semi-conducteurs ,et le Principe de fonctionnement après le Stockage d'énergie , la Technologie et type d'accumulateurs, A la fin nous allons exposer les avantages et les inconvénients de l'énergie PV.

Le cœur du travail est exposé dans le dernier chapitre traitant de l'analyse, de la validation, et de la discussion des résultats de simulation et expérimentaux de la technique MPPT (P&O) proposée :

Dans **le deuxième chapitre**, nous présentons le principe de la recherche de point maximal, les classifications de la commande MPPT ainsi, des algorithmes de quelques-unes de ces méthodes, en focalisant sur la méthode P&O.

Dans **le troisième chapitre**, nous a présenté la commande MPPT pour rechercher le point de puissance maximale du générateur photovoltaïque, sous conditions standards  $G=1000 \text{ W/m}^2$   $T=25^\circ\text{C}$ ). On a étudié quelques méthodes MPPT basées sur contre réaction de puissance, comme la méthode de perturbation et observation (P&O).

Une conclusion générale dressera le bilan de cette étude en donnant quelques perspectives pour de futurs travaux.



# **Chapitre I**

## **Généralité sur le Système photovoltaïque**

## I.1.Introduction

Les cellules solaires sont des éléments qui convertissent directement le rayonnement lumineux (solaire) en électricité. Cette conversion de la lumière en électricité, est appelée effet photovoltaïque.

Ce chapitre est consacré à l'étude théorique des cellules solaires et en particulier une brève présentation de l'élément énergétique essentiel. Nous aborderons également le phénomène photovoltaïque.

## I.2.Histoire

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

L'énergie photovoltaïque s'est développée dans les **années 50** pour l'équipement de vaisseaux spatiaux et le premier a été lancé dans l'espace en 1958. C'était le seul procédé non-nucléaire d'alimenter des satellites en énergie. Les images satellites reçues par votre **téléviseur ne vous parviennent que grâce à l'énergie photovoltaïque**[1][2].

Pendant les années 70 et 80, des efforts ont été faits pour réduire les coûts de sorte que l'énergie photovoltaïque soit également utilisable pour des applications terrestres. La croissance de l'industrie fut spectaculaire.

Depuis le début des années 80, la quantité de modules photovoltaïques expédiés par an (mesurés en MW-Crêtes) a augmenté et le prix des modules (par Watt-Crête) diminuait au fur et à mesure que le nombre de modules fabriqués augmentait. Bien que le prix se soit quelque peu stabilisé, la quantité de modules photovoltaïques expédiés chaque année continue d'augmenter [3].

## I.3.Généralité sur le soleil

### I.3.1.Rayonnement solaire

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus depuis que

Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène - hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium, la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement Sa lumière, à une vitesse de 300000km/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre. Sa distribution spectrale de l'atmosphère présente un maximum pour une longueur d'onde d'environ 0.5  $\mu$ m, la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780°k [4].

- ❖ Diamètre de soleil  $D_s = 1.39 \times 10^9$  m
- ❖ Diamètre de la terre  $D_t = 1.27 \times 10^7$  m
- ❖ Distance moyenne soleil- terre  $L_{ts} = 1.5 \times 10^{11}$  m

Le rayonnement solaire est la matière première de l'énergie solaire. C'est une propagation d'une onde de longueur qui varie entre 0.2 et 4.10<sup>-6</sup>m .sans la nécessité d'un support physique.

pour se déplacer, il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité, à cause d'une partie de l'ultraviolet, qui s'absorbent [4].

### **I.3.1.1.Rayonnement direct**

C'est la partie reçue directement du soleil, sans diffusion par L'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs .Il peut être mesuré par un pyrhéliomètre [1][3].

### **I.3.1.2.Rayonnement diffus**

Il est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions.

Dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent cet éclatement des rayons du soleil.

Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques [3].

### I.3.1.3. Rayonnement solaire réfléchi

C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige) [2].

### I.3.1.4. Rayonnement global

Le rayonnement global est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran. Les stations météorologiques généralement mesurent le rayonnement global horizontal par un Pyranomètre placé horizontalement à l'endroit requis [3].

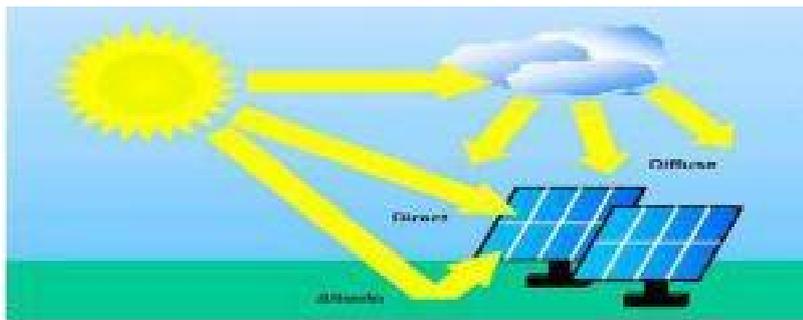


Figure (I.1): Composante du rayonnement global sur un plan horizontal [4].

### I.3.2. Energie solaire

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré ( $KWc/m^2$ ) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge [5].

Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année. L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés : [5][3].

❖ **L'énergie solaire thermique** : qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.

❖ **L'énergie solaire photovoltaïque** : qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon.

### I.3.3. Spectre du rayonnement

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons [5]. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde.

L'énergie de chaque photon est donnée par la formule suivante :

$$E = h\nu = hc/\lambda$$

$h = 6,62 \times 10^{-34} \text{ JS}^{-1}$  la constante de Planck.

$c = 3 \times 10^8 \text{ mS}^{-1}$  étant la vitesse de propagation.

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à  $5800^\circ \text{ K}$ . Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom d'AM0. Sa distribution en énergie est répartie en: [1][6]

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

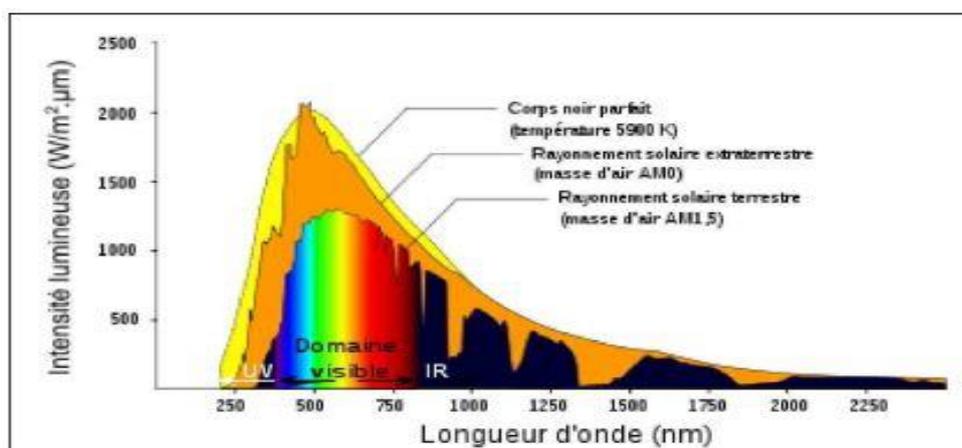


Figure (I.2) : Le spectre rayonnement [6]

### I.3.4. Cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques ou les plaques solaires sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque », qui a été découvert par E. Becquerel en 1839. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants [1][5].

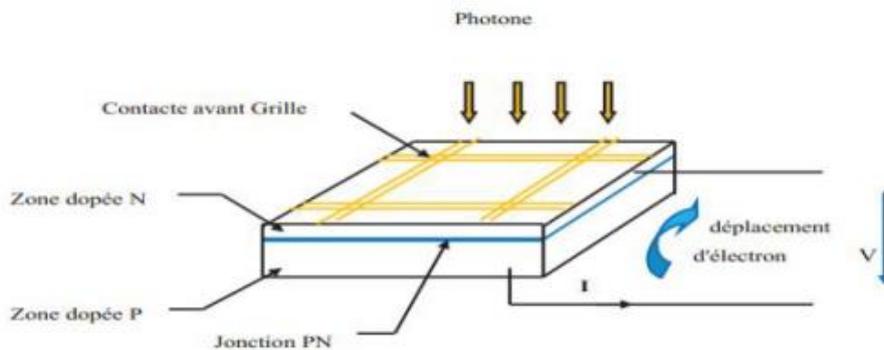


Figure (I.3) : schéma d'une cellule photovoltaïque [5].

### I.3.5. La conversion photovoltaïque

Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charge libre est très faible par rapport aux métaux. Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimale pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction). Cette énergie s'appelle bande interdite  $E_g$  (eV).

Le spectre du rayonnement solaire est la distribution des photons, particules de lumière en fonction de leur énergie (inversement proportionnelle à la longueur d'onde). Le rayonnement arrivant sur la cellule solaire sera en partie réfléchi, une autre absorbée et le reste passera à travers l'épaisseur de la cellule [6].

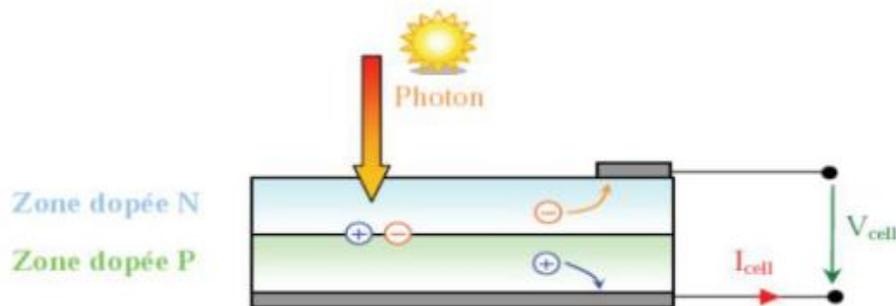
Les photons absorbés dont l'énergie est supérieure à l'énergie de la bande gap vont libérer un électron (charge négative), laissant un « trou » (charge positive) derrière lui. Pour séparer cette paire de charges électriques de signes opposés et recueillir un courant électrique, il faut introduire un champ électrique de part et d'autre de la cellule [6].

La méthode utilisée pour créer ce champ est le dopage du semi - conducteurs par des impuretés . Deux types de dopage sont possibles :[4][6]

- ❖ Le dopage type n (négatif) consiste à introduire dans la structure cristalline semi conductrices des atomes étrangers qui ont la propriété donner chacun un électron excédentaire (charge négative), libre de se mouvoir cristal . C'est le cas du phosphore (P) dans le silicium (Si). Dans un matériau de type n, on augmente fortement la concentration en électrons libres .
- ❖ Le dopage de type P (positif) utilise des atomes dont l'insertion dans le réseau cristallin donnera un trou excédentaire. Le bore (B) est le dopant de type P le plus couramment utilisé pour le silicium

Lorsque l'on effectue deux dopages différents (type n et type P) de part et d'autre de la cellule, il en résulte, après recombinaison des charges libre (électrons et trous), un champ électrique constant crée par la présence d'ions fixes positifs et négatifs

Les charges électriques générées par l'absorption du rayonnement pourront contribuer au courant de la cellule photovoltaïque. Lorsque l'énergie de la bande interdite augmente, le courant diminue mais la tension est plus élevée [2].



**Figure (I.4) :** schéma de principe de la conversion photovoltaïque [6].

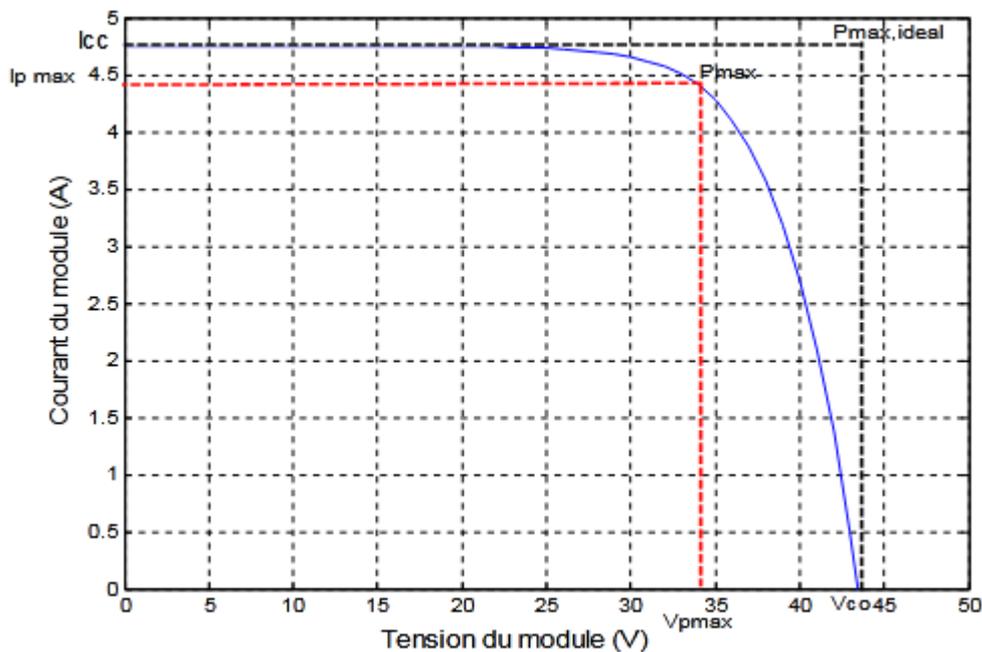
## I.4.Générateur photovoltaïque

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un GPV. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera [7].

I.4.1. Constitution d'un générateur photovoltaïque

Afin d'augmenter la tension d'utilisation, les cellules PV sont connectées en série. La fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre. Le tout est appelé un module photovoltaïque [6].

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle pour construire le champ photovoltaïque 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 et l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dues à de l'ombrage, de la poussière, etc...), peuvent endommager les cellules de façon permanente [2][5].



Figure(I.5) : Puissance maximale idéale et pratique [5].

I.4.1.1. Association en série :

En additionnant des cellules (modules) identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série.

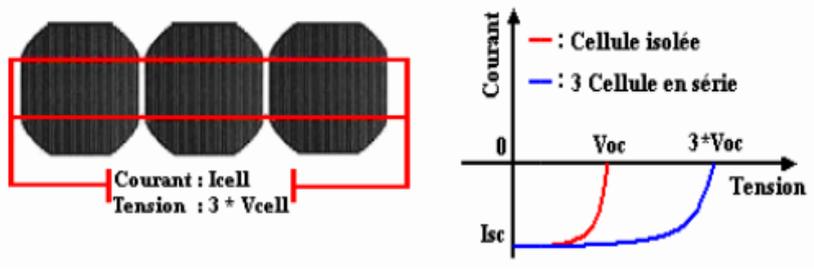


Figure (I.6) : Cellules connectées en série avec leur caractéristique courant-tension [5].

**I.4.1.2. Association en parallèle**

En additionnant des cellules (modules) identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque cellule (module) et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en parallèle dans la branche

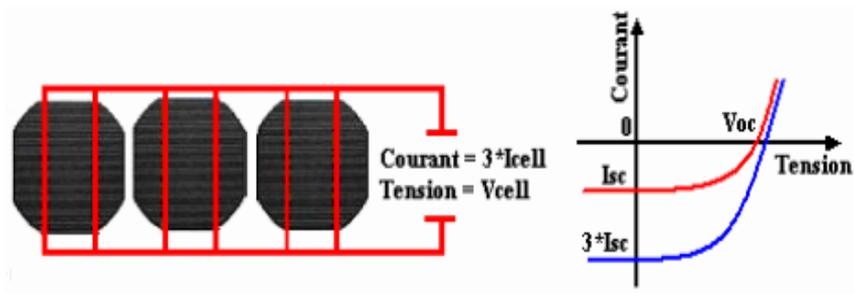


Figure (I.7) : Cellules connectées en parallèle avec leur caractéristique courant-tension [5].

**I.4.2. Les composants d'un système solaire**

**I.4.2.1. Les modules photovoltaïques**

Les modules sont un assemblage de photopile (ou cellule) montée en série, afin d'obtenir la tension désirée (12V, 24V ...). La cellule photovoltaïque est l'élément de base dans la conversion du rayonnement [1]. Plusieurs cellules sont associées dans un module qui est la plus petite surface de captation transformable, montable et démontable sur un site. Les modules sont regroupés en panneaux, qui sont à leur tour associés pour obtenir des champs photovoltaïques selon les besoins. Les cellules photovoltaïques sont réalisées principalement

par le silicium cristallin, qui est utilisé sous forme monocristalline ou multi-cristalline en plaquette ou en ruban ou encore en couches semi-minces sur substrat selon les technologies récentes [7].

Les modules sont associés en série et en parallèle pour obtenir des puissances importantes et la tension voulue.

On protège chaque cellule PV contre l'échauffement en lui montant une diode dite « diode by-pass » en parallèle qui la court-circuite. Aussi on évite qu'un module PV soit récepteur en mettant en série à chaque branche une diode dite « diode anti-retour », de chute de tension négligeable [2].

Les associations série-parallèle des modules et des diodes sont présentés sur la figure ci-dessous.

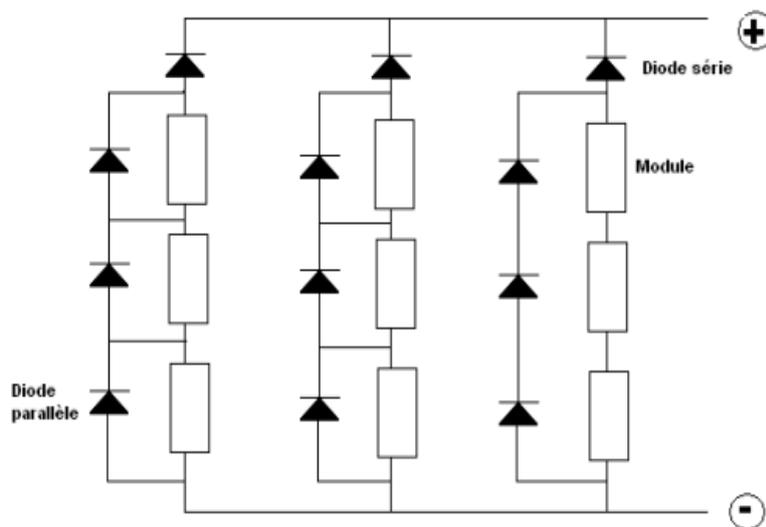


Figure (I.8) : Réseau de modules en série-parallèle [6].

### I.4.2.2. Le régulateur de charge et décharge

Le régulateur électronique dans un système photovoltaïque gère la charge et la décharge de la batterie. Il limite la tension de la batterie afin d'éviter une surcharge, en déconnectant la batterie trop chargée des modules PV. Quand la batterie est trop déchargée, il la déconnecte de l'utilisation, par un disjoncteur automatique pour la protéger contre la décharge profonde.

Dans un système PV, en l'absence d'un régulateur, les accumulateurs seront exposés à une perte d'eau donc un vieillissement prématuré et à la sulfatation des plaques.

Le régulateur dans un système photovoltaïque peut assurer aussi le rôle de la compensation thermique. Il est situé entre le champ de modules et les batteries accumulateurs [7].

### **I.4.2.3. Les batteries d'accumulation**

Dans un système photovoltaïque, la ressource solaire ne pouvant être disponible à tout moment, il est indispensable de stocker de manière journalière ou saisonnière de l'énergie électrique produite par les panneaux solaires. On utilise pour cela des batteries d'accumulateurs. Les batteries les plus courantes sont de type plomb-acide à plaque plane pour les installations de faible puissance et de type plomb-acide à plaque tubulaire pour les installations de grandes puissances. Il existe aussi des accumulateurs de type nickel-cadmium qui sont chères et qui posent des problèmes de régulation de tension. A long terme, on pourra voir apparaître d'autres systèmes de stockage.

Une batterie est constituée essentiellement des deux électrodes ( une positive et une négative) qui représentent ses bornes et un électrolyte( solution d'acide sulfurique de viscosité variable) ; Les batteries sont connectées au régulateur électronique car elles sont chargées à travers le régulateur et elles alimentent les charges par le biais du même régulateur.

On associe plusieurs batteries en série pour obtenir une tension adaptée à l'utilisation et on les associe en parallèle pour avoir la capacité et la puissance nécessaire à l'autonomie désirée.

Les tensions des batteries seront déterminées par rapport à celle aux bornes des récepteurs à courant continu et la tension des modules. Le nombre de batterie sera déterminé à partir de l'autonomie désirée [5][7].

### **I.4.2.4. L'onduleur**

La tension produite par les modules photovoltaïques est continue et celle fournie par les batteries pour l'alimentation des charges est aussi de nature continue. Dans ces conditions, il faudra intégrer obligatoirement un onduleur au système PV destiné à alimenter des charges alternatives. L'onduleur est un convertisseur DC/AC, c'est-à-dire convertir la sortie continue (DC) du champ de module ou des batteries en électricité alternative (AC) standard comme celle fournie par la SBEE [5].

## I.4.2.5. Le contrôleur DC/DC

Il peut arriver que dans un système PV, la tension de sortie du champ ou de la batterie soit inférieure ou supérieure à celle de l'utilisation, qui doit être alimentée en continu. Il est donc nécessaire pour ces systèmes, un convertisseur DC-DC qui assure l'adaptation de la tension de sortie du système PV à celle d'usage de la charge. Le convertisseur DC-DC transforme une tension continue de son entrée en une tension de sortie continue inférieure ou supérieure à celle de l'entrée selon qu'il soit abaisseur ou élévateur. Il permet de contrôler le signal d'alimentation de la charge et le stabilise [4].

## I.4.2.6. Les câbles électriques

Les câbles relient électriquement tous les composants du système PV. Le câblage est un point critique de toute installation PV. Il est très important de bien dimensionner les conducteurs afin d'éviter la circulation d'un courant très fort dans les câbles même pour de petites puissances dans le cas d'utilisation de faibles tensions. Le choix des câbles dont l'enveloppe est adapté aux conditions d'utilisation est nécessaire [4].

## I.4.2.7. Les récepteurs

Les récepteurs ou charges (utilisations) font partie du système PV. Leurs tensions d'usage et leurs puissances déterminent les caractéristiques des éléments du système. Les récepteurs doivent être choisis avec soin. Lorsque c'est possible, il faut choisir les récepteurs de grand rendement. Après le choix des charges à alimenter par notre mini-centrale PV, nous relèverons leurs caractéristiques qui nous permettront de déterminer la puissance à installer [7].

## I.4.3. Caractéristique électrique

### I.4.3.1. Propriétés

La cellule photovoltaïque possède une caractéristique  $I(V)$  non linéaire **figure(I.7)** La caractéristique d'une cellule photovoltaïque balaie 3 quadrants sur les 4 existants

Une cellule PV est un récepteur dans le quadrant 2 et dans le quadrant 4. Le fonctionnement dans ces deux quadrants est à proscrire car un risque de destruction par phénomène d'échauffement local (hot spot) est possible. Le fonctionnement dans le quadrant [1]

est le fonctionnement normal, en effet dans ce cas la cellule est un générateur, elle produit donc de l'énergie. L'objectif est donc de faire travailler la cellule dans ce quadrant [7].

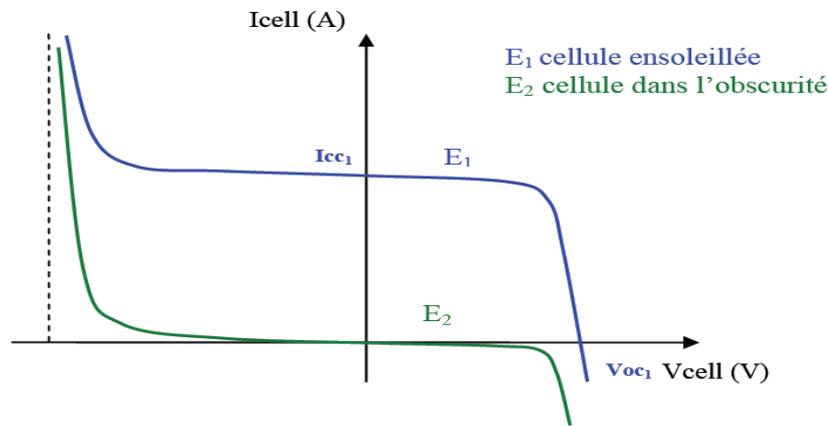


Figure (I.9) : Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque [7].

La tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ) d'une cellule PV est comprise entre 0,3V et 0,7V selon le matériau utilisé, la température et son état de vieillissement. Son courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) varie principalement selon le niveau d'éclairement et selon les technologies et les tailles de cellules (entre 5 et 8A pour le silicium cristallin).

I.5.3.2. Zones de fonctionnement du module solaire

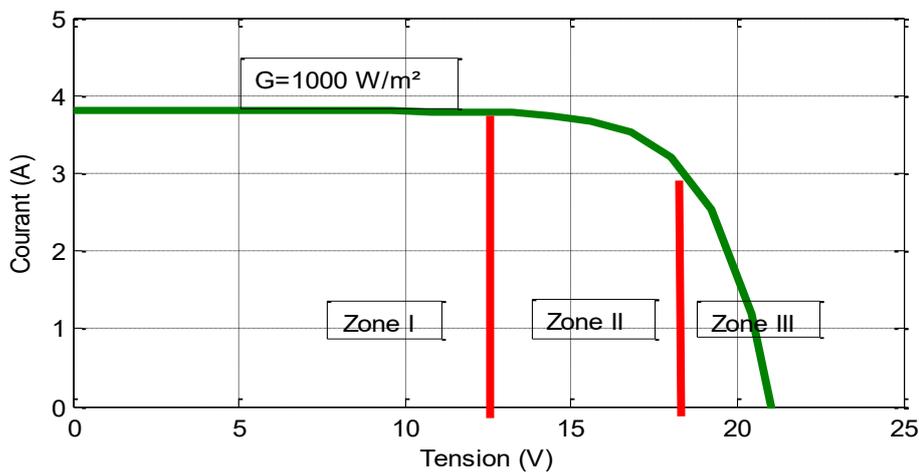


Figure (I.10) : Caractéristiques I(V) d'une cellule et d'une association de 3 branches en parallèle ayant chacune 2 cellules en série.

Les caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque varient en fonction de la température, de l'éclairement et, de façon générale, des conditions de fonctionnement lorsqu'il est connecté à une charge donnée. Nous rappelons brièvement dans ce paragraphe le

comportement du générateur soumis à diverses contraintes. Ces notions sont en effet nécessaires pour comprendre le comportement d'un générateur PV et ensuite effectuer des optimisations de fonctionnement [3].

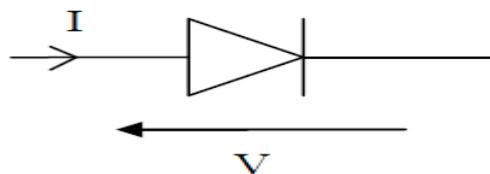
Nous pouvons décomposer la caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque en 3 zones :[4]

- Une zone assimilable à un générateur de courant ICC proportionnel à l'irradiation, d'admittance interne pouvant être modélisée par 1/Rsh (Zone 1),
- Une zone assimilable à un générateur de tension Vco d'impédance interne équivalente à la résistance série Rs (Zone 2),
- Une zone où l'impédance interne du générateur varie très fortement de Rs à Rsh, zone (3). C'est dans la (Zone 3) qu'est situé le point de fonctionnement pour lequel la puissance fournie par le générateur est maximale. Ce point est appelé point de puissance optimale, caractérisé par le couple (Imax, Vmax), et seule une charge dont la caractéristique passe par ce point, permet d'extraire la puissance maximale disponible dans les conditions considérées .

**I.4.3.3. Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque**

Une cellule photovoltaïque dans l'obscurité est une diode. Dans le cas idéal, le courant circulant dans une cellule est donc donné par la relation de Shockley :

$$I = I_s \times \left[ \exp \left( \frac{q.V}{K.T} \right) - 1 \right] \tag{I.1}$$



Lorsque la cellule est éclairée, le courant circulant dans celle-ci devient :

$$I = I_s \times \left[ \exp \left( \frac{q.V}{K.T} \right) - 1 \right] - I_{ph} \tag{I.2}$$

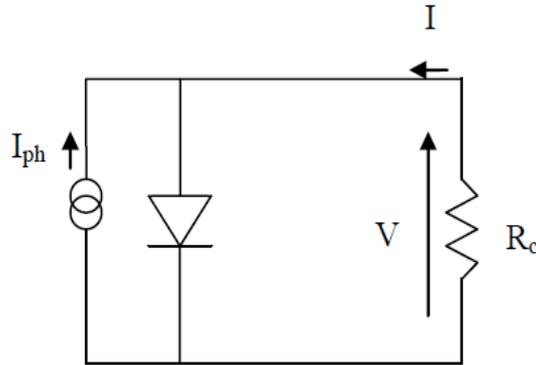


Figure (I.11) : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.

$R_c$  : résistance de la charge connectée à la cellule.

Dans la réalité, on doit ajouter une résistance série  $R_s$  pour tenir compte des résistances des électrodes et de celles induites par les interfaces électrode-semi conducteur. On doit également ajouter une résistance parallèle  $R_p$  (résistance shunt en anglais) qui prend en compte les courts circuits dans la cellule **figure (I.8)**. Ces courts circuits dans la cellule sont dus à l'organisation des matériaux (dans un mélange de matériaux, il existe des chemins favorables à la recombinaison des charges), à la présence d'aluminium dans la couche active (diffusion d'aluminium lors de la réalisation de l'électrode) et aux charges au voisinage des interfaces de séparation des excitons qui ont tendances à recombinaison des charges séparées [4].

Le courant est alors donné par la relation :

$$I = \frac{R_p}{R_s R_p} \left[ I_s \times \left[ \exp \left( \frac{q(V - I R_s)}{n k T} \right) - 1 \right] + \frac{V}{R_p} - I_{ph} \right] \tag{I.3}$$

$n$  : facteur d'idéalité de la diode.

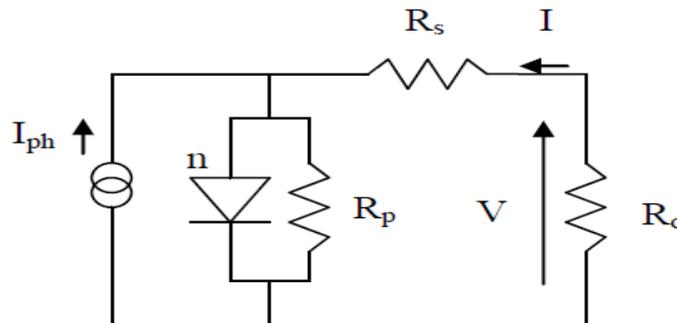


Figure (I.12) : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque

**I.5. Propriétés fondamentales des semi-conducteurs**

Afin de comprendre le fonctionnement des cellules solaires aux semi-conducteurs, il faut se familiariser avec quelques concepts de base de la physique du solide. Les cellules solaires peuvent être fabriquées à partir d'un nombre de matériaux semi-conducteurs. Généralement, les plus utilisés sont le silicium (Si)

monocristallin, polycristallin et amorphe. On trouve aussi les cellules à base de matériaux comme GaAs, GaInP, Cu(InGa)Se<sup>2</sup>, CdTe, ...etc.

Les matériaux des cellules solaires sont largement choisis sur la base de leurs caractéristiques d'absorption, devant s'adapter avec le spectre solaire et sur la base de leurs coûts de fabrication. Le silicium a été, pour longtemps, un choix adéquat dû au fait qu'il présente une assez bonne absorption adaptée au spectre solaire et aussi au fait

que sa technologie est bien développée en raison de sa dominance dans l'industrie électronique des semi-conducteurs.

**I.5.1. Structure à bandes dans un semi-conducteur**

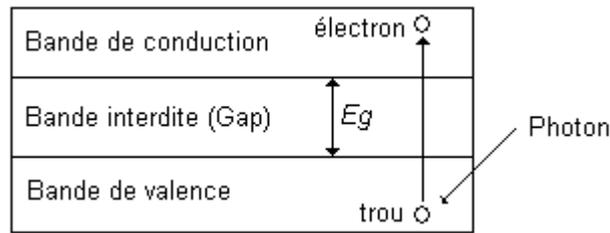
Les propriétés chimiques et électriques de l'atome sont liées aux électrons qui gravitent autour du noyau. Les électrons se répartissent en orbites ; la dernière définit, en fait, les principales propriétés de l'élément correspondant. L'électron possède, par rapport au noyau, une certaine énergie  $E$  à laquelle correspond un potentiel  $\phi$

$$E = q \cdot \phi + \text{constante} \quad (\text{I.4})$$

$E$  est en électron-volt.

Le comportement dynamique de l'électron peut être déduit par la résolution de l'équation de Schrödinger. L'application de la mécanique quantique à l'atome n'a pas modifié fondamentalement les résultats de la théorie de Bohr. Basée sur le principe d'exclusion de Pauli et le principe d'incertitude d'Heisenberg, la mécanique quantique montre que, pour un atome isolé, l'électron ne peut occuper que des niveaux discrets (quantifiés) d'énergie. Les orbites, c'est-à-dire, les états d'énergie permis aux électrons, dépendent (équation de Schrödinger) de la fonction potentiel dans laquelle ces électrons se meuvent (fonction en  $1/r$  dans l'atome isolé).

Ainsi, pour un monocristal, on peut montrer qu'il existe des domaines d'énergie appelés bandes dont certaines sont permises et d'autres interdites **Figure (I.11)**.



**Figure (I.13) :** Niveaux énergétiques dans un semi conducteur [5].

La solution conduit à la définition de la structure à bandes (niveaux d'énergie permis pour l'électron) et la relation entre l'énergie de l'électron et le moment du semi-conducteur .

En ne considérant que les électrons de la couche périphérique, c'est-à-dire les électrons ayant l'énergie la plus élevée, les éléments chimiques peuvent être classés en deux catégories principales :[1][5]

- ❖ Les isolants et les semi-conducteurs : caractérisés par une bande interdite qui sépare deux bandes permises,
- ❖ Les métaux : il n'y a pas de bande interdite et les bandes permises se recouvrent.

La largeur de la bande interdite est appelée gap ( $E_g$ ). Elle est d'autant plus grande que le matériau est isolant.

Dans un semi-conducteur à une température absolue nulle, la bande de valence est complètement pleine et la bande de conduction est vide de telle sorte qu'aucune conduction électrique n'est possible (tous les électrons sont liés à leurs atomes).

Cependant, dans un semi-conducteur, l'énergie nécessaire pour séparer les électrons externes de leurs atomes est relativement faible. Cette énergie correspond à l'énergie du gap  $E_g$  de telle sorte que les électrons reçoivent une énergie suffisante pour faire une transition de la bande de valence vers la bande de conduction. Cette énergie peut être une augmentation de la température ou une interaction avec un photon lumineux

Le gap  $E_g$  et sa structure en fonction du vecteur d'onde sont des caractéristiques clés du matériau semi-conducteur et de l'importance fondamentale de l'opération de la cellule solaire.

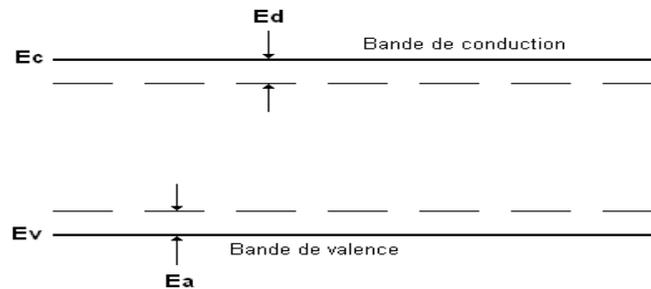
Les principales caractéristiques sont la variation du gap sous l'effet de la température et la grandeur du vecteur d'onde associé à une faible énergie des transitions [2].

## I.5.2. Dopage d'un semi-conducteur

On peut contrôler le nombre des électrons et des trous dans leurs bandes respectives (c'est-à-dire la conductivité du semi-conducteur) par introduction d'impuretés spécifiques (ou additifs) appelées donneurs ou accepteurs. Ces additifs ont la propriété de se placer en position de substitution dans le cristal : dans le silicium dopé au phosphore, par exemple, chaque atome de phosphore prend la place d'un atome de silicium. Si on prend le cas du silicium dopé par un élément pentavalent comme le phosphore, l'atome de phosphore qui possède cinq électrons de valence en met quatre en liaison covalentes avec ses quatre voisins tétravalents (silicium). Il reste donc un électron excédentaire qui est nécessairement peu lié à l'atome de phosphore. Il suffit, à cet atome excédentaire, un surplus d'énergie très faible pour rompre sa liaison et devenir un électron libre situé, énergétiquement, dans le bas de la bande de conduction ou peu au dessus. Les énergies d'ionisation des atomes pentavalents ont été mesurées : elles valent environ 0.01eV pour un cristal de germanium et 0.05eV environ pour un cristal de silicium. Dans ce cas, l'atome pentavalent est dit donneur d'électrons et le silicium dopé est de type N. Si, par contre, le silicium est dopé par un élément trivalent (le bore, par exemple), chaque atome [5].

trivalent met ses trois électrons de valence en liaison avec trois de ses quatre voisins, et capture un électron d'un quatrième atome pour devenir un ion négatif et créer un ion positif  $Si^+$ , ce qui fait apparaître un trou. Dans ce cas, l'atome trivalent est dit accepteur d'électrons. Ce type de dopage aboutit à un silicium de type P. Toutes les impuretés introduisent des états électroniques dans la structure à bandes (souvent dans la bande interdite entre  $E_c$  et  $E_v$  comme c'est illustré dans la **Figure (I.10)**). Si l'état d'énergie  $E_D$  introduit par un atome est suffisamment proche de la limite de la bande de conduction (avec quelques  $kT$ ), il y aura une énergie thermique suffisante pour permettre l'extraction d'électrons pour occuper un état dans la bande de conduction. L'état donneur sera donc chargé positivement. D'une façon similaire, l'atome accepteur introduira, dans l'état d'énergie  $E_A$ , une charge négative. Dans un semi-conducteur, l'introduction contrôlée des donneurs et des accepteurs permet la création de deux types du semi-conducteur, l'un de type n (les électrons sont la source primaire de la conduction électrique) et l'autre de type p (les

trous sont la source primaire de la conduction électrique). Ces deux types constituent la base de la fabrication de tous les dispositifs des semi-conducteurs y compris les cellules solaires [5][2].

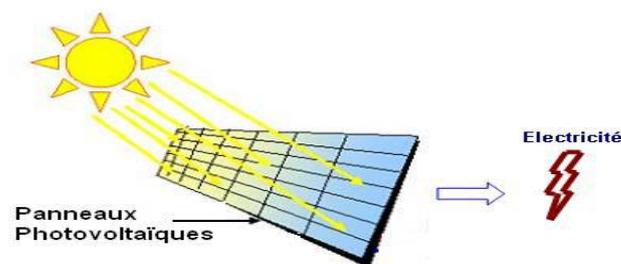


**Figure (I.14) :** Niveau Donneur et accepteur dans un semi-conducteur. La distribution spatiale non uniforme de ces états renforce le concept qu'ils sont des états localisés.

## I.6.Principe de fonctionnement

### I.6.1. La conversion de la lumière en électricité

Le terme « photovoltaïque » souvent abrégé par le sigle « PV », à été formé à partir des mots « photo » un mot grec signifiant lumière et « Volta » le nom du physicien italien Alessandro Volta qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité [2].



**Figure (I.15) :** conversion de l'énergie solaire en électricité.

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Les modules photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. La conversion photovoltaïque se produit dans des matériaux semi-conducteurs. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable [2].

- ❖ Dans un **isolant électrique** : les électrons de la matière sont liés aux atomes et ne peuvent pas se déplacer.
- ❖ Dans un **conducteur électrique** (un fil de cuivre par exemple) les électrons sont totalement libres de circuler et permettent le passage d'un courant.
- ❖ Dans un **semi-conducteur** : la situation est intermédiaire, les électrons contenus dans la matière ne peuvent circuler que si on leur apporte une énergie pour les libérer de leurs atomes. Quand la lumière pénètre dans un semi-conducteur, ces photons apportent une énergie permettant aux électrons de se déplacer, il y a donc courant électrique sous l'exposition à la lumière.

### I.6.2. Fonctionnement d'une cellule solaire 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. 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 matériau *n* diffusent dans le matériau *p*. La zone initialement dopée *n* devient chargée positivement, et la zone initialement dopée *p* chargée négativement [4][2].

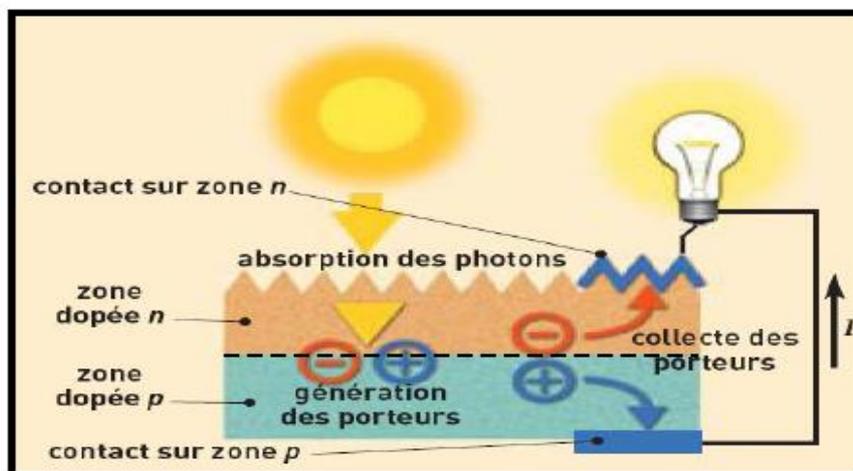


Figure (I.16) : Principe de la conversion photovoltaïque [4].

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. 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. 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: le courant électrique circule **Figure (I.16)**.

### I.7. Stockage d'énergie

#### I.7.1. Les Batteries

La batterie sert à stocker l'énergie produite par le champ de modules photovoltaïques. Il y a nécessité de stockage chaque fois que la demande énergétique est décalée. Dans le temps vis-à-vis de l'apport énergétique solaire.

En effet, la demande énergétique est une fonction de la charge à alimenter et les appareils utilisés. L'apport énergétique solaire est périodique (alternance jour/nuit). Ce décalage entre la demande et l'apport énergétique nécessite un stockage d'électricité.

Le système tampon utilisé le plus couramment pour les systèmes photovoltaïques est les batteries d'accumulateurs électrochimiques.

Dans un système photovoltaïque, la batterie remplit trois fonctions importantes :

**Autonomie** : Une batterie permet de répondre aux besoins de la charge en tout temps, même la nuit ou par temps nuageux.

**Courant de surcharge** : Une batterie permet de fournir un courant de surcharge pendant quelques instants, c'est-à-dire un courant plus élevé que celui que peut fournir le champ photovoltaïque. Ceci est nécessaire pour faire démarrer les moteurs et les autres appareils requérant un courant de démarrage de 3 à 5 fois supérieur au courant d'utilisation.

**Stabilisation de la tension** : Une batterie permet de fournir une tension constante, en éliminant les écarts de tension du champ photovoltaïque et en permettant aux appareils un fonctionnement à une tension optimisée [4][2].

#### I.7.2. Les Types de Batteries

Il existe deux types de batteries : [7]

Les batteries ouvertes : Sont des batteries au plomb contenant de l'électrolyte liquide dont l'eau doit être contrôlée.

Les batteries étanches : Ne contiennent pas de liquide, mais du gel. Ainsi, elles peuvent fonctionner dans toutes les positions et ne demandent absolument aucun entretien puisqu'il n'y a pas d'eau à rajouter.

## I.8. Technologie et Type d'Accumulateurs

### I.8.1. Les Différents types d'accumulateurs au plomb

C'est le type d'accumulateur le plus largement répandu sur le marché et c'est aussi la plus ancienne technologie de stockage d'énergie. Ils sont sur tout utilisés dans nos voitures pour alimenter le démarreur. Il est à remarquer que plus du tiers de la production mondiale de plomb est destinée à la fabrication de batteries au plomb [2].

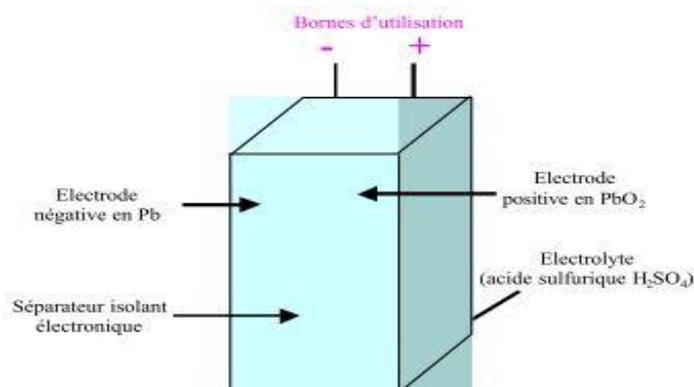


Figure (I.17) : Structure d'un accumulateur acide/plomb à plaques planes [5].

Il existe deux types d'accumulateurs au plomb, la batterie dite ouverte et la batterie scellée ou à recombinaison de gaz.

#### I.8.1.1. La batterie au plomb ouverte

Dans le tableau (I.1) la comparaison entre les Lors du fonctionnement de la batterie au plomb dite ouverte, les productions de gaz suite aux réactions secondaires de décomposition de l'eau s'échappent naturellement par les orifices prévus au niveau des bouchons. Le dégagement de dihydrogène dans le lieu de stockage des batteries est source de danger, car son mélange avec l'air ambiant est potentiellement explosif à partir de 4% en volume. Nous avons représenté deux types de batterie [4].

Type de batterie au plomb	Ouverte(1.1.5)	A Recombinaison da gaz (1.1.5.2)	
<b>ELECTROLYTE</b>	Liquide	Gélifié	Absorbé (parle séparateur)
<b>APPELLATION ANGLLO-SAXONNE</b>	Flooded (ou vented) battery	Gel VRLA (ou scaled) Batterie	VRLA(ou scaled) AGM separator Battery
<b>AVANTAGES</b>	*durée de vie pouvant être importante (5 à 15ans) *technologie la moins chère	*Recombinaison=>pas de perte en eau (pas d'entretien) *très faible taux de dégagement de gaz (sécurité).	
<b>INCONVENIENS</b>	*consommation d'eau (maintenance) *installation en locaux spécifiques (dégagement gazeux)	*plus faible durée dz vie (modes de défaillance spécifique) *plus sensible à la température.	

**Tableau (I.1) :** Principales comparaisons des deux types de batterie au plomb

Dans le cadre du stationnaire de secours, une installation en locaux spécifiques ventilés est obligatoire. Les batteries ouvertes produites aujourd'hui (à base de grilles à fortes sur tensions d'oxygène et d'hydrogène, sont souvent qualifiées de batteries "sans maintenance" ou "sans entretien". Ces appellations ont été choisies car la consommation d'électrolyte est si faible que la réserve d'électrolyte d'origine est suffisante pour assurer le bon fonctionnement de la batterie pendant toute sa durée de vie [2].

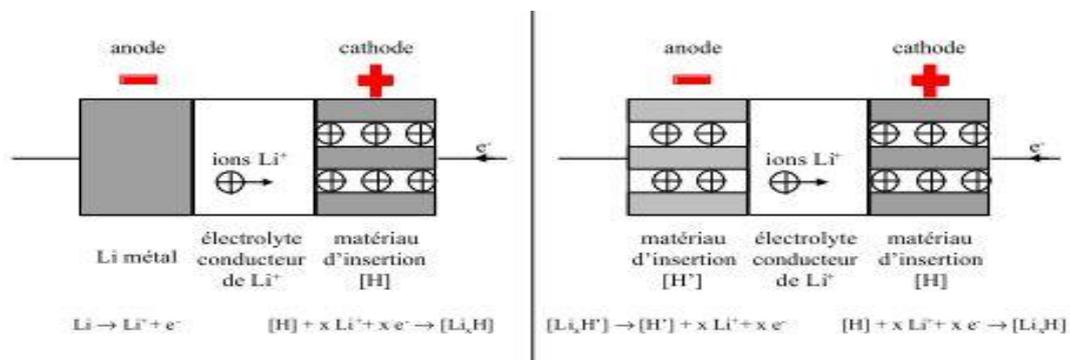
**I.8.1.2. La batterie à recombinaison de gaz**

Les premières batteries à recombinaison de gaz sont apparues fin des années 1950, grâce à la fabrication d'un électrolyte gélifié. Ce type d'électrolyte permet la formation de chemins gazeux facilitant le transfert rapide du dioxygène, qui suit alors un cycle interne : produit à l'électrode positive, sa diffusion vers l'électrode négative est optimisée et il atteint l'électrode négative où il y est réduit (formation de molécules d'eau.

Les batteries à recombinaison de gaz sont appelées aussi batteries VRLA (Valve-Regulated Lead-Acid) ou batteries étanches.

**I.8.1.3. la Batterie au lithium ion (Li-ion)**

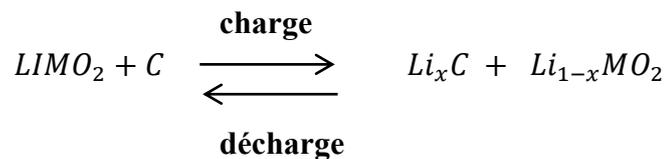
Les premiers accumulateurs de ce type ont été commercialisés par Sony dans les années 90. Ils présentent un plus grand potentiel électrochimique. En plus, le lithium est le plus léger des métaux. Les accumulateurs aux ions de lithium sont largement utilisés dans l'industrie des ordinateurs portables, les téléphones cellulaires ainsi que dans les systèmes embarqués à cause de leur haute densité d'énergie. D'ailleurs, ce type de batterie d'accumulateurs a une bonne performance à température élevée et une faible auto décharge d'autant plus qu'il ne présente aucun effet mémoire [1][3].



**a- Accumulateur au lithium métal**

**b - accumulateur aux ions lithium**

Les deux électrodes du couple chimique sont le siège des réactions globales suivantes :



Les premières batteries d'accumulateurs de ce genre avaient des durées de vie assez faibles.

Afin de remédier à ce problème, on a changé la structure de l'électrode au lithium. Le tableau ci-dessous présente quelques caractéristiques nominales de l'accumulateur.

Tension nominale par cellule (volt)	3.6
Resistance interne	Très faible
Température de fonctionnement (°C)	ambiante
Autodécharge	Faible, 10% par mois
Temps de charge (h)	2 à 3
Nombre de cycles de vie	Plus que 1000

**Tableau (I.2) :** Caractéristiques de l'accumulateur Li-ion

Le seul inconvénient que présente l'accumulateur aux ions de lithium est que l'électrode négative est composée de lithium métallique qui peut causer des problèmes de sécurité.

Pour contrer cela, un autre type d'accumulateur a été développé, il s'agit des accumulateurs lithium polymère qui fournissent un peu moins d'énergie, mais ils sont plus sûrs.

	<b>Plomb</b>	<b>Li-ion</b>
Tension nominale par cellule [volt]	2,1	3,6
Resistance interne	Très faible	Très faible
Température de fonctionnement [°C]	ambiante	Ambiante
Autodécharge	~ 2 % par jour	Faible, 10% par mois
Nombre de cycles de vie	Jusqu'à 800 cycles.	Plus que 1000

**Tableau (I.3) :** Comparaison entre les deux types d'accumulateurs.

## **I.9. Avantages et inconvénients d'une installation photovoltaïque**

### **I.9.1. Avantages**

Parmi les avantages d'une installation photovoltaïque, on peut citer : [4][2]

- Haute fiabilité : l'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Caractère modulaire des panneaux photovoltaïques ; ceci permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au mégawatt.
- Coût de fonctionnement très faible ; vu les entretiens réduits, et la non-nécessité du combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Qualités écologiques ; le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

### I.9.2. Inconvénients

Parmi les inconvénients, on note : [4]

- Fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût très élevé.
- Rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10 à 15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28 %.
- Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour de faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.
- Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur.

**I.10. Conclusion**

En résumé, technologiquement, un capteur PV est proche d'une diode PN de par sa constitution, les matériaux utilisés, et les phénomènes physiques identiques mis en œuvre.

Le comportement d'une cellule PV peut donc se modéliser comme celui d'une mauvaise jonction PN autant en statique qu'en dynamique lorsque cette dernière n'est pas éclairée.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les enjeux et les développements actuels du photovoltaïque. Nous avons ensuite présenté le fonctionnement d'une cellule en expliquant brièvement le phénomène photovoltaïque (L'effet photovoltaïque). Nous avons vu que la cellule PV présente une caractéristique  $I(V)$  non linéaire, présente un point de puissance maximal (PPM) caractérisé par un courant ( $I_{max}$ ) et une tension ( $V_{max}$ ) et qu'elle peut être modélisée par un circuit électrique simple.

Un état de l'art des composants électrochimiques a permis de mesurer la très grande variété des technologies et des composants aujourd'hui utilisables pour la production et/ou le stockage de l'énergie dans les systèmes de conversion d'énergie relevant du génie électrique, une partie d'un large paysage renouvelé par les Nouvelles Technologies de l'Energie.

D'une part, cette description analytique a permis de mettre en exergue les propriétés à considérer dans la conception des systèmes.

D'autre part, elle nous a permis de dégager des phénomènes chimiques et électriques qui sont présents dans la plupart des composants électrochimiques, malgré des technologies très variées.



**Chapitre II**  
**La**  
**Commande**  
**MPPT**

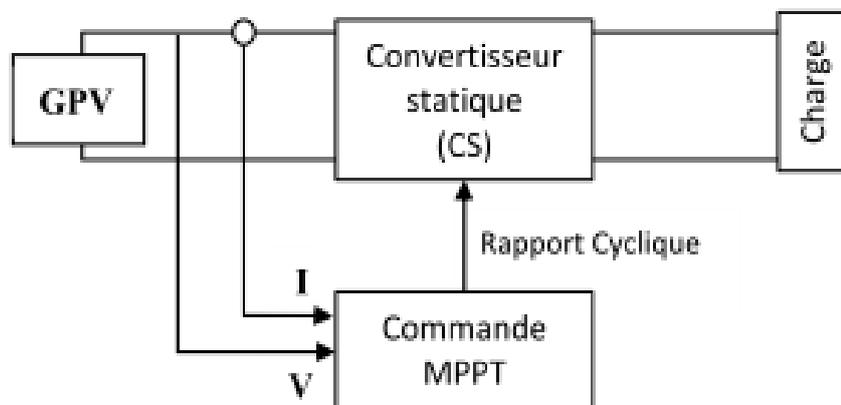
## II.1.Introduction

Des lois de commandes spécifiques existent pour amener des dispositifs à fonctionner à des points maximums de leurs caractéristiques sans qu'a priori ces points soient connus à l'avance, ni sans que l'on sache à quel moment ils ont été modifiés ni qu'elles sont les raisons de ce changement.

Pour le cas de sources énergétiques, cela se traduit par des points de puissance maximum. Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou bien « Maximum Power Point Tracking » en anglo-saxon (MPPT). Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximal (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance.

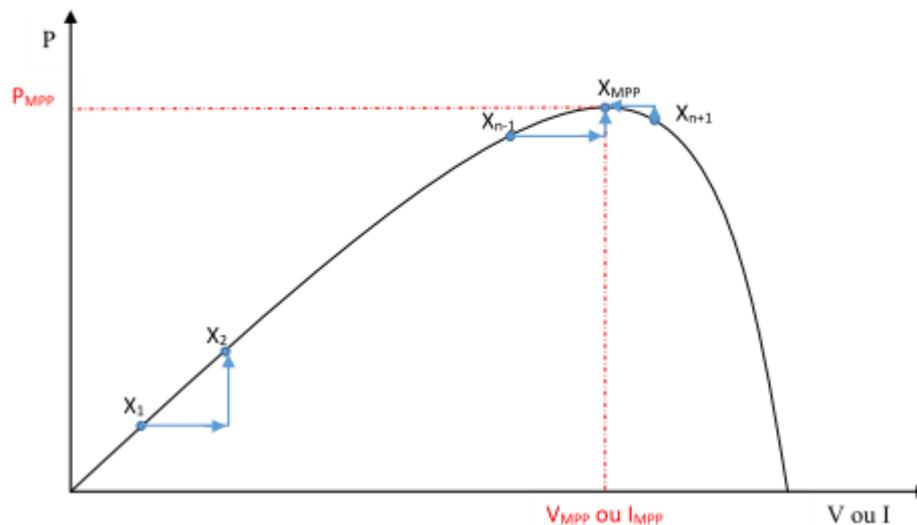
## II.2.Principe De La Commande MPPT

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un GPV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum ( $V_{PPM}$  et  $I_{PPM}$ ). La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT ; Il peut être représenté par le schéma de la **Figure (II.1)** [8].



**Figure (II.1) :** Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge [8].

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP [8][12].



**Figure (II.2) :** Principe de la commande MPPT [12].

### II.3. Classification Des Commandes MPPT

La classification peut être basée sur la fonction des techniques ou des stratégies de commande utilisées. Ainsi, deux catégories peuvent être présentées: méthodes directes et indirectes [9].

#### II.3.1.MPPT indirecte

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées ( $I_{sc}$  ou  $V_{oc}$ ), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes en se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur. Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y

a peu de changements climatiques. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur, la méthode de court-circuit etc... [12].

### II.3.2.MPPT Directe

Les méthodes directes sont des méthodes qui utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV est indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables [11].

Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. D'autres algorithmes se basent sur l'introduction de variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du convertisseur pour comparer la composante alternative et la composante continue de la tension du GPV et pour ainsi placer le point de fonctionnement du GPV le plus près possible du MPP. L'avantage de ce type de commandes est leurs précisions et leur rapidité de réaction. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode Perturbe & Observe (P&O), l'incrément de conductance (InC)... [10].

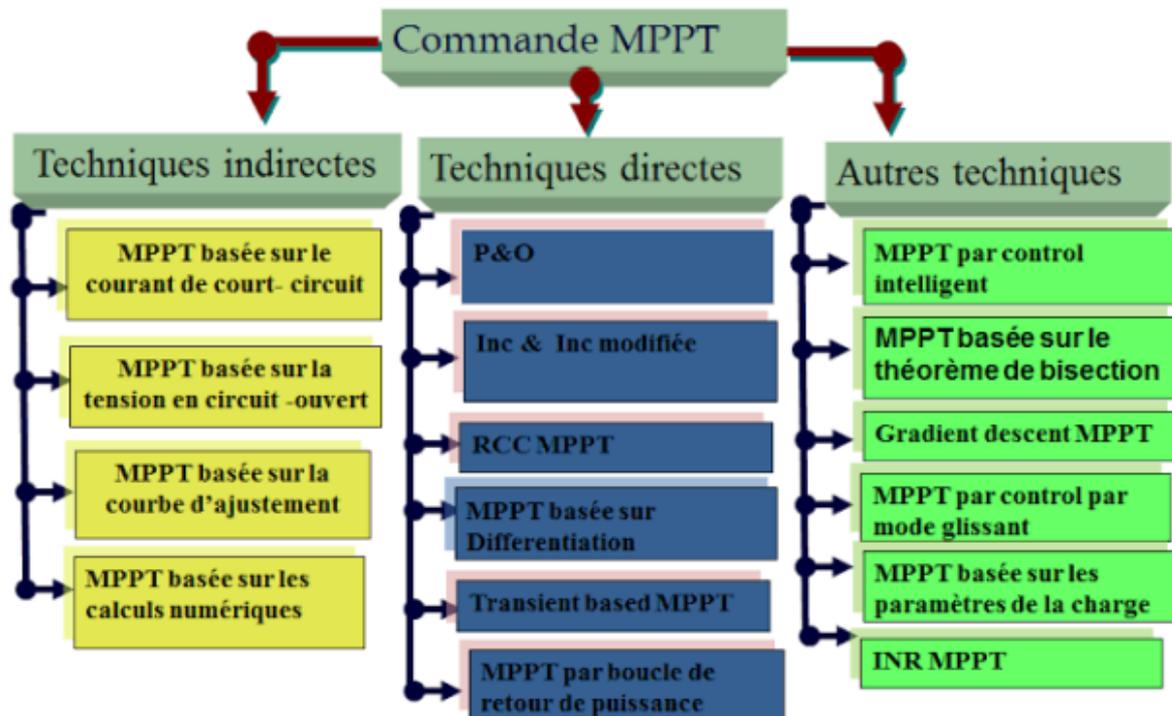


Figure (II.3) : Organigramme de classification des commandes MPPT [11]

## II.4. Les algorithmes MPPT

Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV. Une synthèse des principaux modes de recherche du PPM existants dans ce chapitre nous a permis de bien identifier l'existant et les points qu'il restait à améliorer. Ceci a constitué la base théorique pour nos travaux concernant les simulations dans le chapitre suivant [12].

### II.4.1. Méthodes à contre réaction de tension

Ce genre de mécanismes repose sur le contrôle de la tension de fonctionnement des panneaux par la comparaison de cette tension avec une tension de référence. Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la PWM de commande afin d'annuler cette erreur. Selon la nature de cette tension de référence (fixe ou variable, interne ou externe) on a trois types de méthodes : [12]

- ❖ Méthode à tension de référence fixe.
- ❖ Méthode à tension de référence en fonction de (circuit ouvert ; open circuit voltage).

- ❖ Tension de référence extrême (Cellule pilote).

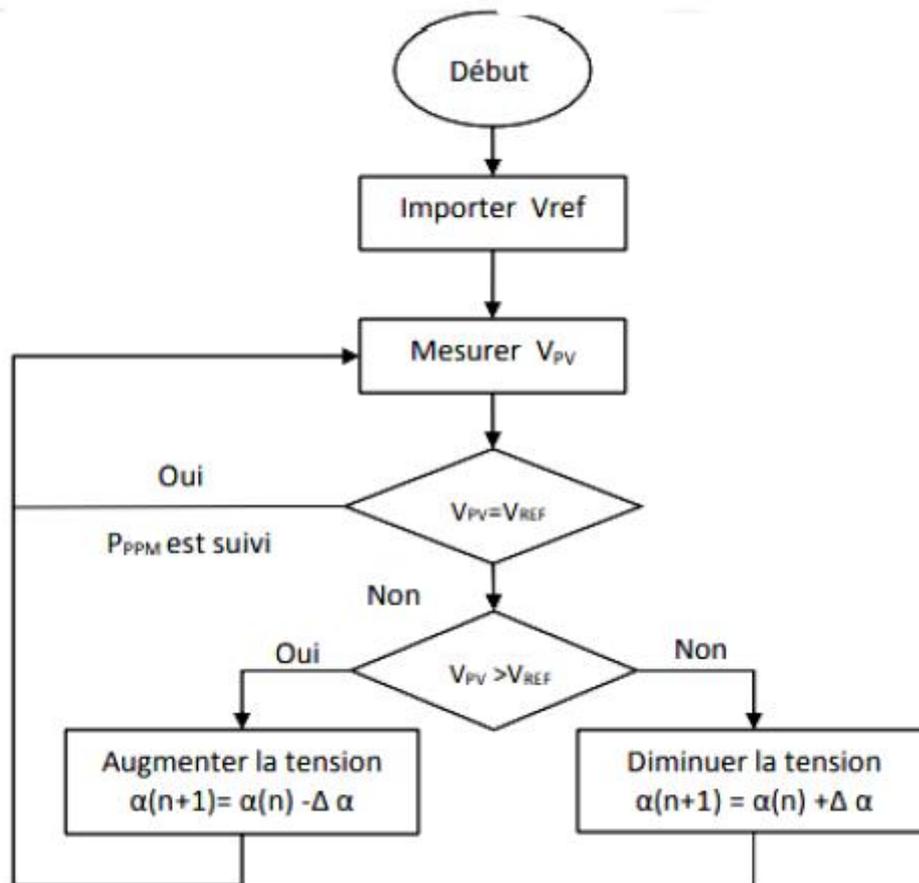


Figure (II.4) : Algorithme de circuit ouvert [13].

#### II.4.2. Méthodes a contre réaction de courant

Cette méthode utilise seulement une mesure de courant pour obtenir l'information sur le point opérationnel et actuel du système. Permet de savoir la valeur du courant optimal dans lequel doit fonctionner le panneau pour extraire le maximum de puissance : [13][12]

- Méthode à courant de référence en fonction du courant de court-circuit .
- Méthode de maximisation du courant de sortie.

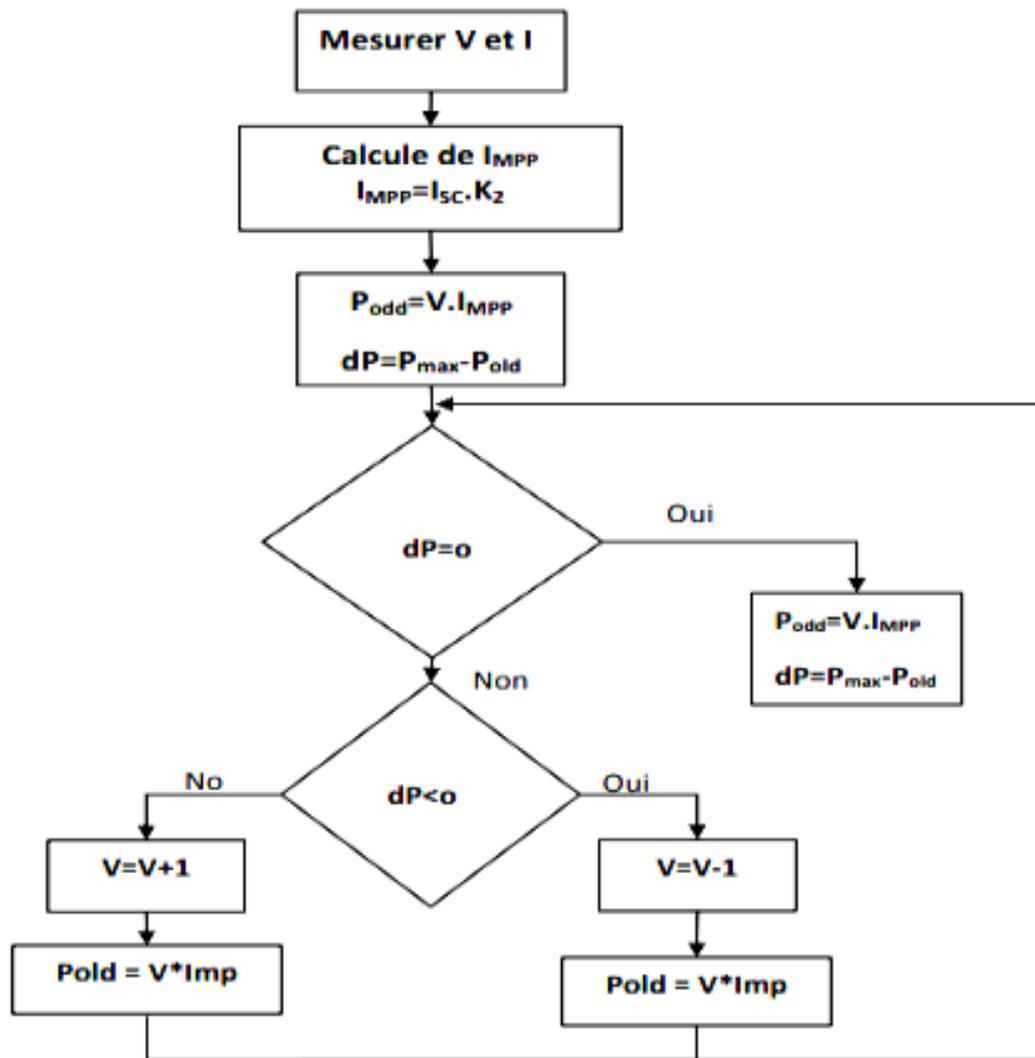


Figure (II.5) : Algorithme du court-circuit [13].

### II.4.3.Méthodes a contre réaction de puissance

Ces méthodes sont basées sur des algorithmes de recherche itérative qui se charge de trouver le point de fonctionnement du panneau pour que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système. L'évaluation de la puissance instantanée de ce dernier est élaborée par une simple multiplication de ces deux composantes  $P_{pv} = I_{pv} * V_{pv}$ . Elles ne sont pas basées sur des valeurs de références prédéfinies ou à partir des paramètres opérationnels, mais sur la maximisation permanente de la puissance générée par les panneaux solaires. Ainsi pour un point donne on fait la recherche dans un certain sens, si on a une augmentation de la puissance du panneau alors on maintien cette direction de recherche, sinon on cherche dans le sens opposé : [15]

- ❖ Méthode de perturbation et observation (P&O).
- ❖ Méthode de conductance incrémentale (InC).
- ❖ Méthode de Hill Climbing.

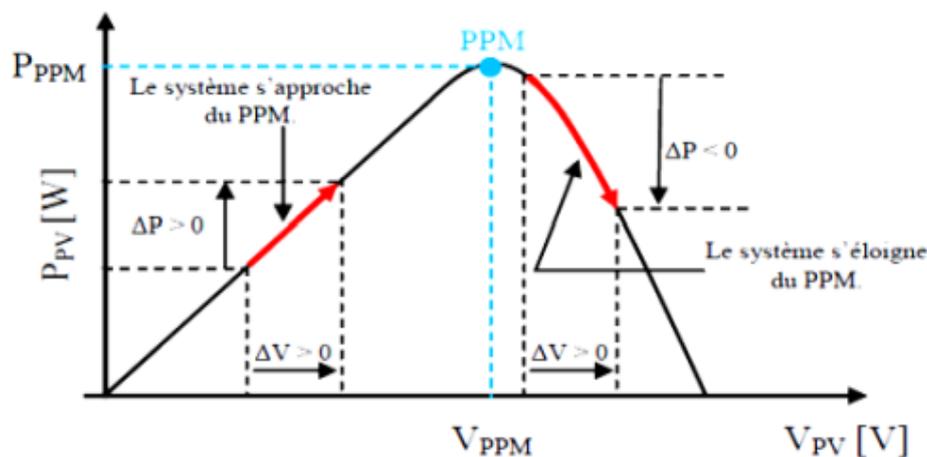
## II.5. Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe)

L'algorithme P&O est largement utilisé parce qu'il a la particularité d'avoir une structure simple, et peu de paramètre de mesure, pour l'utiliser on considère que le PV fonctionne à un point qui n'est pas obligatoirement le MPP [14].

La méthode P&O fonctionne en perturbant périodiquement la tension du panneau  $V_{pv}$  avec l'ajout d'un signal de faible amplitude positif ou négatif noté  $\Delta V$  et on observe la variation de puissance  $P_{pv}$  noté  $\Delta P$  qui en résulte ainsi, comme l'illustre la **figure (II.7)** [15][12].

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 **Figure (II.7)**. 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.

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM [8][16].



**Figure (II.6) :** Poursuite du point de puissance maximale.

Perturbation de la tension	Observation de la puissance	Prochaine perturbation
Positive (+)	Positive (+)	Positive (+)
Positive (+)	Négative (-)	Négative (-)
Négative (-)	Positive (+)	Négative (-)
Négative (-)	Négative (-)	Positive (+)

**Tableau (II.1) :** Table de vérité de l'algorithme 'perturbation et observation.

### II.5.1.Raisonnement Perturbe & Observe

- Mesures de courant et de tension.
- Calcul de la puissance du panneau.
- La puissance trouvée est-elle égale à la valeur précédente ? :
- Oui : renouvellement de la mesure.
- Non : étape suivante.
- La variation de la puissance est-elle positive ?
- Oui : détermination du sens de la pente par observation de la variation de tension :
- Positive : incrémentation de la tension de référence.
- Négative : décrémentation de la tension de référence.
- Non : détermination du sens de la pente par observation de la variation de tension :
- Positive : incrémentation de la tension de référence.
- Négative : décrémentation de la tension de référence.
- Mise à jour de la variable puissance photovoltaïque.

### II.5.2.Organigramme de l'Algorithme P&O

La **figure (II.7)** 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. La figure montre les entrées du système MPPT ;  $\Delta P$  et  $\Delta V$  calculées à partir des signaux  $P(k)$ ,  $P(k-1)$ ,  $V(k)$  et  $V(k-1)$ , les signes de ces deux entrées sont exploités pour savoir dans quelle position de la courbe P-V on se trouve [16].

D'abord la tension  $V$  et le courant  $I$  sont mesurés pour calculer la puissance  $P_k$ . Cette valeur  $P_k$  est comparée à la valeur de la puissance obtenue durant la dernière mesure  $P_{k-1}$ . Si la puissance fournie par le panneau a augmenté depuis la dernière mesure, l'incrément ou les décréments du rapport cyclique  $\alpha$  continuera dans le même sens que lors du dernier cycle et ceci est fait par le test sur  $\Delta V$  [16].

- Si  $\Delta V > 0$  cela veut dire qu'on a incrémenté  $V$  durant le dernier cycle c'est-à-dire  $D_{k+1} = D_k + \Delta D$

- Si  $\Delta V < 0$  cela veut dire qu'on a décrémenté  $V$  durant le dernier cycle c'est-à-dire qu'on va mettre  $D_{k+1} = D_k - \Delta D$ .

Donc on termine dans le chemin où  $P$  continue à augmenter. Si la puissance fournie par le panneau a diminué depuis la dernière mesure, l'incrément ou les décréments du rapport cyclique  $\alpha$  sera en sens inverse par rapport au dernier cycle et ceci est fait aussi par le test sur  $\Delta V$ .

Avec cet algorithme la tension de fonctionnement  $V$  est perturbée à chaque cycle. Dès que le MPP sera atteint,  $V$  oscillera autour du point de fonctionnement idéal  $V_{mpp}$ . Mais ceci cause des pertes de puissances qui dépendent de la largeur du pas d'une simple perturbation  $\Delta D$ . Si la largeur du pas est grande, l'algorithme de MPPT répondra rapidement aux changements soudains mais occasionnera des pertes dans des conditions changeantes lentement et dans les états stables [12].

Si la largeur du pas est très petite les pertes dans les états stables ou les conditions changeantes lentement seront réduites, mais le système aura une réponse lente aux changements rapides de la température ou d'insolation. La valeur pour la largeur idéale du pas du système ne peut être déterminée qu'expérimentalement ou par simulation, est ainsi satisfaire un compromis entre la réponse rapide et perte de puissance dans les états stables [16].

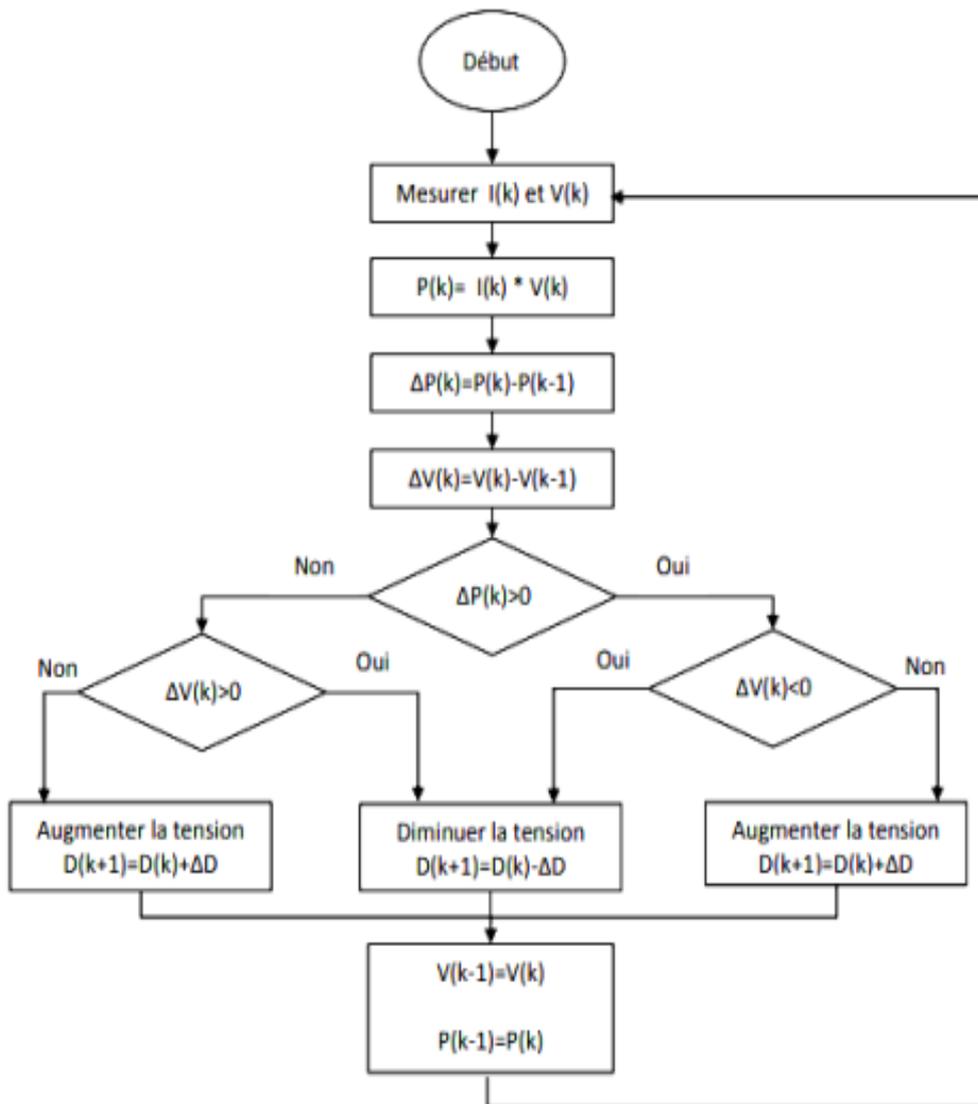


Figure (II.7) : Algorithme de la méthode P&O [16].

### II.5.3. Avantages et inconvénients de P&O

#### Avantage :

- Structure de régulation simple.
- Nombre des paramètres mesures réduit.

#### Inconvénients :

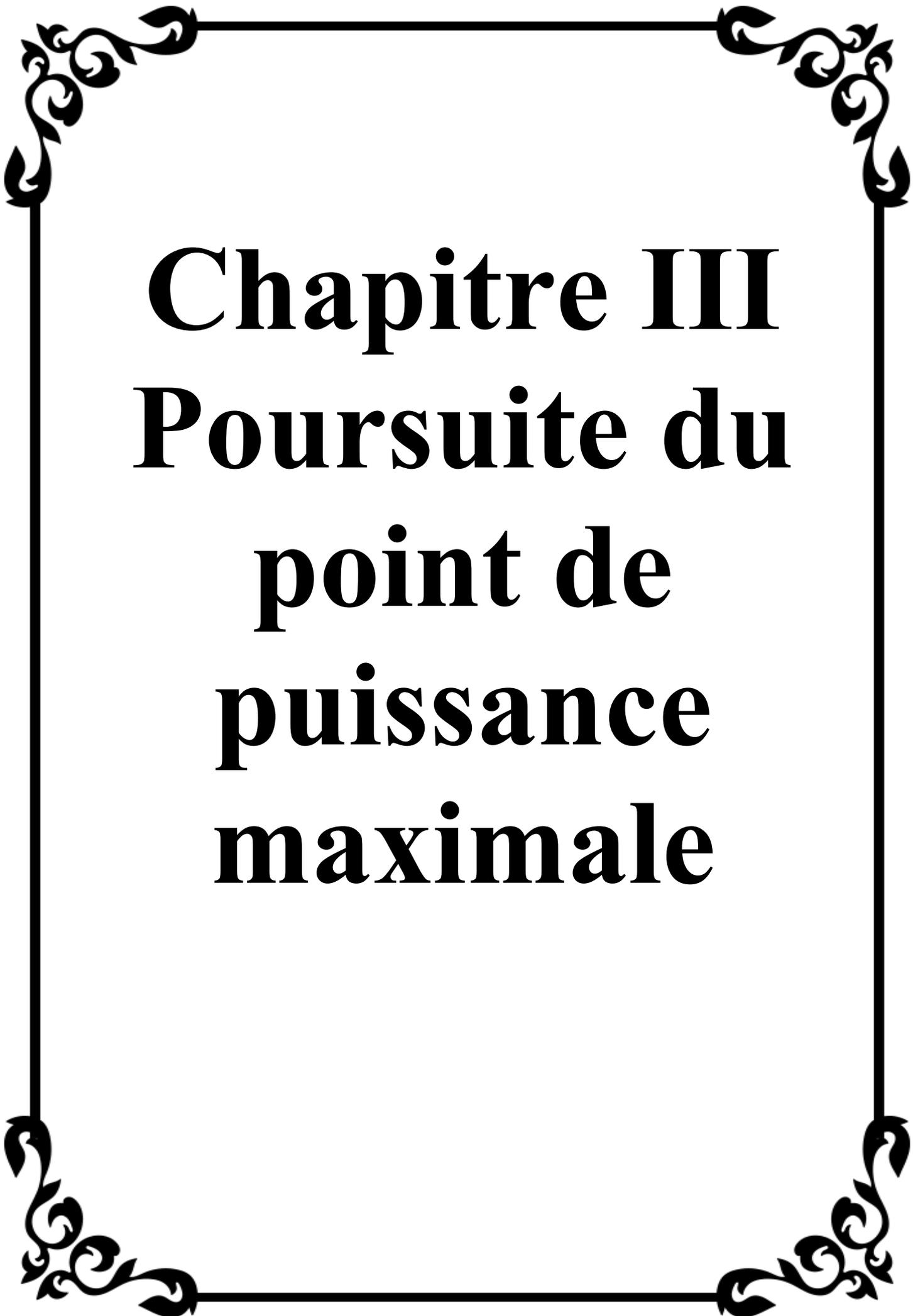
- Dépassement du point maximum optimal en cas de changement rapide des conditions atmosphériques. [15]

### II.5.4. Autres Méthodes

- Les algorithmes à base de réseau de neurones.
- Méthode de look-up table.
- Les algorithmes d'identification en temps réel du MPP.
- Méthode de  $\beta$ .
- L'algorithme de la capacité parasite (Parasitic Capacitance).
- La méthode de balayage du courant (CurrentSweep). [12]

### II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons entamé la partie la plus importante et la plus délicate de cette étude. Il s'agit de présenter le principe de la recherche du point de puissance maximale tout en donnant les différentes classifications des commandes MPPT. Nous avons détaillé les différentes méthodes MPPT rencontrées le plus souvent dans la littérature. L'existence de plusieurs types de commandes MPPT montre que ce domaine de recherche est en perpétuelle évolution et qu'il est difficile de trouver une ou plusieurs solutions universelles.



**Chapitre III**  
**Poursuite du**  
**point de**  
**puissance**  
**maximale**

### III.1.Introduction

La simulation est un outil puissant pour l'évaluation des performances théoriques d'un système.

En effet, ce dernier peut être testé sous des conditions facilement contrôlables et ses performances peuvent être aisément surveillées. La procédure de simulation lie les deux principales parties de la conception d'un système, à savoir, l'étude théorique et la réalisation d'un prototype. Vu que des changements dans la conception peuvent facilement être faits à l'étape de la simulation, il est possible d'expérimenter avec un large ensemble de variations des conditions de fonctionnement afin d'aboutir à une solution optimale.

Matlab/Simulink est un logiciel de simulation, qui fournit une interface graphique permettant de construire des modèles sous forme de diagrammes blocs. Il offre l'avantage de construire des modèles hiérarchisés qui offrent la possibilité de voir le système à différents niveaux.

### III.2. Simulations et résultats

#### III.2.1. simulation d'un générateur photovoltaïque

De nombreux modèles mathématiques de modules photovoltaïques, ont été développés, dont le but est l'obtention de la caractéristique Courant-Tension et Puissance-Tension pour l'analyse et l'évaluation des performances des systèmes photovoltaïques [17].

##### III.2.1.1 Cas d'une cellule idéale

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque peut être schématisée par un générateur de courant  $I_{ph}$  en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la figure (II.1), qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale [18].

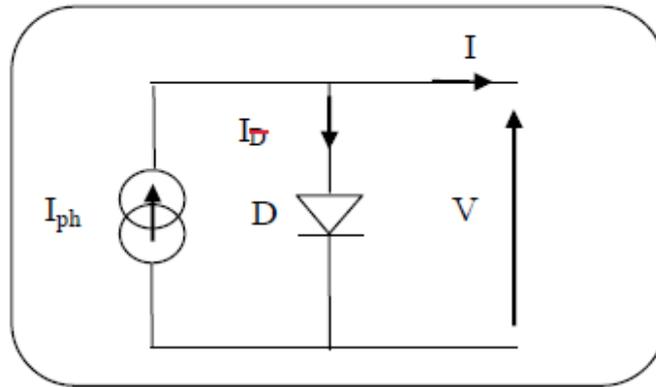


Figure (III.1) : Schéma idéale d'une cellule photovoltaïque

- L'équation retenue de ce modèle est :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (III.1)$$

- Le courant  $I_{ph}$  est assimilé au courant  $I_{cc}$  avec  $V_{pv} = 0$ , courant de court-circuit.

$$I_{ph} = [I_{cc} + K_i *(T_c - T_{ref})] * \frac{G}{G_{ref}} \quad (III.2)$$

$K_i$ : Coefficient de température du court-circuit de la cellule (Ampères / K)

$T_c$ : Température de la cellule en Kelvin

$G$  : L'éclairement absorbe par la cellule

$G_{ref}$  : L'éclairement de référence (1000 w/m2)

$$I_d = I_0 (e^{\frac{vd}{V_t}} - 1) \quad (III.3)$$

$I_0$  : Courant de saturation de la diode

$$V_t = \frac{BKT}{q} \quad (III.4)$$

$V_t$  : Tension thermique

$B$  : Facteur d'idéalité

$K$  : Constant de Boltzmann ( $1,38*10^{-23}$  J/K)

$q$  : Charge de l'électron ( $1,6*10^{-19}$  C) [19]

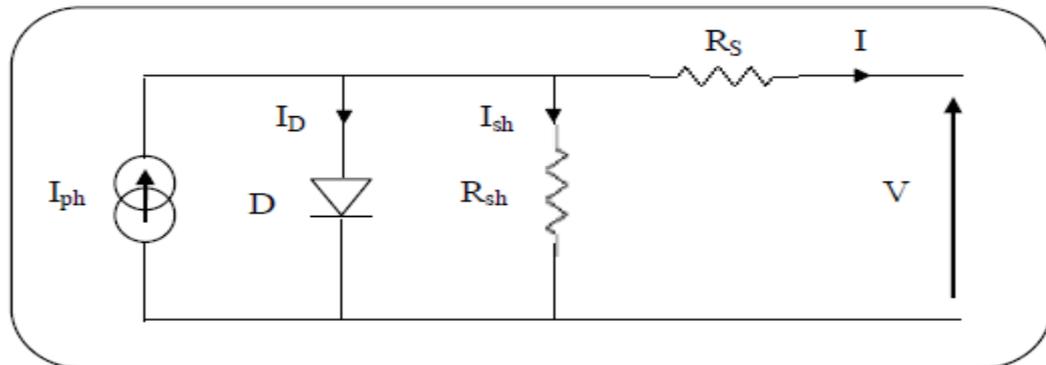
### III.2.1.2 Cas d'une cellule réelle (cinq paramètres 5P)

#### III.2.1.2.1. Avec résistance shunt

C'est le modèle le plus classique dans la littérature, il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes physique de polarisation et deux résistances (série et shunt).

Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique  $I-V$  de la photopile:

- la résistance série est la résistance interne de la cellule; elle principalement la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles,
- la résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.



**Figure (III.2) :** Schéma équivalent d'une cellule solaire

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles

$$I_{cell} = I_{ph} - I_d - I_{Rsh} \quad (III.5)$$

Avec :

$I_{cell}$  : Courant délivré par la photopile.

$I_{ph}$  : Photo courant.

$I_d$  : Courant de la diode.

$I_{Rsh}$  : Courant shunt

### a. Le photo-courant

C'est le courant généré par une cellule, il est proportionnel à l'irradiation solaire et est légèrement influencé par la température selon l'équation suivante :

$$I_{ph} = [ I_{cc} + K_i (T - T_{ref}) ] * \frac{G}{G_{ref}} \quad (III.6)$$

Avec :

$I_{cc}$  [A] : Courant de court-circuit du panneau (donné par le constructeur).

$K_i$  [A/K] : Courant de court-circuit divisé par le coefficient de température du panneau.

$T$  [K] : Température ambiante.

$G$  [W/m<sup>2</sup>] : Irradiation sur la surface de la cellule.

$T_{ref}$  [K] : Température de référence (298.15 K).

$G_{ref}$  [W/m<sup>2</sup>] : Irradiation de référence (1000 W/m<sup>2</sup>).

### b. Le courant de saturation $I_0$

Ce courant varie avec la température et est donné par :

$$I_0 = I_{rs} \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^3 \exp \left[ \frac{qEg}{Ak} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right) \right] \quad (III.7)$$

Avec :

$Eg$  [eV] : Énergie de gap du semi-conducteur (1.1 eV pour le silicium poly cristallin à 25°C).

### c. Le courant de saturation inverse de la diode (courant de fuite)

Son expression est donnée par l'équation :

$$I_{rs} = \frac{I_{cc}}{\exp\left(\frac{qV_{oc}}{KAT}\right) - 1} \quad (III.8)$$

Où :

$V_{oc}$  [V] : Tension de circuit ouvert du module (donnée par le constructeur).

$A$  : Constante d'idéalité de la jonction ( $1 < A < 2$ ).

À partir des expressions décrites précédemment on peut déduire le courant délivré par une cellule

$$I_{cell} = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V_{cell} + R_s I_{cell})}{AKT}\right) - 1 \right] - \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_{sh}} \quad (III.9)$$

### d. Le courant du panneau

Les équations décrites précédemment ne peuvent représenter la caractéristique I-V d'un module PV puisqu'elles sont propres à une seule cellule PV qui représente l'élément de base du panneau, on introduit donc l'équation spécifique à un module :

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V_{cell} + R_s I_{cell})}{N_s AKT}\right) - 1 \right] - N_p \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_{sh}} \quad (III.10)$$

Où :

$N_s$  : Nombre de cellules connectées en série dans un module.

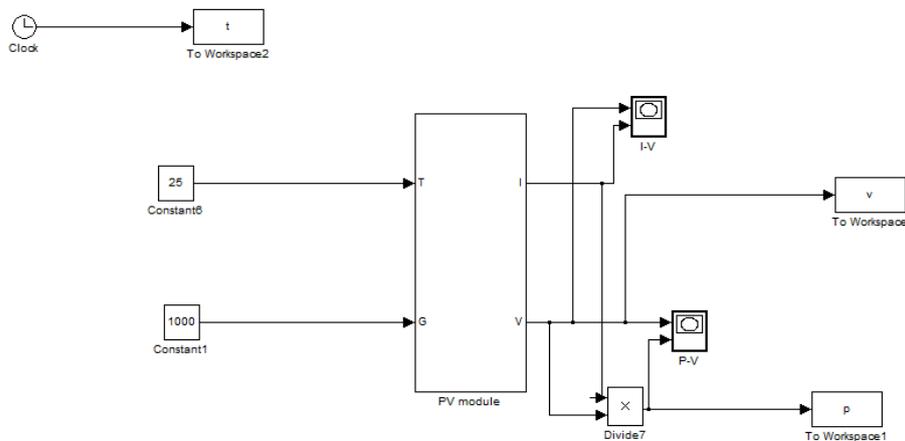
$N_p$  : Nombre de cellules connectées en parallèle dans un module.

## Chapitre III Poursuite du point de puissance maximale

Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque sont données dans le tableau suivant :

Eclairement standard G	1000W/m <sup>2</sup>
Température standard T	25°C
Puissance maximale P <sub>max</sub>	1110W
Tension à P <sub>max</sub> ou tension optimale (V <sub>opt</sub> )	54.2V
Courant à P <sub>max</sub> ou courant optimale (I <sub>opt</sub> )	23.25A
Courant de court-circuit I <sub>sc</sub>	25.44A
Tension à circuit ouvert V <sub>co</sub>	66V
Energie de la bande interdite	1.12 Ev

**Tableau (III.1) :** caractéristiques électriques du module photovoltaïque Dans les conditions standards «CST»



**Figure (III.3) :** Schéma bloc de générateur photovoltaïque

Les résultats obtenus de la simulation d'une caractéristique courant –tension I(V) et puissance -tension P(V) d'un panneau photovoltaïque dans les conditions standards (T=25°C, G=1000 W/m<sup>2</sup>).

## II.2.2.3. Caractéristique courant-tension

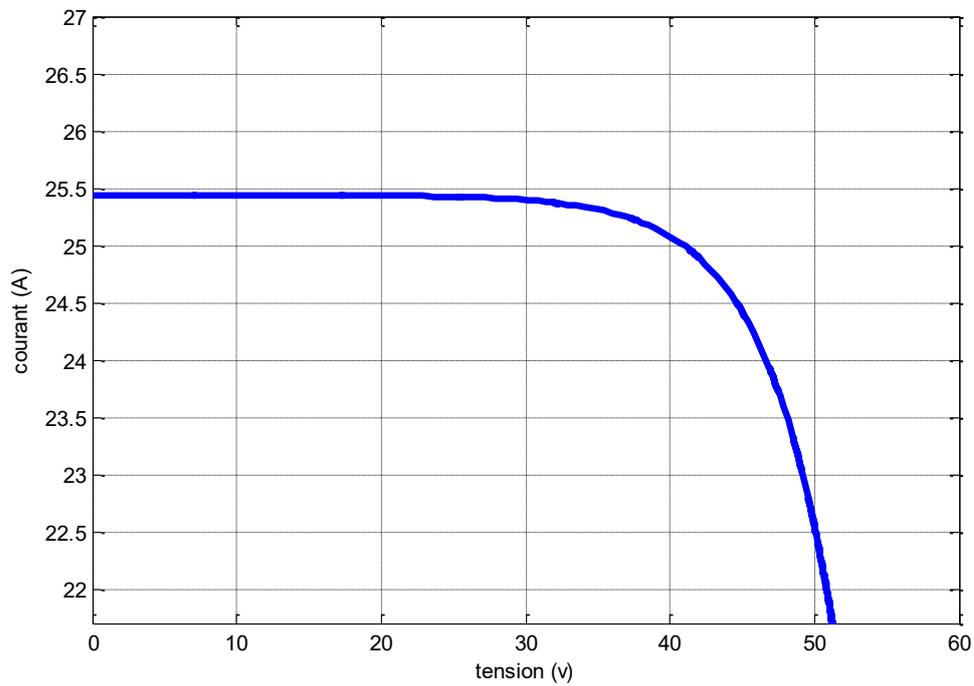


Figure (III.4) : Caractéristique I(V) d'un panneau

## II.2.2.4. Caractéristique puissance-tension

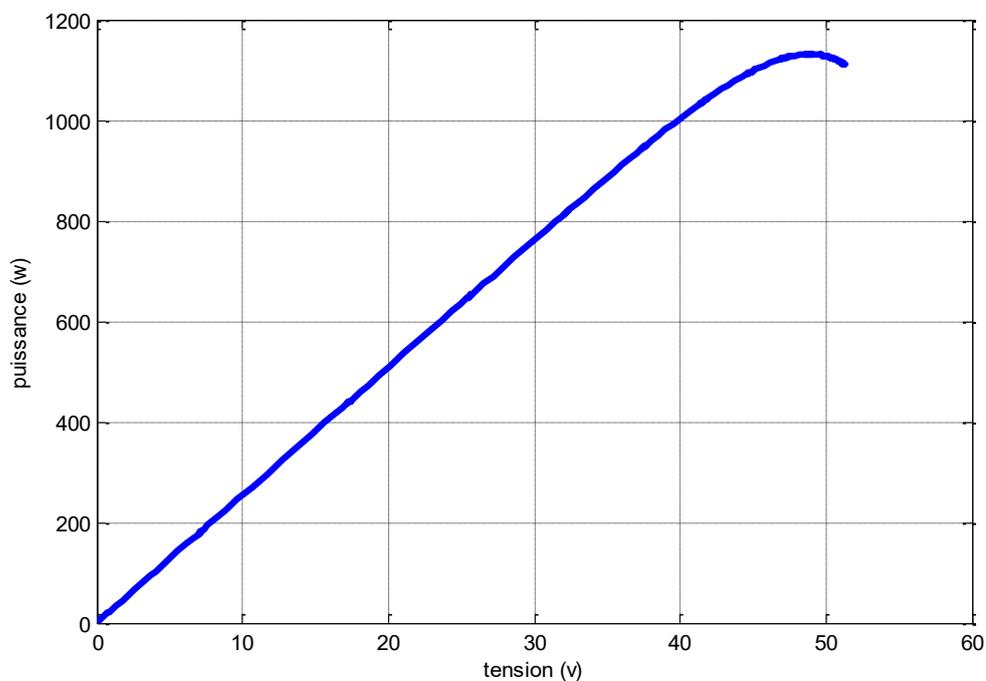
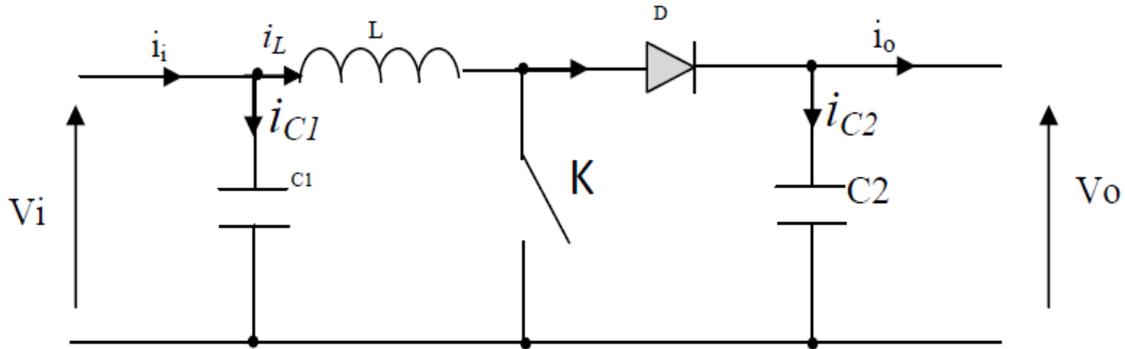


Figure (III.5) : Caractéristique P(V) d'un panneau

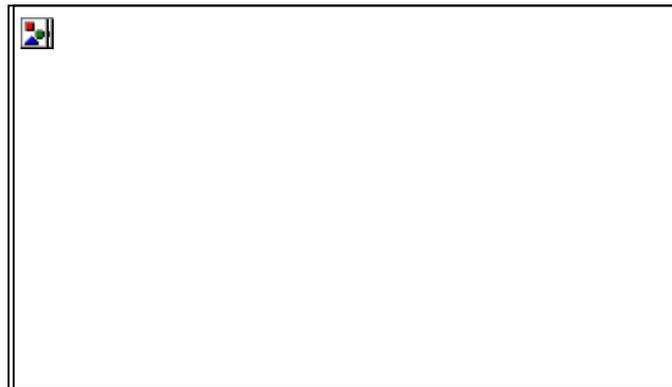
### III.2.3. simulation du convertisseur de puissance survolteur BOOST

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle, son schéma de principe de base est celui de la figure (III.6). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [20].

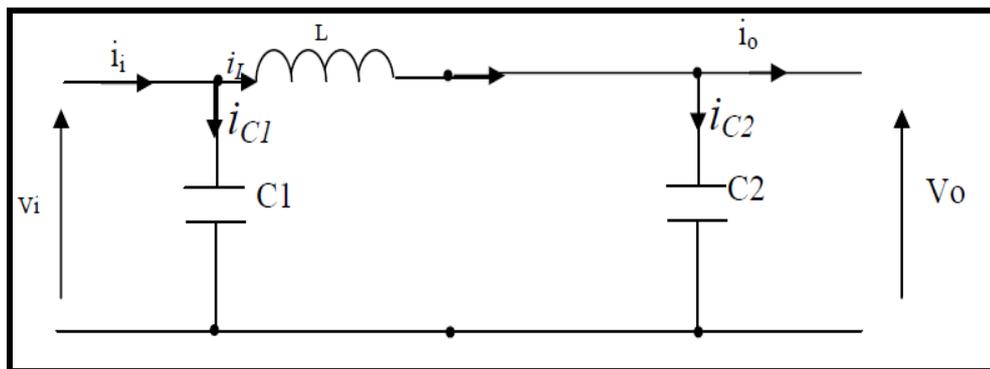


**Figure (III.6) :** Schéma de principe d'un convertisseur Boost

L'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur (voir figures III.7 et III.8) des deux phases de fonctionnement donne :



**Figure (III.7) :** Schémas équivalents du hacheur survolteur K fermé



**Figure (III.8) :** Schémas équivalents du hacheur survolteur K ouvert

Pour la première période  $d.T_s$  :

$$i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \quad (III.11)$$

$$i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = -i_0(t) \quad (III.12)$$

$$V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = -V_i(t) \quad (III.13)$$

Pour la deuxième période  $(1-d)T_s$  :

$$i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \quad (III.14)$$

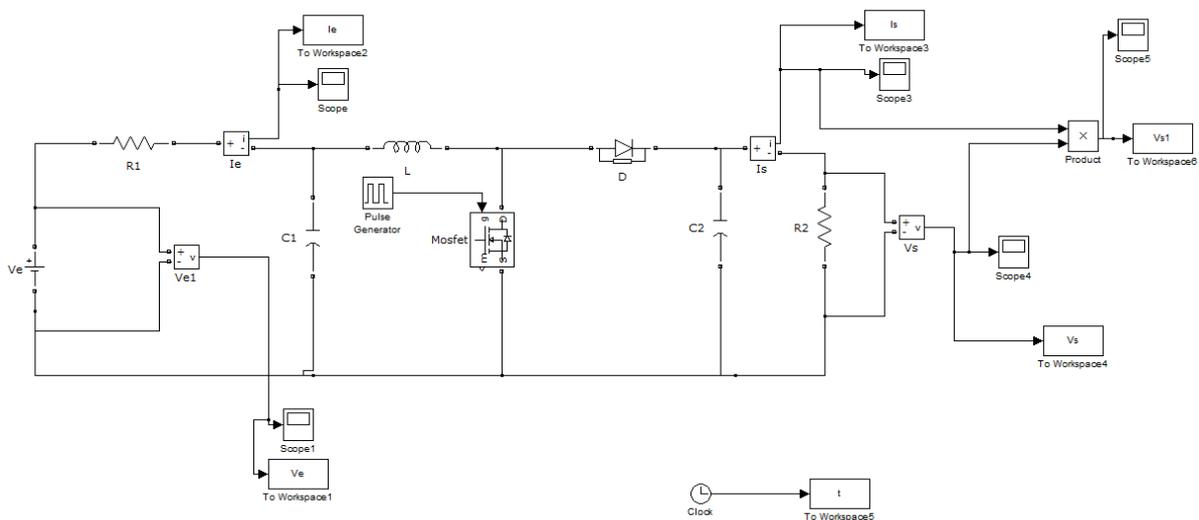
$$i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \quad (III.15)$$

$$V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \quad (III.16)$$

Pour la simulation du convertisseur nous utilisons :

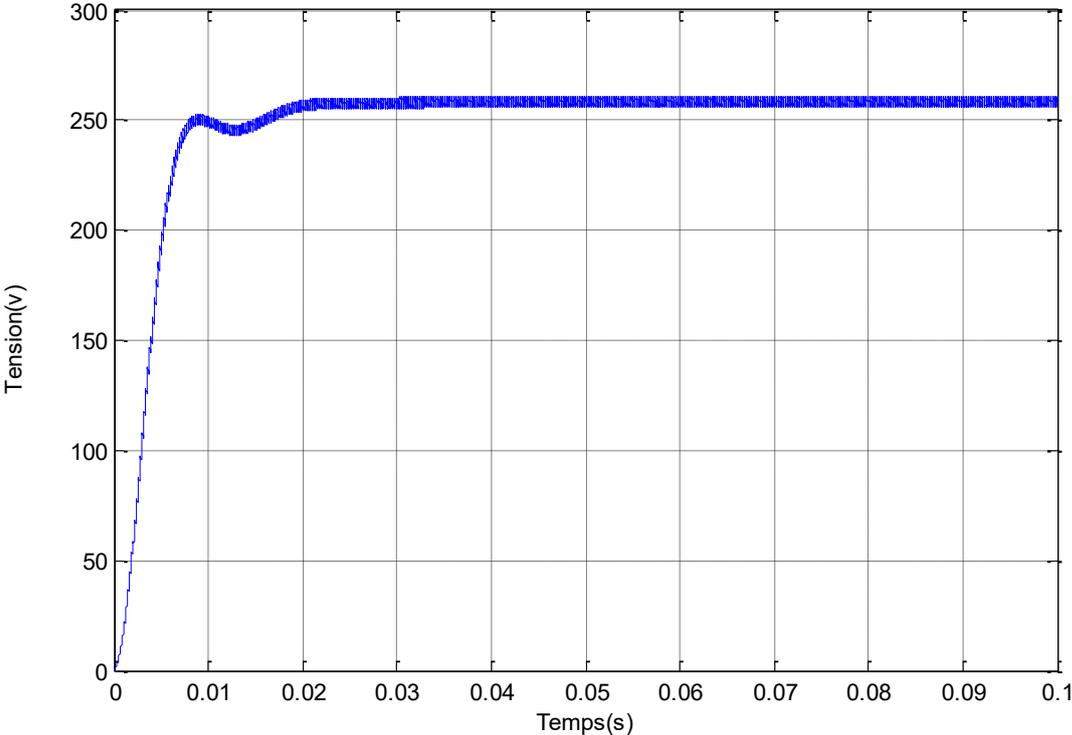
- Une source de tension de 230 V continu comme tension d'entrée du convertisseur DC-DC.

- Les paramètres ( $R = 2.33\Omega$ ,  $L = 1mH$ ,  $C1 = 2mF$ ,  $C2 = 2mF$ )

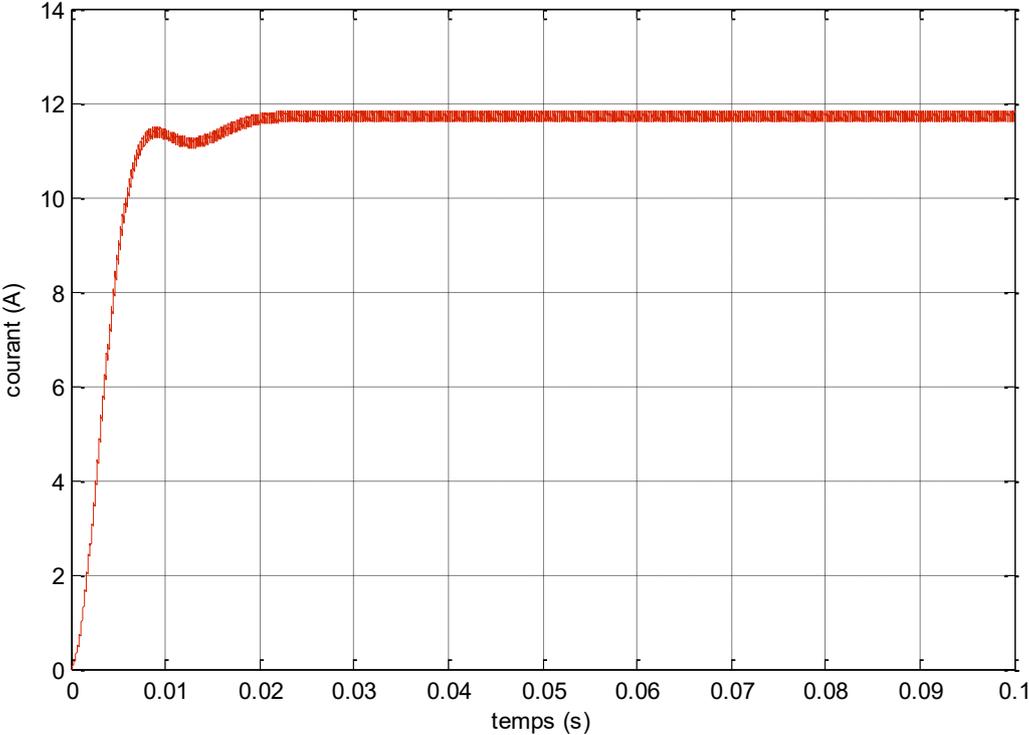


**Figure(III.9):** Schéma de simulation du hacheur survolteur BOOST

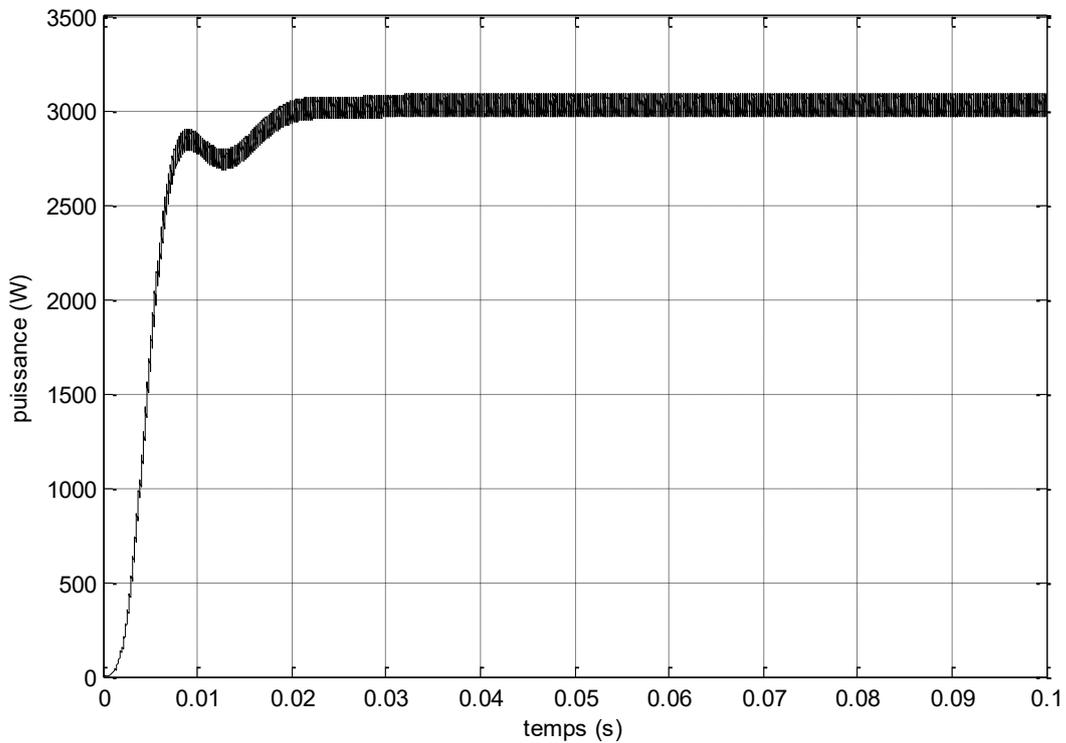
Les résultats de simulation du convertisseur survolteur représentent par les figures (III.10) à (III.12). Ces figures représentent la tension de sortie d'hacheur survolteur ainsi le courant et puissance de sortie d'hacheur. Ces résultats montrent que la tension de sortie d'hacheur survolteur est supérieure à celle d'entrée. Donc le hacheur survolteur effectue correctement son rôle.



Figure(III.10):Tension de sortie du hacheur survolteur.



Figure(III.11): Courant de sortie du hacheur survolteur



Figure(III.12): Puissance de sortie du hacheur survolteur

### III.2.4. Simulation de système photovoltaïque avec la commande P&O

La figure(III.13) Représente le schéma global d'un système photovoltaïque composé d'un module PV avec un hacheur Boost commandé en MPPT (P&O).

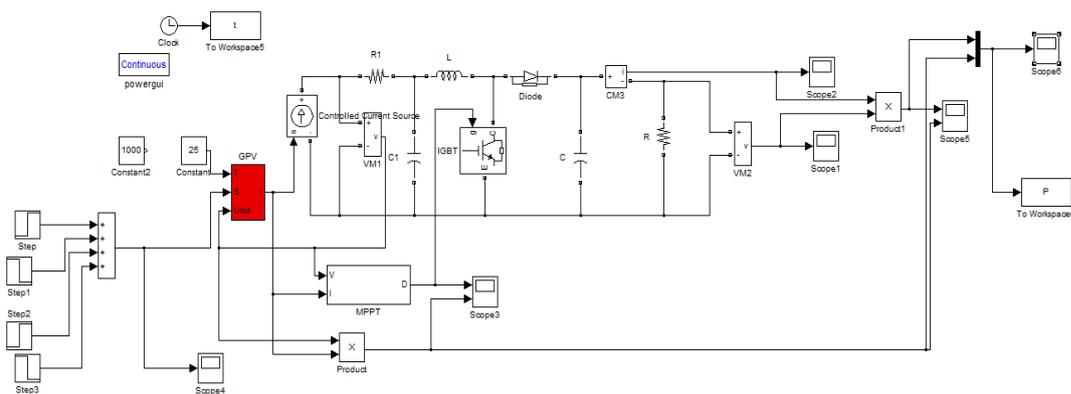


Figure (III.13) : Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT (P&O).

## III.2.5. Résultats

### III.2.5.1. Caractéristique de tension :

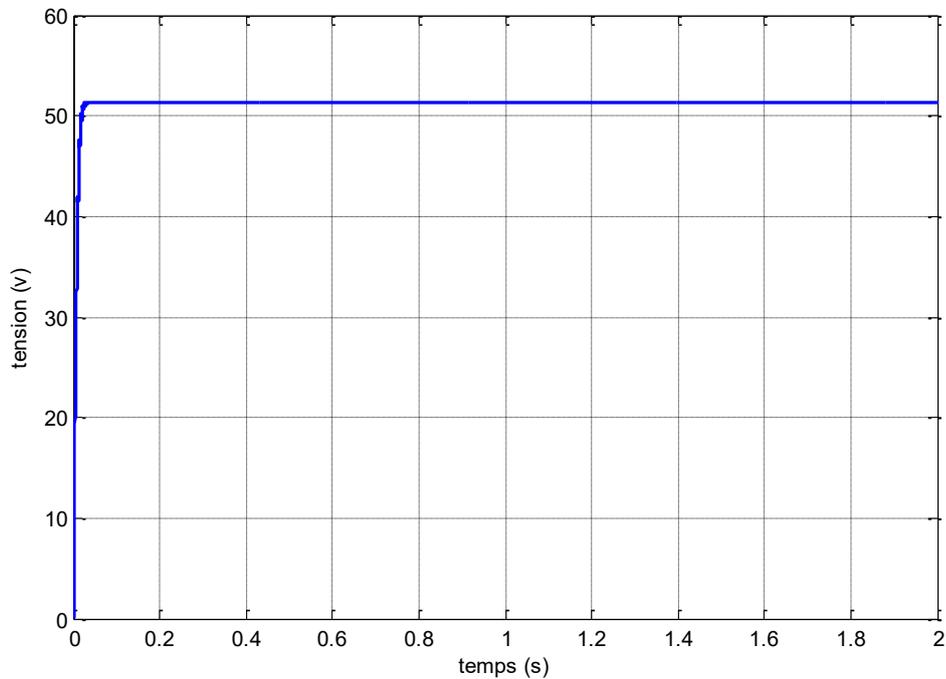


Figure (III.14) : Tension générée par la GPV pour  $G=1000\text{W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$

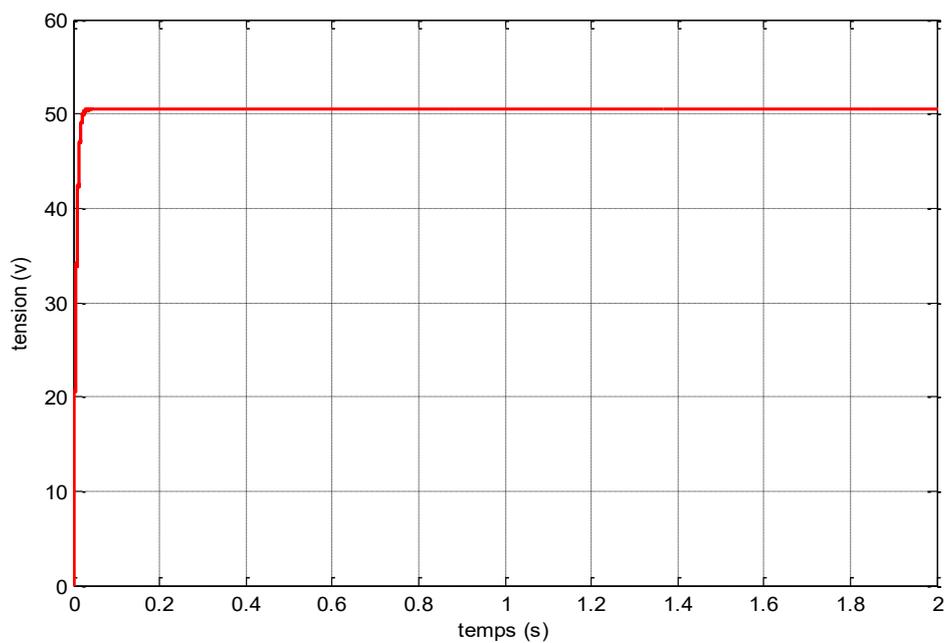


Figure (III.15) : Tension de sortie du système pour  $G=1000\text{W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ .

## III.2.5.2. Caractéristique de courant :

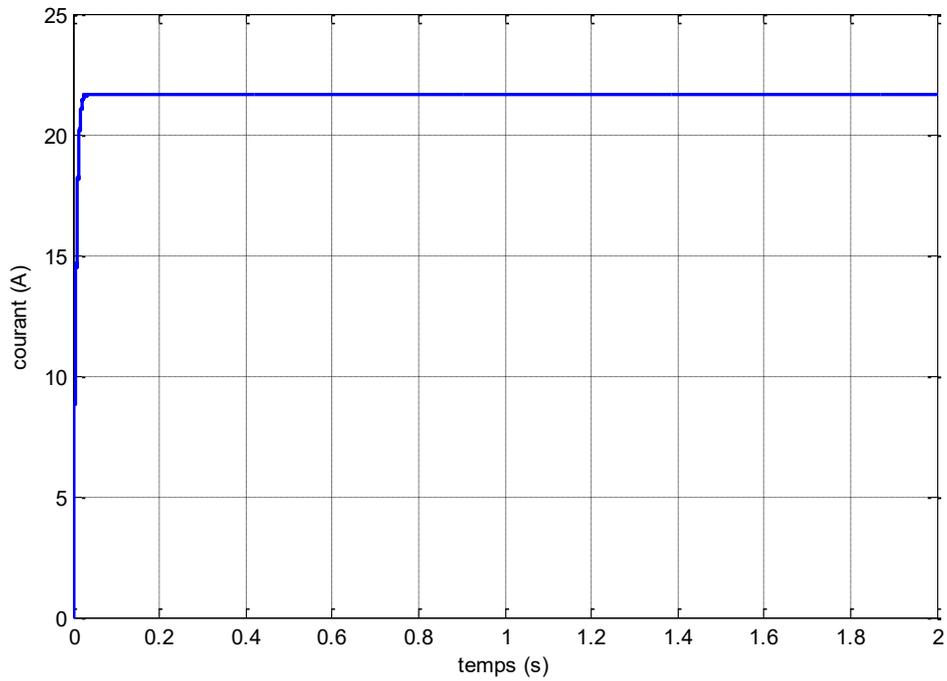


Figure (III.16) : Courant de sortie du système pour  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ .

## III.2.5.3. Caractéristique de puissance :

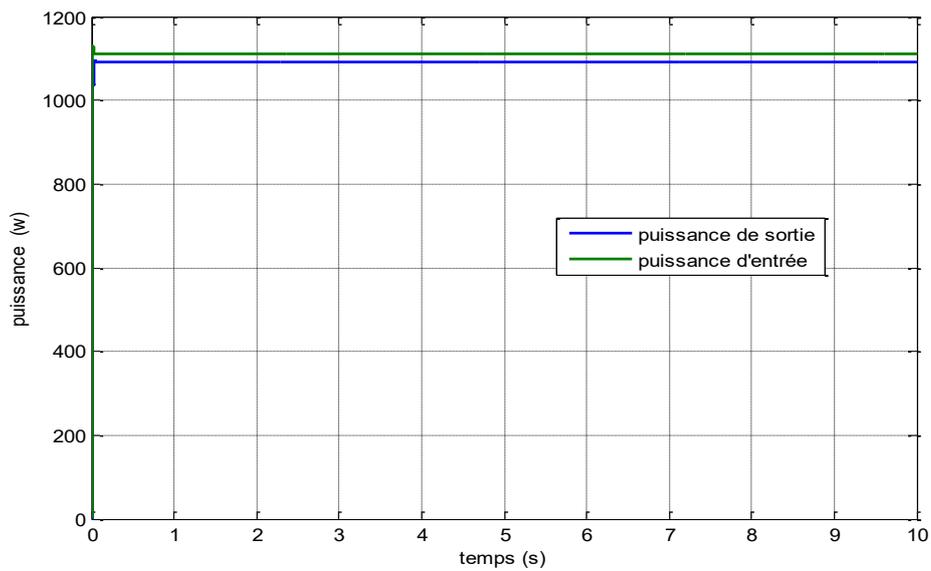


Figure (III.17) : Puissance d'entrée et sortie du système pour  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ .

Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT «perturbation et observation » représentent par les figures (III.14) à (III.17). Ces figures représentent la tension et puissance générées par le générateur photovoltaïque. Ainsi, la tension, le courant et la puissance à la sortie du système photovoltaïque. Ces résultats montrent que l'hacheur survolteur et la commande MPPT « perturbation et observation » effectuent correctement leurs rôles.

Le hacheur boost fournit une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur photovoltaïque et la commande MPPT adapte le générateur PV à la charge.

### III.2.5.4. Effets climatiques sur le système :

#### III.2.5.4.1. Influence de la température sur le système :

La figure (III.18) représente la caractéristique de puissance d'entrée et sortie dans la même condition de l'éclairement ( $G=1000 \text{ W/m}^2$ ) et pour différentes température ( $T=0, 25, 50, 75, 100$ ).

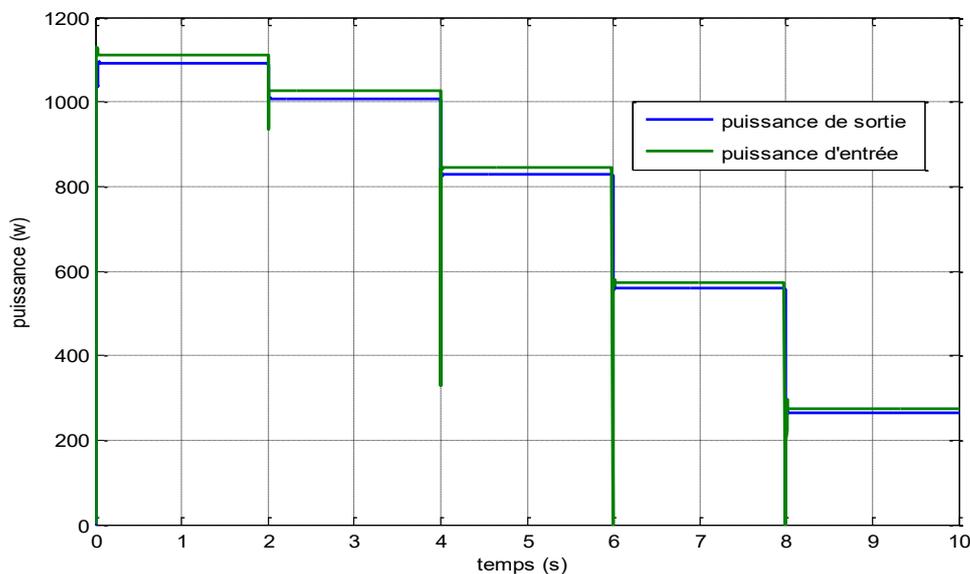
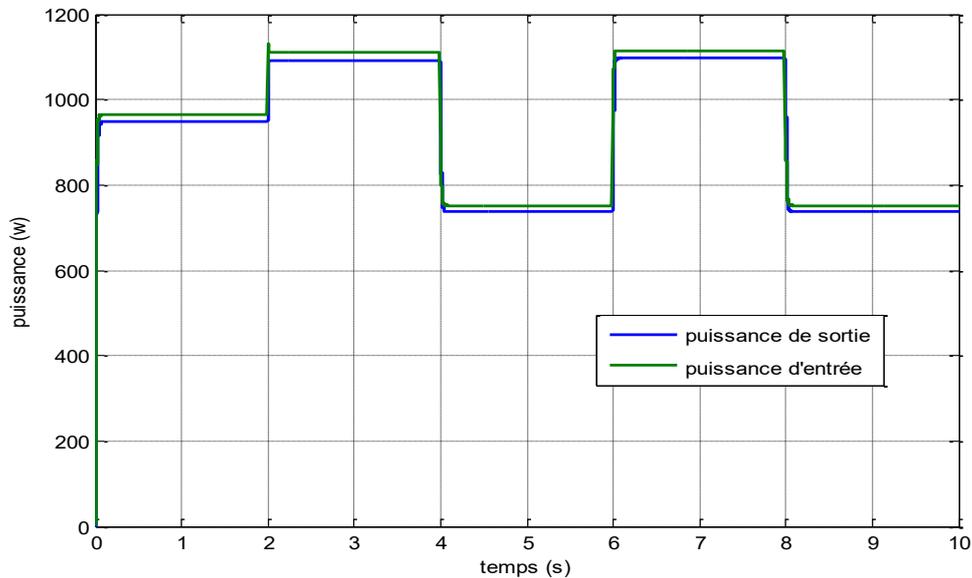


Figure (III.18) : Puissance d'entrée et sortie du système pour  $G=1000 \text{ W/m}^2$  et différentes température [0 25 50 75 100]

### III.2.5.4.2. Influence de l'éclairement sur le système :

La **figure (III.19)** représente la caractéristique de puissance d'entrée et de sortie en fonction de la variation de l'éclairement ( $G=800.1000.1200 \text{ W/m}^2$ ) à température constants ( $T=25^\circ\text{C}$ )

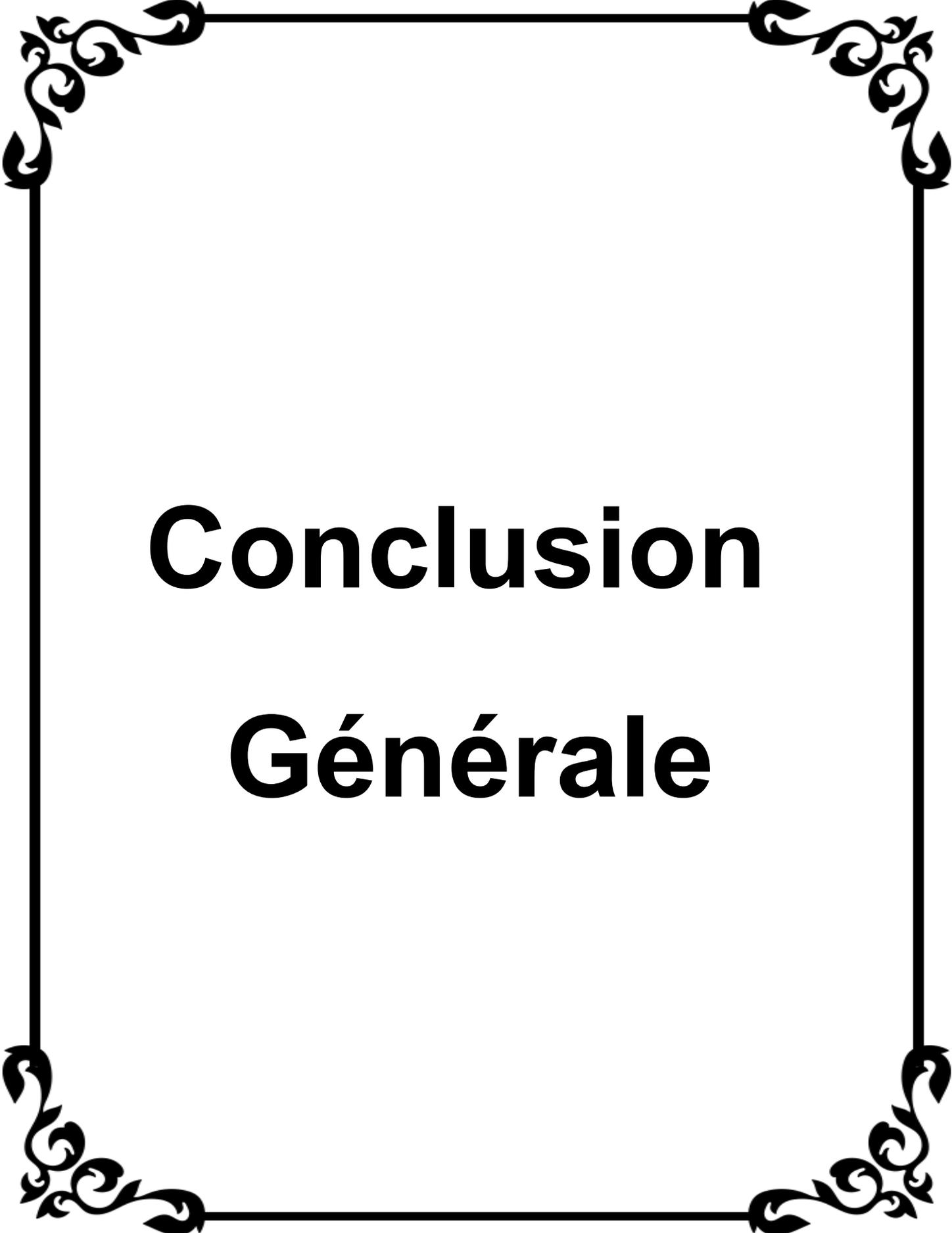


**Figure (III.19) :** Puissance d'entrée et sortie du système pour  $T= 25^\circ\text{C}$  et différentes irradiation [ 1200 1000 800 ]

Les **figures (III.18) (III.19)** présentent l'évolution de la puissance générée par le système photovoltaïque. On note que la puissance augmente avec la diminution de l'éclairement et diminuée avec l'augmentation de température.

### III.3.Conclusion

Dans ce chapitre, nous a présenté la commande MPPT pour rechercher le point de puissance maximale du générateur photovoltaïque, sous conditions standards ( $G=1000 \text{ W/m}^2$   $T=25^\circ\text{C}$ ). On a étudié quelques méthodes MPPT basées sur contre réaction de puissance, comme la méthode de perturbation et observation (P&O).



# **Conclusion**

## **Générale**

## Conclusion générale

---

Dans notre projet l'étude est basée sur l'analyse d'une simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque (PV) adapté par une commande numérique (commande MPPT) assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

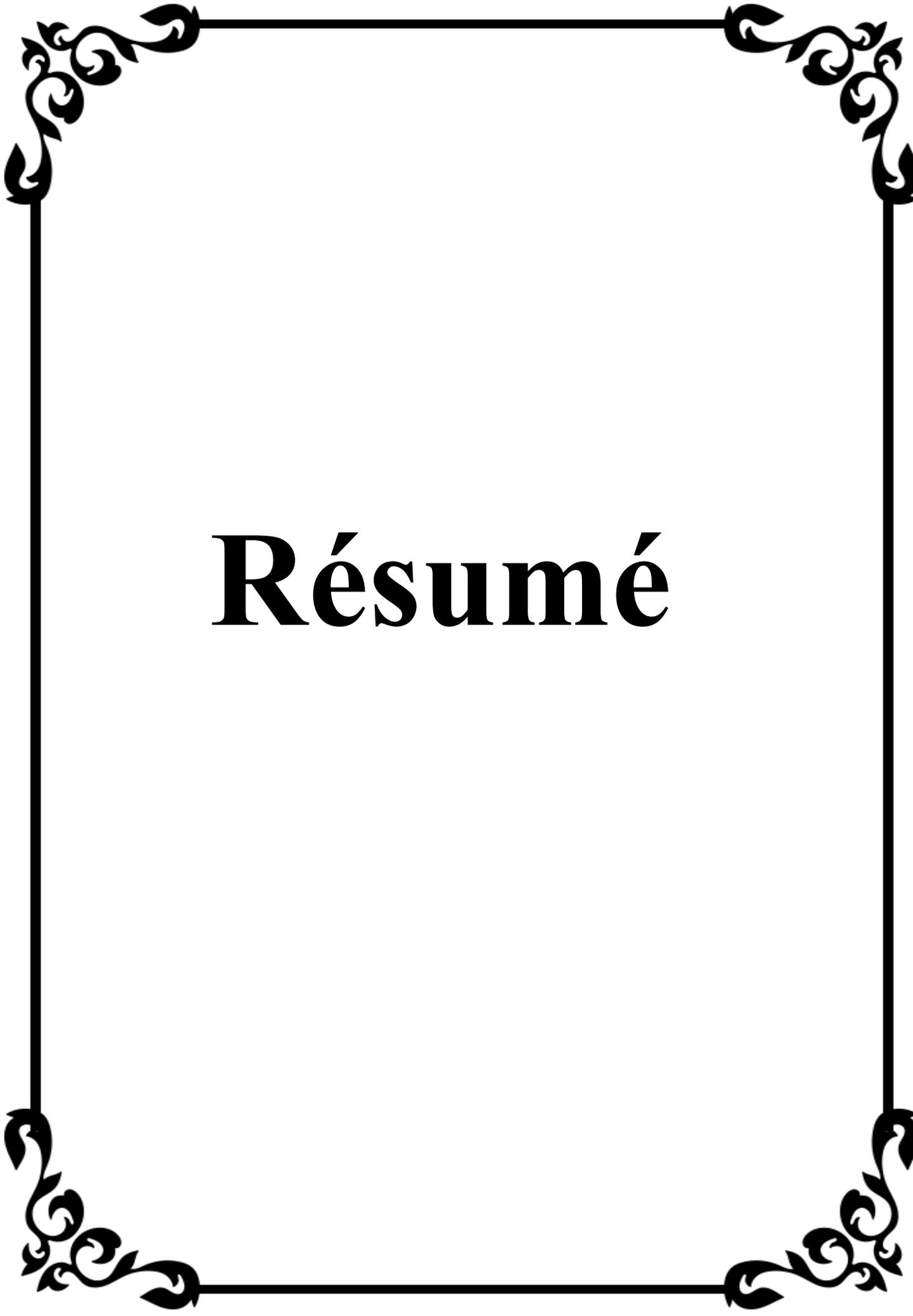
Le travail présenté dans ce mémoire traite de la simulation et l'implémentation d'un algorithme MPPT par la méthode de perturbation et observation (P&O). La méthode P&O est l'un des systèmes les plus largement utilisés dans MPPT. Il vérifie la puissance de sortie du réseau et compare sa varié à la direction de perturbation de la tension de fonctionnement du réseau lui-même.

Au premier lieu nous avons vu des notions sur le soleil , générateur photovoltaïque, La cellule photovoltaïque en commençant par La conversion photovoltaïque puis Jonction PN , les Caractéristique électrique , Propriétés fondamentales des semi-conducteurs ,et le Principe de fonctionnement après le Stockage d'énergie , la Technologie et type d'accumulateurs, A la fin nous allons exposer les avantages et les inconvénients de l'énergie PV.

Ensuite, Nous avons utilisé le logiciel MATLAB pour étudier dans un premier temps le comportement d'une cellule photovoltaïque puis un générateur photovoltaïque dans les conditions standard ( $G=1000 \text{ W/m}^2$   $T=25^\circ\text{C}$ ).

Les principaux éléments auxquels ce travail a abouti sont :

- Le courant délivré par le GPV est directement proportionnel à l'ensoleillement par contre la tension aux bornes du GPV est relativement peu dégradée par l'accroissement de celui-ci.
- L'augmentation de la température conduit à une diminution nette de la tension de circuit ouvert, à une légère augmentation du courant de court-circuit, et à une diminution de la puissance maximale.
- Pour profiter de la puissance maximale délivrée par un panneau solaire, l'utilisation d'un étage d'adaptation entre ce panneau et la charge est nécessaire.



# Résumé

## Résumé

---

### Résumé :

Dans ce mémoire, on analyse la simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque (PV) adapté par une commande numérique MPPT «perturbation et observation (P&O)», assurent la poursuite de la puissance maximale fournie par un générateur photovoltaïque .

Dans notre simulation , on a conçu un générateur PV dans les conditions standards de test (CTS) ( $G=1000 \text{ W/m}^2$   $T=25^\circ\text{C}$ ) , une puissance crête de 1110W, un courant optimal de 23.25A et une tension optimal de 54.2V, et un convertisseur survolteur (Boost) , les résultats de simulation obtenus sous Matlab.

**Mots clés :** Système PV – Convertisseur survolteur – Commande MPPT – Simulation – Matlab/Simulink .

### الملخص :

نقوم في هذه المذكرة بتحليل المحاكاة لنظام الخلايا الكهروضوئية PV وفق الآلية الرقمية (P&O) لضمان تحقيق استطاعة قصوى التي يوفرها المولد الكهروضوئي .

في هذه المحاكاة قمنا بتصميم مولد كهروضوئي تحت ظروف الاختبار القياسية ( $G=1000 \text{ W/m}^2$   $T=25^\circ\text{C}$ ) (CTS) ذات استطاعة 1110 W وتيار 23.25A, وتوتر 54.2V, ومحول (Boost) نتائج المحاكاة المتحصل عليها تمت بواسطة برنامج Matlab.

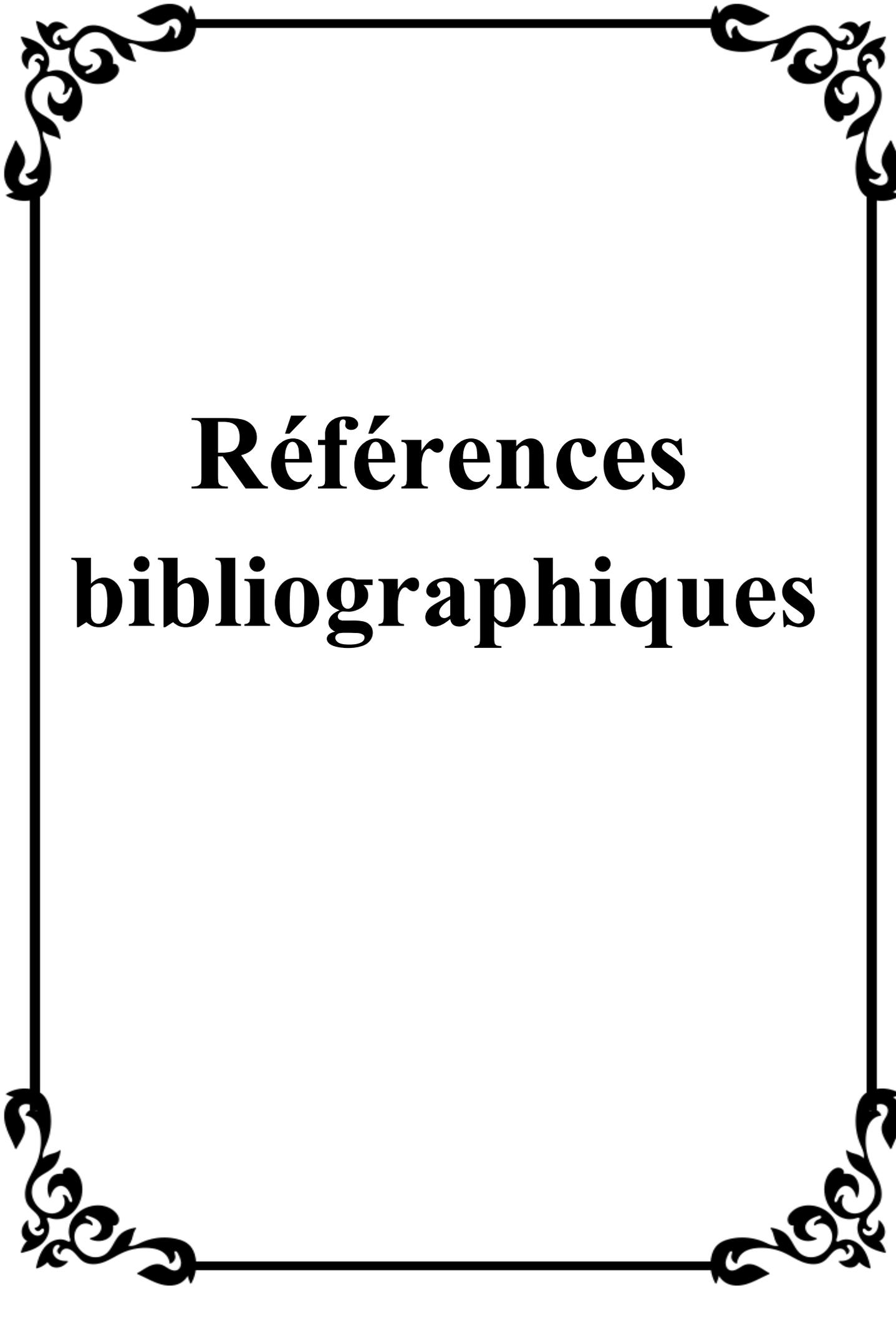
**الكلمات المفتاحية :** نظام PV - محول تقوية - تحكم MPPT - محاكاة - Matlab/Simulink .

### Abstract :

In this thesis, we analyze the simulation of the operation of a photovoltaic (PV) system adapted by a digital MPPT "disturbance and observation (P&O), Incremental (INC)" digital control, ensures the pursuit of maximum power supplied by a photovoltaic generator.

In our simulation, we designed a PV generator under standard test conditions (CTS) ( $G=1000 \text{ W/m}^2$   $T=25^\circ\text{C}$ ), a peak power of 1110W, an optimal current of 23.25A and an optimal voltage of 54.2V, and a booster converter, the results of simulation obtained under Matlab.

**Keywords :** PV system - Booster converter - MPPT control - Simulation - Matlab/Simulink .



# **Références bibliographiques**

## Références bibliographiques

---

- [1] Zahra ssoria ,Makhloufcheymaa : Etude et Simulation d'un Générateur Photovoltaïque Muni d'un Convertisseur MPPT pour une Meilleure Gestion Energétique , Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2016/2017
- [2] Bouguerra.T, «Optimisation d'un système photovoltaïque : Application en continu et en alternatif», Mémoire Magister, UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE 1, 30/06/2014.
- [3] SAADI.S, « Effet Des Paramètres Opérationnels Sur Les Performances D'un Capteur Solaire Plan » Thèse de Magistère en physique, Université Mentouri De Constantine 2010.
- [4] Boutifathi : Etude de la dégradation des panneaux photovoltaïque de l'Université de Biskra , mémoire master , domaine science et techniques , filière génie mécanique , Biskra ; 2019.
- [5] Belaidlalounisofia : Cours Energie Solaire Photovoltaïque , Université A.MIRA de BEJAIA Faculté de Technologie ; Maître de Conférences Classe B, 2014/2015.
- [6] BelarbiMustapha : Contribution à l'étude d'un générateur solaire pour site autonome, Thèse de Doctorat Es-Sciences SPECIALITE :électronique , option systemes photovoltaïque , 2015.
- [7] Rémi saisset Agrégé de Génie Electrique de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan DEA Génie Electrique : Contribution à l'étude systémique de dispositifs énergétiques à composants électrochimiques. Formalisme Bond Graph appliqué aux piles à combustible, accumulateurs Lithium-Ion, Véhicule Solaire, 2004.
- [8] Amarouayache Mohamed, « contribution à l'optimisation d'une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque », doctorat en sciences en électrotechnique option ,2014
- [9] J. Ferrieux, f. Forest, « alimentations à découpage convertisseurs à résonance: principes composants modélisation ». Paris, France: Dunod, 1999.
- [10] Le Ministère de L'énergie et des mines conception et réalisation satinfo société du groupe sonelgaz « programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique » mars 2011
- [11] B.Bendib, « Techniques conventionnelles et avancées de MPPT pour des applications photovoltaïques: étude comparative », mémoire de Magister, département d'Electronique .Université Ferhat Abbes-Sétif 2007.

## Références bibliographiques

---

- [12] BENSACI Wafa, «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », Mémoire master, université kasdiMarbah Ouargla, 2012.
- [13] Y.Lasmi, « Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque par les techniques intelligentes. », mémoire de magister, Université Sétif-1, 2013.
- [14] BENSACI Wafa, «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », Mémoire master, université kasdiMarbah Ouargla, 2012.
- [15] Y.Sedrati, H.Nouar, « Implémentation de l'algorithme P&O pour un système photovoltaïque », mémoire de master académique, Université KasdiMerbah d'Ourgla, 2016.
- [16] S.Zahar, C.Makhlouf, « Etude et Simulation d'un Générateur Photovoltaïque Muni d'un Convertisseur MPPT pour une Meilleure Gestion Energétique », mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf de M'sila, 2017.
- [17] KH.Bouزيد, « Etude et Réalisation d'un système photovoltaïque à base d'une carte Arduino uno », Mémoire Master, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2016.
- [18] M.Z.F.Z.Zerhoun, « Optimisation d'un système à énergie verte avec validation pratique » Revue des énergies renouvelables, vol. 11 , N°1, p. 41–49, 2008.
- [19] A.Saadi, « Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage Photovoltaïque », Mémoire de Magister, Université de Biskra, 2000.
- [20] N. Abouchabana, « Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT », Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.