

875  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université 8Mai 1945 – Guelma

Faculté des sciences et de la Technologie  
Département d'Electronique et Télécommunications



2015  
جامعة 08 ماي 1945  
الإلكترونيك  
اتصالات الساتل  
البيئية  
العلوم والتكنولوجيا  
**Mémoire de fin d'étude  
Pour l'obtention du diplôme de Master Académique**

Domaine : Sciences et Technologie  
Filière : Génie Électrique  
Spécialité : Systèmes électroniques

---

---

**Étude d'un générateur photovoltaïque**

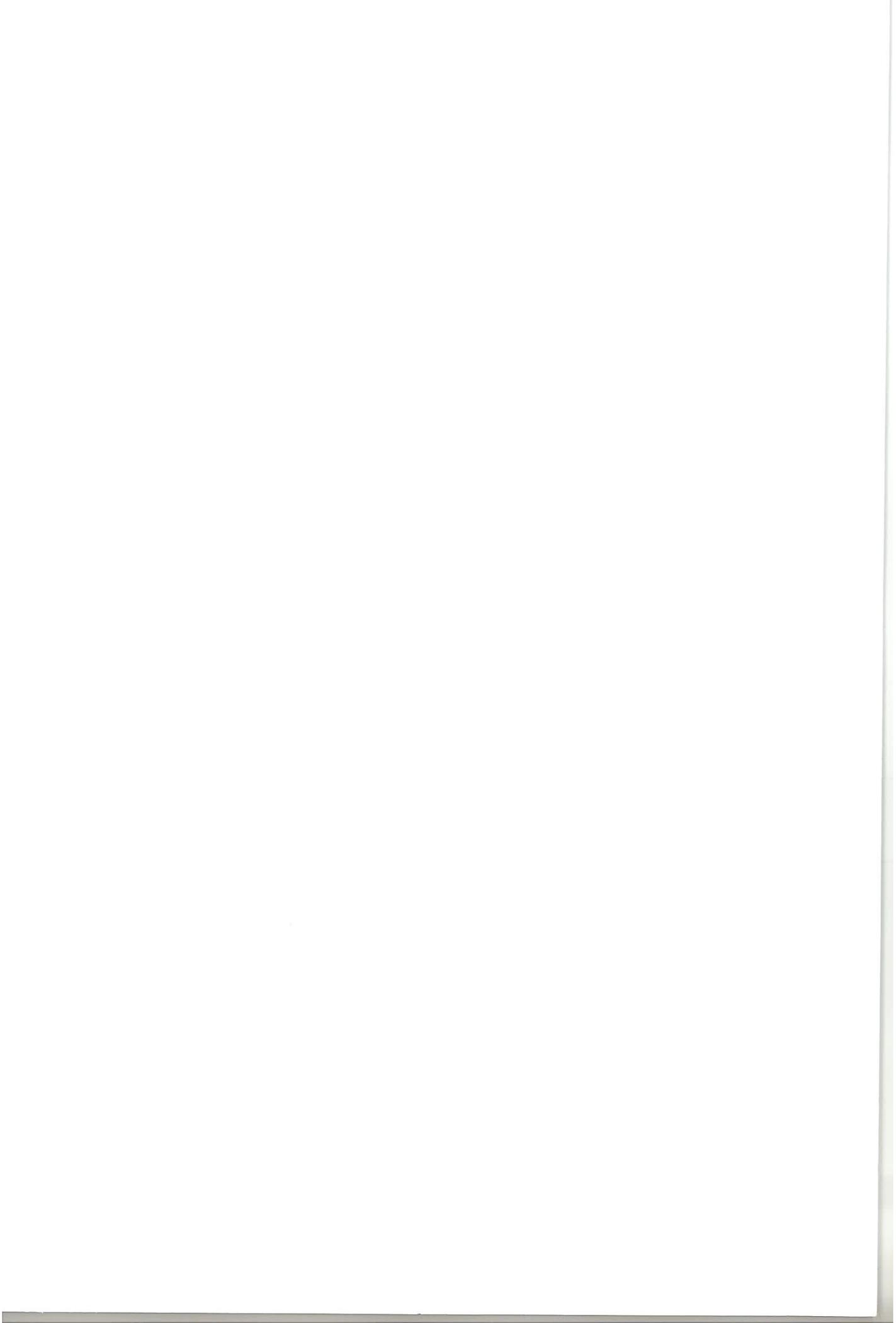
---

---

Présenté par : **Brahmia Fatih**

Sous la direction de :  
**Mr .Boulsina Fayçal**

Juin 2015



## Remerciements

15/3/202

*Avant tout nous tenons nos remerciements à notre dieu de nos avoir donné la force et le courage pour réaliser ce modeste travail.*

*Je tiens à exprimer mes remerciements à notre encadreur Mr.F .Boulsina qui m'a guidé par ses remarques constructives et ses valeureux conseils qui ont contribué à améliorer la qualité de ce mémoire.*

*J'exprime mes remerciements au Mr.Boujahem de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.  
Mes remerciements vont aussi à Messieurs Mr.H.Doghman et Mr.H.Bourouba, membres du jury, pour leurs disponibilités et leurs gentilleses.*

*Nos plus chaleureux remerciements pour tous ceux qui de près et de loin ont contribué à la réalisation de cette mémoire.*

*Fateh*

A decorative border with intricate floral and scrollwork patterns in black ink, framing the central text. The border is composed of four corner pieces and two horizontal lines connecting them.

## *Dédicaces*

- بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ -

*Je dédie ce travail à mes parents que  
dieu me les garde, mes frères et mes  
sœurs, mes amies et mes collègues et  
à toute la famille Brahmia.*

## Liste des figures

Figure	Titre	Page
<b>CHAPITRE 01 : NOTIONS ESSENTIELLES SUR LE GISEMENT SOLAIRE</b>		
<b>Figure (1.1)</b>	Structure du soleil	<b>02</b>
<b>Figure (1.2)</b>	Le mouvement de la terre autour du soleil	<b>03</b>
<b>Figure (1.3)</b>	Coordonnées solaires selon le repère équatorial	<b>04</b>
<b>Figure (1.4)</b>	Coordonnées solaires selon le repère horizontal	<b>05</b>
<b>Figure (1.5)</b>	Repérage d'un site sur la surface terrestre	<b>06</b>
<b>Figure (1.6)</b>	Description du nombre de masse d'air	<b>06</b>
<b>Figure (1.7)</b>	spectre solaire hors atmosphère	<b>08</b>
<b>Figure (1.8)</b>	Les composants du rayonnement solaire	<b>09</b>
<b>Figure (1.9)</b>	Potentiel solaire en Algérie	<b>11</b>
<b>CHAPITRE 02 : PRÉSENTATION D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE</b>		
<b>Figure (2.1)</b>	Cellule solaire photovoltaïque	<b>13</b>
<b>Figure (2.2)</b>	Le silicium	<b>15</b>
<b>Figure (2.3)</b>	Le diagramme énergétique	<b>16</b>
<b>Figure (2.4)</b>	Dopage de type N	<b>16</b>
<b>Figure (2.5)</b>	Dopage de type P	<b>17</b>
<b>Figure (2.6)</b>	Jonction P-N	<b>18</b>
<b>Figure (2.7)</b>	Schéma d'une cellule photovoltaïque	<b>18</b>
<b>Figure (2.8)</b>	Collision entre un photon et un atome	<b>20</b>
<b>Figure (2.9)</b>	Cellule photovoltaïque	<b>20</b>
<b>Figure (2.10)</b>	Types de cellules photovoltaïques	<b>21</b>

<b>Figure (2.11)</b>	Structure d'une cellule triple-jonction	<b>22</b>
<b>Figure (2.12)</b>	Cellule solaire tout organique sur substrat souple	<b>23</b>
<b>Figure (2.13)</b>	Courant de court-circuit	<b>24</b>
<b>Figure (2.14)</b>	Tension de circuit ouvert	<b>24</b>
<b>Figure (2.15)</b>	Courbe I(V) à T=25 et un éclairement de 1000W/m <sup>2</sup> .	<b>25</b>
<b>Figure (2.16)</b>	Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire idéale connectée à une charge.	<b>26</b>
<b>Figure (2.17)</b>	Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire idéale avec résistance série.	<b>27</b>
<b>Figure (2.18)</b>	Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire idéale avec résistance parallèle.	<b>28</b>
<b>Figure (2.19)</b>	Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire idéale avec résistance série et parallèle	<b>28</b>
<b>Figure (2.20)</b>	Cellule, module (ou générateur) et panneau PV	<b>29</b>
<b>Figure (2.21)</b>	Caractéristique courant-tension de ( $N_{cs}$ ) cellule en série	<b>30</b>
<b>Figure (2.22)</b>	Caractéristique courant tension de ( $N_{cp}$ ) cellule en parallèle	<b>31</b>
<b>Figure (2.23)</b>	Protection d'un générateur PV par diodes	<b>32</b>
<b>Figure (2.24)</b>	Les différentes zones de Caractéristique I(V) d'un GPV	<b>33</b>
<b>Figure (2.25)</b>	Système photovoltaïque	<b>34</b>
<b>CHAPITRE 03 : SIMULATION D'UNE CELLULE ET D'UN GPV</b>		
<b>Figure (3.1)</b>	Caractéristique I (V) d'une cellule (T=25°C, G=1000W/m <sup>2</sup> )	<b>39</b>
<b>Figure (3.2)</b>	Caractéristique P(V) d'une cellule solaire (T=25°C, G=1000W/m <sup>2</sup> )	<b>39</b>
<b>Figure (3.3)</b>	Caractéristique I(V) pour différentes températures (G=1000W/m <sup>2</sup> )	<b>40</b>
<b>Figure (3.4)</b>	Caractéristique P(V) pour différentes températures (G=1000W/m <sup>2</sup> )	<b>41</b>

<b>Figure (3.5)</b>	Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C)	<b>42</b>
<b>Figure (3.6)</b>	Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C)	<b>42</b>
<b>Figure (3.7)</b>	Caractéristique I(V) d'un générateur PV (T=25°C, G=1000W/m <sup>2</sup> )	<b>43</b>
<b>Figure (3.8)</b>	Caractéristique P(V) d'un générateur PV (T=25°C, G=1000 W/m <sup>2</sup> )	<b>44</b>
<b>Figure (3.9)</b>	Caractéristique I (V) pour différents nombres de cellules en série.	<b>45</b>
<b>Figure (3.10)</b>	Caractéristique P (V) pour différents nombres de cellules en série.	<b>45</b>
<b>Figure (3.11)</b>	Caractéristique I (V) pour différents nombres de cellules en parallèle.	<b>46</b>
<b>Figure (3.12)</b>	La caractéristique de P (V) pour différents nombres de cellules en parallèle.	<b>46</b>
<b>Figure (3.13)</b>	Caractéristique I (V) pour différents nombres de cellules en série et parallèle.	<b>47</b>
<b>Figure (3.14)</b>	Caractéristique P (V) pour différents nombres de cellules en série et parallèle.	<b>47</b>
<b>Figure (3.15)</b>	Caractéristique I(V) d'un générateur pour différentes températures (G=1000W/m <sup>2</sup> ).	<b>48</b>
<b>Figure (3.16)</b>	Caractéristique P(V) d'un générateur pour différentes températures (G=1000W/m <sup>2</sup> ).	<b>49</b>
<b>Figure (3.17)</b>	Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).	<b>49</b>
<b>Figure (3.18)</b>	Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).	<b>50</b>
<b>Figure (3.19)</b>	Bloc Simulink représentant la cellule photovoltaïque.	<b>51</b>
<b>Figure (3.20)</b>	Schéma bloc de la cellule PV en MATLAB-SIMULINK	<b>51</b>
<b>Figure (3.21)</b>	Caractéristique P(V) d'une cellule à T=25°C, G=1000W/m <sup>2</sup> .	<b>52</b>

<b>Figure (3.22)</b>	Caractéristique P(V) d'une cellule à T=25°C, G=1000W/m <sup>2</sup> .	<b>52</b>
<b>Figure (3.23)</b>	Caractéristiques I(V) pour différentes températures (G=1000W/m <sup>2</sup> ).	<b>53</b>
<b>Figure (3.24)</b>	Caractéristiques P(V) pour différentes températures (G=1000W/m <sup>2</sup> ).	<b>53</b>
<b>Figure (3.25)</b>	Caractéristiques I(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).	<b>54</b>
<b>Figure (3.26)</b>	Caractéristiques P(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).	<b>54</b>
<b>Figure (3.27)</b>	Bloc Simulink représentant le GPV.	<b>55</b>
<b>Figure (3.28)</b>	Schéma bloc du générateur PV en MATLAB-SIMULINK.	<b>55</b>
<b>Figure (3.29)</b>	Caractéristique I(V) d'une cellule PV (T=25°C, G=1000W/m <sup>2</sup> ).	<b>56</b>
<b>Figure (3.30)</b>	Caractéristique P(V) d'une cellule PV (T=25°C, G=1000W/m <sup>2</sup> ).	<b>56</b>
<b>Figure (3.31)</b>	Caractéristiques I(V) pour différentes températures (G=1000W/m <sup>2</sup> ).	<b>57</b>
<b>Figure (3.32)</b>	Caractéristiques P(V) pour différentes températures (G=1000W/m <sup>2</sup> ).	<b>57</b>
<b>Figure (3.33)</b>	Caractéristiques I(V) d'un générateur pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).	<b>58</b>
<b>Figure (3.34)</b>	Caractéristiques P(V) d'un générateur pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).	<b>58</b>

## Liste des tableaux

<b>Tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>page</b>
<b>Tableau (1.1)</b>	Valeurs énergétiques des photons issus du spectre solaire	<b>08</b>
<b>Tableau (1.2)</b>	Le taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie	<b>10</b>
<b>Tableau (2.1)</b>	Avantages et inconvénients des cellules photovoltaïques	<b>23</b>
<b>Tableau (3.1)</b>	Caractéristique électrique de cellule dans les conditions standards «CST» $T=25^{\circ}\text{C}$ , $G=1000\text{W}/\text{m}^2$	<b>38</b>

## SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

DEDICACES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

### CHAPITRE 01 : NOTIONS ESSENTIELLES SUR LE GISEMENT SOLAIRE

1. Introduction .....	1
2. Le soleil .....	1
3. Le mouvement de la terre .....	2
4. Grandeurs géographiques et astronomiques .....	3
4.1 Grandeurs pour le repérage du soleil .....	3
4.1.1. Repère de coordonnées équatoriales.....	4
4.1.2. Repère de coordonnées horizontales .....	5
4.2. Grandeurs pour le repérage d'un site à la surface terrestre .....	6
5. Caractéristiques du rayonnement solaire .....	7
5.1. Masse d'air .....	7
5.2. Spectre solaire .....	8
5.3. Différents types de rayonnement .....	9
5. Potentiel solaire en Algérie.....	10
6. Conclusion .....	12

### CHAPITRE 02 : PRÉSENTATION D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE

1. Introduction .....	13
2. La cellule photovoltaïque .....	13
3. Historique .....	14

---

4. La conversion photovoltaïque .....	15
5. Rappel sur les propriétés des semi-conducteurs .....	15
5.1 Les semi-conducteurs intrinsèques .....	15
5.2 Les semi-conducteurs extrinsèques .....	16
5.2.1 Dopage de silicium .....	16
5.2.2 La jonction PN.....	17
6. L'effet photovoltaïque .....	18
7. Principe de fonctionnement de la cellule PV .....	19
8. Rendement PV .....	20
9. Les différents types de cellules PV.....	21
9.1 Les technologies de 1 <sup>ère</sup> génération .....	21
9.2 Les technologies de 2 <sup>ème</sup> génération .....	21
9.3 Les technologies de 3 <sup>ème</sup> génération .....	22
10. Paramètre des cellules photovoltaïques .....	24
10.1. Courant de court-circuit $I_{cc}$ .....	24
10.2. Tension à circuit ouvert $V_{oc}$ .....	24
10.3. Puissance maximale .....	24
10.4. Rendement d'une cellule .....	25
10.5. Le facteur de forme $ff$ .....	25
11. Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	26
11.1. Cellule photovoltaïque idéal .....	26
11.2. Cellule photovoltaïque idéal avec résistance série .....	27
11.3. Cellule photovoltaïque idéal avec résistance parallèle.....	28
11.4. Cellule photovoltaïque idéal avec résistance série et parallèle .....	28
12. Générateur photovoltaïque (GPV) .....	29
12.1 Groupement de cellules photovoltaïques .....	29
12.1.1 Groupement en série .....	30
12.1.2 Groupement en parallèle .....	30
12.1.3 Groupement (série et parallèle) .....	31
12.2 Protection par diodes.....	31
12.3 Les zones de caractéristique $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque .....	32
12.4. Modélisation d'un générateur photovoltaïque.....	33
13. Système photovoltaïque .....	33
13.1. Les batteries .....	34

13.2. Le régulateur .....	35
13.3. L'onduleur .....	35
14. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	35
14.1. Les avantages .....	35
14.2. Les inconvénients .....	36
15. Conclusion .....	37

## CHAPITRE 03 : SIMULATION D'UNE CELLULE ET D'UN GPV

1. Introduction .....	38
2. Simulation d'une cellule photovoltaïque .....	38
2.1 Caractéristique I(V) et P(V) .....	38
2.2. Effets climatiques sur la cellule PV .....	40
2.2.1. Influence de la température sur la cellule .....	40
2.2.2. Influence de l'éclairement sur la cellule .....	41
3. Caractéristiques du générateur photovoltaïque .....	43
3.1. Caractéristique courant-tension I(V) .....	43
3.2. Caractéristique puissance-tension P(V) .....	44
3.3. Influence de l'association des cellules PV sur le GPV .....	44
3.3.1 Influence de l'association série des cellules PV .....	44
3.3.2 Influence de l'association parallèle des cellules PV .....	46
3.3.3 Influence de l'association mixte (Série + Parallèle) des cellules PV.....	47
3.4. Effets climatiques sur le générateur PV .....	48
4. Simulation d'une cellule et générateur PV par MATLAB-SIMULINK.....	50
4.1. L'outil Matlab-Simulink.....	50
4.2. Simulation d'une cellule PV par Matlab-Simulink.....	51
4.3. Simulation d'un générateur PV par Matlab-Simulink.....	55
5. Conclusion.....	59
Conclusion générale .....	60
Références bibliographiques	
Résumé	

# INTRODUCTION GENERALE

Les sources d'énergie conventionnelles telles que le nucléaire ou les combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz) sont issues de stocks limités de matières extraites du sous-sol de la terre. Chacune d'elles provoque des dégâts à long terme plus ou moins importants sur l'environnement : pollution atmosphérique, changement climatique, contamination radioactive....

A l'opposé, les sources d'énergie renouvelables ont recours à des flux naturels qui traversent de façon plus ou moins permanente la biosphère. Comme elles n'utilisent qu'une infime partie de ces flux, elles sont inoffensives pour l'environnement naturel.

Toutes les énergies renouvelables sont issues directement ou indirectement du soleil.

Son rayonnement direct peut être utilisé de deux manières :

- + sa chaleur peut être concentrée pour chauffer de l'eau sanitaire, des immeubles, des séchoirs, ou bien un liquide en circulation afin de produire de l'électricité par l'intermédiaire d'un alternateur ou d'une dynamo. C'est le solaire thermique.
- + sa lumière peut être transformée directement en courant électrique.

Le rayonnement solaire est également à l'origine de phénomènes naturels qui offrent autant de manières de capter une partie de cette énergie solaire indirecte: le vent (énergie éolienne), le cycle de l'eau (énergie hydraulique), la croissance des végétaux par la photosynthèse (énergie de la biomasse, notamment bois et bio-gaz), auxquelles on peut ajouter l'énergie de la mer (courants marins, houle et marée) qui est issue des forces internes du système solaire.

Parmi ces énergies renouvelables, nous allons nous intéresser à l'énergie photovoltaïque, qui est la conversion directe de l'énergie que nous envoie le soleil en électricité. Cette conversion s'effectue par le biais d'une cellule dite solaire basée sur l'effet photovoltaïque.

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique propre à certains matériaux appelés "semi-conducteurs" (le plus connu est le silicium utilisé pour les composants électroniques).

Lorsque les "grains de lumière" (les photons) heurtent une surface mince de ces matériaux, ils transfèrent leur énergie aux électrons de la matière. Ceux-ci se mettent alors en

mouvement dans une direction particulière, créant ainsi un courant électrique qui est recueilli par des fils métalliques très fins.

L'association possible de plusieurs cellules en série/parallèle constitue le générateur photovoltaïque (GPV) avec des caractéristiques courant-tension  $I(V)$  spécifique.

L'objectif du travail présenté dans ce mémoire est d'étudier un générateur photovoltaïque (GPV). Ce travail a été réparti en trois chapitres comme suit:

- ✚ Dans le premier chapitre, nous allons décrire les notions essentielles sur le gisement solaire à savoir les coordonnées terrestres, le mouvement de la terre autour du soleil, les différents types de rayonnements, et le potentiel solaire en Algérie.
  
- ✚ Dans le deuxième chapitre, nous allons faire une généralité sur le système photovoltaïque. Nous allons présenter le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres, le fonctionnement d'une cellule PV, nous allons présenter les différentes technologies des cellules ainsi que la modélisation d'une cellule. Ensuite, nous allons faire un rappel sur les générateurs PV et leurs performances. Les différents groupements possibles des cellules sont décrits, Enfin. Les avantages et les inconvénients du photovoltaïque.
  
- ✚ Dans le troisième chapitre, nous allons faire la simulation du comportement d'une cellule et d'un générateur PV sous Matlab (l'influence de la température, le niveau de l'éclairement et l'association des cellules en série/parallèle). Puis nous avons utilisé l'outil Matlab-Simulink pour simuler les caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  de la cellule et du GPV pour différentes températures et différents niveaux d'éclairement.

Enfin, nous terminons cette étude par une conclusion générale qui résume les travaux réalisés.

# Chapitre 01

## **NOTIONS ESSENTIELLES SUR LE GISEMENT SOLAIRE**

## 1. INTRODUCTION

Issue de la nature, l'énergie se présente sous deux formes :

- ✚ Les énergies conventionnelles ou les énergies non renouvelables, elles sont d'origine fossile, dont les plus connues sont : le pétrole, le charbon, le gaz et l'uranium.
- ✚ Les énergies renouvelables ou les énergies non conventionnelles, dont les plus importantes sont : le solaire ; l'éolien, la géothermie et la biomasse. Elles ont pour origines des sources d'énergie inépuisables grâce aux cycles naturels telles que, le rayonnement solaire, le vent, le flux de chaleur interne de la terre, et le cycle du carbone dans la biosphère.

L'énergie solaire est la plus dominante de toutes les énergies renouvelables, elle est l'une des plus facilement exploitables. Comme la plus part des énergies douces, elle donne à l'utilisateur la possibilité de subvenir sans intermédiaire à une partie de ses besoins.

La connaissance de la position du soleil dans le ciel à tout instant et en tout lieu est nécessaire pour l'étude de l'énergie interceptée. Les heures du lever et du coucher ainsi que la trajectoire du soleil dans le ciel au cours d'une journée permettent d'évaluer certaines grandeurs telles que la durée maximale d'insolation, l'irradiation globale.

Dans ce chapitre nous allons définir certaines grandeurs solaires à savoir :

- ✚ Les grandeurs astronomiques.
- ✚ Les grandeurs géographiques.
- ✚ Le rayonnement direct, diffus et global.

## 2. LE SOLEIL

Le Soleil est une grande sphère formée de gaz extrêmement chauds. Il est constitué, par la masse, de 75% d'hydrogène, 23% d'hélium et autres (2%). Les atomes d'hydrogène sont transformés en hélium par une réaction de fusion thermonucléaire massive. La masse est alors transformée en énergie selon la fameuse formule d'Einstein  $E = mc^2$ . Cette réaction maintient la surface du soleil à une température approximative de 5800° K.

Le soleil n'est pas une sphère homogène, on peut y distinguer trois régions principales (Figure 1.1) [1] :

a) L'intérieur, contient 40% de la masse du soleil, c'est là où se crée l'énergie par réaction thermonucléaire, cette région s'étend sur une épaisseur de  $25 \times 10^4$  km. Cette couche est divisée en trois zones, le noyau, la zone radiative et la zone convective. Le rayonnement émis

dans cette partie est totalement absorbé par les couches supérieures. La température atteint plusieurs millions de degrés, et la pression un milliard d'atmosphères.

b) La photosphère est une couche opaque, très mince, son épaisseur est d'environ 300 km, elle est responsable de la presque totalité du rayonnement qui nous parvient, c'est la partie visible du soleil. L'ordre de grandeur de la température est de quelques millions de degrés, décroissant très rapidement dans l'épaisseur de la couche jusqu'à une température dite de surface de l'ordre de 4500°.

c) La chromosphère et la couronne solaire, sont des régions à faible densité où la matière est très diluée, elles constituent l'atmosphère du soleil. Cette couche est caractérisée par un rayonnement émis très faible, bien que la température y est très élevée (un million de degrés).

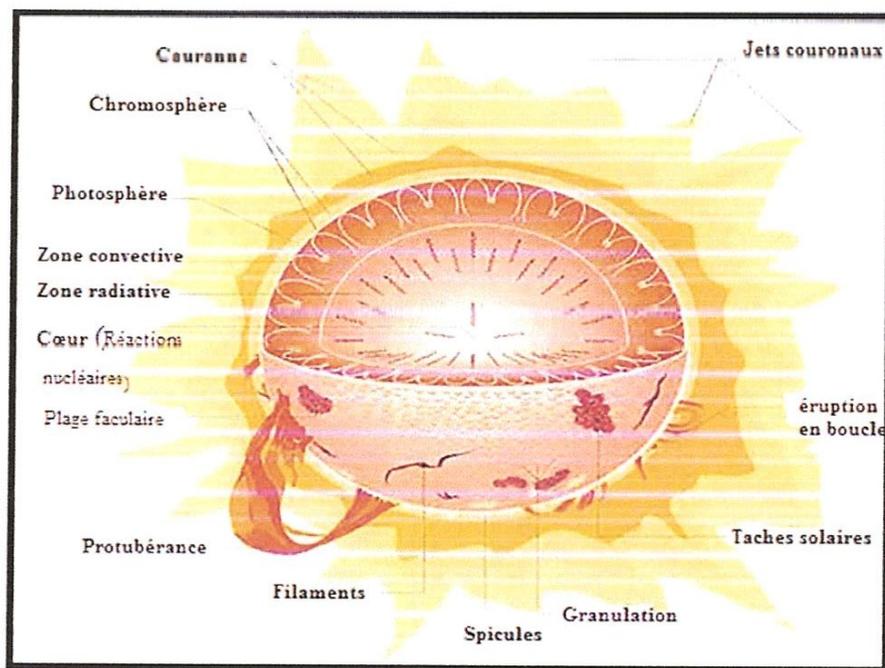


Figure (1.1) : Structure du soleil [1].

### 3. LE MOUVEMENT DE LA TERRE

Dans son mouvement autour du soleil, la terre décrit une ellipse dont le soleil est l'un de ses foyers, la révolution complète s'effectue en une période de 365,25 jours. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique.

C'est au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est la plus proche du soleil : 147 millions de km. Au 22 juin la distance terre-soleil vaut 152 millions de km, c'est le jour ou la

terre est la plus éloignée, c'est le solstice d'été. Le 21 mars et le 21 septembre sont appelés respectivement équinoxes de printemps et équinoxe d'automne. Aux équinoxes le jour et la nuit sont égaux.

En plus de sa rotation autour du soleil, la terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Cette rotation s'effectue en une journée. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la terre est appelé l'équateur. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique, ils font entre eux un angle appelé inclinaison égale à  $23^{\circ}27'$  [1].

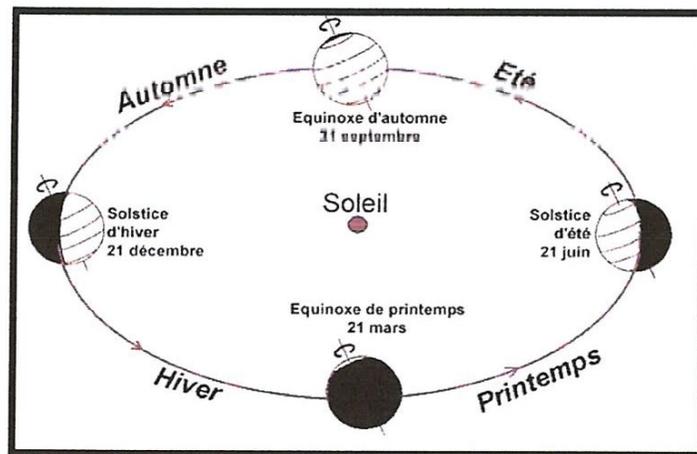


Figure (1.2) : Le mouvement de la terre autour du soleil.

## 4. GRANDEURS GÉOGRAPHIQUES ET ASTRONOMIQUES

### 4.1. Grandeurs pour le repérage du soleil

La position du soleil dans le ciel n'est pas fixe, elle change à travers le jour et la saison. Ce changement de position est engendré par la rotation de la terre sur elle-même (autour de son axe), et de son mouvement autour du soleil (dans son orbite) [1].

Afin de déterminer cette position il est d'usage d'utiliser deux repères : le repère équatorial ou horaire et le repère horizontal ou azimutal.

#### 4.1.1. Repère de coordonnées équatoriales

Les coordonnées équatoriales sont indépendantes de la position de l'observateur sur la terre, mais elles sont liées à l'heure d'observation. La position de soleil est exprimée par deux angles [29] :

### ✦ La déclinaison $\delta$

C'est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial. La déclinaison varie de façon sinusoidale au cours de l'année : elle vaut 0 aux équinoxes et atteint ses deux valeurs extremes au solstice d'hiver ( $-23^{\circ},27'$ ), et au solstice d'été ( $+23^{\circ},27'$ ).

### ✦ L'angle horaire $\omega$

L'angle horaire  $\omega$  mesure le mouvement du soleil par rapport à midi qui est l'instant où le soleil au plan méridien du lieu zénith. Cet angle est formé entre la projection du soleil sur le plan équatorial à un moment donnée et la projection du soleil sur ce même plan au midi vrai.

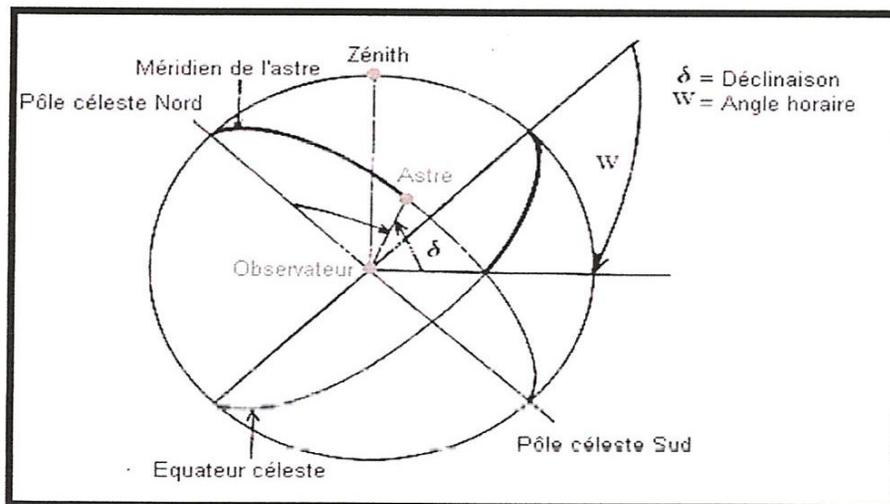


Figure (1.3) : Coordonnées solaires selon le repère équatorial.

#### 4.1.2. Repère de coordonnées horizontales

Le soleil repéré par les grandeurs suivants [29] :

##### ✦ L'azimut $\psi$

L'azimut est l'angle entre le plan vertical contenant le rayon solaire et direction sud. Il se compte de  $0^{\circ}$  à  $360^{\circ}$  à partir de sud dans le sens rétrograde.

##### ✦ L'angle de la hauteur solaire $\gamma$

C'est l'angle compris entre la direction du soleil et le plan horizontal.  $\gamma$  varie de  $0^{\circ}$  à  $90^{\circ}$  vers le zénith et de  $0^{\circ}$  vers  $-90^{\circ}$  vers le nadir.

##### ✦ La distance zénithale $z$

C'est l'angle entre la direction du soleil et la verticale du lieu (zénith). L'angle  $z$  est complémentaire de  $\gamma$ .

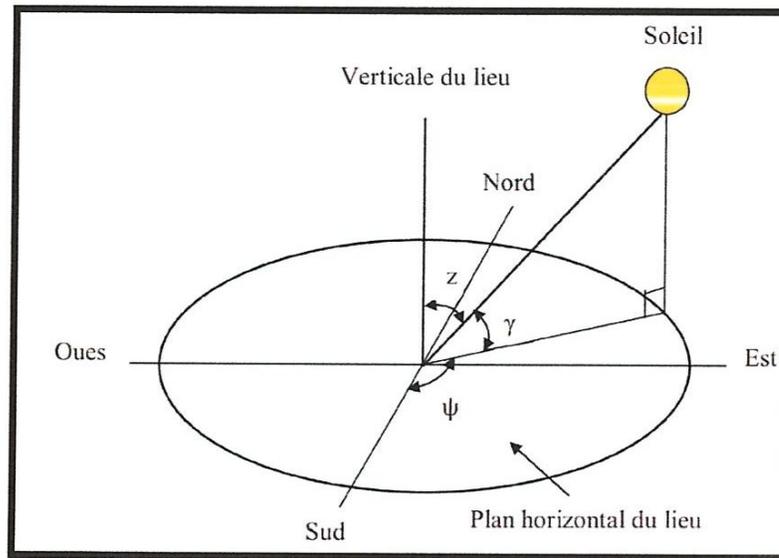


Figure (1.4) : coordonnées solaires selon le repère horizontal [29].

#### 4.2. Grandeurs pour le repérage d'un site à la surface terrestre

Un point quelconque d'un lieu donné du globe peut être défini par les coordonnées suivantes :

##### + Longitude

C'est l'angle formé par le méridien de Greenwich et le méridien de lieu considéré. La longitude est comprise entre  $-180$  (vers l'ouest) et  $+180$  (vers l'est). Comme la terre met 24 heures pour faire un tour sur elle-même ( $360^\circ$ ), chaque heure représente  $15^\circ$  d'écart de longitude et donc chaque degré de longitude représente 4 minutes [13].

##### + La latitude

Correspond à l'angle entre le rayon joignant le centre de la terre à ce lieu et le plan équatorial. Elle varie de  $-90^\circ$  à  $+90^\circ$ , elle est positive vers le nord.

##### + L'altitude

L'altitude d'un point correspond à la distance verticale entre ce point et une surface de référence théorique (niveau moyen de la mer), on l'exprime généralement en mètre [12].

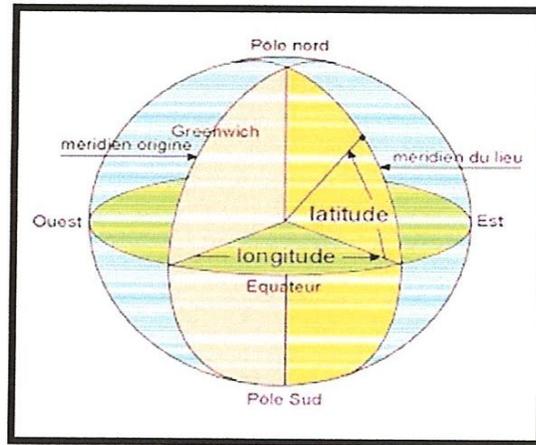


Figure (1.5) : Repérage d'un site sur la surface terrestre [1].

## 5. CARACTÉRISTIQUES DU RAYONNEMENT SOLAIRE

### 5.1. Masse d'air

Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus il va subir de transformation.

On appelle masse d'air AM, la perte de l'énergie solaire par l'absorption atmosphérique. Elle est donnée en fonction de l'angle entre le soleil et le zénith.

$$AM \approx \frac{1}{\sin\theta} \quad (1.1)$$

Où :  $\theta$  représente l'angle entre la position du soleil et le zénith exprimée en (Deg).

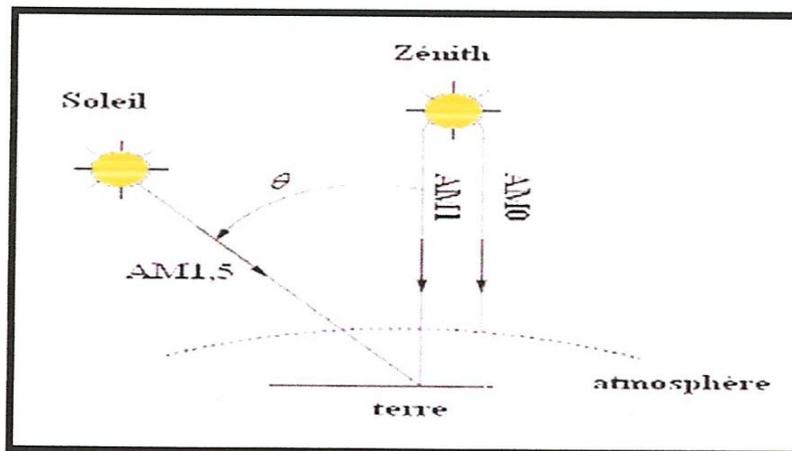


Figure (1.6) : Description du nombre de masse d'air.

Le spectre solaire AM0 correspond à une masse d'air nulle pour un rayonnement arrivant au-dessus de la couche atmosphérique à incidence normale, AM1 pour un soleil vertical à la terre (le soleil est au zénith), et AM1.5 pour un rayonnement solaire correspondant à une inclinaison du soleil de 45° par rapport au zénith.

Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith [4] [30].

## 5.2. Spectre solaire

Le spectre du soleil, c'est sa décomposition en longueurs d'onde ou en couleurs. La lumière solaire est en effet composée de toutes sortes de rayonnements de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde.

Les photons, grain de lumière qui composent ce le rayonnement électromagnétique, sont porteurs d'une énergie qui est reliée à longueur d'onde par la relation [30] :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.2)$$

Où :  $h$  est la constante de Plank,  $\nu$  la fréquence,  $C$  la vitesse de la lumière et  $\lambda$  la longueur d'onde.

La courbe standard de la répartition spectrale du rayonnement solaire extraterrestre AM0, compilée selon les données recueillies par les satellites, est répartie comme suit [28] :

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

La figure (1.7) représente le spectre solaire hors atmosphère :

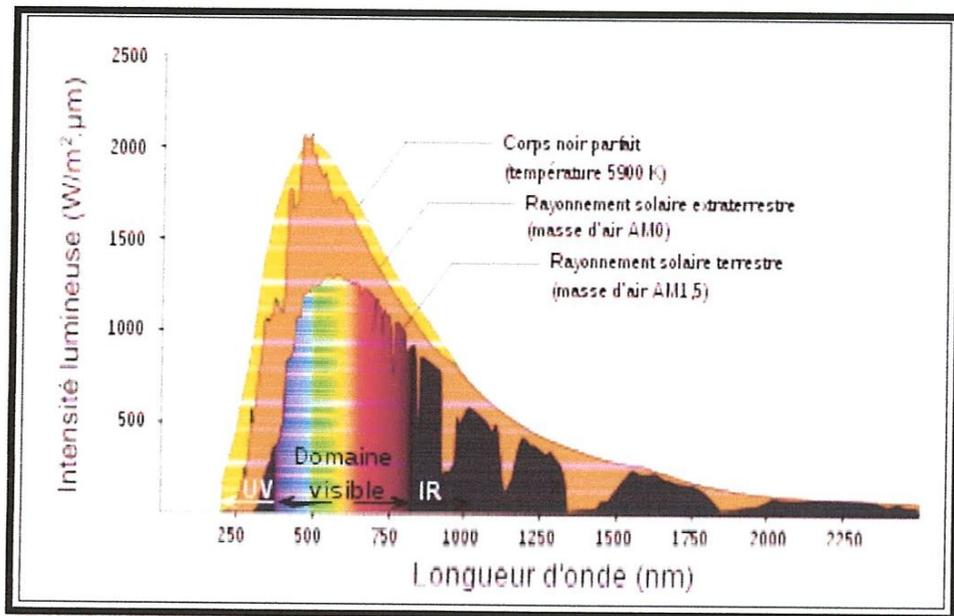


Figure (1.7) : spectre solaire hors atmosphère [20].

Le tableau 1.1 donne les valeurs énergétiques caractéristiques des photons pour diverses longueurs d'ondes, ainsi que les zones correspondantes au spectre lumineux [3].

Longueur d'onde (µm)	Énergie E (ev)	Zone
0.2	6.2	Ultra-violet
0.4	3.1	Visible bleu
0.5	2.48	Visible jaune-vert
0.78	1.59	Visible rouge
1	1.24	Infrarouge
2	0.62	Infrarouge
4	0.31	Infrarouge

Tableau 1.1 : Valeurs énergétiques des photons issus du spectre solaire.

### 5.3. Déficients types de rayonnement

L'énergie reçue au niveau du sol est plus faible que  $1354 \text{ w/m}^2$  (la constante solaire) car l'atmosphère absorbe une partie du rayonnement solaire (environ 15%) et la réémet dans toutes les directions sous forme de rayonnement diffus. L'atmosphère réfléchit une autre partie du rayonnement solaire vers l'espace (environ 6%). Le rayonnement global au niveau du sol se définit donc comme la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus (figure 1.8). L'énergie reçue par une surface dépend en outre de la saison, de la latitude, des conditions météorologiques, du relief, de la pollution, de l'orientation de la surface considérée, etc.

Les différents types de rayonnement sont :

#### + Rayonnement direct

Rayonnement reçu directement du soleil. Il peut être mesuré par un pyrhéliomètre.

#### + Rayonnement diffus

Rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Il peut être mesuré par un pyranomètre avec écran masquant le soleil.

#### + Rayonnement solaire réfléchi ou l'albédo du sol

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 (cau, neige).

#### + Rayonnement global

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.

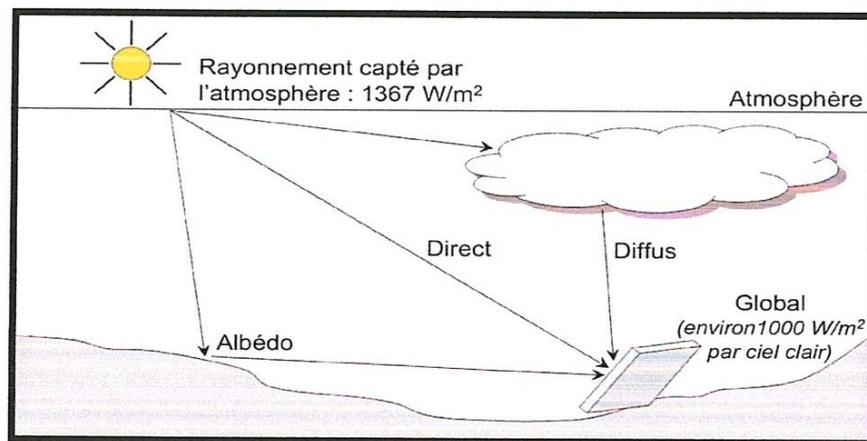


Figure (1.8) : Les composants du rayonnement solaire.

À noter que certains capteurs solaires concentrent le rayonnement solaire afin d'augmenter le rendement du capteur par rapport à une surface donnée. Ces capteurs à concentration ne peuvent utiliser que le rayonnement direct provenant du soleil. Dans les endroits avec une forte proportion d'ensoleillement diffus, ces capteurs ne peuvent pas fonctionner efficacement car l'ensoleillement diffus ne peut être concentré en un point.

## 6. Potentiel solaire en Algérie

Le potentiel solaire de l'Algérie, représentant dix fois la consommation mondiale en énergie, est à même d'assurer l'énergie nécessaire aux différentes applications industrielles, pour peu que les capacités technologiques dans ce domaine connaissent un accroissement significatif.

La qualité du rayonnement solaire algérien permet à l'Algérie de se classer parmi les trois pays qui disposent des meilleurs gisements solaires dans le monde. De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara).

L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de  $1\text{m}^2$  est de l'ordre de 5KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/m<sup>2</sup>/an au nord et 2650 KWh/m<sup>2</sup>/an au sud du pays.

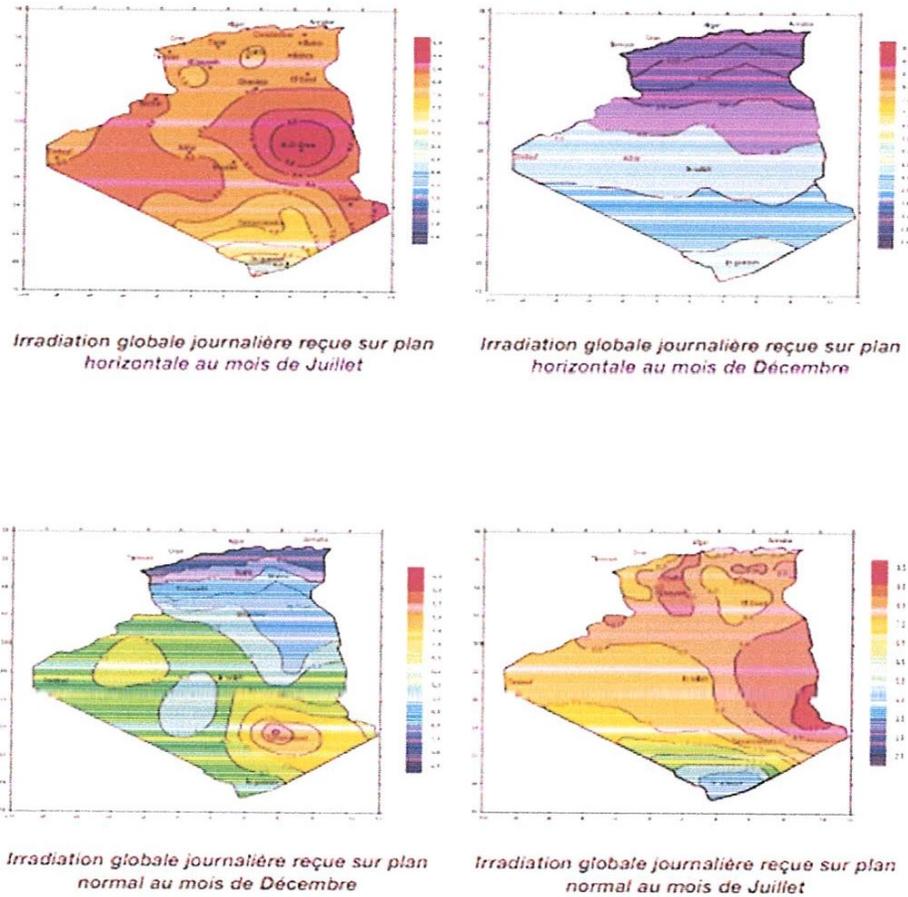
La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500 h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8 h/j et peut arriver jusqu'à 12 h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6 h/j en période estivale.

Le tableau suivant indique le taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie :

Régions	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Énergie moyenne reçue (Kwh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

**Tableau (1.2) : Le taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie [10].**

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un potentiel solaire énorme comme le montre la figure (1.9) :



**Figure (1.9) : Potentiel solaire en Algérie [11].**

Le volet de l'énergie solaire le plus utilisé dans notre pays est le solaire photovoltaïque, les autres volets solaire, thermique et thermodynamique, restent toujours au stade expérimental. Toutefois, la complexité des procédés de fabrication des modules photovoltaïques et les rendements de production faibles entraînent des coûts très élevés, ce qui freine son développement [1] [7] [8] [9] [10] [11].

## 7. CONCLUSION

L'étude du rayonnement solaire s'avère nécessaire pour le choix du meilleur site en vue d'une installation d'un système de captation solaire. Dans ce chapitre nous avons vu des notions sur l'énergie solaire et ses caractéristiques. Nous avons défini les grandeurs astronomiques, les grandeurs géographiques et les caractéristiques du rayonnement solaire.

Enfin, nous avons présenté le potentiel solaire en Algérie, la qualité du rayonnement solaire algérien permet à l'Algérie de se classer parmi les trois pays qui disposent des meilleurs gisements solaires dans le monde, la durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara).

# Chapitre 02

## **PRÉSENTATION D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE**

## 1. INTRODUCTION

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV).

L'association de plusieurs cellules en série/parallèle constitue le générateur photovoltaïque.

Ce chapitre présente un système photovoltaïque. Nous allons commencer par une étude détaillée de la cellule PV. Nous allons ensuite présenter le générateur PV. Nous allons enfin donner un aperçu sur le système PV.

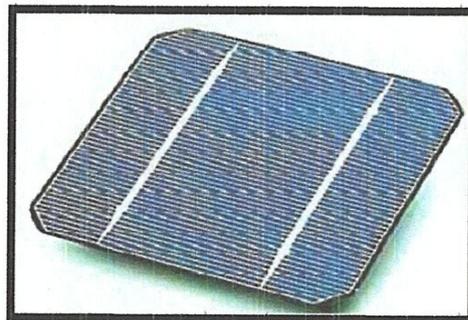
## 2. LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque », a été découverte 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. Elles utilisent principalement le silicium (Si) et plus rarement d'autres semi-conducteurs : sélénure de cuivre et sélénure d'indium ( $\text{CuIn}(\text{Se})_2$  ou  $\text{CuInGa}(\text{Se})_2$ ), tellurure de cadmium ( $\text{CdTe}$ ), ... etc.

La taille de chaque cellule va de quelques centimètres carrés jusqu'à  $100 \text{ cm}^2$  ou plus, sa forme est circulaire, carrée ou dérivée des deux géométries [5].

La figure ci-dessous, représente une cellule PV :



**Figure (2.1) : Cellule solaire photovoltaïque.**

### 3. HISTORIQUE

Le terme photovoltaïque provient de « photo » qui signifie lumière, et de « voltaïque » qui signifie électricité, désignant donc la production d'électricité à partir de lumière.

En plaçant deux électrodes métalliques dans un liquide conducteur et en exposant l'ensemble au rayonnement solaire, on peut mesurer une faible tension. C'est ainsi que fut découvert l'effet photovoltaïque en 1839 par le physicien français Antoine BECQUEREL. Ce fut donc la première fois que l'énergie solaire fut transformée en énergie électrique. Dans les années 1880, l'américain Charles FRITTS mit au point les premières cellules solaires au sélénium. Les investigations sur le silicium, les tentatives pour l'isoler, le purifier, mettre en œuvre ses propriétés physiques, commencèrent avant 1910. Einstein en expliqua les mécanismes en 1912, mais ce n'est qu'entre 1930 et 1945 qu'un premier procédé industriel de purification par refroidissement progressif du silicium fondu fut mis au point.

En 1954, deux chercheurs des laboratoires américains Bell, Darryl Chapin et Carl Fuller, annoncèrent au public que des cellules solaires à base de silicium avaient été obtenues avec un rendement de 6%. Bien que ces deux scientifiques arrivèrent par la suite à fabriquer en laboratoire des cellules à 15% de rendement, ils rencontrèrent des obstacles économiques et les laboratoires Bell abandonnèrent leurs efforts de recherche pour diminuer les coûts de fabrication [11].

L'énergie photovoltaïque eut un regain d'intérêt dans les années 1950 lors des premiers lancements spatiaux de satellites (Vanguard I, 1958). Les crises économiques des années 1970 (flambée des prix du pétrole, 1973) puis les accidents de centrales nucléaires tels ceux de Three Mile Island (USA, 1979) ou de Tchernobyl (URSS, 1986) renforcèrent l'intérêt envers les énergies renouvelables, en particulier l'énergie photovoltaïque qui s'impose comme une des sources d'énergies renouvelables les plus prometteuses.

A partir de 1995, des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001 et les projections sont assez optimistes pour les années à venir [12].

Actuellement, on peut citer quelques-uns des nouveaux axes de recherches dans le domaine de l'énergie photovoltaïque tels que [11] :

- ✚ L'utilisation des nanotubes de carbone pour un meilleur rendement.
- ✚ Le recours à de nouveaux nanomatériaux pour une meilleure absorption des rayons du soleil.

- ✦ La fabrication de cellules solaire flexibles.

#### 4. LA CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE

La conversion d'énergie photovoltaïque met en jeu trois phénomènes physique, intimement liés et simultanés:

- ✦ L'absorption de la lumière dans le matériau ;
- ✦ Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques;
- ✦ La collecte des charges.

Il est donc clair qu'un matériau doit avoir des propriétés optiques et électriques spécifiques pour permettre la conversion photovoltaïque.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant : d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque [21].

#### 5. RAPPEL SUR LES PROPRIÉTÉS DES SEMI-CONDUCTEURS

Les matériaux semi-conducteurs sont des corps dont la résistivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants.

Les quatre électrons de valence du silicium permettent de former quatre liaisons covalentes avec un atome voisin. Dans ce cas, tous les électrons sont utilisés et aucun n'est disponible pour créer un courant électrique [15].

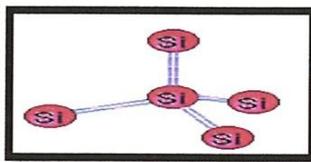


Figure (2.2) : Le silicium.

##### 5.1 Les semi-conducteurs intrinsèques

Les électrons situés sur la couche la plus éloignée du noyau, qui participent aux liaisons covalentes peuvent, sous l'effet de l'agitation thermique, devenir porteur de charge.

Le diagramme énergétique est constitué de deux bandes (conduction et valence) séparé par une bande interdite ou band gap (énergie minimale pour créer une paire électron-trou). Lorsqu'on excite un semi-conducteur par des photons, dont l'énergie est au moins égale à

celle du band gap (dans le cas du silicium 1.12 eV), on promeut un électron de la bande de valence vers la bande de conduction, formant un « trou » dans la bande de valence. Mais le nombre d'électrons libres dans un semi-conducteur intrinsèque reste très faible. Ici le nombre de trou et d'électron est égal.

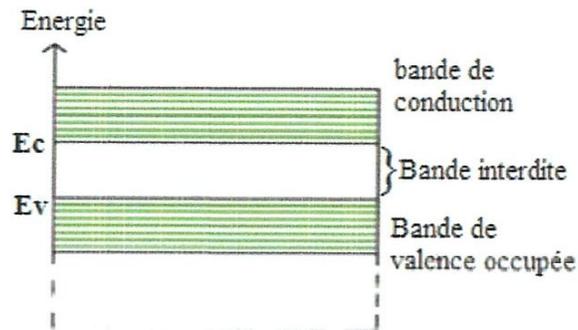


Figure (2.3) : Le diagramme énergétique.

## 5.2 Les semi-conducteurs extrinsèques

Pour augmenter la conductivité des semi-conducteurs on y introduit des impuretés. Ce procédé est appelé dopage.

### 5.2.1 Dopage de silicium

#### ✚ Dopage de type N

On remplace un atome de silicium par un atome pentavalent (cinq électrons de valence). Quatre d'électrons d'entre eux assurent les liaisons avec les atomes voisins de silicium et le cinquième resté disponible va être excité vers la bande de conduction très facilement par l'agitation thermique. D'où le nombre d'électron libre va fortement augmenter: dans ce cas le nombre de trou est très inférieur au nombre d'électron libre. On obtient ainsi un cristal dopé N (négatif), les impuretés utilisées sont souvent du phosphore.

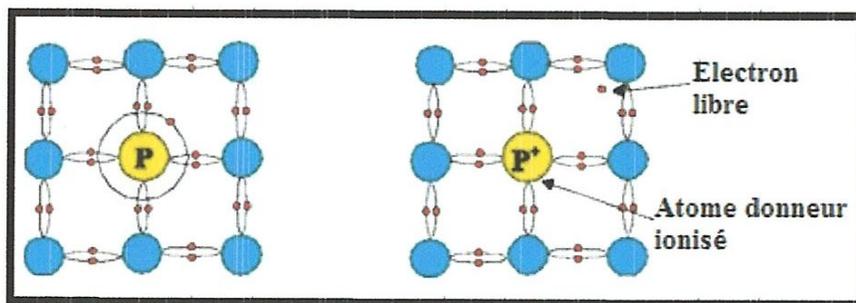


Figure (2.4) : Dopage de type N.

### ⚡ Dopage de type P

De la même façon on introduit des atomes trivalents, ses trois électrons vont assurer les liaisons covalentes avec trois atomes voisins mais laisser un trou au quatrième. Ce trou se déplace de proche en proche dans le cristal pour créer un courant. Ici le nombre de trous est très supérieur au nombre d'électrons libres du cristal intrinsèque, on obtient donc un cristal dopé P (positif), les impuretés utilisées sont souvent du Bore.

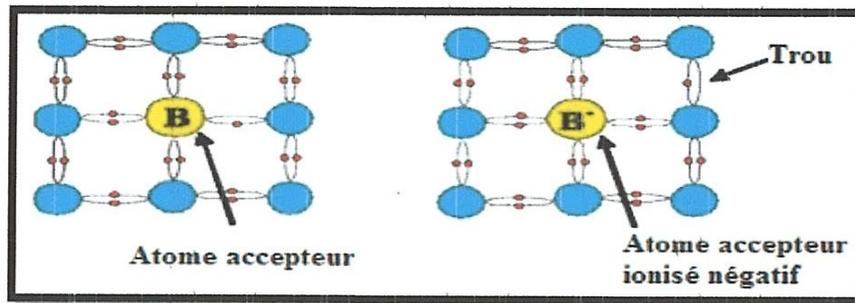


Figure (2.5) : Dopage de type P.

### 5.2.2 La jonction PN

La jonction P-N est à la base de la plupart des applications des semi-conducteurs. Elle est créée par la mise en contact de deux régions de types différents (Net P) sur le même support (substrat).

Dans la zone de contact, les électrons libres du segment N pénètrent dans le segment P et se recombinaient avec les trous. De même, les trous des segments P pénètrent dans le segment N et se recombinaient avec les électrons. Ce phénomène est appelé diffusion. Il en résulte, au niveau de la transition des segments, l'apparition d'une zone exempte de charges mobiles appelée zone de transition (aussi nommée Zone de Charge d'Espace ou Zone d'épuisement), où seuls demeurent les atomes d'impureté fixes (ions accepteurs dans le segment P, ions donneurs dans le segment N) et les atomes de semi-conducteur neutres.

Les charges constituées par les ions fixes sont à l'origine d'un champ électrique  $E$  dans la zone de transition, et par la même d'une différence de potentiel  $V_0$  (appelée barrière de potentiel) aux bornes de cette zone. Cette zone possède une grande impédance. Le champ électrique  $E$  tend à maintenir les porteurs majoritaires dans leurs régions respectives et s'oppose ainsi à la cause qui lui donne naissance, ce qui conduit à un état d'équilibre[15].

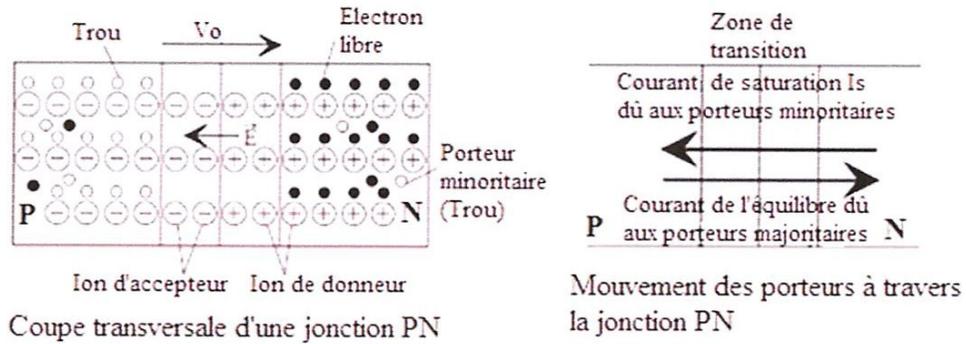


Figure (2.6) : Jonction P-N.

Cependant, le champ électrique  $E$  n'interdit pas le passage des porteurs minoritaires présents dans les segments de type P et N (courant de "saturation"  $I_s$ ). Ce mouvement est toutefois équilibré par les porteurs majoritaires qui possèdent l'énergie nécessaire au franchissement de la barrière de potentiel [11].

## 6. L'EFFET PHOTOVOLTAÏQUE

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule. La figure (2.7) illustre une cellule PV typique.

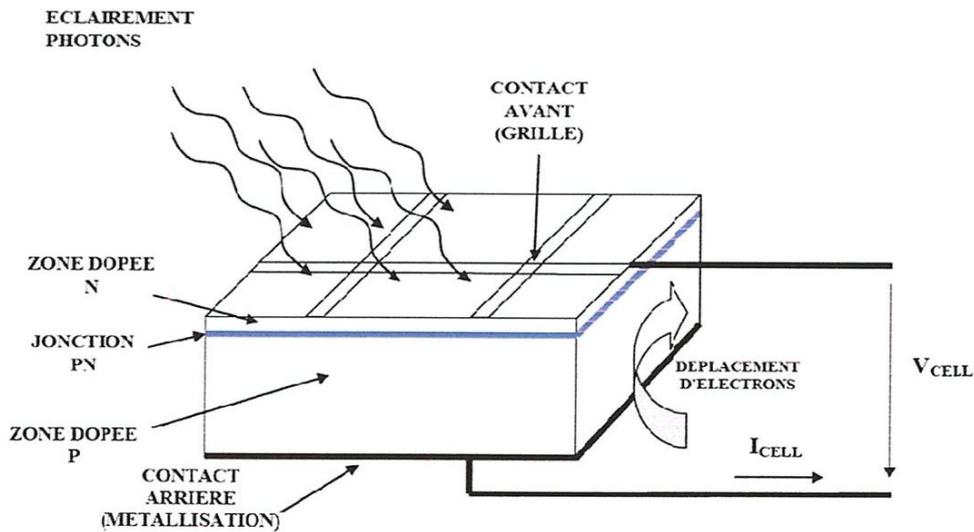


Figure (2.7) : Schéma d'une cellule photovoltaïque.

Les performances de rendement énergétique atteintes industriellement sont de 13 à 14% pour les cellules à base de silicium monocristallin, 11 à 12% avec du silicium poly-cristallin et enfin 7 à 8% pour le silicium amorphe en films minces. La photopile ou cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque [5].

## 7. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA CELLULE PV

Une cellule photovoltaïque (PV) est la juxtaposition de deux semi-conducteurs, l'un dopé P et l'autre dopé N. À la jonction des deux couches se forme un champ électrique (résultant du phénomène décrit précédemment). Ce champ électrique existe même si la cellule est dans l'obscurité. Sous un ensoleillement plus ou moins important, les photons ou grains de lumière, venant avec une énergie suffisante entrent en collision avec les atomes du cristal (figure 2.8). Ils parviennent à faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction du matériau semi-conducteur, créant ainsi des paires d'électrons-trous. Ceux-ci, sous l'effet de la barrière de potentiel, vont s'accumuler sur chacune des faces extérieures des zones P et N [11].

Ainsi, une différence de potentiel entre les deux faces de la cellule est créée. Les grilles métalliques à l'avant et à l'arrière de la cellule PV collectent les électrons et les trous qui vont donc fournir à un circuit extérieur le courant électrique produit. Si le photon est très énergétique, il ne peut tout de même extraire qu'un seul électron. L'énergie excédentaire est perdue en chaleur.

La zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode, tandis qu'une plaque métallique (contact arrière) recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode. L'épaisseur totale du cristal est de l'ordre du millimètre.

D'un point de vue électrique, une cellule photovoltaïque est l'équivalent d'un générateur de courant auquel on a adjoint une diode. Il faut ajouter des contacts électriques (qui laissent passer la lumière en face éclairée : en pratique, on utilise un contact par une grille), une couche antireflet pour assurer une bonne absorption des photons, etc. Pour que la cellule fonctionne, et produise le maximum de courant, on ajuste le gap du semi-conducteur au niveau d'énergie des photons. On peut éventuellement empiler les jonctions, de façon à exploiter au mieux le spectre d'énergie des photons, ce qui donne les cellules multi-jonctions [16].

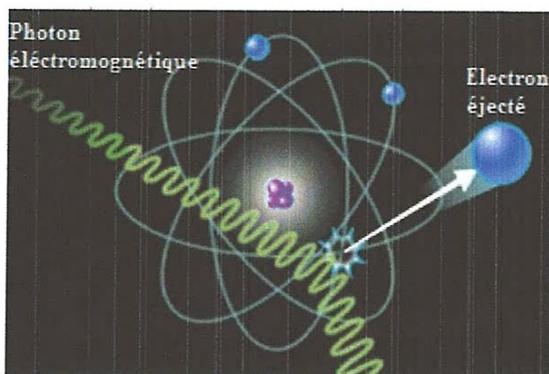


Figure (2.8) : Collision entre un photon et un atome.

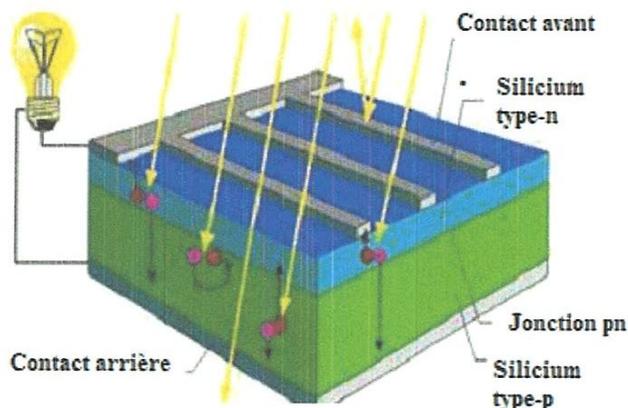


Figure (2.9) : Cellule photovoltaïque.

## 8. RENDEMENT PHOTOVOLTAÏQUE

Le rendement photovoltaïque est un facteur très important pour les composants photovoltaïques, Il caractérise ces composants et définit leur performance, il se définit comme étant le taux de conversion d'énergie des cellules PV. Le rendement est aussi le pourcentage de l'énergie solaire qui est convertie en électricité par l'intermédiaire d'une cellule solaire.

Le rendement est fonction du type de semi-conducteur utilisé et est directement lié au «band gap». Pour le silicium cristallin, le rendement théorique maximum est de 44 %. Le silicium n'est pas le meilleur matériau, son «band gap» est de 1.10 eV, celui de l'arséniure de gallium (GaAs) à un «band gap» quasi optimal de 1.4 eV. Le rendement commercial des cellules monocristallines est de l'ordre de 12 à 17 % maximum. Les principales pertes sont dues à :

- ✚ une absorption incomplète des photons.
- ✚ les photons très énergétiques voient la part d'énergie supérieure perdue en chaleur.
- ✚ la réflexion optique à la surface des cellules, c'est la raison pour laquelle une couche antireflet ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ...) est déposée à la surface des cellules.
- ✚ la collecte des paires d'électrons trous n'est pas optimum, certaines paires d'électrons trous se recombinent avant d'atteindre la jonction.
- ✚ la grille en face avant ne favorise pas la transmission optique maximale du rayonnement solaire. Sa forme géométrique est cependant très optimisée par les constructeurs. Chez certains la grille est faite par laser pour en diminuer la surface.
- ✚ pertes dues à la résistance série (résistance de contact des deux grilles)[11].

## 9. LES DIFFERENTS TYPES DE CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

### 9.1 Les technologies de 1<sup>ère</sup> génération

Ces cellules, généralement en silicium, ne comprennent qu'une seule jonction PN. La technique de fabrication de ces cellules, basée sur la production de "wafers" à partir d'un silicium très pure, reste très énergivore et coûteuse.

✚ **Cellules Photovoltaïques en silicium monocristallin** : Elles ont un rendement d'environ 15 %, Le silicium monocristallin est un matériau pur à 99,999% et se présente sous la forme d'un cristal unique de grande dimension [17].

✚ **Cellules Photovoltaïques en silicium polycristallin** : Plus répandu, car moins cher, il est composé de plusieurs cristaux juxtaposés. Son rendement est de 12 à 13%.

La fiabilité de la technologie au silicium cristallin est démontrée sur le très long terme (+30 ans) [17].

### 9.2 Les technologies de 2<sup>ème</sup> génération

✚ **Cellules au silicium amorphe** : Les cellules au silicium amorphe sont des cellules à couche mince, c'est-à-dire qu'elles sont fabriquées en déposant une fine couche de silicium sur un substrat, par exemple du verre. L'épaisseur de silicium utilisée est beaucoup plus faible que pour les cellules mono ou polycristallines qui sont réalisées à partir de tranches de silicium. Ce type de cellule est donc moins cher et plus facile à fabriquer. Sa faible épaisseur permet, par exemple, de les utiliser pour créer des panneaux solaires souples. Cependant ces cellules ont des rendements limités (de l'ordre de 5 à 7%, soit environ 15m<sup>2</sup> pour obtenir 1kWc) et sont donc réservées à des applications nécessitant peu de puissance.

Les cellules au silicium amorphes sont beaucoup plus utilisées pour l'alimentation de petits appareils solaires (montre, calculatrice...) [18].

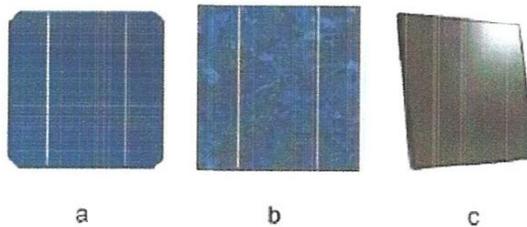


Figure (2.10): Types de cellules photovoltaïques.

(a) silicium monocristallin, (b) silicium polycristallin, (c) silicium amorphe

### 9.3 Les technologies de 3<sup>ème</sup> génération

Pour améliorer les rendements des cellules, la recherche se tourne actuellement vers plusieurs pistes dont notamment :

- ✚ **Cellules multicouches** : Superposition de multiples cellules aux propriétés différentes (utilisant des bandes d'énergie différentes permettant un balayage plus large du spectre solaire). Ce type de cellules est déjà commercialisé, mais principalement pour des applications spatiales. Les rendements obtenus sous concentration sont très prometteurs (de l'ordre de 30 %).

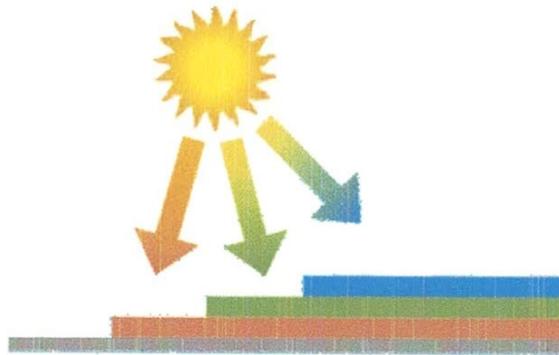


Figure (2.11) : Structure d'une cellule triple-jonction.

- ✚ **Cellules à concentration** : Permet d'utiliser des photons à basse énergie qui ne sont habituellement pas absorbés par la cellule [19]. Elles sont placées au sein d'un foyer optique qui concentre la lumière. Leur rendement est élevé (de l'ordre de 20 à 30%) mais elles doivent absolument être placées sur un support mobile afin d'être constamment positionnées face au soleil.
- ✚ **Cellules organiques** : Composées de semi-conducteurs organiques déposés sur un substrat plastique ou de verre, ces cellules encore au stade expérimental offrent un rendement moyennement élevé (de l'ordre de 5 à 10%) mais présentent des perspectives intéressantes de réduction des coûts.

Les matériaux organiques, moléculaires ou polymériques, à base de carbone, d'hydrogène et d'azote, sont particulièrement intéressants en termes d'abondance, de coût, de poids et de mise en œuvre [5].

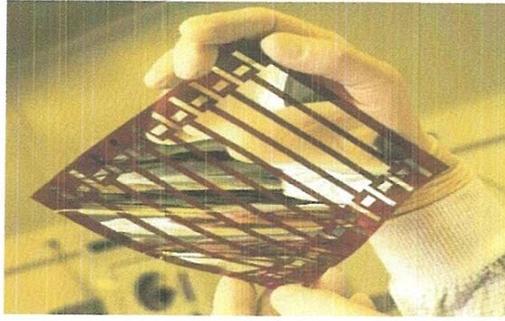


Figure (2.12) : Cellule solaire tout organique sur substrat souple.

- ⚡ **Cellules nanocristallines** : Une des dernières générations de photopiles; fonctionnent selon un principe qui différencie les fonctions d'absorption de la lumière et de séparation des charges électriques; le rendement global de 10,4 % confirmé par des mesures au laboratoire; procédé et coût de production encore plus bas.

Le tableau (2.1) présente les avantages et les inconvénients pour les technologies les plus utilisées d'une cellule photovoltaïque.

Type	Silicium monocristallin	Silicium Polycristallin	Amorphe
Rendement	De 15% à 19%		7% à 10%
Durée de vie	35 ans	35 ans	< 10 ans
Avantage	Bon rendement en soleil direct	Bon rendement en soleil direct (moins que le monocristallin mais plus que l'amorphe)	Souplesse Prix moins élevé que les cristallins Bon rendement en diffus
Inconvénient	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...), prix élevé	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...), prix élevé	Mauvais rendement en plein soleil.

Tableau 2.1: Avantages et inconvénients des cellules photovoltaïques [5].

## 10. PARAMETRES DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

### 10.1 Courant de court-circuit $I_{cc}$

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule ( $V=0$ ). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température [20].

On peut écrire :  $I_{cc}(V=0) = I_{ph}$

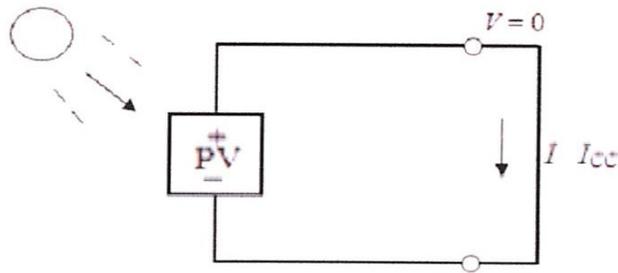


Figure (2.13) : Courant de court-circuit.

### 10.2. Tension à circuit ouvert $V_{oc}$

La tension à circuit ouvert  $V_{oc}$  est la différence de potentiel mesurée aux bornes de la cellule lorsque la sortie est en circuit ouvert [21], C'est-à-dire :  $V_{oc} = V (I=0)$ .

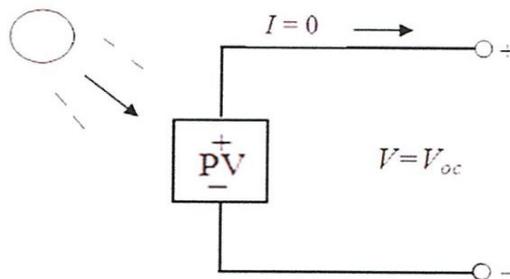


Figure (2.14) : Tension de circuit ouvert.

### 10.3. Puissance maximale

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée  $P_{max}$ ) pour un point de fonctionnement  $P_{max}(I_{max}, V_{max})$  de la courbe courant-tension (figure 2.15) (courants compris entre 0 et  $I_{cc}$  et tension comprise entre 0 et  $V_{oc}$ ).

$$P_{max} = I_{max} * V_{max} \quad (2.1)$$

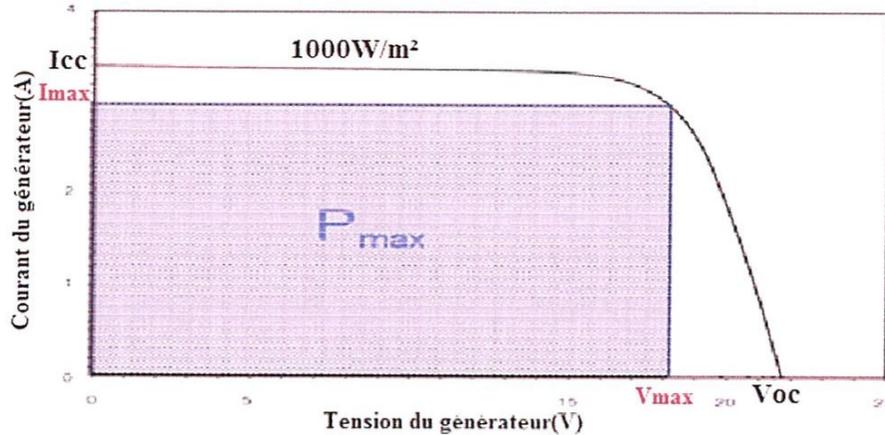


Figure (2.15) : Courbe I(V) à T=25 et un éclairement de 1000W/m<sup>2</sup> [20].

#### 10.4. Rendement d'une cellule

On définit le rendement énergétique d'une cellule par le rapport entre la puissance maximum et la puissance incidente.

$$n_c = \frac{V_{max} * I_{max}}{P_{solaire}} \quad (2.2)$$

Avec :

$I_{max}$  : Le courant au point de puissance maximale,  $V_{max}$  : la tension au point de puissance maximale,  $P_{solaire}$  : est la puissance maximum mesurée dans les conditions STC (Standard Test Conditions), c'est-à-dire sous un spectre AM1.5, une température de 25°C, et un éclairement de 1000W/ m<sup>2</sup>.

#### 10.5. Le facteur de forme $ff$

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique I(V) pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur. Le facteur de forme ou facteur de remplissage, encore souvent appelé par sa dénomination anglaise (Fill Factor) correspond à la puissance maximum  $P_{max}$  délivrée par la cellule, divisée par le produit  $V_{oc} * I_{cc}$ , correspondant à la puissance maximale idéale.

$$ff = \frac{P_{max}}{V_{oc} * I_{cc}} \quad (2.3)$$

## 11. MODÉLISATION D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

### 11.1 Cellule photovoltaïque idéal :

Dans le cas idéal, la jonction PN d'une cellule photovoltaïque soumise à un éclairage, peut être schématisée par un générateur de courant  $I_{ph}$  en parallèle avec une diode, voir figure (2.16).

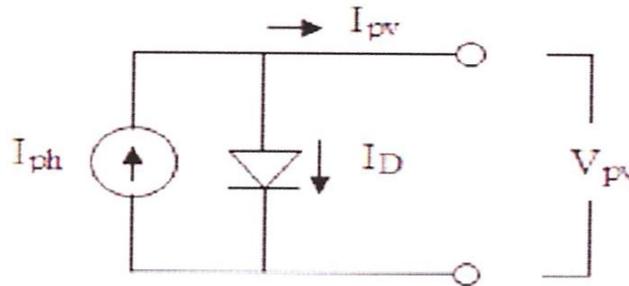


Figure (2.16) : Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire idéale connectée à une charge.

Cette cellule peut se comporter comme une source de courant shuntée à une diode dont l'équation est donnée par [22] [23] [24]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (2.4)$$

Où :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{q \cdot V_{pv}}{A \cdot K \cdot T}\right) - 1 \right] \quad (2.5)$$

$I_{ph}$ : Le courant photonique, il dépend de la température et de l'ensoleillement ( $E$ ) comme il est montré par l'équation suivante

$$I_{ph} = [I_{cc} + K_i (T - T_{ref})] \times \frac{E}{1000} \quad (2.6)$$

$I_{ph}$  : est en [A], calculé dans les conditions nominales (25° et 1000 w/m<sup>2</sup>);  $K_i$  : est le rapport entre le courant de court-circuit et le coefficient de température (0.0017 A/K);  $I_{cc}$ : courant de court – circuit,  $T_{ref}$ : Température de référence, égale à 25 C°,  $I_s$ : est le courant de saturation exprimé par :

$$I_s = I_{rs} \times \left[ \frac{T}{T_{ref}} \right]^3 \exp \left[ \frac{q \cdot E_g}{A \cdot k} \times \left\{ \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right\} \right] \quad (2.7)$$

$E_g$  : L'énergie de gap du semi-conducteur utilisé ( $E_g \approx 1.1$  eV pour le silicium polycristallin à 25 C°);  $I_{rs}$ : le courant de saturation inverse, il est donné par :

$$I_{rs} = \frac{I_{cc}}{[\exp(q \cdot V_{oc}/K \cdot A \cdot T) - 1]} \quad (2.8)$$

$q$  : La charge de l'électron, elle est égale à  $1.6 \cdot 10^{-19}$  C ;  $K$  : Constante de Boltzmann, elle est égale à  $1.3805 \cdot 10^{-23}$  j/k ;  $A$  : Facteur d'idéalité, égale à 1.6.

Si on veut calculer la tension de court-circuit on résout l'équation:

$$V_{oc} = \frac{K \cdot T}{q} \ln \left( \frac{I_{cc}}{I_s} - 1 \right) \quad (2.9)$$

## 11.2 Cellule photovoltaïque idéal avec résistance série

Pour se rendre compte des pertes ohmiques qui sont dues à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts en face avant et arrière dans les cellules solaires, on fait inclure une résistance en série  $R_s$  avec le modèle idéal [22] [23] [24].

Le circuit équivalent pour ce modèle est représenté par la figure (2.17)

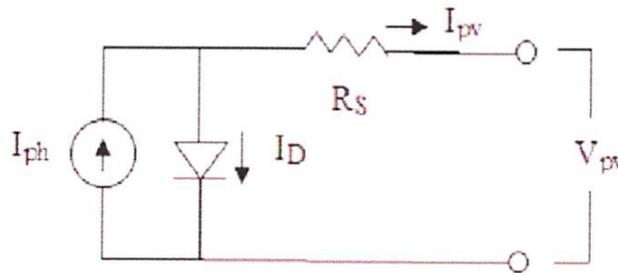


Figure (2.17): Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire idéale avec résistance série.

L'équation du courant devient :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left[ \exp \left( \frac{q \cdot V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{A \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] \quad (2.10)$$

### 11.3 Cellule photovoltaïque idéal avec résistance parallèle

Pour caractériser les courants de fuites de la jonction des cellules solaires qui sont la conséquence de l'état de surface le long de la périphérie des cellules, on fait inclure une résistance en parallèle avec le modèle idéal [22] [23] [24].

Le circuit équivalent pour ce modèle est représenté par la figure (2.18)

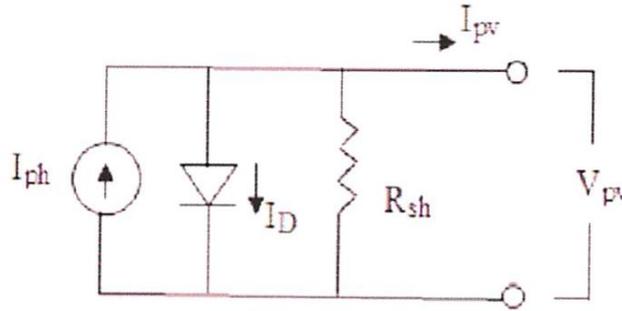


Figure (2.18) : Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire idéale avec résistance parallèle.

L'équation du courant devient :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{q \cdot V_{pv}}{A \cdot K \cdot T}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv}}{R_{sc}} \quad (2.11)$$

### 11.4 Cellule photovoltaïque idéal avec résistance série et parallèle

Pour tenir compte de tous les phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule photovoltaïque, les résistances série  $R_s$  et parallèle  $R_{sh}$  sont rajoutées au modèle idéal [22][23] [24].

Le circuit équivalent pour ce modèle est représenté par la figure (2.19).

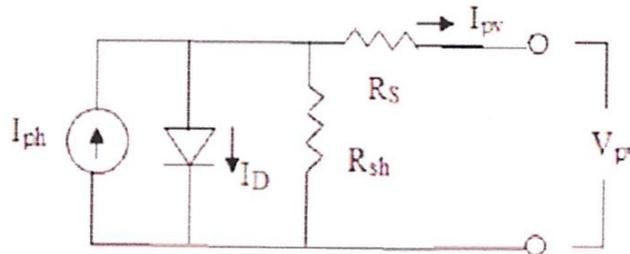


Figure (2.19) : Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire idéale avec résistance série et parallèle.

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left[ \exp \left( \frac{q \cdot (V_{pv} + I_{pv} R_s)}{A \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (2.12)$$

Où :  $I_{pv}$  est le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur,  $I_s$  est le courant de saturation,  $T$  est la température effective des cellules en Kelvin (K),  $V_{pv}$  est la tension aux bornes de cette même cellule,  $R_{sh}$  est la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction,  $R_s$  est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions.

## 12. GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

La cellule solaire, de forme ronde ou carrée est l'élément de base d'un système solaire. Un ensemble de cellules forme un module solaire, dans un module les cellules sont reliées électriquement entre elles et encapsulées, donc protégées des agents extérieurs. Plusieurs modules forment un panneau solaire. Plusieurs panneaux forment un système ou champ solaire.

Le terme générateur photovoltaïque (GPV) est utilisé pour désigner, selon l'application considérée, un module ou un panneau PV. Toutefois, il peut faire allusion au système PV tout entier [11]; Pour la suite de ce document, on utilisera le terme GPV pour désigner un module PV.

La figure ci-dessous, représente une cellule, un module et un panneau PV.

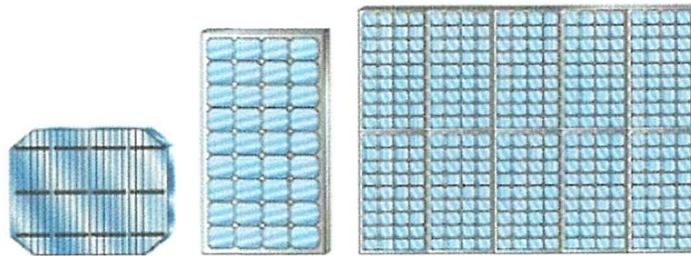


Figure (2.20): Cellule, module (ou générateur) et panneau PV.

### 12.1 Groupement de Cellules Photovoltaïques

La puissance fournie par une seule cellule solaire étant très faible, plusieurs cellules dont les caractéristiques sont semblables doivent être électriquement associées et encapsulées dans un plastique pour former un GPV pratique [11].

Dans ce qui suit, différents groupements possibles des cellules solaires sont présentés.

### 12.1.1 Groupement en série

Une association de  $N_{cs}$  cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, figure (2.21). Les équations (2.13 et 2.14) résument les caractéristiques électriques d'une association série de  $N_s$  cellules [3].

$$V_{ocNcs} = N_{cs} * V_{oc} \quad (2.13)$$

$$I_{cc} = I_{ccNcs} \quad (2.14)$$

Avec :

$I_{ccNcs}$  : le courant de court-circuit de  $N_s$  cellules en série,  $V_{ocNcs}$  : la somme des tensions en circuit ouvert de  $N_{cs}$  cellules en série.

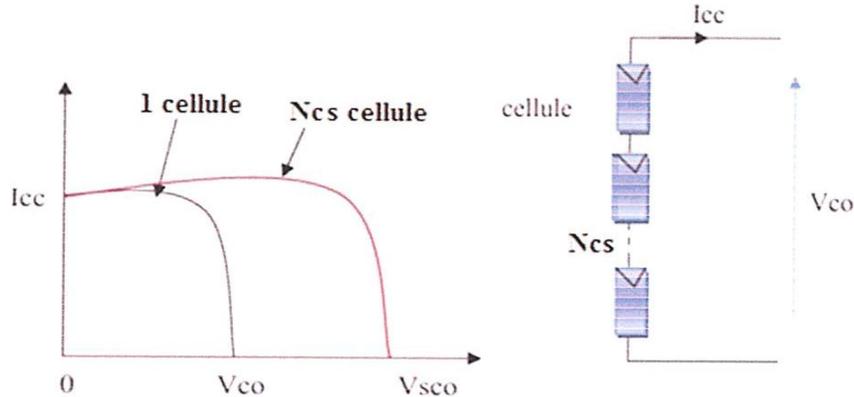


Figure (2.21) : Caractéristique courant-tension de  $N_{cs}$  cellule en série.

### 12.1.2 Groupement en parallèle

Une association de  $N_{cp}$  cellules en parallèle permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans ce cas les cellules sont alors soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants, figure (2.22). Les équations (2.15 et 2.16) résument à son tour les caractéristiques d'une association parallèle de  $N_{cp}$  cellules [3].

$$I_{ccNcp} = N_{cp} * I_{cc} \quad (2.15)$$

$$V_{co} = V_{coNcp} \quad (2.16)$$

Avec :

$I_{ccNcp}$  : la somme des courants de court circuit de ( $N_{cp}$ ) cellule en parallèle,  $V_{coNcp}$  : tension du circuit ouvert de ( $N_{cp}$ ) cellules en parallèle.

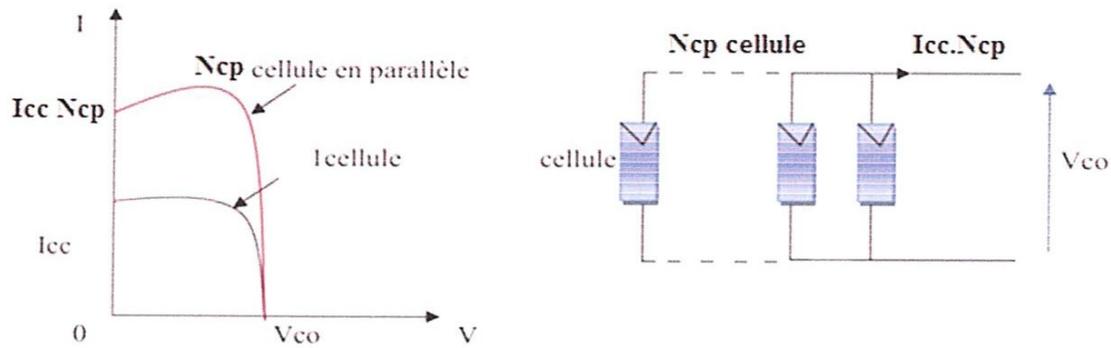


Figure (2.22): Caractéristique courant tension de ( $N_{cp}$ ) cellule en parallèle.

### 12.1.3 Groupement (série et parallèle)

Les deux types de regroupement (série et parallèle) sont en effet possible et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaités. Ainsi, pour  $N_{cs}$  cellules en série, constituant des branches elles-mêmes  $N_{cp}$  en parallèles. La puissance disponible en sortie de générateur PV est donnée par :

$$P_{pv} = N_{cs} \cdot V_{pv} + N_{cp} \cdot I_{pv} \quad (2.17)$$

Avcc :

$P_{pv}$ : La puissance disponible en sortie du GPV.

## 12.2 PROTECTION PAR DIODES

Si les cellules des générateurs en série ne sont pas identiques ou si certaines cellules sont partiellement ombragées, les cellules moins efficaces peuvent devenir réceptrices. Ainsi, une cellule ombragée sera soumise à ses bornes à une tension inverse importante et la puissance qu'elle devra dissiper sera trop grande. En fonctionnant ainsi, on provoque l'échauffement de la cellule (hot spot), ce qui est susceptible de la détruire par claquage. Il convient donc de limiter la tension inverse maximale susceptible de se développer aux bornes d'une cellule en plaçant une diode en parallèle (by-pass) au niveau de chaque générateur (figure 2.23).

Si les générateurs en parallèle ne sont pas identiques ou si quelques cellules d'un générateur sont ombragées, les générateurs moins performants deviendront récepteurs si la tension d'utilisation est supérieure à la tension produite par ces générateurs. Une dissipation de puissance importante peut devenir dangereuse au niveau de la cellule la plus faible de ces générateurs. Ainsi, le courant des branches des générateurs performants se dissipera dans la branche la moins performante. Donc, il est préférable de disposer des diodes anti-retour. Celle-

empêche aussi de gaspiller dans le générateur occulté une partie de la puissance produite par les générateurs fonctionnant normalement [13].

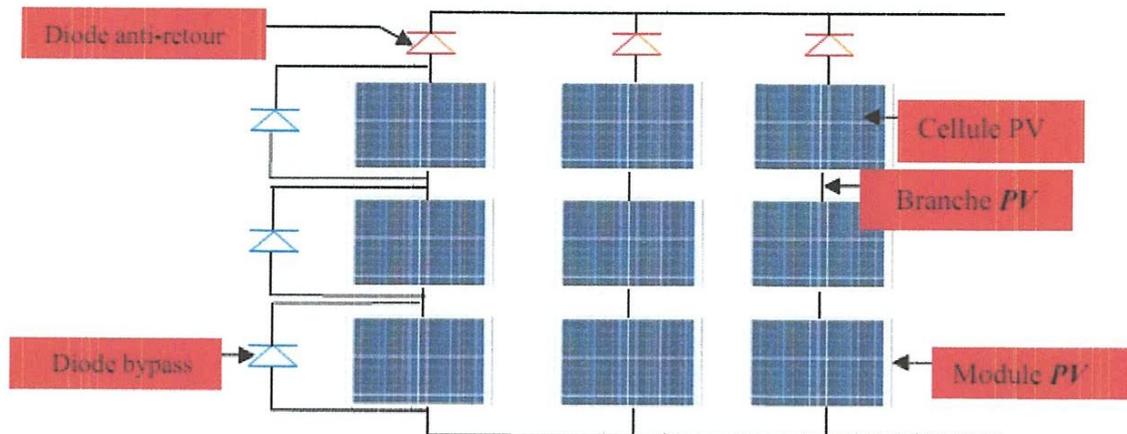


Figure (2.23) : Protection d'un générateur PV par diodes.

### 12.3 Les zones de caractéristique $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement, seule la courbe  $I=f(V)$  est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque. La figure (2.24) représente trois zones essentielles :

- ✚ **La zone (1) :** où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- ✚ **La zone (2) :** correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.
- ✚ **La zone (3) :** qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

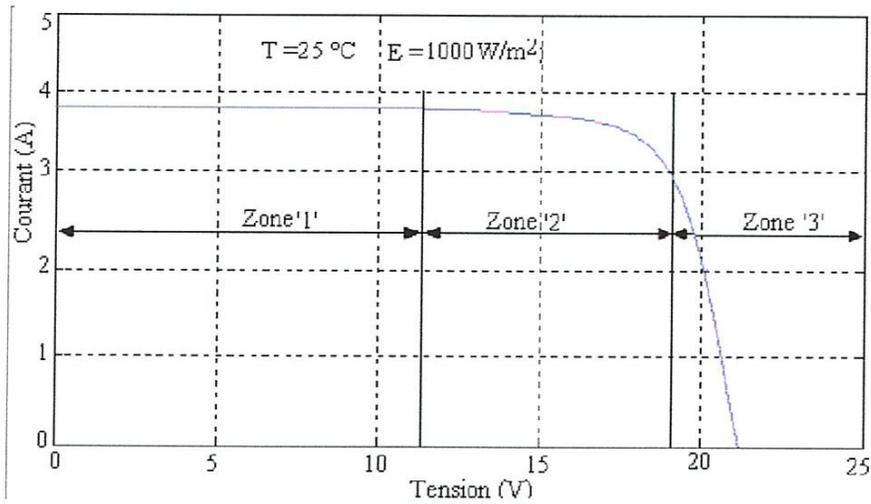


Figure (2.24): Les différentes zones de Caractéristique I(V) d'un GPV [20].

### 12.4. MODÉLISATION D'UN GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

D'une manière générale, un générateur photovoltaïque est formé par  $N_{cp}$  cellules connectées en parallèle et avec  $N_{cs}$  cellules connectées en série. En supposant que tous les cellules sont soumis aux mêmes conditions météorologiques (ensoleillement et température), le courant et la tension en sortie du groupement série-parallèle des cellules seront liés par la relation (2.18) dérivée de la formule (2.12) du modèle de la cellule idéal avec  $R_s$  et  $R_{sh}$ .

$$I_{pv} = N_{cp} \cdot I_{ph} - N_{cp} \cdot I_s \left[ \exp \left( \frac{q \cdot (V_{pv} + I_{pv} R_s)}{N_{cs} \cdot A \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (2.18)$$

Avec :

$N_{cp}$ : est le nombre de cellules en parallèle,  $N_{cs}$ : est le nombre de cellules en série.

### 13. SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

Bien que fondamental dans la chaîne que représente un système, pour répondre à un besoin défini, il faut en fait associer étroitement les générateurs à un système complet correspondant à une application bien spécifique. Un système photovoltaïque sera donc constitué du générateur, généralement associé à l'un ou plusieurs des éléments suivants: **batterie, régulateur, onduleur** [25].

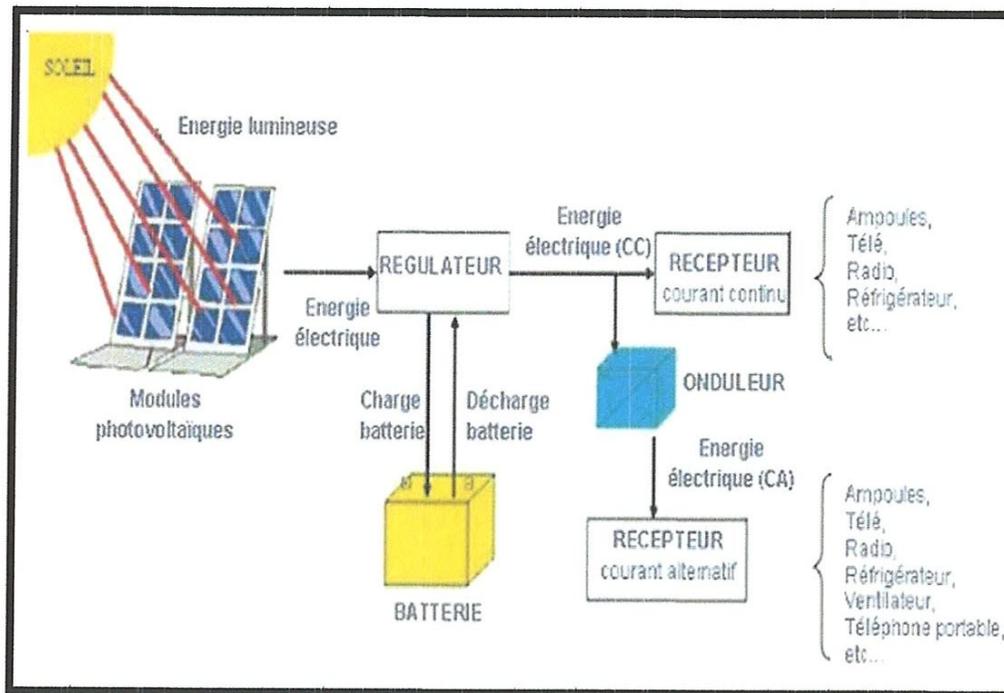


Figure (2.25) : Système photovoltaïque.

### 13.1 Les batteries

La batterie sert à stocker l'énergie produite par le champ de générateurs PV. 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 fonction de la charge à alimenter, les appareils utilisés fonctionnent soit en continu, soit à la demande;
- ✚ L'apport énergétique solaire est périodique (alternance jour/nuit, Été/hiver) et aléatoire (conditions météorologiques)

Il existe de nombreux types de batteries, chacune d'entre elles ayant été conçue pour un usage particulier. Elles sont caractérisées par leur tension nominale, capacité de stockage, aptitude au recyclage, tenue en décharge profonde, taux d'autodécharge, variation avec la température, maintenance, prix, etc. ces caractéristiques sont fournies par leur fabricant.

Pour l'usage spécifique du photovoltaïque, une batterie doit remplir les conditions suivantes: Un nombre de cycles de charge et de décharge élevé sans altération, une faible autodécharge, un rendement électrique élevé et une maintenance légère. Toutefois un des plus anciens et des mieux adaptés aux installations de ce genre est l'accumulateur au plomb [13].

### 13.2 Le régulateur

Le régulateur de charge a pour fonction principale de protéger la batterie contre les surcharges et les décharges profondes. Il est un élément essentiel pour la durée de vie de la batterie.

- ✦ Une charge trop élevée entraînera une électrolyse de l'eau en hydrogène et oxygène, ce qui pourra éventuellement amener les plaques en contact avec l'air et provoquera un vieillissement prématuré de la batterie. La formation d'hydrogène représente également un risque certain d'explosion dans un local peu ventilé.
- ✦ Une décharge profonde répétée provoque une sulfatation irréversible des plaques et, par conséquent, une diminution de la capacité de la batterie. Cette sulfatation peut également provoquer des courts circuits entre les plaques et rendre l'accumulateur inopérant [13].

### 13.3 L'Onduleur

L'onduleur a pour fonction de transformer le courant continu produit par un champ photovoltaïque en courant alternatif identique à celui du réseau de distribution. La deuxième fonction de l'onduleur est également d'acheminer l'électricité produite avec un maximum d'efficacité et en toute sécurité vers le réseau électrique dans le cas du raccordé réseau ou à l'utilisateur dans le cas des sites isolés [13] [14].

## 14. AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE

En tant que source d'énergie électrique, un système photovoltaïque offre des avantages mais aussi des inconvénients.

### 14.1 Les avantages

- ✦ L'énergie solaire présente, outre tous les avantages des énergies renouvelables, ses propres avantages, à savoir : énergie maîtrisable et adaptable aux situations de toutes les régions.
- ✦ Le photovoltaïque est une technologie sûre et sans risque. En général, les panneaux photovoltaïques sont garantis 25 ans (et peuvent fonctionner 40 ans quasiment sans diminuer leur rendement).
- ✦ L'investissement et le rendement sont prévisibles à long terme.

- ✦ Ce sont des systèmes simples et rapides à installer qui nécessitent très peu de maintenance (d'où des frais de maintenance relativement faibles).
- ✦ Le solaire photovoltaïque ne comporte aucune pièce en mouvement, la production électrique est réalisée sans combustion ; il n'existe donc ni d'usure due aux mouvements, ni d'usure thermique comme pour les chaudières.
- ✦ Les installations photovoltaïques présentent un bilan énergétique positif. Les modules sont recyclables et la majorité des composants peut être réutilisée ou recyclée.
- ✦ En devenant producteur d'électricité avec une installation photovoltaïque, chacun peut améliorer son écobilan, réduire les émissions de Dioxyde de Carbone et préserver les ressources naturelles.
- ✦ La mise en place d'une installation photovoltaïque donne de la valeur au logement qui en est équipé car sa classe énergétique augmente.
- ✦ Ce système produit de l'électricité sur place ; il peut donc être installé là où on en a besoin, sans être raccordé à un quelconque réseau [6].

## 14.2 Les inconvénients

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients :

- ✦ Les panneaux solaires coûtent excessivement cher, du fait de la haute technicité qu'ils requièrent.
- ✦ Le rendement actuel des cellules photovoltaïques reste assez faible (environ 10% pour le grand public) et donc ne délivre qu'une faible puissance. De ce fait, pour couvrir un besoin familial, une grande surface de panneaux photovoltaïques est nécessaire.
- ✦ Le rendement maximum d'un panneau solaire s'obtient uniquement quand la surface du panneau est strictement perpendiculaire aux rayons solaires. Idéalement, il faudrait donc que la position du panneau varie suivant les saisons et au cours de la journée, ce qui n'est quasiment pas réalisable.
- ✦ Pour cette même raison d'ensoleillement, les panneaux solaires ne peuvent pas s'installer n'importe où, ni n'importe comment, sous peine de voir le gain d'énergie divisé par deux par rapport aux valeurs théoriques.
- ✦ La production d'électricité ne se fait que le jour alors que la plus forte demande se fait la nuit.
- ✦ Le stockage de l'électricité est également très difficile avec les technologies actuelles (problème contourné en cas de raccord avec un réseau).
- ✦ Le recyclage des cellules photovoltaïques en fin de vie pose des problèmes environnementaux. Les batteries utilisés par les panneaux photovoltaïques sont

composées de plomb, de zinc, de cadmium, . . . et donc ont un impact sur l'environnement.

- ✚ Les usines de production de cellules photovoltaïques émettent un grand taux de Dioxyde de Carbone [6].

## 15. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté une cellule PV avec un petit rappel sur les semi-conducteurs. Ensuite, nous avons étudié un générateur photovoltaïque GPV. On obtient un générateur PV avec associations des cellules. L'association de  $N_{cs}$  cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV), les cellules sont alors traversées par le même courant. L'association de  $N_{cp}$  cellules en parallèle permet d'accroître le courant de sortie du générateur, les cellules sont alors soumises à la même tension. Les deux types de regroupement (série et parallèle) sont en effet possible et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie du GPV des valeurs de tension et intensité souhaités.

Nous avons effectué la modélisation mathématique de la cellule et du GPV qui est essentielle à l'étude qui sera réalisé dans le chapitre suivant.

Finalement, nous avons donné les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

## Chapitre 03

# **SIMULATION D'UNE CELLULE ET D'UN GPV**

## 1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, Nous allons utiliser le logiciel MATLAB pour étudier dans un premier temps le comportement d'une cellule photovoltaïque puis un générateur photovoltaïque (composé de 46 cellules connectées en série) dans les conditions standard ( $G=1000\text{W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ ). Nous allons étudier l'influence de la température et de l'éclairement sur l'énergie produite par la cellule PV, ainsi que l'influence de l'association de cellule (série, parallèle et série/parallèle) sur l'énergie produite.

Enfin, nous allons utiliser l'outil MATLAB-SIMULINK pour simuler le comportement de la cellule et du générateur PV.

## 2. SIMULATION D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

### 2.1. Caractéristiques I(V) et P(V)

Nous avons considéré une cellule photovoltaïque. Les caractéristiques électriques de cette cellule sont données dans le tableau suivant :

éclairement standard,	$G=1000\text{W/m}^2$
Température standard,	$T=25^\circ\text{C}$
Facteur d'idéalité A	$A = 1.6$
Énergie de la bande interdite	$E_g \approx 1.1 \text{ eV}$

**Tableau 3.1: Caractéristique électrique de cellule dans les conditions standards «CST»  
 $T=25^\circ\text{C}$ ,  $G=1000\text{W/m}^2$  [23].**

Nous avons utilisé le logiciel Matlab (par programmation) pour simuler les caractéristiques courant-tension I(V) et puissance-tension P(V) de la cellule photovoltaïque. Les résultats obtenus dans les conditions standards ( $T=25^\circ\text{C}$ ,  $G=1000\text{W/m}^2$ ) sont représentés par les figures (3.1) et (3.2).

On observe que la caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque (figure 3.1) est identique à celle d'une jonction P-N avec un sens bloqué, mais décalé le long de l'axe du courant d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement.

Le courant de court-circuit est  $I_{cc}=2.55$  A, la tension de circuit ouvert est  $V_{oc}=0.48$  V.

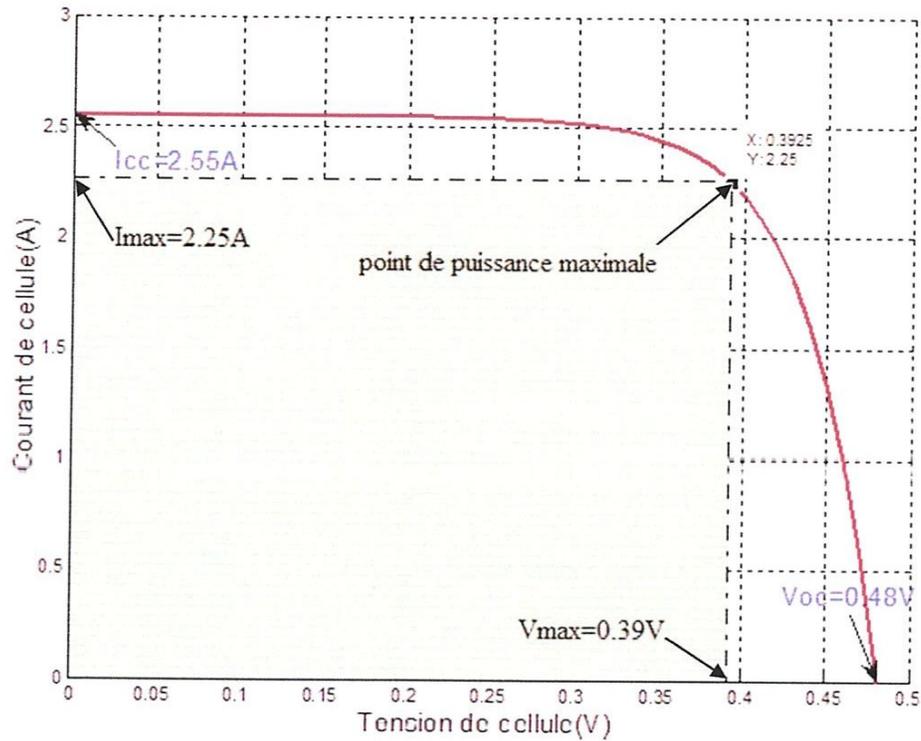


Figure (3.1) : Caractéristique I (V) d'une cellule ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ ).

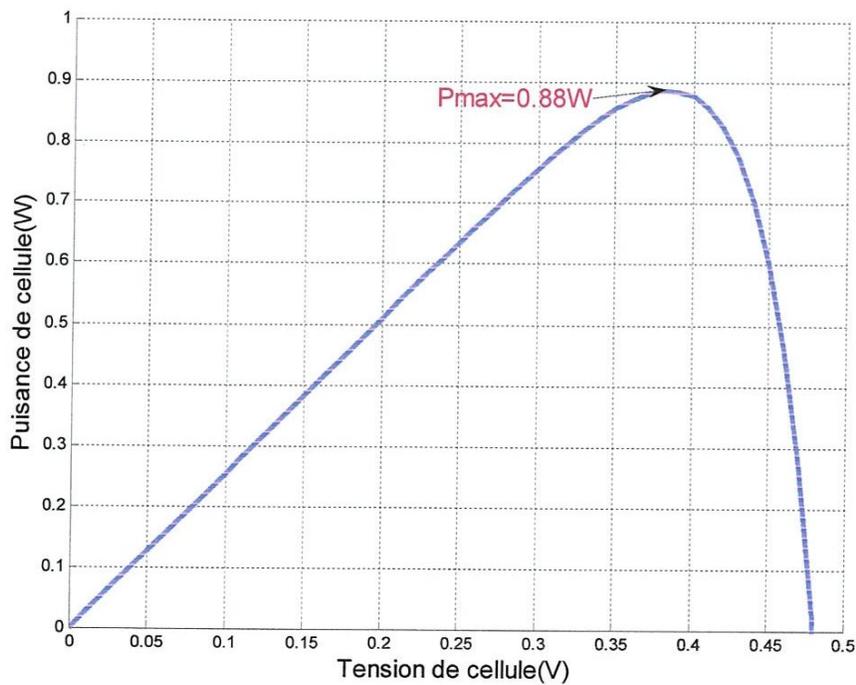


Figure (3.2) : Caractéristique P(V) d'une cellule solaire ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ ).

La puissance maximale débitée par la cellule photovoltaïque est  $P_{max} = 0.88W$  (figure3.2), ce qui est vérifiée par de l'équation (2.1) :  $P_{max} = 2.25A * 0.39V = 0.88W$ .

## 2.2. Effets climatiques sur la cellule PV

Dans cette partie nous avons étudié l'influence de la température et de l'éclairement sur l'énergie produite par la cellule photovoltaïque.

### 2.2.1. Influence de la température sur la cellule

Nous présentons ci-dessous les caractéristiques (I-V) et (P-V) (figure 3.3 et 3.4) d'une cellule photovoltaïque pour un niveau d'ensoleillement  $G=1000 W/m^2$  et pour différentes températures.

On s'aperçoit que le courant délivré par chaque cellule dépend de la température interne de la jonction PN qui constitue la cellule PV. Si on considère le réchauffement d'une cellule PV de  $0^{\circ}C$  à  $75^{\circ}C$  et si l'on considère en première approximation que la température face arrière de la cellule est proche de la température de la jonction PN, alors on peut considérer l'influence de la température. À partir de la figure (3.3) nous remarquons que la tension de circuit ouvert décroît en fonction d'une augmentation de la température, mais le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente. On constate que la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert.

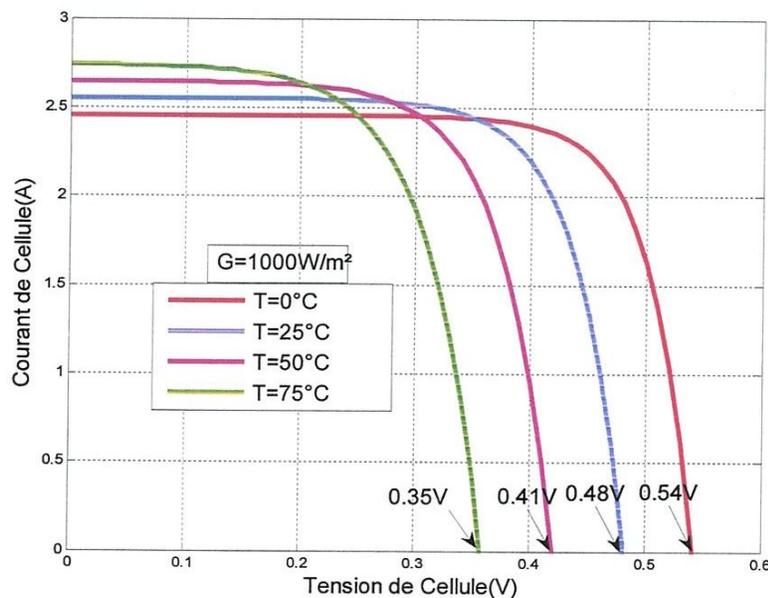
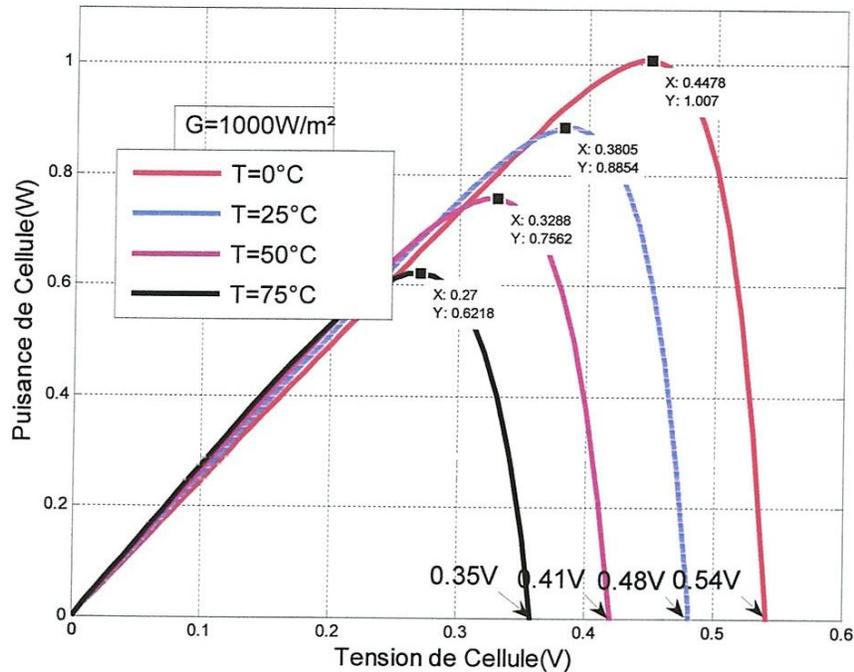


Figure (3.3) : Caractéristique I(V) pour différentes températures ( $G=1000W/m^2$ ).



**Figure (3.4): Caractéristique P(V) pour différentes températures ( $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ ).**

La température augmente la tension de circuit ouvert diminue et conduit donc à la diminution de la puissance (figure 3.4).

On peut donc tirer la conclusion suivante : les cellules PV ont de meilleure performance dans un environnement froid avec ciel dégagé.

### 2.2.2. Influence de l'éclairement sur la cellule

La figure (3.5) montre l'influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V). À une température constante ( $T=25^\circ\text{C}$ ), on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement. Car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique.

On observe que le courant du court-circuit  $I_{cc}$  est directement proportionnel à l'intensité lumineuse incidente. D'autre part, l'accroissement de l'éclairement provoque une légère augmentation de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ .

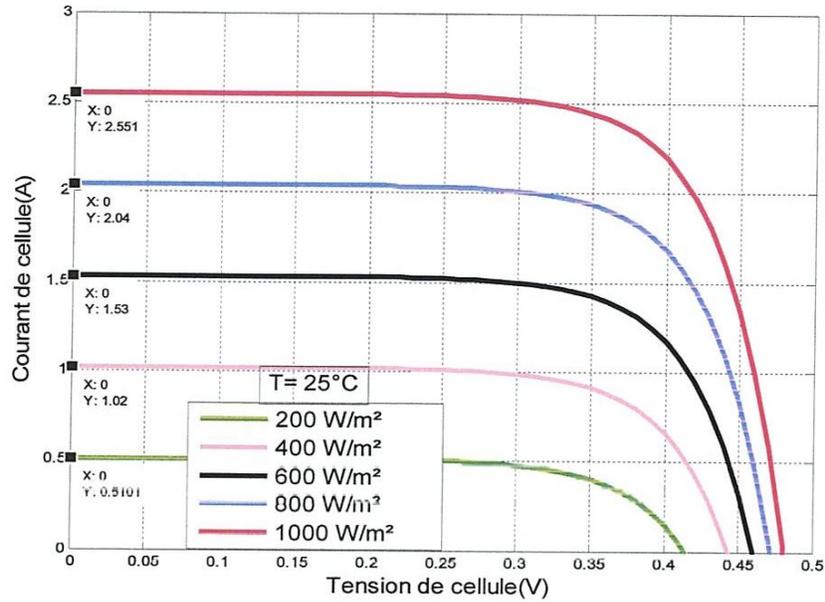


Figure (3.5) : Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).

La figure (3.6) illustre la variation de la puissance délivrée par la cellule en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairement, quand l'éclairement augmente la tension de circuit ouvert augmente et conduit donc à l'augmentation de la puissance.

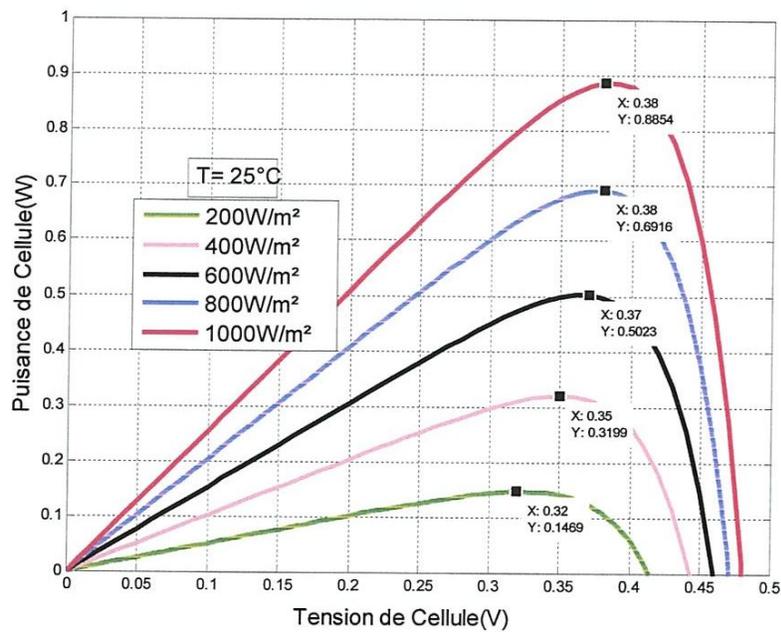


Figure (3.6) : Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).

On peut remarquer que la production photovoltaïque d'une cellule dépend directement de l'éclairement, puisque c'est sa source d'énergie.

### 3. CARACTÉRISTIQUES DU GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

Nous avons choisi un générateur composé de 46 cellules connectées en série et est considéré dans les conditions standards  $G=1000\text{w/m}^2$ ,  $T=25^\circ\text{C}$ .

La méthode utilisée ici pour modéliser le générateur PV ne présente aucune différence par rapport à celle utilisée pour la cellule PV et les paramètres sont les même.

#### 3.1. Caractéristique courant-tension I(V)

La figure (3.7) représente la courbe I (V) d'un générateur photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température ( $T=25^\circ\text{C}$ ,  $G=1000\text{W/m}^2$ ).

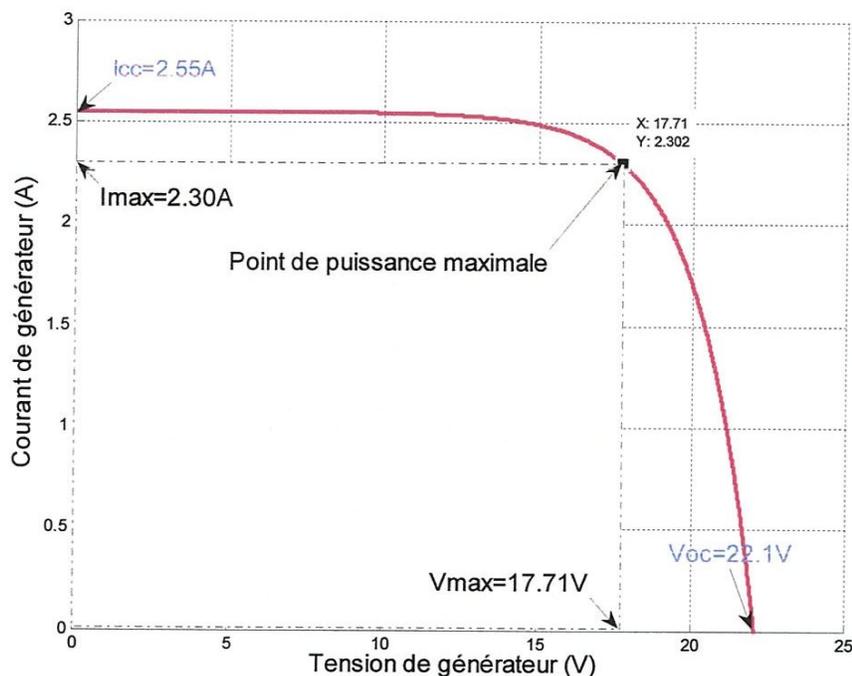
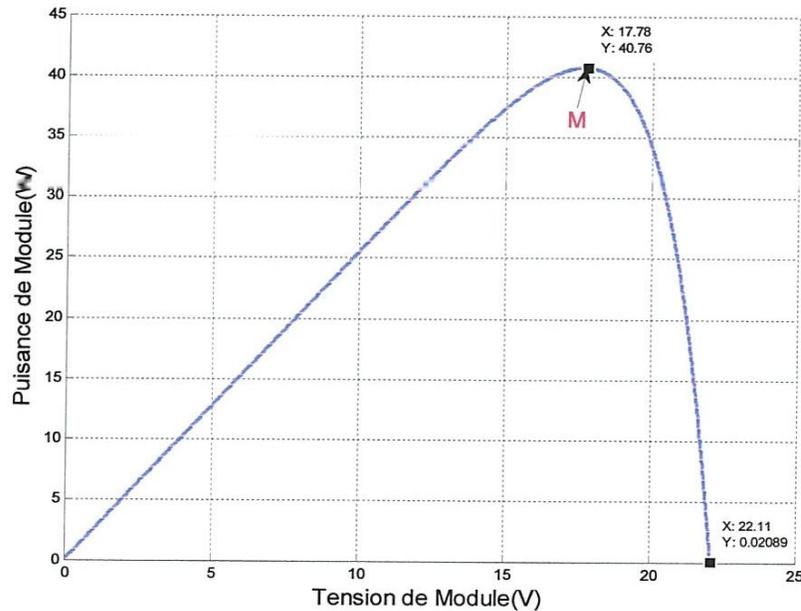


Figure (3.7) : Caractéristique I(V) d'un générateur PV ( $T=25^\circ\text{C}$ ,  $G=1000\text{W/m}^2$ ).

Le courant de court-circuit est  $I_{cc} = 2.55\text{A}$ , la tension de circuit ouvert est  $V_{oc} = 22.1\text{V}$  (figure 3.7). Ce résultat peut être expliqué par le fait que le générateur est composé de 46 cellules connectées en série ce qui donne d'après les équations (2.4 et 2.5) :  $V_{ocNcs} = 46 * 0.48\text{V} = 22.1\text{V}$  et  $I_{cc} = I_{ccNcs} = 2.55\text{A}$ .

### 3.2. Caractéristique puissance-tension P(V)

La puissance débitée par le générateur photovoltaïque dépend du point de fonctionnement du générateur; représente le produit de l'intensité de courant et de la tension entre ses bornes, comme il montré par la figure (3.8). Le point « M » représente la puissance maximale débitée par le générateur. À ce point  $P_{max} = 40.76W$ , ce qui est vérifiée par l'équation (2.1) :  $P_{max} = 17.71V * 2.30A = 40.73W$ .



**Figure (3.8) : Caractéristique P(V) d'un générateur PV (T=25°C, G=1000 W/m²).**

### 3.3 Influence de l'association des cellules PV sur le GPV

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 0.5 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un générateur. Dans cette partie on va étudier l'influence de l'association série et / ou parallèle des cellules.

#### 3.3.1 Influence de l'association série des cellules PV

Les caractéristiques I(V) et P(V) d'un groupement de  $N_{cs}$  cellules solaires en série sont représentées sur les figures (3.9 et 3.10).

Nous remarquons que la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules en série mais l'association en série n'influe pas sur la valeur du courant (figure 3.9).

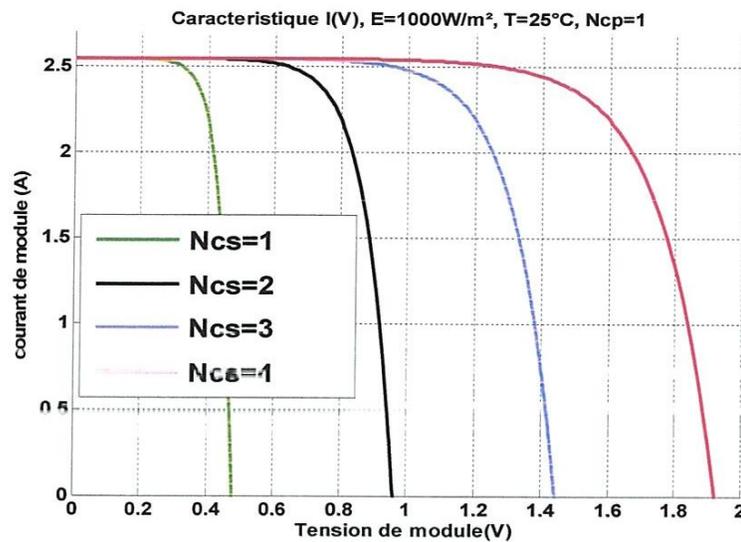


Figure (3.9) : Caractéristique I (V) pour différents nombres de cellules en série.

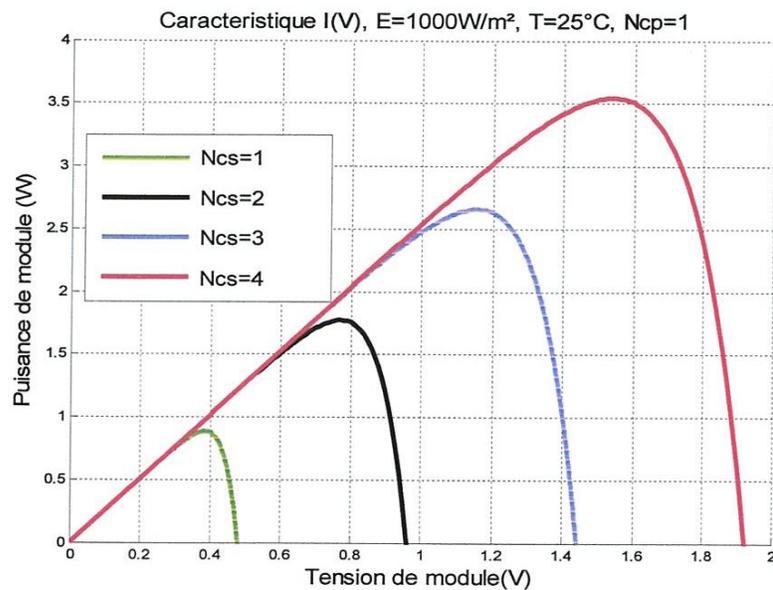


Figure (3.10) : Caractéristique P (V) pour différents nombres de cellules en série.

Quand le nombre de cellules en série augmente la tension de circuit ouvert augmente et conduit donc à l'augmentation de la puissance (figure 3.10).

### 3.3.2. Influence de l'association parallèle des cellules PV

Les caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  d'un groupement de  $N_{cp}$  cellules solaires en parallèle sont représentées sur les figures (3.11 et 3.12)

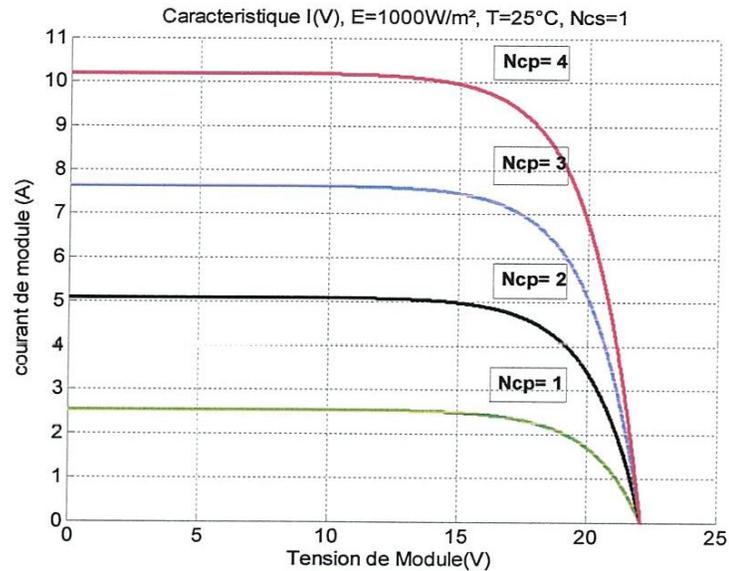


Figure (3.11) : Caractéristique  $I(V)$  pour différents nombres de cellules en parallèle.

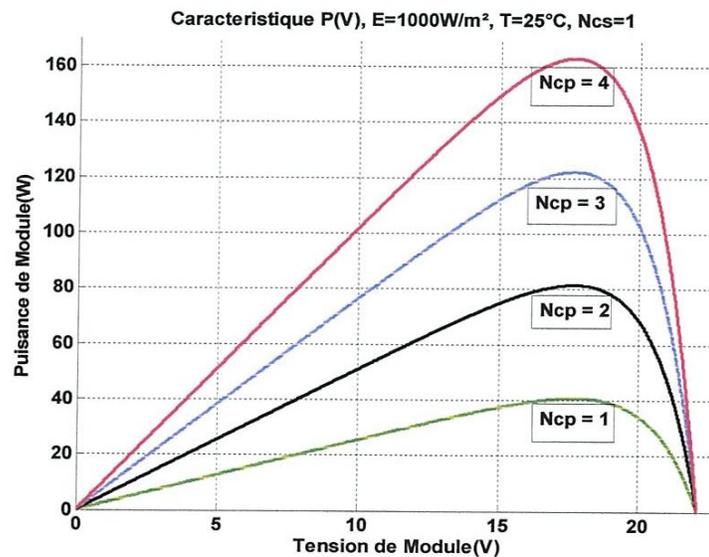


Figure (3.12) : La caractéristique de  $P(V)$  pour différents nombres de cellules en parallèle.

Nous remarquons que le courant augmente proportionnellement au nombre de cellules en parallèle mais l'association parallèle n'influence pas sur la valeur de la tension (figure 3.11).

Quand le nombre de cellules en parallèle augmente le courant de court-circuit augmente et conduit donc à l'augmentation de la puissance (figure 3.12).

### 3.3.3. Influence de l'association mixte (Série + Parallèle) des cellules PV

Les caractéristiques I(V) et P(V) d'un groupement de  $N_{cp} * N_{cs}$  cellules solaires en série et parallèle sont représentées sur les figures (3.13 et 3.14) :

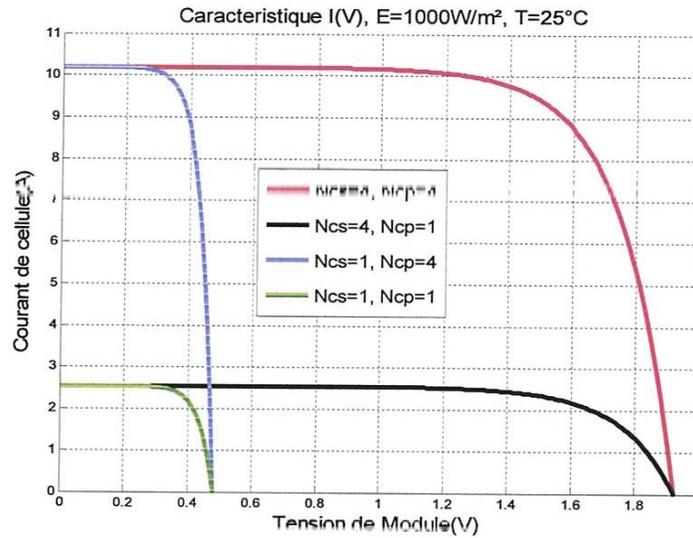


Figure (3.13) : Caractéristique I (V) pour différents nombres de cellules en série et parallèle.

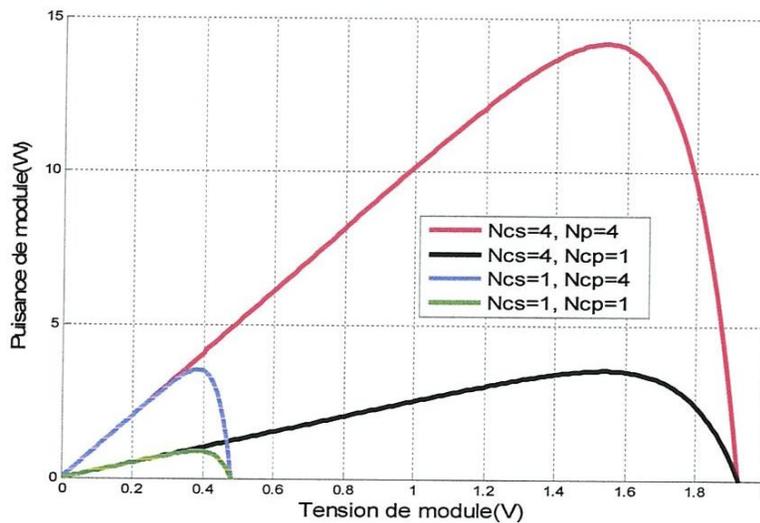


Figure (3.14) : Caractéristique P (V) pour différents nombres de cellules en série et parallèle.

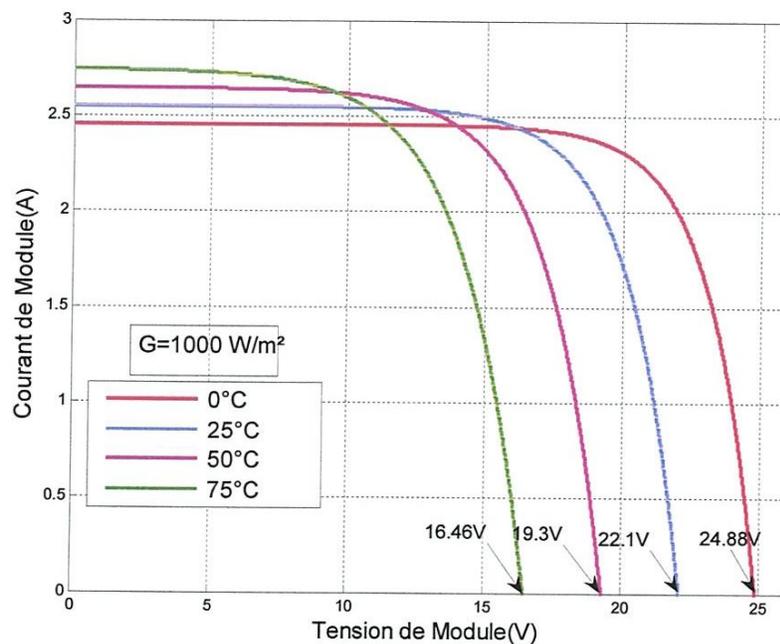
Nous remarquons que la tension ainsi que le courant augmentent proportionnellement en fonction du nombre de cellules en série/parallèle (figure 3.13).

Quand le nombre de cellules en série/parallèle augment la tension de circuit-ouvert et le courant augmentent ceci conduit donc à l'augmentation de la puissance (figure 3.14).

### 3.4. Effets climatiques sur le générateur PV

Les résultats de simulation du générateur PV sont représentés par les figures (3.15) à (3.18). Ces figures représentent les caractéristiques Courant-Tension et Puissance-Tension pour différents températures et différents niveaux d'éclairements. Nous n'observons aucune différence par rapport à la simulation d'une cellule PV (même forme). Avec l'augmentation de la température on observe que le courant gagne un peu en intensité mais la tension d'un générateur diminue et conduit donc à la diminution de la puissance (les figures 3.15 et 3.16).

On remarque que l'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que l'augmentation de la tension de circuit ouvert, car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement et la tension du circuit ouvert est une fonction logarithmique voire figure (3.17) et figure (3.18).



**Figure (3.15) : Caractéristique I(V) d'un générateur pour différentes températures (G=1000W/m²).**

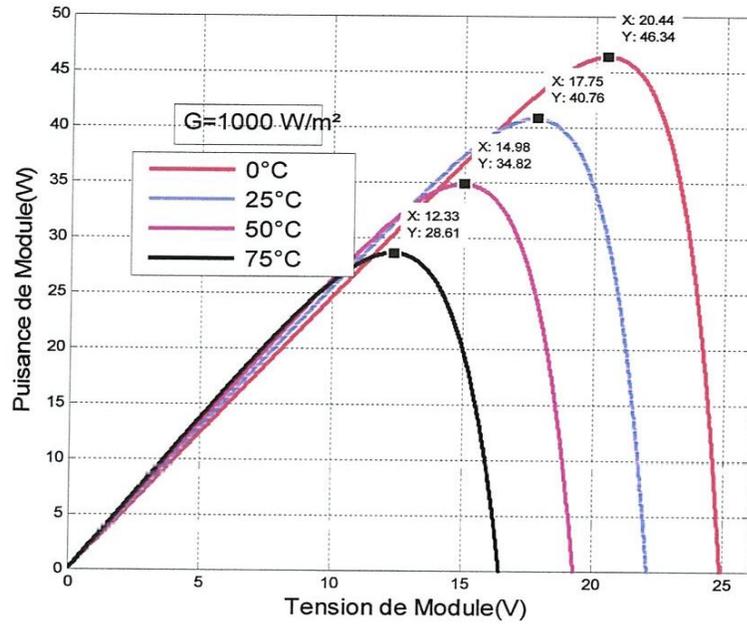


Figure (3.16): Caractéristique P(V) d'un générateur pour différentes températures (G=1000W/m²).

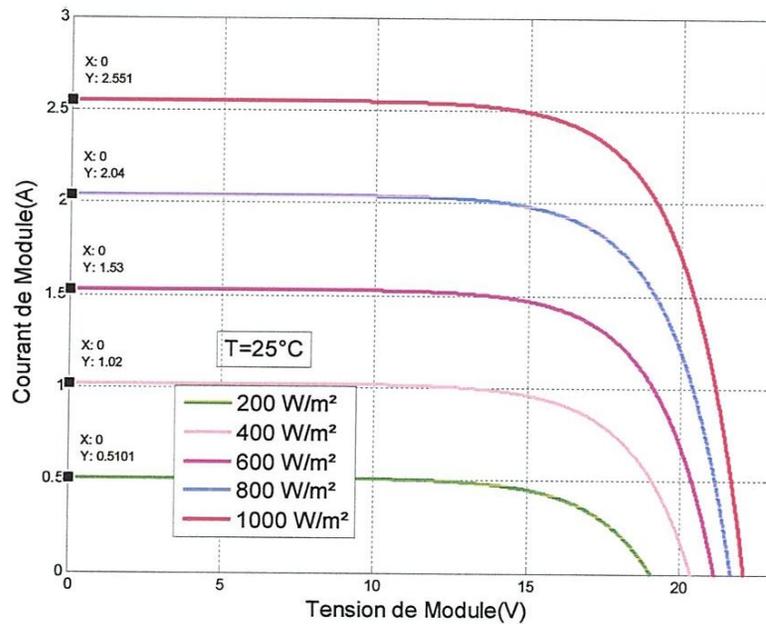


Figure (3.17) : Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).

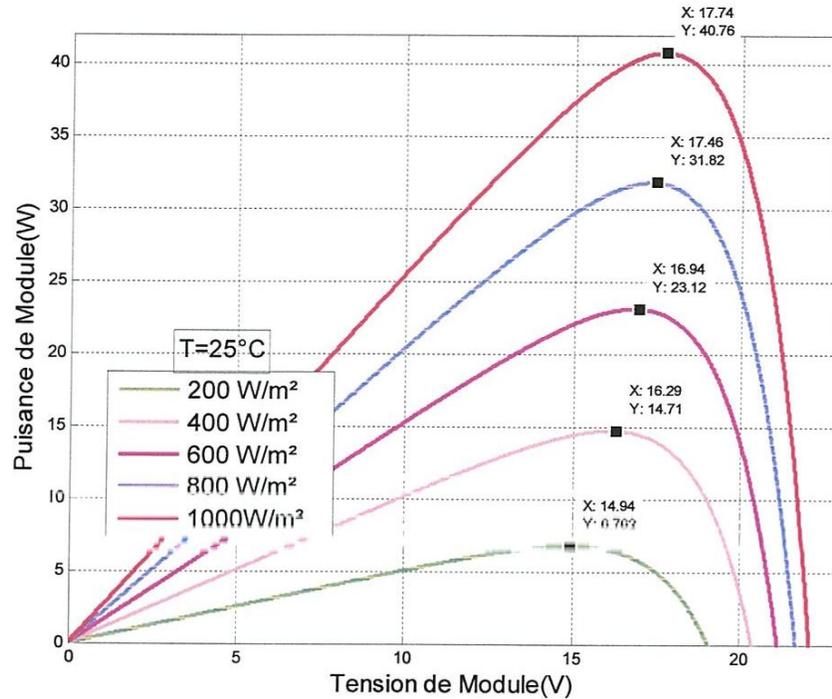


Figure (3.18) : Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).

## 4. SIMULATION D'UNE CELLULE ET GENERATEUR PV PAR MATLAB-SIMULINK

### 4.1 L'outil Matlab-Simulink

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. Simulink offre également la possibilité de construire des modèles modulaires, qui ont l'avantage d'être facilement reliés entre eux afin de simuler un certain système. Ces modèles permettent également aux concepteurs de systèmes d'optimiser la taille des composants du système PV [11].

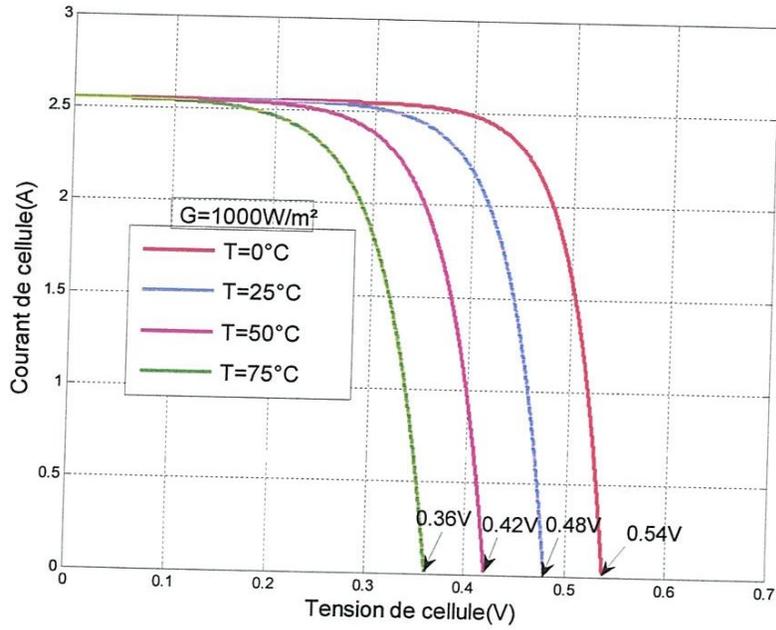


Figure (3.23): Caractéristiques I(V) pour différentes températures ( $G=1000\text{W/m}^2$ ).

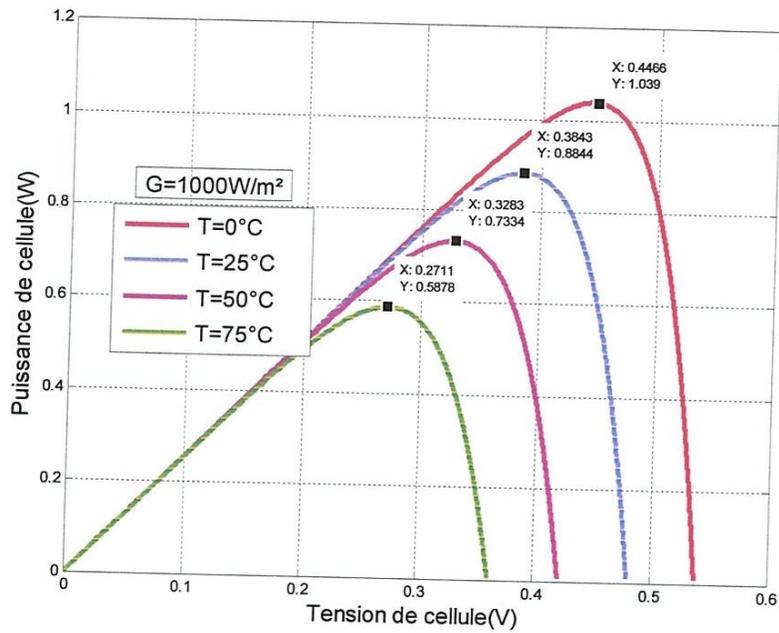


Figure (3.24): Caractéristiques P(V) pour différentes températures ( $G=1000\text{W/m}^2$ ).

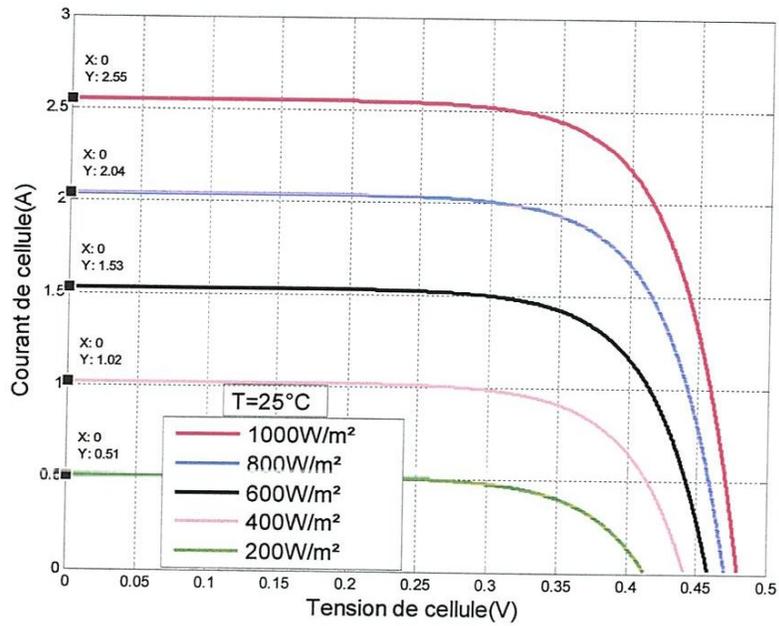


Figure (3.25) : Caractéristiques I(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).

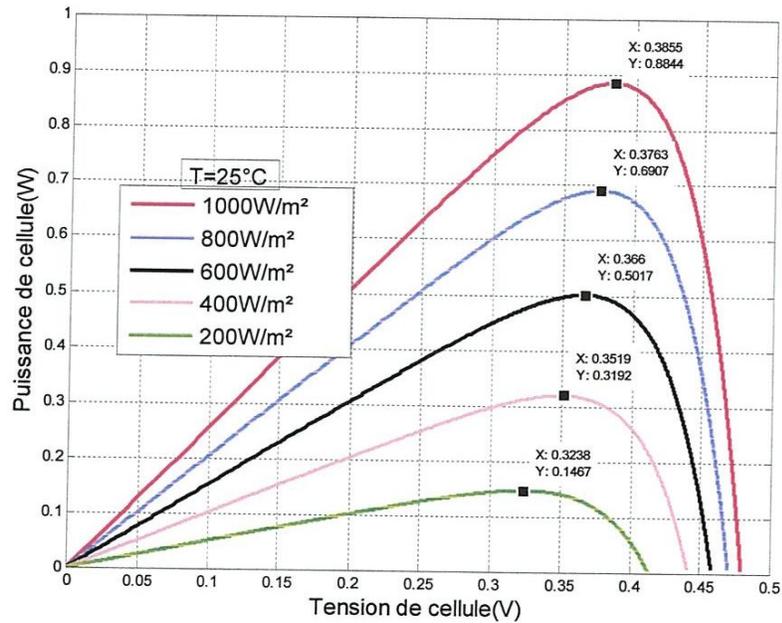


Figure (3.26) : Caractéristiques P(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).

### 4.3. Simulation d'un générateur PV par Matlab-Simulink

La figure (3.27) présente le schéma bloc d'un générateur photovoltaïque qui est composé de 46 cellules connectées en série :

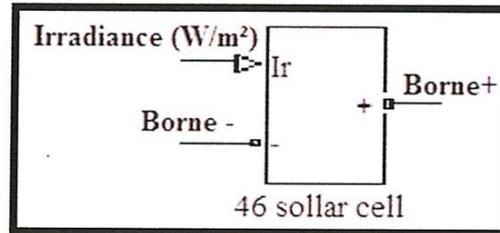


Figure (3.27) : Bloc Simulink représentant le GPV.

Pour l'étude du générateur PV nous avons construit le schéma bloc suivant (figure 3.28).

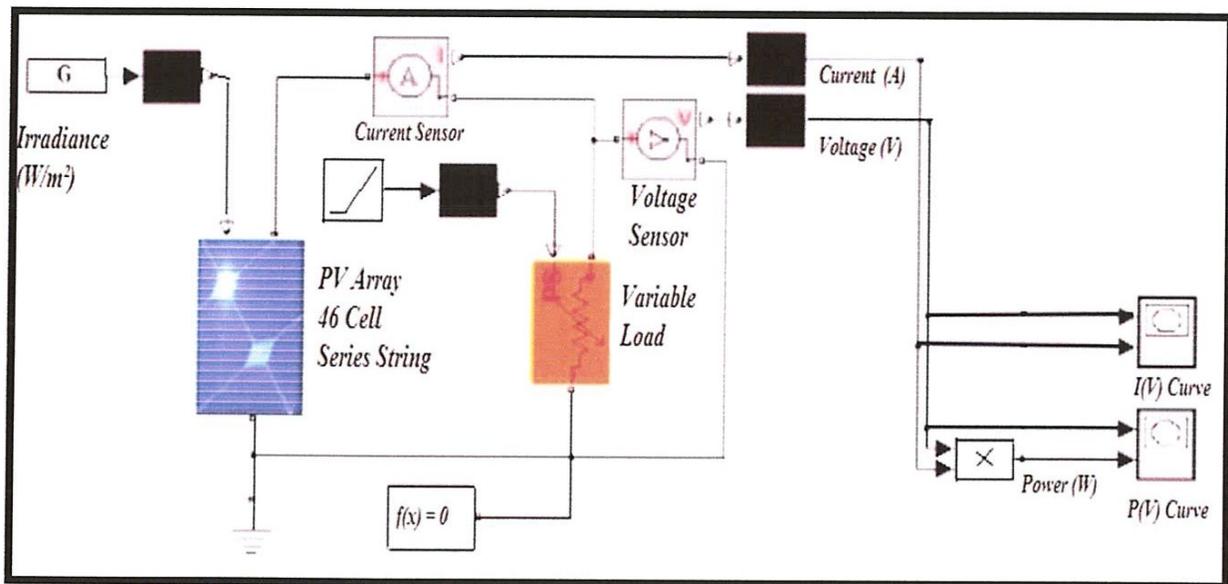


Figure (3.28) : Schéma bloc du générateur PV en MATLAB-SIMULINK.

Les résultats de simulation du générateur photovoltaïque sont représentés par les figures (3.29) à (3.34). Ces figures représentent les caractéristiques Courant-Tension  $I(V)$  et Puissance-Tension  $P(V)$  dans les conditions standards (figure 3.29 et 3.30) et pour différents températures et différents niveaux d'éclairements (figure 3.31 et 3.34).

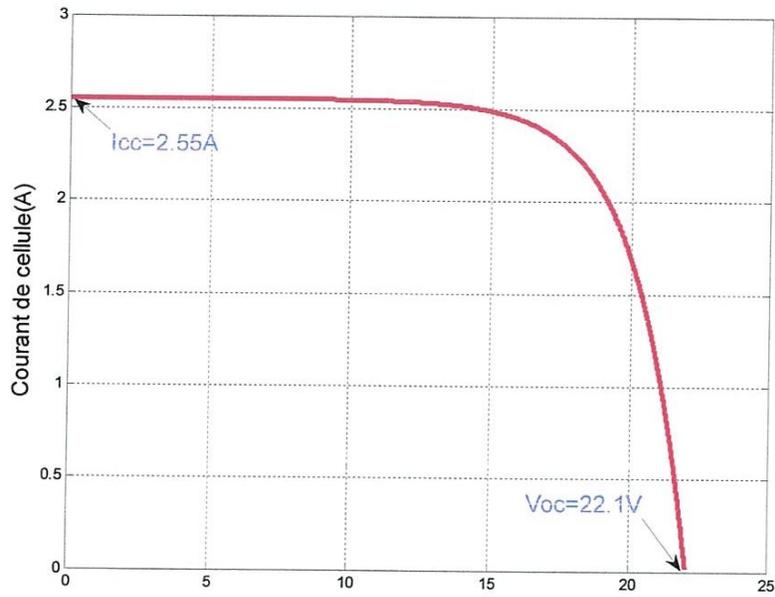


Figure (3.29) : Caractéristique I(V) d'une cellule PV (T=25°C, G=1000W/m²).

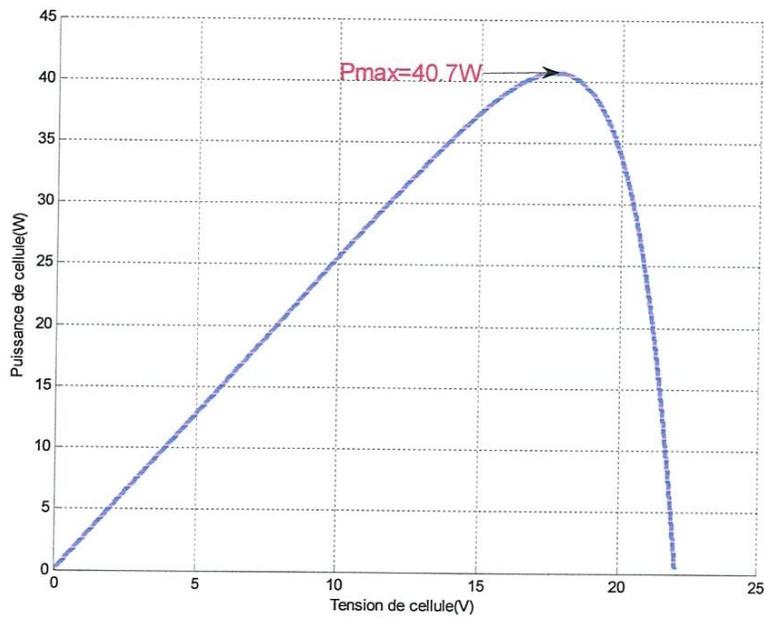


Figure (3.30) : Caractéristique P(V) d'une cellule PV (T=25°C, G=1000W/m²).

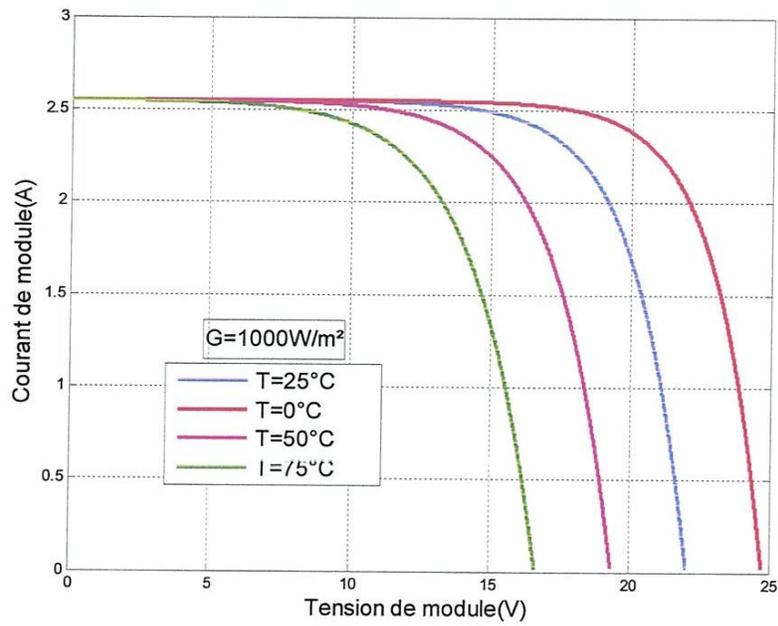


Figure (3.31): Caractéristiques I(V) pour différentes températures ( $G=1000\text{W/m}^2$ ).

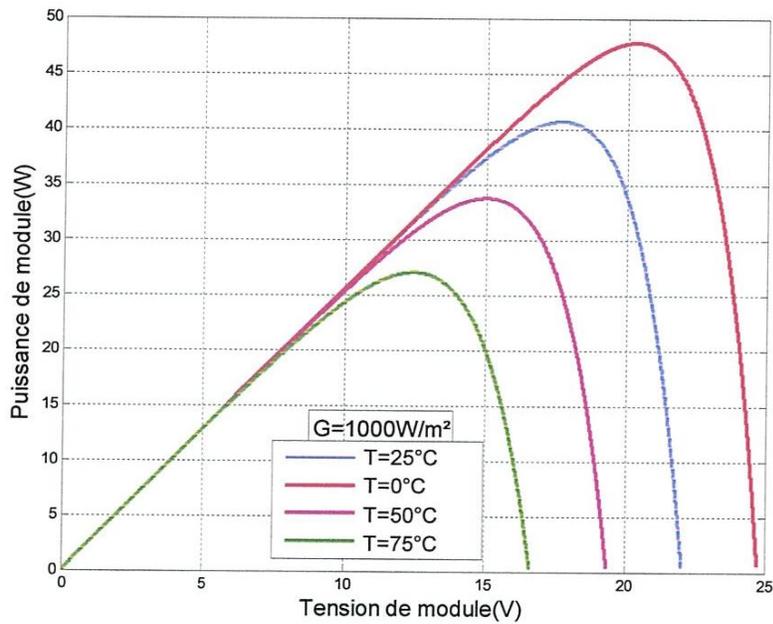


Figure (3.32): Caractéristiques P(V) pour différentes températures ( $G=1000\text{W/m}^2$ ).

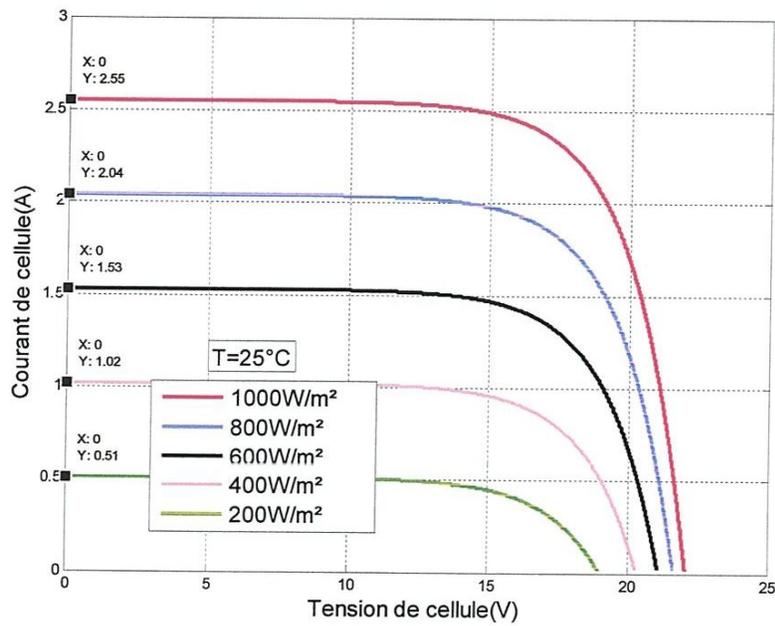


Figure (3.33) : Caractéristiques I(V) d'un générateur pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).

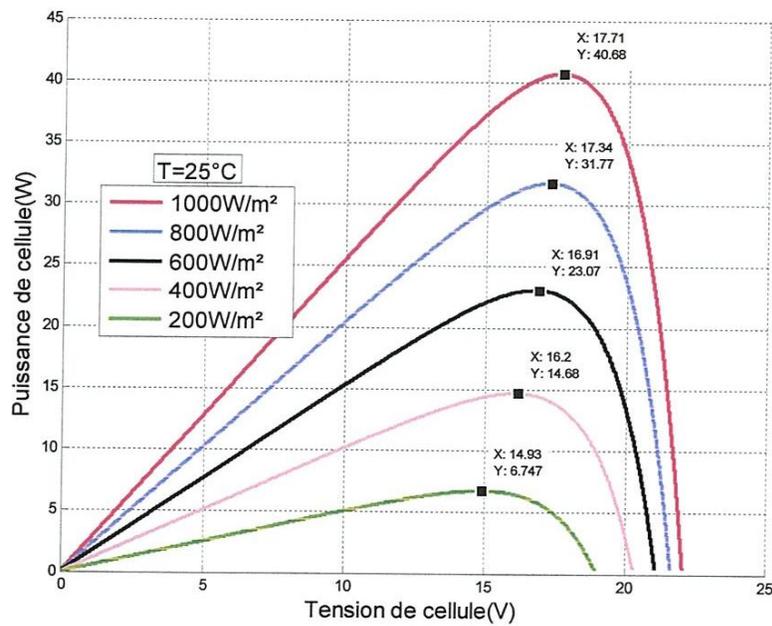


Figure (3.34) : Caractéristiques P(V) d'un générateur pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).

## 5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, Nous avons utilisé le logiciel Matlab (par programmation) pour simuler les caractéristiques courant-tension  $I(V)$  et puissance-tension  $P(V)$  des cellules photovoltaïques et aussi du GPV que nous avons choisi (un générateur composé de 46 cellules connectées en série).

Nous avons étudié l'effet des changements climatiques (influence de la température et de l'éclairement), les résultats obtenus sont :

- ✚ Quand la température augmente l'énergie produit par le générateur PV diminue.
- ✚ L'énergie produite par le générateur PV est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement.

Ensuite, nous avons étudié l'influence de l'association des cellules PV sur l'énergie produite par le générateur photovoltaïque. Nous avons observé que l'énergie produite par le GPV augmente avec l'augmentation du nombre de cellules.

Enfin, nous avons utilisé l'outil Matlab-Simulink pour simuler les caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  de la cellule et du générateur PV pour différentes températures et différents niveaux d'éclairement, le principal intérêt de cet outil réside dans sa simplicité et son efficacité. En effet, en utilisant cet outil on peut aboutir à des résultats similaires à ceux obtenus par programmation avec moins d'effort.

# CONCLUSION GENERALE

La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles de l'énergie telles que l'uranium, le gaz et le pétrole diminuent en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie ces dernières années. Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches sont conduites à l'énergie renouvelable. Une des énergies renouvelables qui peut accomplir la demande est l'énergie solaire photovoltaïque, c'est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par la cellule photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. L'association de plusieurs cellules en série et/ou parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque qui a une caractéristique courant-tension non linéaire présentant un point de puissance maximale.

Dans ce mémoire, nous avons étudié un générateur photovoltaïque, nous avons donné dans le premier chapitre les notions essentielles sur le gisement solaire avec quelques définitions sur les grandeurs astronomiques, géographiques et différents types de rayonnement solaire. Enfin, nous avons présenté le potentiel solaire en Algérie qui dispose des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara).

Dans le deuxième chapitre, nous avons effectué la modélisation mathématique du GPV qui est essentielle à l'analyse. Ensuite, nous avons abordé l'analyse du générateur photovoltaïque GPV, puis nous avons vu les trois types de l'association des cellules.

- ✦ Une association de  $N_{cs}$  cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV), les cellules sont alors traversées par le même courant.
- ✦ Une association de  $N_{cp}$  cellules en parallèle permet d'accroître le courant de sortie du générateur. Dans ce cas les cellules sont alors soumises à la même tension.
- ✦ Une association de  $N_{cs} * N_{cp}$  cellules en série/parallèle permet d'augmenter la tension et le courant du générateur.

Dans le troisième chapitre, nous avons étudié le comportement d'un générateur photovoltaïque, nous avons établi des programmes de calculs sous l'environnement Matlab

9.0 permettant de tracer les caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  pour différents éclairagements, différentes températures et pour différentes associations des cellules PV (série, parallèle, série/parallèle).

Enfin, nous avons utilisé l'outil Matlab-Simulink pour simuler les caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  de la cellule et du GPV pour différentes températures et différents niveaux d'éclairément, En effet, en utilisant cet outil on peut aboutir à des résultats similaires à ceux obtenus par programmation avec moins d'effort.

D'après les résultats obtenus de la simulation (par programmation et Matlab-Simulink), on peut dire que :

- ✦ La température a un impact important sur les performances des cellules, et donc sur la conception et la production de générateur PV. En effet, la tension d'un GPV baisse assez fortement avec la température.
- ✦ La production photovoltaïque d'un GPV dépend directement de l'éclairément, puisque c'est sa source d'énergie, nous constatons que le courant est directement proportionnel au rayonnement à ces niveaux d'éclairément. La tension par contre est moins dégradée lorsque la lumière baisse.
- ✦ La production photovoltaïque d'un GPV dépend directement du nombre de cellules, si dernier augment l'énergie produite par le GPV augmente.

# Bibliographie

- [1] **Benkhelifa Abdelaziz**, « Modélisation et expérimentation d'un capteur solaire plan à eau influence de l'intensité de l'éclairement solaire et de l'inclinaison du capteur solaire sur le rendement du capteur », Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah, Ouargla, **2012**.
- [2] **Maïlys Grau**, « Réalisation de nouvelles structures de cellules solaires photovoltaïques à partir de couches minces de silicium cristallin sur substrat de silicium préparé par frittage de poudres ». Thèse, INSA de Lyon, French, **2012**.
- [3] **Helali Kamelia**, «Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative» Mémoire Master en électronique. Université Mouloud Mammeri. Tizi Ouzou, **2012**.
- [4] **SLAMA Fateh**, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique », Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas, Setif, **2011**.
- [5] **Othmane Benseddik et Fathi Djaloud**, « Étude et optimisation du fonctionnement d'un système PV». Mémoire Master Recherche : Génie électrique et électronique. Université kasdi merbah. Ouargla, **2012**.
- [6] **Florian Cronfalt**, « Les énergies solaires : notre avenir », **2009**.
- [7] **Lyes Malki**, « Potentiel solaire en Algérie » Publié dans ElWatan, **2007**.  
<http://www.djazairiss.com/fr/economie>.
- [8] **Abdou Semmar**, « Gisement solaire de l'Algérie est parmi les trois meilleurs gisements dans le monde », **2014**.
- [9] [http : //www.sonelgaz.dz](http://www.sonelgaz.dz)
- [10] Ministère de l'Énergie et des Mines (MEM), « Guide des Énergies Renouvelables », **2007**.
- [11] **Boukli Hacene Omar**, « Conception Et Réalisation d'un Générateur Photovoltaïque Muni d'un Convertisseur MPPT Pour Meilleure Gestion Energétique». Thèse De Magister en Automatique Productique Informatique. Université Abou Baker Belkaid. Tlemcen, **2011**.
- [12] **Yacine Fouad**. « Étude des nouvelles générations de cellules photovoltaïques», Thème de Magister. Université Des Sciences et de le Technologie d'Oran, **2011**.
- [13] **Kalyankolo Zaina, Assongmo Kenfack Claude Brice** « Conception d'une centrale photovoltaïque raccordée au réseau électrique », Mémoire Licence Génie Électrique, Université des Sciences et de la Technologie, Houari Boumediene, **2012**.
- [14] <http://energythic.com>

- [15] **Mornay Thomas, Vernay Alexis, Volle Marion**, « Les cellules photovoltaïques », **2005**.
- [16] <http://fr.wikipedia.org>
- [17] **Axenne - Ernst & Young** « Étude du développement de l'énergie solaire en Rhône-Alpes », **2010**.
- [18] <http://energie-developpement.blogspot.fr>
- [19] <http://www.energieplus-lesite.be>
- [20] **Bendjamâa Ibrahim**. « Modélisation et commande d'un système De stockage photovoltaïque » mémoire de magister, Université Abou-bakr Belkaid, Tlemcen, **2012**.
- [21] **Bouafia Mounir, Deblaoui laid** « Modélisation et simulation d'une cellule solaire en couche mince à base de diséléniure de Cuivre, d'Indium et de Gallium « CIGS » Université Kasli Merbah, Ouargla, **2012**.
- [22] **Ayache Khedidja** « Modélisation et Simulation d'un Générateur photovoltaïque couplé à un Réseau Électrique » Mémoire de Magister, Université Mohamed Chérif Messaâdia de Souk-Ahras, **2014**.
- [23] **P.Sudeepika, G.Md. Gayaz Khan** « Analysis of Mathematical Model Of PV Cell Module in Matlab/Simulink Environment » International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering (IJAREEIE), **2014**.
- [24] **Jitendra Bikaneria, Surya Prakash Joshi, A.R. Joshi** « Modeling and Simulation of PV Cell using One-diode model » International Journal of Scientific and Research Publications, **2013**.
- [25] **Alain Ricaud**, « Modules et systèmes photovoltaïques », **2008**.
- [26] **Bensaci Wafa**, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT » Diplôme de Master en Génie électrique, Université Kasdi Merbah–Ouargla, **2012**.
- [27] **Bibek Mishra, Bibhu Prasanna Kar**, « Matlab based modeling of photovoltaic array characteristics », National Institute of Technology, Rourkela, **2012**.
- [28] **Belhadj Mohammed**, « Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome », Mémoire de Magister, Universitaire De Bechar, **2008**.
- [29] **Meziani Fariza**, « Détermination du gisement solaire par traitement d'image MSG », Mémoire de Magister, Université Mouloud Mameri, Tizi Wouzo, **2012**.
- [30] **Anne Labouret, Michel Viloz** « Énergie solaire photovoltaïque », Livre 4ème édition, **2009**.