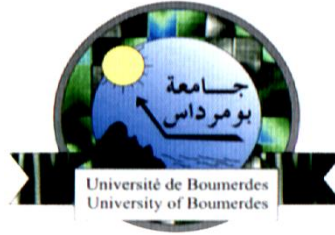


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté de Technologie  
Département Génie Mécanique

## Mémoire de Master

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

**Filière** : génie mécanique  
**Spécialité** : Energétique

### THEME

**Etude de système photovoltaïque**

**Présenté par :**

Adjal Ouarda

**Promotrice :** Mme. Dahmani .k

**Encadreur :** Mr Fezani

Promotion 2021- 2022

# remerciements

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à ceux qui ont contribué à la rédaction de ce mémoire . Je tiens à remercier tout particulièrement M. Dahmani .K pour son soutien et ses encouragements, et avec qui j'ai établi une relation de confiance".

Je tiens à remercier spécialement Monsieur FEZZANI.A , qui fut le premier à me faire découvrir le sujet qui a guidé mon mémoire.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers les amis et collègues qui m'ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de ma démarche.

# Ma Dédicace

*Je dédie ce travail*

*A ma famille ,elle m'a doté d'une éducation digne ,son amour a fait de moi ce que je suis aujourd'hui  
Spécialement*

*à ma chère mère*

*à mon chère père*

*source de vie d'amour et de courage et à ma chère sœur et mes frères marwan , sid ahmed , yamina.*

*à moi*

*à ma chère litisya*

*à mes chère cousins*

*et tous mes amis dooa, aymen ; zaghlol ; mouhamed seddi ; rafik ,et a tous la famille ADJAL, , boukhalfa , et tous mes amis de département énergetique .*

## Résumé

Le développement du marché photovoltaïque nécessite de connaître parfaitement la production électrique de ces systèmes sous différentes conditions de fonctionnement. Cette estimation précise ne peut se faire qu'en prenant en compte les effets d'ombrage qui ont des conséquences dramatiques sur la puissance électrique délivrée. Dans ce mémoire, nous avons testé le modèle une diode et le modèle bishop sur un module photovoltaïque au silicium polycristallin sous différentes conditions d'éclairage et température ; puis après une explication du comportement électrique de module pour une cellule ou plusieurs cellules ombrées, nous présentons l'expérimentation mise en place. Les tests effectués ont permis de valider le modèle bishop de comportement de module PV en fonctionnement défiant.

## Abstract

The photovoltaic solar energy is electrical energy ;produced from insulated radiation using photovoltaic solar panels or power station .it is said to be renewable , because its source is considered inexhaustible on the scale of human time ,but the solar panels receive many errors due to faults , either temporal or permanent , such as shading ,dust ,ect .In this paper we have studied the most common fault in photovoltaic shading système .

## ملخص

يتطلب تطوير سوق الخلايا الكهروضوئية معرفة كاملة بالإنتاج الكهربائي لهذه الأنظمة في ظل ظروف تشغيل مختلفة. لا يمكن إجراء هذا التقدير الدقيق إلا من خلال مراعاة تأثيرات التظليل التي لها عواقب وخيمة على الطاقة الكهربائية التي يتم توصيلها. في هذه الأطروحة ، اختبرنا نموذج الصمام الثنائي المفرد ونموذج الأسقف على وحدة فلتانية ضوئية متعددة البلورات من السيليكون تحت ظروف إضاءة ودرجة حرارة مختلفة ؛ ثم بعد شرح السلوك الكهربائي للوحدة لخلية واحدة أو عدة خلايا مظلة ، نقدم إعداد التجربة. جعلت الاختبارات التي تم إجراؤها من الممكن التحقق من صحة نموذج الأسقف لسلوك الوحدة الكهروضوئية في عملية صعبة.

## SOMMAIRE

### Chapitre 1 : Généralité sur le système photovoltaïque

<b>I.1</b>	<b>Introduction</b>	5
<b>I.2</b>	<b>Historique</b>	5
<b>I.3</b>	<b>Sources d'énergie renouvelables</b>	5
<b>I.4</b>	<b>Gisement solaire</b>	5
I.4.1	Le rayonnement solaire	5
I.4.2	Effets atmosphériques sur le rayonnement	6
I.4.3	Position du soleil par rapport à la terre	7
I.4.3.1	Repérage d'un site à la surface de la terre (coordonnées géographiques)	7
	a) La latitude $\theta$	7
	b) La longitude $\varphi$	7
	c) L'altitude	7
I.4.3.2	La trajectoire apparente du soleil	7
	a) Les coordonnées équatoriales	7
	• La déclinaison $\delta$	8
	• L'angle horaire $\omega$ (ah)	8
	b) Les coordonnées horizontales	8
	• l'azimuth	8
	• L'angle de la hauteur solaire $\gamma$ (hs)	8
	• La distance zénithale $z$	8
I.4.3.3.	Le temps	9
	a) Le temps universel (TU)	9
	b) Le temps solaire moyen (TSM)	9
	c) Le temps solaire vrai (TSV)	9
	d) Equation du temps	10
<b>I.5</b>	<b>L'effet photovoltaïque</b>	10
I.5.1	Semi-conducteur dopé N et Semi-conducteur dopé P	10
I.5.2	dopage de type N	11
I.5.3	Dopage de type P	11
I.5.4	La jonction PN	11
I.5.5	Cellule photovoltaïque	12
I.5.5.1	Les principales technologies de cellules solaires photovoltaïques	12
	a) Cellule en silicium polycristallin	12
	b) Cellule en silicium monocristallin	13
	c) Cellule silicium amorphe en couche mince	14
	d) Cellule sans silicium en couche mince CIS / CIGS	15
	e) Cellule multi-jonction	16
<b>I.6</b>	<b>Système photovoltaïque (PV)</b>	17

I.6.1	Définition d'un système photovoltaïque (PV)	17
I.6.2	Classification des systèmes PV	17
I.6.2.1	Systèmes autonomes	17
	• Types de systèmes PV autonomes	18
	a) Les systèmes au fil du soleil	18
		19
	b) Les systèmes avec stockage	
I.6.2.2	Systèmes PV à injection aux réseaux	19
	• Définition d'un système PV raccordé au réseau	19
	• Classes des systèmes raccordés aux réseaux	20
	a) Systèmes à grande puissance	20
	b) Systèmes à petite puissance	20
	b .1 Systèmes à Injection du surplus	20
	b .2 Systèmes à injection de la totalité	20
<b>I.7</b>	<b>Constitution des champs PV</b>	21
<b>I.8</b>	<b>Modules PV</b>	21
I.8.1	Constituants	21
I.8.2	Fonction	22
I.8.3	Caractéristiques d'un module [19]	22
	• La puissance de crête $P_c$	23
	• La caractéristique I-V	23
	• Tension à vide, $V_{co}$	23
	• Courant de court-circuit, $I_{cc}$	24
	• Point de fonctionnement optimum, ( $U_m, I_m$ )	24
	• La puissance est maximale	24
	• Rendement	24
	• Facteur de forme	24
I.8.4	Effet de la température sur une cellule photovoltaïque	24
I.8.5	Connexion des modules	25
	a) Connexion des modules en série	25
	b) Connexion des modules en parallèle	26
<b>I.9</b>	<b>Système de protection</b>	26
I.9.1	La Diode By-pass	27
I.9.2	La Diode Anti-Retour	27
<b>I.10</b>	<b>Système de stockage</b>	28
<b>I.11</b>	<b>Système de régulation</b>	28
I.11.1	Convertisseurs DC/DC	29
I.11.2	Convertisseurs DC/AC (onduleur)	29
I.11.3	Types d'onduleurs en fonction de l'installation PV	30
	a) Onduleurs modulaires	30
	b) Onduleurs centralisés	30

	C) Les onduleurs de string	31
<b>I.12</b>	<b>Avantages et inconvénients d'une installation photovoltaïque</b>	32
<b>I.13</b>	<b>Conclusion</b>	33

## **CHAPITRE II : MODELISATION ET SIMULATION D'UN CHAMP PV**

<b>II.1</b>	<b>Introduction</b>	34
<b>II.2</b>	<b>Les modèles de la cellule PV</b>	34
II.2.1	Modèle à une diode	35
II.2.2	Modèle à deux diodes	37
II.2.3	Modèle de Bishop	38
II.2.4	Modèle explicite	38
<b>II.3</b>	<b>Simulation du module pv</b>	39
II.3.1	Simulation du modèle a une diode	40
II.3.1.1	Effet de l'éclairement	41
II.3.1.2	Effet de la température	42
II.3.2	SIMULATION DE MODELE BISHOP	44
II.3.2.1	Effet de l'éclairement	44
II.3.2.2	Effet de la température	45
<b>II.4</b>	<b>Comparaison entre Bishop et une diode</b>	47
	Comparaison entre Bishop et une diode des caractéristiques I-V	48
<b>II.5.</b>	<b>Conclusion</b>	49

## **Chapitre III : étude des défauts dans une installation photovoltaïque**

<b>III.1</b>	<b>Introduction</b>	50
<b>III.2</b>	<b>Classification des défauts</b>	50
III.2.1	Défauts dans le générateur photovoltaïque	50
	TABLEAU III. 1. Défauts dans le générateur photovoltaïque	51
	<b>TABLEAU III .2 . Défauts dans la boîte de jonction</b>	53
	<b>TABLEAU III .2 .3. Défauts dans le système de câblage</b>	53
	<b>TABLEAU III .2 .4. Défauts dans le système de protection</b>	54
	<b>TABLEAU III .2 .5. Défauts de l'onduleur</b>	55
	TABLEAU III .2 .6. Défaut du système d'acquisition des données	56
<b>III.3</b>	<b>Quelques défauts trouvés au sein de L'UREAR - GHARDAIA</b>	57
<b>III.4</b>	<b>Validation expérimentale du modèle bishop</b>	58
III.4.1	Description de la plateforme d'expérimentation	58
III.4.2	Résultats expérimentaux	59
III.4.3	Les scénarios du test	60
III.4.3.1	défaut d'ombrage d'une cellule	60
III .4.3.2	Présentation des résultats expérimentaux des caractéristique I -V et P-V	60
	Observation	61
	Justification	62

III.4.2.4	Défaut d'ombrage 18 cellules horizontales	62
	Observation	62
	Justification	63
<b>III.7</b>	<b>Conclusion</b>	64

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b> : Distribution spectrale du rayonnement solaire.....	6
<b>Figure I. 2</b> : Coordonnées terrestres.....	7
<b>Figure I.3</b> : Coordonnées solaires selon le repère horizontal.....	9
<b>Figure I. 3</b> : semi-conducteur de type N.....	11
<b>Figure I.4</b> : semi-conducteur de type p.....	11
<b>Figure I. 5</b> : la jonction PN.....	12
<b>Figure I.6</b> : Cellule en silicium polycristallin.....	13
<b>Figure I.7</b> : cellule silisium amorphe monocristallin.....	14
<b>Figure I. 8</b> : Cellule silicium amorphe en couche mince.....	15
<b>Figure I. 9</b> : Cellule sans silicium en couche mince CIS / CIGS.....	16
<b>Figure I.10</b> : cellule multi jonction.....	16
<b>Figure I.12</b> : Système photovoltaïque plus détaillé.....	17

<b>Figure I.13</b> : Schéma d'un système autonome (hors-réseau).....	17
<b>Figure I.14</b> : Système de Pompage.....	18
<b>Figure I.15</b> : injection partielle .....	19
<b>Figure I.17</b> : Installation solaire à injection au réseau avec deux .....	19
<b>Figure I.18</b> : Constituants d'un générateur PV.....	19
<b>Figure I.19</b> : Constituants d'un module photovoltaïque (Si cristallin) .....	20
<b>Figure I.20</b> : Exemple de caractéristiques (P-V) d'un module.....	22
<b>Figure I.21</b> : Exemple de caractéristiques (I-V) d'un module.....	23
<b>Figure I. 22</b> : exemple de l'effet de la température sur le de caractéristiques (Pd'un module pv).....	23
<b>Figure I. 23</b> : exemple de l'effet de la température sur le de caractéristiques (I-V)d'un module pv).....	25
<b>Figure I.24</b> :Connexion des modules en série.....	25
<b>Figure I.25</b> : Connexiondes modules en parallèle.....	26
<b>Figure I.26</b> : diode by-pass.....	26
<b>Figure I.27</b> : La Diode Anti-Retour.....	27

<b>Figure I.28</b> : la batterie PV.....	27
<b>Figure I.29</b> : le régulateur de la charge.....	37
<b>Figure I. 30</b> : Type d'onduleurs existants.....	28
<b>Figure I.31</b> : Onduleur modulaire (un onduleur par panneau).....	29
<b>Figure I.32</b> : Onduleur central.....	30
<b>Figure I.33</b> : Onduleur string.....	30
<b>Figure II. 1</b> : schéma équivalent d'une cellule PV Modèle.....	31
<b>Figure II. 2</b> : Schéma équivalent d'une cellule PV .....	32
<b>Figure II. 3</b> : schéma équivalent d'une cellule PV Modèle .....	35
<b>Figure II. 4</b> : Simulation du modèle à une diode.....	36
<b>Figure II .5</b> : Résultats de de simulation des caractéristiques (P-V) pour différents éclairagements et une température $T = 25^{\circ}\text{C}$ .....	37
<b>Figure II. 6</b> : Résultats de simulation de la caractéristique (I-V) pour différents éclairagements et une température $T = 25^{\circ}\text{C}$ .....	38
<b>Figure II .7</b> : Résultats de simulation de la caractéristique (p-v) pour différents température et éclairagements $E = 1000$	

w/m<sup>2</sup>.....  
...42

**Figure II.8:** Résultats de simulation de la caractéristique (I-V) pour différentes températures et un éclairement  $E = 1000$

W/m<sup>2</sup>.....42

**Figure II.9 :** Simulation du modèle

bishop.....43

**Figure II.10 :** Résultats de simulations de la caractéristique (P –V) pour différents éclairements et une température  $T =$

25°C.....44

**Figure II.11 :** Résultats de simulation de la caractéristique (I-V) pour différents éclairementset une température  $T =$

25°C.....44

**Figure II .12 :** Résultats de simulation de la caractéristique (P-V) pour différents températureet éclairements  $E = 1000$

W/m<sup>2</sup>.....  
...45

**FigureII.13 :** Résultats de simulation de la caractéristique (I-V) pour différentes températures et un éclairement  $E = 1000$

W/m<sup>2</sup>.....45

**Figure II. 14 :** Résultats de simulation de la caractéristique (P-V) pour éclairements  $E = 1000$ w/m<sup>2</sup> et une température  $T =$

25°C.....46

**Figure II. 15 :** Résultats de simulation de la caractéristique (I-V) pour une température  $T = 25^\circ\text{C}$  et un éclairement  $E = 1000$

W/m<sup>2</sup>.....47 **Figure**

**III .1.**Décoloration des cellules PV en marron ou jaune (URAER).....59

<b>Figure III .2.</b> Défaut de la Salissure (URAER).....	59
<b>Figure III .3.</b> Défaut de déconnection de la diode (URAER).....	60
<b>Figure III .4.</b> Banc d'essai au sein de l'URAER.....	61
<b>Figure III. 5 :</b> Caractéristiques (I-V) expérimentale et simulé (module SCHOTT solar ASE - 100-GT –FT/MC) $E = 1000W/m^2$ et $T =$ $52^{\circ}C$ .....	61
<b>Figure III. 6 :</b> Caractéristiques (P-V) expérimentale et simulé (module SCHOTT solar ASE - 100-GT –FT/MC) $E = 1000W/m^2$ et $T =$ $52^{\circ}C$ .....	62
<b>Figure III.7 :</b> défaut d'ombrage d'une cellule.....	62
<b>Figure III .8.</b> Résultats des caractéristiques (I-V) avec défaut d'ombrage d'une cellule et sans défaut  $E = 1000W/m^2$ et $T = 52^{\circ}C$ .....	63
<b>Figure III. 9. :</b> Résultats des caractéristiques (P-V) avec défaut d'ombrage d'une cellule et sans défaut $E = 1000W/m^2$ et $T = 52^{\circ}C$ .....	63
<b>Figure III .10 :</b> Défaut d'ombrage de 18 cellules horizontals.....	64
<b>Figure III .11.</b> Résultats des caractéristiques (I-V) avec défaut .....	65
<b>Figure.III.12 :</b> Résultats des caractéristiques (P-V) avec défaut d'ombrage de 18cellules horizontale set sans défaut $E = 1000W/m^2$ et $T =$ $52^{\circ}C$ .....	65

## Liste des Symboles

**PV** : photovoltaïque.

**GPV** : Générateur photovoltaïque.

**PPM** : le point de puissance maximale.

**CC** : Court circuit.

**CO** : Circuit ouvert.

**DC** : Direct courant.

**AC** : courant alternatif.

**STC** : Conditions standard

**Si** : Silicium.

**URAER** : Unité de recherche appliquée en énergie renouvelable.

**Imp**: le courant de puissance maximale.

**Vmp** : la tension de puissance maximale.

**FF**: Facteur de forme.

**Pmax** : la puissance maximale.

**Pmax (défaut)** : la puissance maximale de la string défaille.

**R** : résistance.

**T** : la température .

**Voc**: Tension du circuit-ouvert [V].

**Icc** : Courant de court-circuit [A].

**Rsh**: Rp: Resistance shunt (parallèle) [ohm].

**Rs**: Resistance série [ohm].

**k:** Constante de Boltzmann =  $1,38 \cdot 10^{-23}$  [J/K].

**q:** Charge de l'électron =  $1,602 \cdot 10^{-19}$  [Coulomb].

**a:** Facteur de qualité de la diode.

**I<sub>ph</sub>:** Photo-courant, ou courant photo-généré par l'éclairement (A).

**I<sub>0</sub>:** Courant de saturation de la diode (A).

**V<sub>t</sub>:** La tension thermique (V).

**V:** tension (volte).

**I:** le courant (A) fourni par la cellule PV.

**p:** la puissance. w

**η:** Le rendement .

**E:** éclairement (W /m<sup>2</sup>)..

**I<sub>sc</sub>:** courant de court-circuit [A].

**V<sub>oc</sub>:** la tension de circuit ouvert [V].

## Introduction générale

Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues de soleil, de vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. À la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. Dans le cadre de ce travail, on s'intéresse à l'énergie solaire photovoltaïque [1].

Durant les dernières années, le photovoltaïque est devenu rapidement l'une des technologies d'énergie les plus importantes, comme l'énergie éolienne, hydraulique et autres [2].

Par ailleurs lors de son fonctionnement, un générateur photovoltaïque n'est jamais à l'abri de défauts et anomalies pouvant l'affecter et par conséquent diminuer ses performances en termes de production d'énergie. Pour pallier ces problèmes, la mise en place d'un système de détection et de localisation des défauts est d'autant nécessaire. En effet, le diagnostic des systèmes PV a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche et de validations expérimentales. Vu la diversité des défauts dans les systèmes photovoltaïques, les techniques et dispositifs permettant leur détection et localisation le sont également [3].

L'objectif de ce travail est de faire une étude de différents défauts pour lesquels peut être soumis un système PV, et de créer l'un de ces défaut pratiquement puis le comparer avec le modèle mathématique le plus utilisé dans la littérature (modèle Bishop) .

Cet objectif est structuré en trois chapitres:

Dans le premier chapitre, nous décrivons les notions essentielles sur le gisement solaire, le fonctionnement, le phénomène photovoltaïque et l'influence des différents paramètres extérieurs. Ensuite, nous décrivons les types et les différents composants d'une installation photovoltaïque et enfin les avantages et les inconvénients.

Dans le deuxième chapitre nous exposons les quatre modèles d'un système PV utilisées dans la littérature en se basant sur le modèle à une diode et bishop ; nous faisons leurs simulation sous MATLAB / SIMULINK, une comparaison entre les caractéristique de modèle

Dans le troisième chapitre, nous avons cité les différents défauts que l'on peut trouver dans

l'installation PV .puis nous avons créé deux défauts d'ombrage d'une seule cellule pour étudier leurs caractéristiques IV et PV et comparais les résultats expérimental avec les résultats de la simulation (résultats théorique) de model a une diode .

# CHAPITRE I : Généralité sur le système photovoltaïque

## I.1. Introduction

L'énergie photovoltaïque, produite à partir du rayonnement solaire, est l'énergie la plus prometteuse des énergies renouvelables. L'énergie solaire est convertie en une énergie électrique au moyen des panneaux solaires constitués de plusieurs cellules photovoltaïques. La cellule photovoltaïque est le principal élément de la conversion directe de l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique. Elle est fabriquée à base de matériau semi-conducteur .

Dans ce chapitre, nous allons rappeler les notions de bases de l'effet photovoltaïque en mettant l'accent sur la cellule PV en tant qu'élément de base du générateur PV. Nous abordons les différentes associations des cellules PV pour la formation d'un générateur PV. Nous étudions aussi les caractéristiques électriques d'une cellule PV tout en évoquant l'effet de quelques paramètres météorologiques sur ces caractéristiques. [1].

## I.2. Historique

Découvert en 1839 par le physicien A. Becquerel, l'effet photovoltaïque a été peu utilisé jusqu'au début des années 60 où il a connu un développement important du fait de ses applications spatiales. L'électricité photovoltaïque, qui est aujourd'hui largement répandue notamment dans le domaine de l'électrification rurale, est obtenue par transformation directe de l'énergie lumineuse en électricité par les cellules PV [2].

## I.3. Sources d'énergie renouvelables

On distingue plusieurs types de sources d'énergies renouvelables : L'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque. Excepté l'énergie géothermique qui provient de la chaleur des profondeurs de la terre, ces sources d'énergie proviennent directement ou indirectement du soleil. Elles sont donc disponibles indéfiniment tant que celui-ci brillera. L'énergie photovoltaïque est la plus jeune des énergies renouvelables, elle a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable [3].

## I.4. Gisement solaire

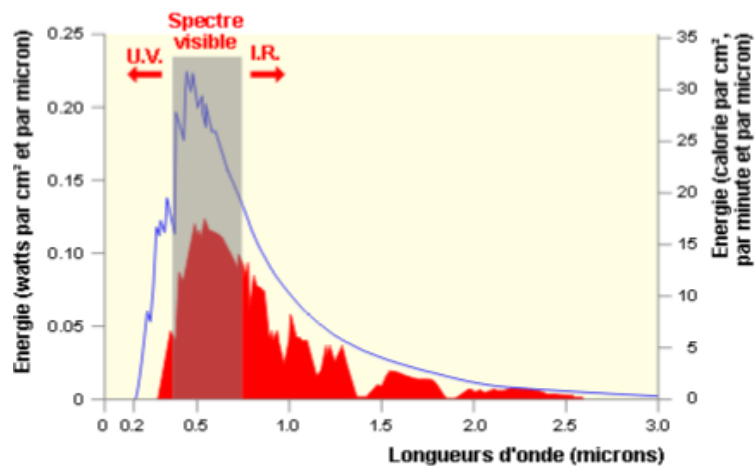
### I.4.1 Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire se compose de radiations électromagnétiques émises par le soleil, dont le spectre s'étend des plus petites longueurs d'ondes (rayons gamma) vers les grandes ondes radioélectriques. Les parties de ce spectre qui jouent un rôle dans l'interaction

## CHAPITRE I : Généralité sur le système photovoltaïque

du rayonnement solaire avec l'environnement terrestre sont essentiellement les bandes infrarouge, visible et ultraviolette, ainsi que la gamme radioélectrique et celles des microondes. La distribution spectrale de ce rayonnement est donnée par la figure I.1.

Le rayonnement solaire reçu au sommet de l'atmosphère, dans un plan perpendiculaire aux rayons solaires et pour une distance terre-soleil égale à sa valeur moyenne, est appelée la constante solaire et vaut  $1367 \text{ W/m}^2$ . Lorsque ce rayonnement traverse l'atmosphère pour atteindre la surface terrestre, il est fortement atténué en raison des phénomènes d'absorption et de diffusion par les différents constituants de celle-ci .



**Figure I.1 :** Distribution spectrale du rayonnement solaire

Le rayonnement arrivant au sol dépend de la réflectance de la surface terrestre et des effets de l'atmosphère qui interviennent dans le double trajet (soleil-terre et terre-satellite) que fait le rayonnement à travers l'atmosphère. Pour connaître l'énergie reçue à un site donné, il est nécessaire de repérer ce site sur la surface terrestre, de connaître la position et la trajectoire du soleil dans la voûte céleste et les mouvements de la terre autour du soleil [8].

### I.4.2 Effets atmosphériques sur le rayonnement

Le rayonnement solaire reçu par une surface inclinée (Rayonnement Global) est la somme des composantes suivantes :

- La composante directe (Beam) : Rayonnement reçu directement du soleil.
- La composante réfléchie : Rayonnement réfléchi par le sol, il dépend du type de (Albedo).
- La composante diffuse : Rayonnement reçu par le reste de la voûte céleste.

# CHAPITRE I : Généralité sur le système photovoltaïque

## I.4.3 Position du soleil par rapport à la terre

Il est possible de déterminer la position du soleil dans la voûte céleste en fonction du temps et de la position de l'observateur sur la terre.

### I.4.3.1 Repérage d'un site à la surface de la terre (coordonnées géographiques)

Pour repérer un site donné à la surface terrestre, on définit les grandeurs suivantes :

#### a) La latitude $\theta$ :

C'est l'angle  $\theta$  que fait la verticale du lieu avec le plan équatorial. Si  $\theta > 0$ , le site se trouve dans l'hémisphère nord, sinon le site est dans l'hémisphère sud.

#### b) La longitude $\varphi$ :

C'est l'angle  $\varphi$  formé par le méridien de Greenwich et le méridien du 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.

#### c) L'altitude :

C'est la distance verticale exprimé en mètres, séparant le point considéré du relief terrestre du niveau de la mer, pris comme surface de référence.

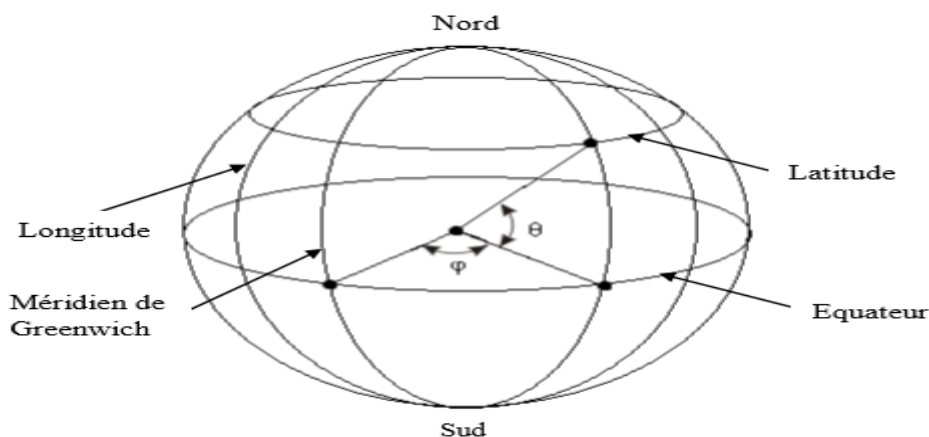


Figure I. 2 : Coordonnées terrestres

### I.4.3.2 La trajectoire apparente du soleil

La position du soleil dans la voûte céleste est repérée à tout instant de la journée par deux systèmes de coordonnées :

#### a) Les coordonnées équatoriales

## CHAPITRE I : Généralité sur le système photovoltaïque

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

### • La déclinaison $\delta$

C'est l'angle que forme la direction du soleil et le plan équatorial. La déclinaison varie de façon sinusoïdale au cours de l'année : elle vaut 0 aux équinoxes et atteint ses deux valeurs extrêmes au solstice d'hiver ( $-23^{\circ},27'$ ) et au solstice d'été ( $+23^{\circ},27'$ ). Plusieurs expressions ont été développées pour évaluer la déclinaison, la plus simple est celle utilisée par Cooper .

$$\delta = 23.45 \sin 360 \cdot 365 (j+284) \quad (I.1)$$

### • L'angle horaire $\omega$ (ah)

L'angle horaire mesure le mouvement du soleil par rapport à midi qui est l'instant où le soleil passe au plan méridien du lieu zénith. Cet angle est formé entre la projection du soleil sur le plan équatorial à un moment donné et la projection du Soleil sur ce même plan au midi vrai. L'angle horaire est donné par la relation suivante:

$$\omega = 15 (TSV - 12) \quad (I.2)$$

Où TSV est le temps solaire vrai qui sera décrit dans les paragraphes suivants.

### b) Les coordonnées horizontales

Le soleil est repéré par les grandeurs suivantes :

#### • l'azimut

L'azimut est l'angle entre le plan vertical contenant le rayon solaire et la direction sud. Il se compte de  $0^{\circ}$  à  $360^{\circ}$  à partir du sud dans le sens rétrograde. La relation qui donne l'azimut est donnée ci-dessous.

$$\cos \psi = (\sin \theta \sin \delta - \sin \delta) / \cos \gamma \cos \theta \quad (I.3)$$

#### • L'angle de la hauteur solaire $\gamma$ (hs)

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. L'angle de la hauteur solaire est donné par :

$$\sin \gamma = \sin \theta \sin \delta + \cos \theta \cos \delta \cos \omega \quad (I.4)$$

#### • 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  $\gamma$ .

$$\cos z = \sin \delta \sin \theta + \cos \delta \cos \theta \cos \omega \quad (I.5)$$

## CHAPITRE I : Généralité sur le système photovoltaïque

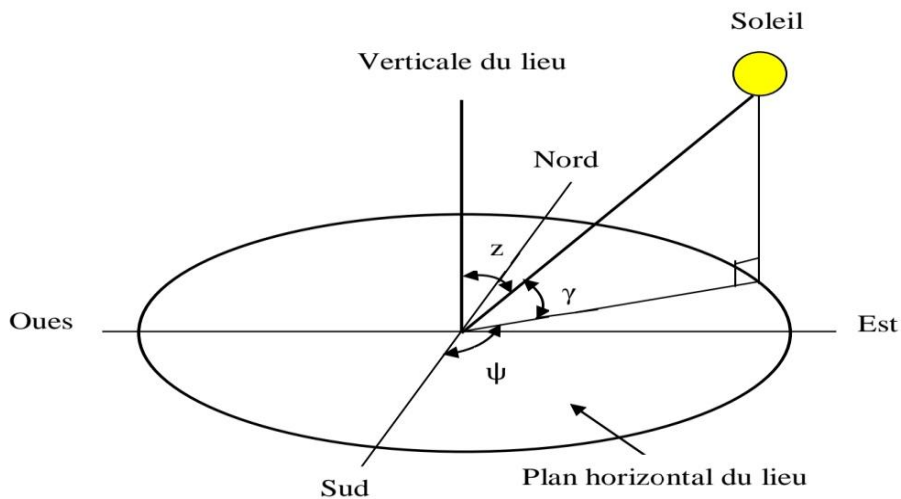


Figure I.3 : Coordonnées solaires selon le repère horizontal

### I.4.3.3. Le temps

La terre subit deux types de déplacement : la rotation de la terre autour de l'axe des pôles et sa révolution autour du soleil. Le mouvement de la terre sur elle-même définit la notion de journée solaire. Une rotation complète s'effectue en 24 heures. Elle amène ainsi la définition du temps, puisque chaque heure correspond à un écart angulaire de  $15^\circ$ . La rotation de la terre autour du soleil définit les saisons et amène à distinguer le temps solaire vrai.

#### a) Le temps universel (TU) :

C'est le temps solaire moyen du méridien de Greenwich GMT (Greenwich Mean Time) qui est le méridien central du fuseau horaire. Pour en déduire le temps légal ou local (TL), il convient d'ajouter au temps universel le décalage du fuseau horaire.

$$TL = TU + \text{décalage} \quad (I.6)$$

#### b) Le temps solaire moyen (TSM) : Il se déduit de l'équation suivante :

$$TSM = TU + \varphi/15 \quad (I.7)$$

Avec TSM en heure.

#### c) Le temps solaire vrai (TSV) :

C'est le temps défini par les coordonnées angulaires vraies du soleil.

$$TSV = TSM + Et \quad (I.8)$$

Où  $Et$  est l'équation du temps.

## CHAPITRE I : Généralité sur le système photovoltaïque

### d) Equation du temps : [10]

Le temps  $E_t$  varie de -14,5 minutes (du 10 au 15 Février) à +16,5 minutes (du 25 au 30 Octobre) .

Une bonne approximation du temps  $E_t$  est donnée par l'équation suivante :

$$E_t = 9.9 \sin [2(0.986 j+100)] - 7.7 \sin (0.986 j-2) \quad (I.9)$$

Où  $E_t$  est exprimé en minutes et  $j$  est le numéro du jour dans l'année à partir du 1er Janvier.

### I.5. L'effet photovoltaïque

Le principe de l'effet photoélectrique (transformation directe d'énergie portée par la lumière en électricité) a été appliqué dès 1839 par Antoine Becquerel. Il notait à l'époque qu'une chaîne d'éléments conducteurs d'électricité comme le silicium donnait naissance à un courant électrique spontané lorsqu'elle était éclairée. L'électricité ainsi produite étant proportionnelle à l'intensité de l'éclairage.

L'effet photovoltaïque met en jeu trois phénomènes physiques liés et simultanés

- l'absorption de la lumière dans le matériau,
- le transfert d'énergie des photons aux particules chargées électriquement
- la collecte des charges. [11].

#### I.5.1. Semi-conducteur dopé N et Semi-conducteur dopé P

- Les panneaux sont un assemblage de cellules photovoltaïques, soudées les unes aux autres. Chacune de ces cellules est constituée de deux couches d'un matériau semi-conducteur, en général du silicium, qui est extrait de la silice.

- La couche supérieure de la cellule (Semi-conducteur dopé N) est dopée négativement grâce à un élément chimique qui contient plus d'électrons que le silicium (le phosphore par exemple).

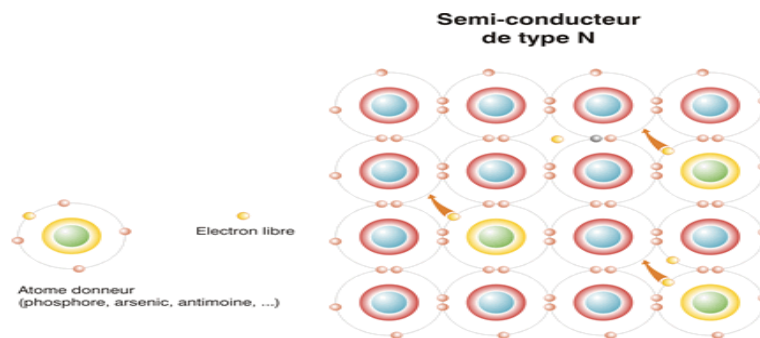
- La couche inférieure (Semi-conducteur dopé P) dont la polarité est dopée positivement grâce à un élément chimique qui contient moins d'électrons que le silicium (le bore par exemple).

- Dopage de type N qui consiste à produire un excès d'électrons, qui sont négativement chargés Dopage de type P, qui consiste à produire un déficit d'électrons, donc un excès de trous, considérés comme positivement chargés [12].

#### I.5.2dopage de type N

## CHAPITRE I : Généralité sur le système photovoltaïque

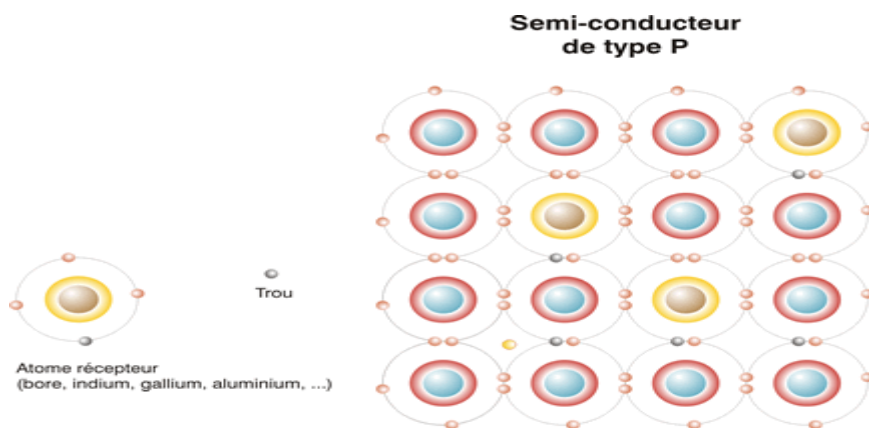
Un atome de silicium compte 4 électrons. L'une des couches de la cellule est dopée avec des atomes de phosphore qui, eux, comptent 5 électrons (soit 1 de plus que le silicium). On parle de dopage négatif, car les électrons (de charge négative) .



**Figure I. 3 :** semi-conducteur de type N

### I.5.3. Dopage de type P

L'autre couche de la cellule est dopée avec des atomes de bore qui ont 3 électrons (1 de moins que le silicium). On parle de dopage positif en raison du déficit d'électrons ainsi créé.



**Figure I.4 :** semi-conducteur de type p

### I.5.4. La jonction PN

Lorsque la première couche est mise en contact avec la seconde. Les électrons en excès dans le matériau dopé N se dirigent naturellement vers le matériau dopé P.

Quand un photon arrache un électron, libérant l'électron et formant un trou, sous l'effet de ce champ électrique ils partent chacun à l'opposé. Les électrons s'accumulent dans la région N (qui devient le pôle négatif), tandis que les trous s'accumulent dans la couche dopée P (qui devient le pôle positif). Ce déplacement d'électrons n'est autre que de l'électricité [13].

# CHAPITRE I : Généralité sur le système photovoltaïque

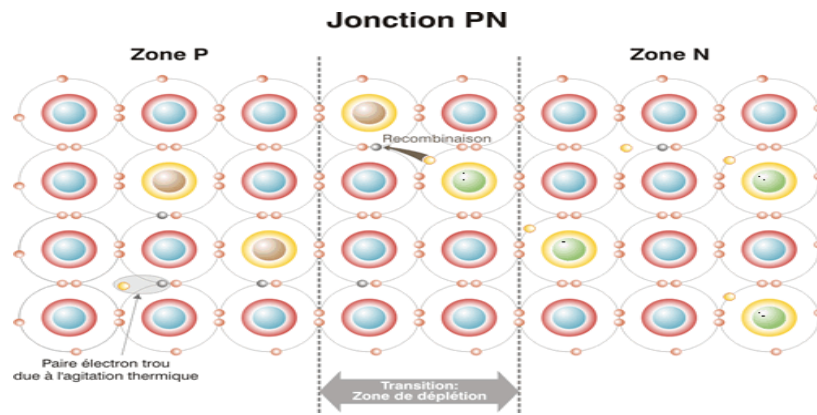


Figure I. 5 : la jonction PN

## I.5.5. Cellule photovoltaïque

Composée de semi-conducteurs, une cellule photovoltaïque absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique.

Une cellule individuelle :

Unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau).

Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Le courant de sortie, et donc la puissance, sera proportionnelle à la surface du module. [14].

### I.5.5.1. Les principales technologies de cellules solaires photovoltaïques

#### a) Cellule en silicium polycristallin

Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

##### ➤ Avantages :

- Bon rendement (environ 100 Wc/m<sup>2</sup>)
- Durée de vie importante (+/- 30 ans)
- Moins cher que le monocristallin

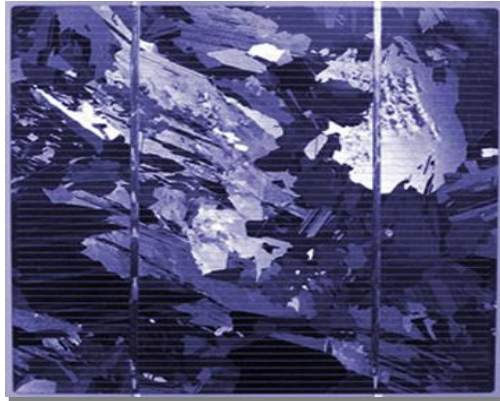
##### ➤ Inconvénients :

- Rendement faible sous un faible éclaircissement

## CHAPITRE I : Généralité sur le système photovoltaïque

### ➤ Rendement :

- Rendement module commercial : 11 à 15%
- Rendement record en laboratoire : environ 20%



**Figure I.6 :** Cellule en silicium polycristallin

### b) Cellule en silicium monocristallin

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme.

### ➤ Avantages :

- Meilleur rendement que le polycristallin (environ 150 Wc/m<sup>2</sup>)
- Durée de vie importante (+/- 30 ans)

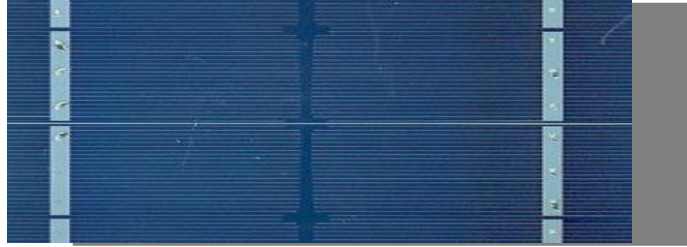
### ➤ Inconvénients :

- Plus cher que le polycristallin
- Rendement faible sous un
- faible éclairement

### ➤ Rendement:

- Rendement module commercial : 12 à 20%
- Rendement record en laboratoire : environ 25%

## CHAPITRE I : Généralité sur le système photovoltaïque



**Figure I.7** : cellule silicium amorphe monocristallin

### c) Cellule silicium amorphe en couche mince

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé ou marron. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites "solaires".

#### ➤ **Avantages :**

- Fonctionnent avec un éclairage faible
- Bon marché par rapport aux autres types de cellules
- Moins sensible aux températures élevées
- Souple

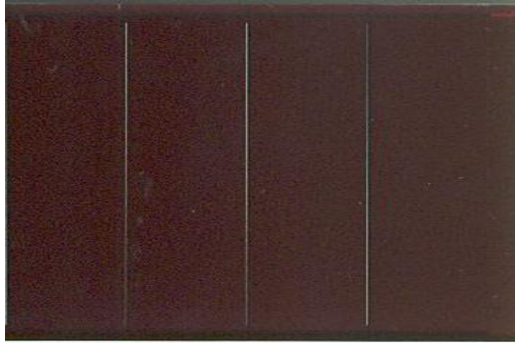
#### • **Inconvénients :**

- Rendement faible en plein soleil (environ  $60 \text{ Wc/m}^2$ ), les cellules en couche mince nécessite une surface plus importante pour atteindre les mêmes rendements que les cellules épaisses.
- Durée de vie courte ( $\pm 10$  ans), performances qui diminuent sensiblement avec le temps

#### • **Rendement :**

- Rendement faible : 5 à 9%
- Rendement record en laboratoire : environ 13,4%

## CHAPITRE I : Généralité sur le système photovoltaïque



**Figure I. 8 :** Cellule silicium amorphe en couche mince

### **d) Cellule sans silicium en couche mince CIS / CIGS**

Les cellules CIS représentent une nouvelle génération de cellules solaires sous forme de films minces, de type CIS (cuivre, indium, sélénium) ou CIGS (cuivre, indium, gallium et sélénium).

Les matières premières nécessaires à la fabrication de ces cellules sont plus faciles à se procurer que le silicium utilisé dans les cellules photovoltaïques classiques (bien que ce dernier soit déjà très abondant sur terre). De plus, leur efficacité de conversion énergétique est la plus élevée à ce jour pour des cellules photovoltaïques en couche mince.

#### ➤ **Avantages :**

- Meilleurs rendements par rapport aux autres cellules photovoltaïques en couche mince
- La cellule peut être construite sur un substrat flexible

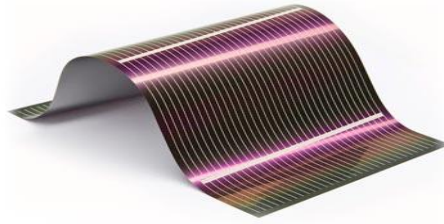
#### ➤ **Inconvénients :**

- Les cellules en couche mince ont un rendement plus faible que les cellules "épaisses".

#### ➤ **Rendement :**

- Rendement module commercial : 9 à 11%
- Rendement record en laboratoire : environ 19,3%

## CHAPITRE I : Généralité sur le système photovoltaïque



**Figure I. 9** : Cellule sans silicium en couche mince CIS / CIGS

### e) Cellule multi-jonction

Les cellules multi-jonction sont composées de différentes couches qui permettent de convertir différentes parties du spectre solaire et ainsi d'obtenir les meilleurs rendements de conversion.

#### ➤ **Avantages**

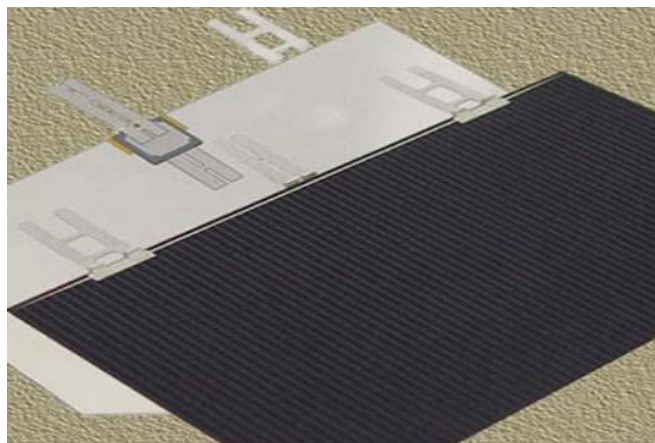
- Rendement inégalé

#### ➤ **Inconvénients**

- Pas ou peu d'applications commerciales

#### ➤ **Rendement**

- Rendement record en laboratoire : environ 40% (sous une concentration de 240 soleils [15]).



**Figure I.10** : cellule multijonction

# CHAPITRE I : Généralité sur le système photovoltaïque

## I.6. Système photovoltaïque (PV)

### I.6.1 Définition d'un système photovoltaïque (PV)

Un système (photovoltaïque) PV est un ensemble d'éléments (constituants) de production d'électricité, en utilisant une source solaire. Ces constituants sont essentiellement le champ PV, le conditionnement de puissance, le système de stockage (dans un certain cas), et la charge (voir figure I. 11).

Le conditionnement de puissance peut comprendre : un régulateur seul, un régulateur avec un convertisseur (DC /DC ou/et DC/ AC) ou un convertisseur seul.

Un exemple d'un système plus détaillé est montré sur la ( Figure I.12 )

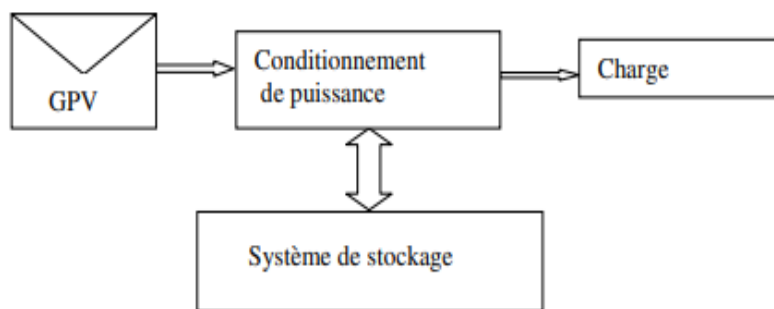


Figure I. 11 : Système photovoltaïque

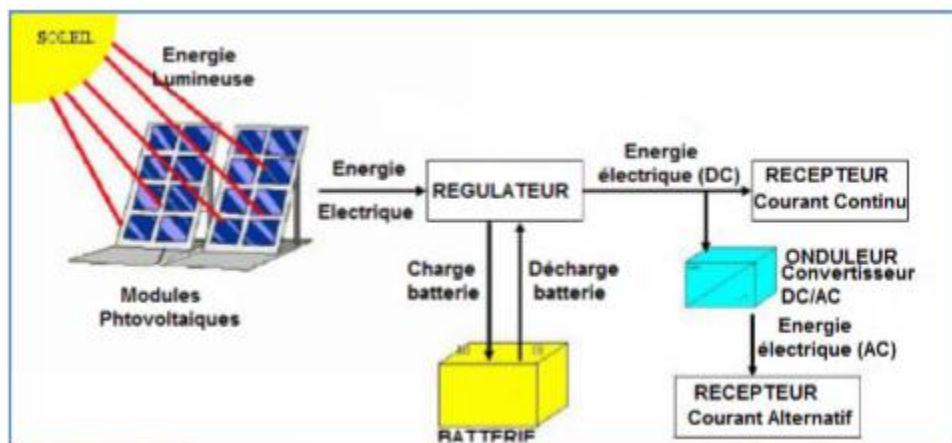


Figure I.12 : Système photovoltaïque plus détaillé

### I.6.2 Classification des systèmes PV

On distingue deux types de systèmes PV :

- Systèmes PV autonomes
- Système à injection au réseau.

#### I.6.2.1 Systèmes autonomes

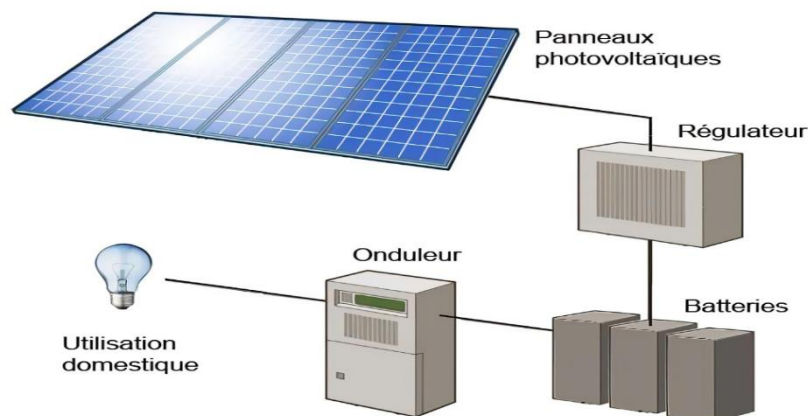
On dit qu'un système PV est autonome si la charge est passive (exemple : lampes, les moteurs, etc.). Le système PV autonome est un système photovoltaïque complètement

## CHAPITRE I : Généralité sur le système photovoltaïque

indépendant d'autres sources d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique (Figure I.13).

Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries ou autres moyens de stockage pour une utilisation durant les périodes de la non disponibilité de l'énergie solaire (par exemple les périodes nocturnes, les périodes non ensoleillées). Les systèmes PV autonomes servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, en îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau (dans certains cas).

En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique. À l'heure actuelle, c'est dans les endroits isolés, loin d'un réseau électrique et où les besoins en énergie sont relativement faibles (généralement moins de 10 kWc) que l'énergie photovoltaïque est la plus concurrentielle.



**Figure I.13 :** Schéma d'un système autonome (hors-réseau).

- **Types de systèmes PV autonomes**

On distingue deux types :

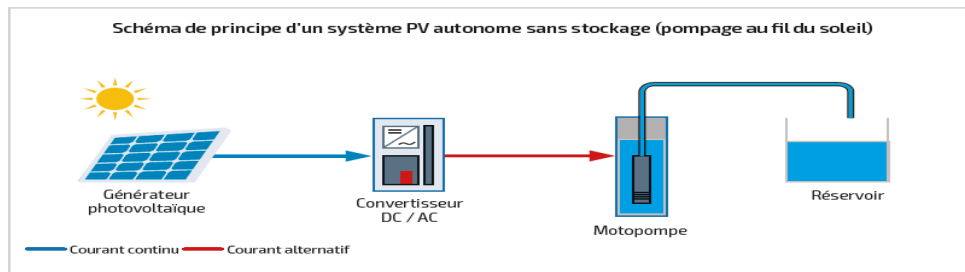
- Les systèmes au fil du soleil
- Les systèmes avec stockage

- a) Les systèmes au fil du soleil :**

Les systèmes au fil du soleil sont des systèmes sans stockage. Ils exploitent directement l'énergie solaire sans aucune source d'appoint. Ces systèmes sont classés, selon la nature de la charge à alimenter, en deux types systèmes à courant continu et systèmes à courant alternatif. L'application la plus connue est le pompage photovoltaïque avec ses deux types : systèmes de pompage PV à courant continu et systèmes à courant alternatif. Pour le deuxième cas on doit ajouter un onduleur.

## CHAPITRE I : Généralité sur le système photovoltaïque

La Figure I.14 montre un exemple d'un système de pompage PV où le conditionneur d'énergie peut être, selon la fonction exigée, un convertisseur DC/DC, un convertisseur DC/AC ou les deux en même temps (les conditionneurs d'énergie seront étudiés aux chapitres qui suivent). Ces systèmes sont simples mais leur inconvénient est la coupure de l'alimentation en absence du soleil. Ces systèmes utilisent, en général, un autre moyen de stockage tel que les réservoirs d'eau pour le pompage PV.



**Figure I.14 : Système de Pompage**

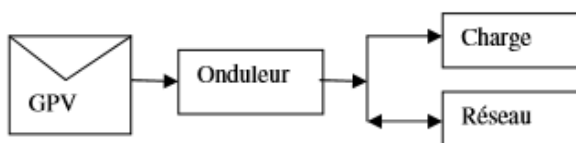
### b) Les systèmes avec stockage

Les systèmes avec stockage sont des systèmes qui contiennent des moyens de stockage. Un système de stockage sert à alimenter les charges durant les périodes ayant un ensoleillement faible (passage des nuages) ou une absence totale de l'ensoleillement (les nuits). Le système de stockage sert à emmagasiner l'énergie durant la présence de l'excès d'énergie photovoltaïque et de la restituer durant les autres périodes d'insuffisance d'énergie. Comme exemple, on peut citer l'alimentation des maisons en électricité dans des sites isolés.

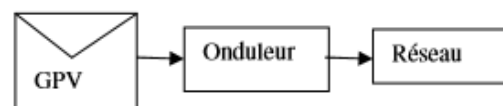
### I.6.2.2. Systèmes PV à injection aux réseaux

- **Définition d'un système PV raccordé au réseau**

Un système PV raccordé au réseau est un système dont la charge est partiellement ou totalement est le réseau électrique. Ç à d. le générateur PV injecte sa puissance à travers un onduleur dans le réseau électrique (Figure I.15 et Figure I.16).



**Figure I.15 : injection partielle**



**Figure I.16 : injection total**

- **Classes des systèmes raccordés aux réseaux :** On a deux classes de systèmes raccordés aux réseaux

## CHAPITRE I : Généralité sur le système photovoltaïque

- Systèmes à grande puissance ou systèmes centralisés (centrale solaire photovoltaïque)
- systèmes à petites puissances ou systèmes décentralisés ; généralement installés chez des particuliers.

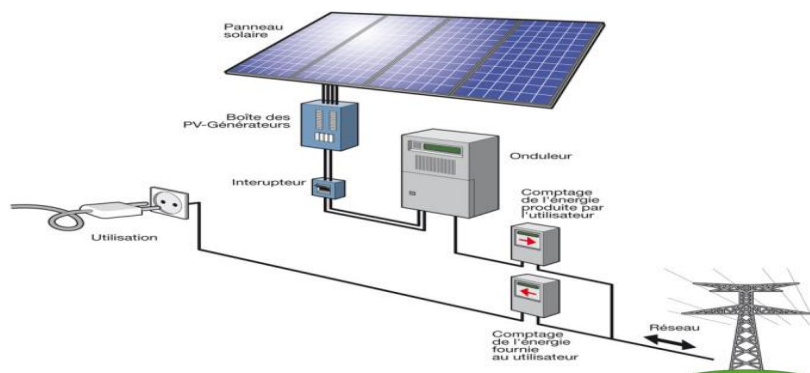
### a) Systèmes à grande puissance

ou systèmes centralisés (centrale solaire photovoltaïque), les systèmes à grandes puissances sont des systèmes PV localisés dans des endroits où l'alimentation est centralisée. Ils sont utilisés pour renforcer le réseau conventionnel durant les périodes de pic de puissances. Ces systèmes nécessitent des espaces très vastes (environ 2 hectares pour un 1MWc).

### b) Systèmes à petite puissance

ou systèmes décentralisés En quantité unitaire, les systèmes décentralisés de petite puissance (inférieur à 100 kWc) sont les plus courants, avec approximativement 80 % des systèmes raccordés au réseau mondial, la majorité étant posé sur des habitations individuelles.

**b.1 Systèmes à Injection du surplus :** Dans cette configuration, le consommateur utilise la puissance fournie par le générateur PV pour satisfaire ses besoins en énergie et dans le cas du surplus, il l'injecte dans le réseau. L'installation du client producteur avec achat des excédents de production doit être équipée de deux compteurs, l'un mesurant l'énergie soutirée au réseau lorsque la consommation excède la production (compteur de soutirage), l'autre mesurant l'énergie injectée dans le réseau (compteur d'injection). A chaque moment, un seul compteur mesure (**Figure I.17**).



**Figure I.17 :** Installation solaire à injection au réseau avec deux compteurs d'énergie

**b.2 Systèmes à injection de la totalité:** Dans ce cas toute la production de la station solaire est injectée dans le réseau. Ces besoins en consommation sont satisfaits par le réseau. Cette configuration est très utilisée dans les pays qui encouragent l'introduction des énergies renouvelables où l'achat du kWh d'énergie renouvelable peut atteindre jusqu'à cinq fois le kWh des énergies fossiles dans certains pays. [16].

## CHAPITRE I : Généralité sur le système photovoltaïque

### I.7 Constitution des champs PV

Le champ PV est la source d'énergie électrique en courant continu. Il est constitué d'un ensemble de modules rangés sous forme de panneaux (voir Figure I.18). Le module est un ensemble de photopiles (cellules) assemblés pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition à la lumière [17].

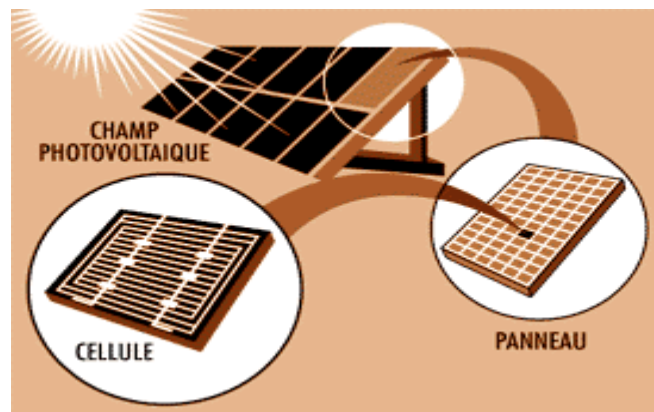


Figure I.18 : Constituants d'un générateur PV

### I.8 Modules PV

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module. Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension.

#### I.8.1 Constituants

Afin de donner au module une certaine protection et rigidité, ses constituants doivent être bien choisis.

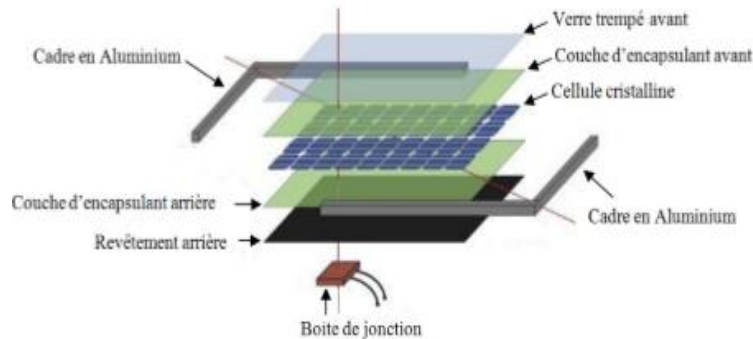
Et pour un bon captage du rayonnement solaire, la réflexion des parties traversées par ce rayonnement soit bien minimisée. La structure est la suivante (figure I.19):

- Cadre en aluminium Le module est généralement entouré d'un cadre rigide en aluminium, comprenant des trous de fixation.
- Verre trempé La surface avant est constituée d'un verre, trempé afin d'augmenter sa résistance aux chocs, d'une épaisseur de plusieurs millimètres. Il assure une stabilité mécanique tout en étant transparent pour la lumière incidente.
- Couches d'encapsulant avant et arrière Le Silicium (cellules) est enrobé dans une résine EVA (éthylène-vinyle- acétate).
- Surface arrière

## CHAPITRE I : Généralité sur le système photovoltaïque

La couche arrière agit comme une barrière contre l'humidité et les autres contraintes. Selon le fabricant, il peut s'agir d'une autre plaque de verre ou d'une feuille de polymère composite. La combinaison de matériaux souvent utilisée est les PVF-polyster-PVF.

Le PVF signifie poly fluorure de vinyle, il a une faible perméabilité aux vapeurs et est très résistant aux intempéries. Il est souvent connu sous son nom de marque Tedlar[18].



**Figure I.19 :** Constituants d'un module photovoltaïque (Si cristallin)

### I.8.2 Fonction

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- ✓ Protection des cellules contre les agents atmosphériques
- ✓ Protection mécanique et support.
- ✓ Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur.

### I.8.3 Caractéristiques d'un module [19].

La figure I.20 et I.21 montre un exemple de caractéristiques d'un module (I-V et P-V) pour une variation d'éclairement de 200 W/m<sup>2</sup> à 1000 W/m<sup>2</sup> avec une température constante 25°C. De cette figure, on remarque que la puissance et le courant du module augmentent avec la croissance de l'éclairement alors que l'augmentation de la tension est relativement faible.

## CHAPITRE I : Généralité sur le système photovoltaïque

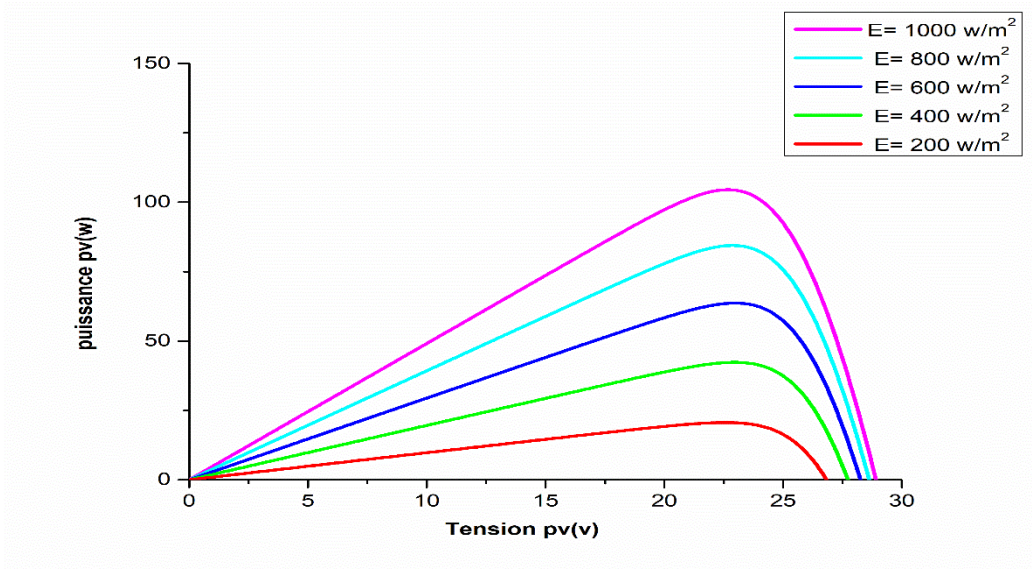


Figure I.20 : Exemple de caractéristiques (P-V) d'un module

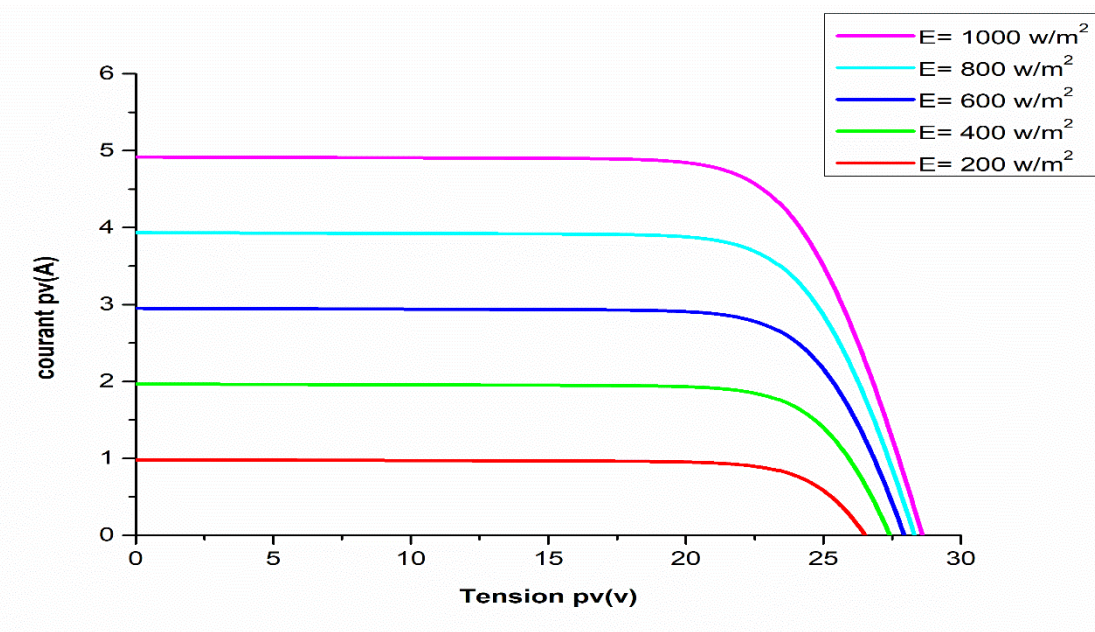


Figure I.21 : Exemple de caractéristiques (I-V) d'un module

Les caractéristiques d'un module peuvent se résumer sur les points suivants :

- **La puissance de crête  $P_c$**  : Puissance électrique maximale que peut fournir le module dans les conditions standards (Température cellule :  $25^{\circ}\text{C}$ , éclairement :  $1000 \text{ W/m}^2$  et air masse
- **La caractéristique I-V** : Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- **Tension à vide,  $V_{co}$**  : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant.
- **Courant de court-circuit,  $I_{cc}$**  : Courant débité par un module en court-circuit.

## CHAPITRE I : Généralité sur le système photovoltaïque

- **Point de fonctionnement optimum, (Um, Im)** : C'est le point sur la caractéristique P-V où
- **La puissance est maximale :  $P_m = U_m * I_m$** . Pour les conditions standards, on parle de la puissance crête.
- **Rendement** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente

$$\eta = \frac{P_m}{E_c * S_{ef}} \quad (\text{I.10})$$

Avec  $E_c$  : l'éclairement incident en ( $W / m^2$ ) et  $S_{ef}$  la surface effective du module

- **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale  $P_m$  et le produit de la tension de circuit ouvert par le courant de court circuit [20] :

$$FF = \frac{P_m}{V_{c0} * I_{cc}} \quad (\text{I.11})$$

### I.8.4 Effet de la température sur une cellule photovoltaïque

Le deuxième paramètre qui influence le profil de la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque est la température de la cellule. Une cellule photovoltaïque convertit une énergie radiative (rayonnement) en énergie électrique avec un rendement compris en 5 % et 16 % selon la technologie. Le reste du rayonnement non-transformé en électricité est convertit en grande partie sous forme de chaleur, la fraction résiduelle étant réfléchi. Ainsi, une cellule photovoltaïque mal ventilée voit sa température monter très rapidement. On observe que la température de la cellule photovoltaïque induit un effet notable sur la tension de celle-ci. Par contre, l'effet de la température sur le courant de la cellule photovoltaïque est négligeable.

Il apparaît que plus la température de la cellule augmente, plus la tension à vide de celle-ci ne diminue. La puissance de la cellule étant égale au produit du courant et de la tension, la même règle s'applique sur la puissance : plus la température de la cellule augmente, plus puissance de celle-ci diminue [21].

## CHAPITRE I : Généralité sur le système photovoltaïque

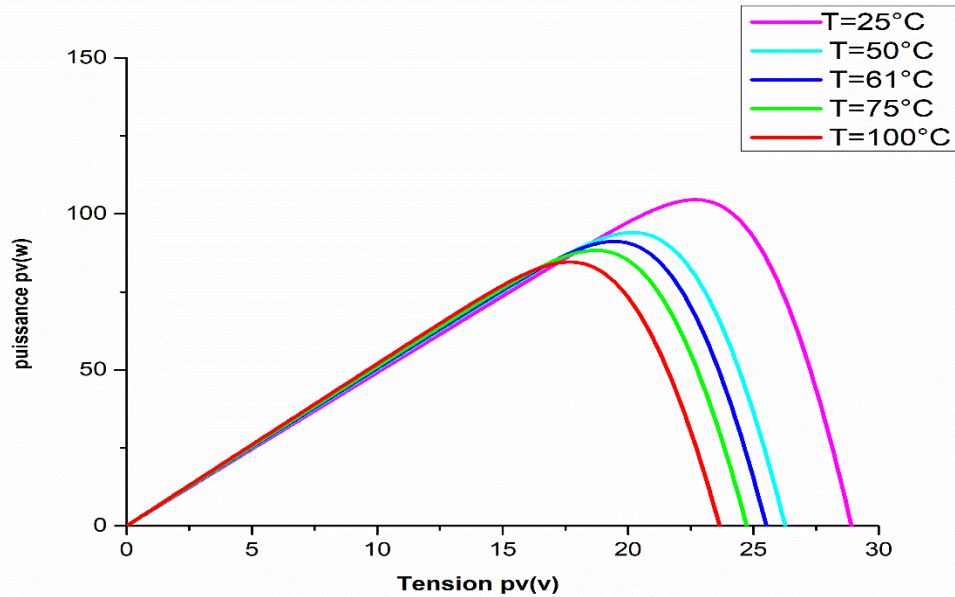


Figure I. 22 : exemple de l'effet de la température sur le de caractéristiques (Pd'un module pv

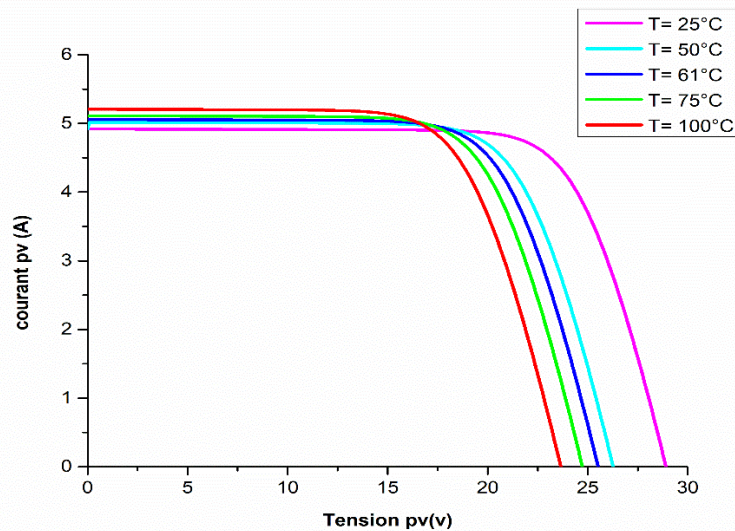


Figure I. 23 : exemple de l'effet de la température sur le de caractéristiques (I-V)d'un module pv

### I.8.5 Connexion des modules

La figure I.24 montre les connexions possibles de deux modules.

a) **Connexion des modules en série:** Les modules identiques peuvent être connectés en série. Dans ce cas la tension est égale à la tension du module fois le nombre de modules en série et le courant reste le même.

## CHAPITRE I : Généralité sur le système photovoltaïque

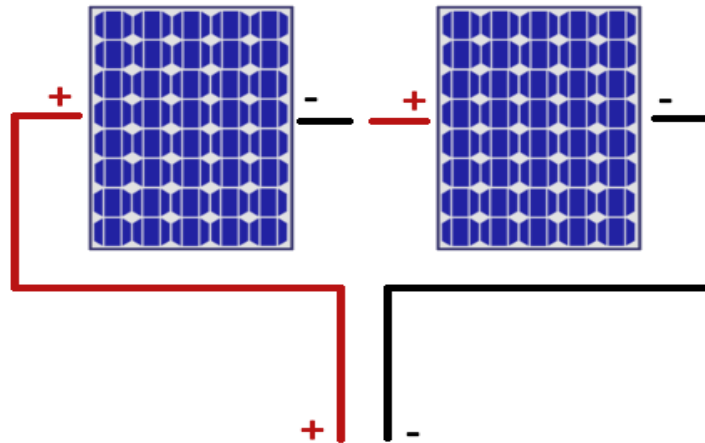


Figure I.24 : Connexion des modules en série

b) **Connexion des modules en parallèle** : Les modules identiques peuvent être connectés en parallèle. Dans ce cas la tension est la même et le courant est égale au nombre de branches parallèles fois le courant d'une branche.

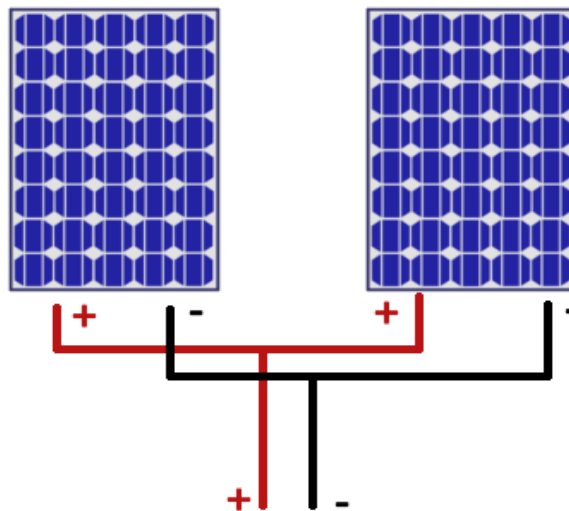


Figure I.25 : Connexion des modules en parallèle

### I.9. Système de protection

Pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules commerciaux afin d'éviter des pannes destructrices liées à l'association de cellules en série et de panneaux en parallèles. Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés dans les installations actuelles.

# CHAPITRE I : Généralité sur le système photovoltaïque

## I.9.1. La Diode By-pass

La diode de by-pass est connectée en antiparallèle avec un groupe de cellules pour protéger les cellules les plus faibles contre la polarisation inverse, cette diode sera conductrice dans le cas de l'ombrage d'une ou plusieurs cellules dans une branche et bloquée dans le cas normal, et permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass) et éviter les points chauds [22].



Figure I.26: diode by- pass

## I.9.2 La Diode Anti-Retour

La tension produite par chaque string peut être différente. Lors de la mise en parallèle de ces strings pour former un champ, le string avec la tension la plus faible peut absorber un courant inverse provenant des autres strings. Cela conduit donc à une baisse de production et les modules du string traversés par le courant inverse pourraient être également susceptibles de la défaillance. Pour éviter ces courants inverses, une diode anti-retour est placée au bout de chaque string [23].

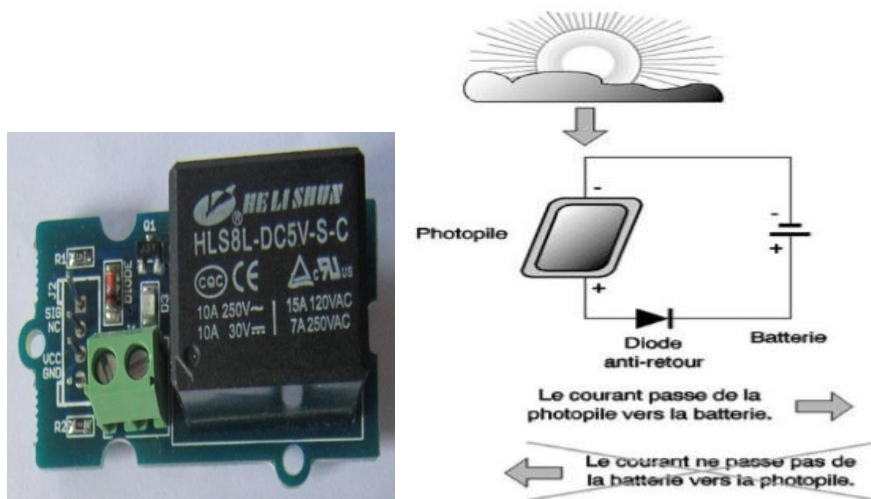


Figure I.27 : La Diode Anti-Retour

## CHAPITRE I : Généralité sur le système photovoltaïque

### I.10. Système de stockage

Les photo-générateurs ne produisent de l'énergie que s'ils sont exposés à la lumière. L'énergie produite par les panneaux photovoltaïques est stockée dans les batteries solaires. Ces batteries permettent ainsi d'assurer l'alimentation électrique pour une durée relativement longue (jour, nuit, ciel couvert).

Les batteries sont, d'habitude, du type plomb – acide. Les batteries nickel – cadmium sont rarement utilisées. Il y a d'autres formes de stockage, mais peu utilisées, comme le pompage de l'eau, les volants d'inertie et le stockage de l'hydrogène stockage électrique caractérisé par :

- Sa capacité en Ah (1Ah=3600 Coulomb) ou en Wh (1Wh = 3600 J) qui représente la quantité de courant qui peut être extraite d'une électrode via l'électrolyte et matériaux actifs des électrodes sur une charge.
- Le niveau de charge des batteries solaires ne doit être ni trop bas (pas en dessous de 40%) ni trop haut (ne pas dépasser 95%). Dans les deux cas, la batterie se détériore et sa durée de vie baisse beaucoup.
- Il est risqué de brancher une batterie solaire directement sur un panneau solaire, (d'endommager la batterie) si son niveau de charge dépasse les 90%. C'est pour cela qu'il est vivement recommandé d'installer un régulateur solaire entre le panneau et les batteries[24].



**Figure I.28** : la batterie PV

### I.11 Système de régulation

Les systèmes de régulation de charge (ou contrôleur de charge) sont des éléments d'un système photovoltaïque qui ont pour but d'éviter les surcharges ou les décharges trop profondes des batteries afin d'assurer une meilleure durée de vie. Son rôle principal est de limiter la charge de la batterie par le module solaire quand la batterie est complètement

## CHAPITRE I : Généralité sur le système photovoltaïque

chargée ; Et de recharger la batterie durant les phases d'ensoleillement et de non utilisation.

Quelques fonctionnalités des régulateurs solaires sont :

- Affichage du niveau de charge.
- Affichage des incidents (surcharge, décharge profonde, court-circuit)
- Protection contre les courts-circuits.
- Protection des panneaux solaires photovoltaïques (contre les retours de charges électriques).
- Protection thermique [25].



**Figure I.29** : le régulateur de la charge

### I.11. Système de conversion

Les convertisseurs sont des appareils servant à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant soit à une tension continue différente, soit à une tension alternative [26].

#### I.11.1. Convertisseurs DC/DC

Ce Type de composant est utilisé pour transformer la tension de la source (panneau ou batterie) en une tension DC différente pour alimenter un appareil spécial : un chargeur pour téléphone portable, une radio, un ordinateur portable ...etc.

Deux types sont possibles : les convertisseurs « vers le haut » pour augmenter la tension et les convertisseurs « vers le bas » pour abaisser la tension.

#### I.11.2. Convertisseurs DC/AC (onduleur)

Les onduleurs photovoltaïques sont des structures en pont constituées le plus souvent d'interrupteurs électroniques tels que les transistors de puissance ou thyristors. Par un jeu de commutations commandées de manière appropriée (généralement une modulation de largeur d'impulsion), on modélise la source afin d'obtenir un signal alternatif de fréquence désirée.

## CHAPITRE I : Généralité sur le système photovoltaïque

### I.11.3. Types d'onduleurs en fonction de l'installation PV

Les onduleurs connectés au réseau peuvent être de type : onduleur centralisé, onduleur String ou onduleur modules. L'utilisation de chaque une dépend des paramètres d'installation et de branchement des modules photovoltaïques : branchement en séries ou en parallèle, degrés d'inclinaison différents entre les modules, tension de sortie de l'installation, flux lumineux général, écart de puissance entre les modules [28].

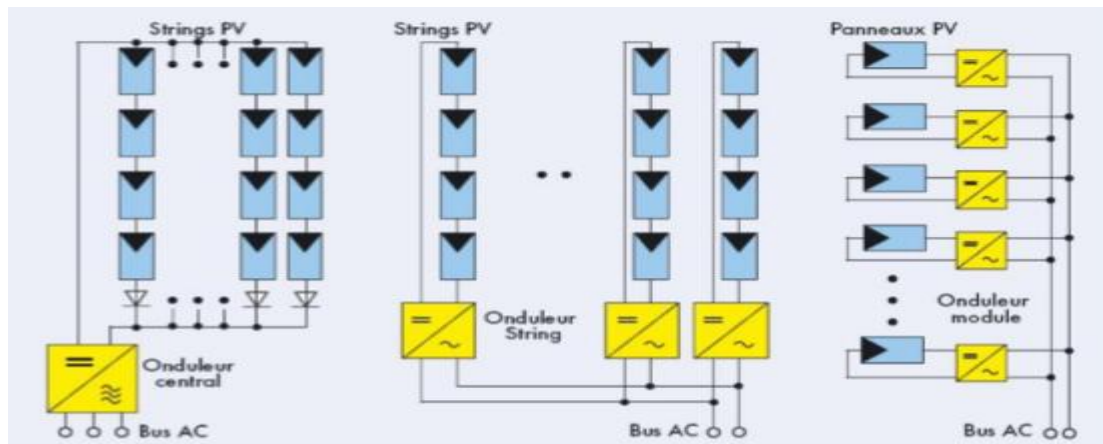


Figure I.30 : Type d'onduleurs existants

a) **Onduleurs modulaires** Ce type d'onduleur vient se connecter directement à un module au niveau du boîtier de jonction (figure I.31). Les modules ainsi équipés sont connectés au niveau AC en parallèle.

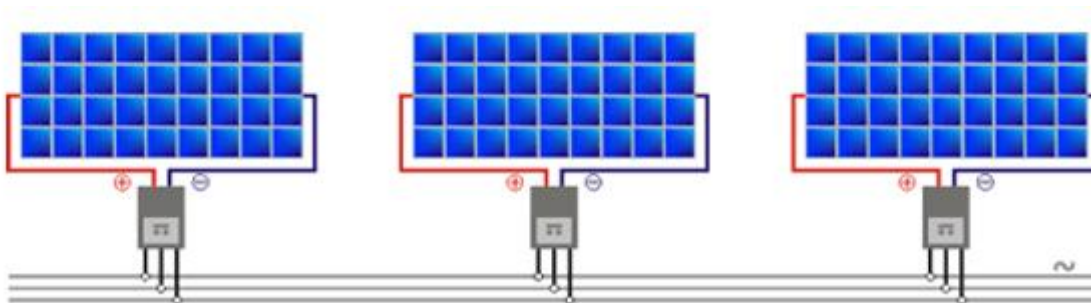


Figure I.31 : Onduleur modulaire (un onduleur par panneau)

b) **Onduleurs centralisés** Un onduleur centralisé de forte puissance transforme l'ensemble du courant continu produit par un champ de cellules solaires en courant alternatif (Figure I.32). Le champ de cellules solaires est en règle générale constitué de plusieurs rangées connectées en parallèle. Chaque rangée est elle-même constituée de plusieurs modules solaires connectés en série.

## CHAPITRE I : Généralité sur le système photovoltaïque

Pour éviter les pertes dans les câbles et obtenir un rendement élevé, on connecte le plus possible de modules en série.

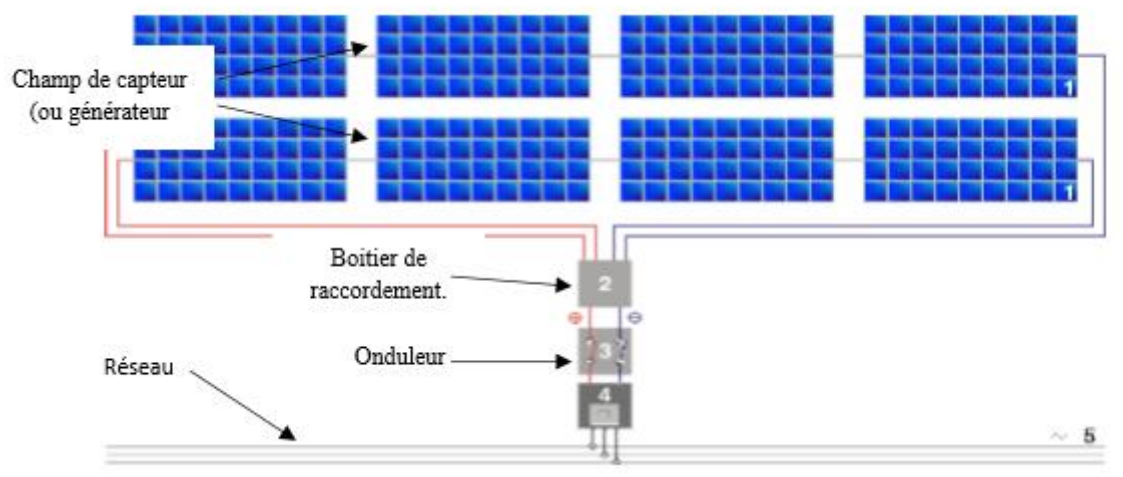
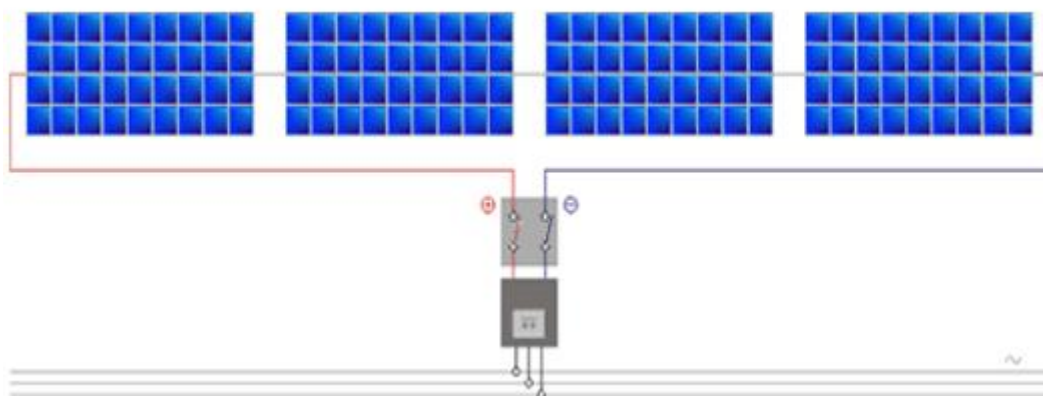


Figure I.32 : Onduleur central

C) **Les onduleurs de string** : L'onduleur String est le plus utilisé Le plus souvent, huit (ou plus) de modules solaires sont connectés en série (voir figure I.33). Comme une seule connexion série est nécessaire, les coûts d'installation sont réduits. Il est important de noter qu'en cas d'ombrage partiel des modules solaires, il n'y a pas de perte, l'emploi de diodes de by-pass est fortement recommandé. Ces onduleurs qui peuvent parfois être installés en extérieur existent avec ou sans transformateur intégré. Les modèles sans transformateur ont de plus hautes efficacités de conversion, les meilleurs modèles atteignant 98% contre 96% pour les modèles avec transfo, la figure suivant montre un onduleur par string (rangée de modules en série)[29].



, Figure I.33 : Onduleur string

## CHAPITRE I : Généralité sur le système photovoltaïque

### I.12. Avantages et inconvénients d'une installation photovoltaïque

Parmi les avantages que nous trouvons lors de l'installation d'un système photovoltaïque

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage Simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Méga Watt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions

**Concernant les inconvénients, nous avons :**

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 %
- (Soit entre 10 et 15 MW/km<sup>2</sup> pour le BENELUX) avec une limite théorique. Pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
  - Tributaire des conditions météorologiques.
  - Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est Nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux Problèmes. Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur [30].

## **CHAPITRE I : Généralité sur le système photovoltaïque**

### **I.13. Conclusion**

Dans ce chapitre, On a étudié le principe de l'effet photovoltaïque et nous sommes concentrés dans notre étude sur le GPV, en particulier la cellule photovoltaïque car c'est le composant principal du générateur, où nous avons discuté de leurs types, principe de fonctionnement, conception et caractéristiques électroniques, nous avons présenté aussi le système de protection du générateur et le système de régulation et de stockage, ce qui permet d'introduire a la modélisation de ce système, chose qu'on va présenter dans le chapitre II.

### II.1. Introduction

La modélisation est une étape fondamentale qui permet d'introduire un certain nombre de modèles puis d'évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi que les paramètres constitutants. Dans un système énergétique photovoltaïque, on espère toujours travailler au voisinage du point de puissance maximale MPP. La modélisation passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents, en prenant plus ou moins de détails ainsi que permet d'obtenir la caractéristique I-V en fonction de deux entrées qui sont la température (T) et l'éclairement (E) reçu par la cellule PV.

La simulation de la performance de système permet de tracer toutes les étapes de la conversion d'énergie et d'identifier en détail les pertes à travers le système, toutes les opérations de simulation sont faites par le logiciel MATLAB.

Dans ce chapitre, on présentera les différents circuits équivalents d'une cellule solaire, en partant du plus simple et classique jusqu'à celui de Bishop qui a été retenu pour son efficacité de simuler le comportement de ce système ou ces cellules en fonctionnement normal [31].

### II.2. Les modèles de la cellule PV

Une cellule solaire photovoltaïque est une diode électronique PN de grande surface qui, exposée à la lumière (photons), génère une tension électrique (volts). Le comportement des cellules photovoltaïques peut être modélisé avec un circuit équivalent. Ce circuit peut être utilisé pour une cellule individuelle, pour un module se composant de plusieurs cellules. Nous allons modéliser et simuler la cellule photovoltaïque, qui nous permettra de caractériser les comportements du GPV dans les conditions souhaitées.

Il existe plusieurs modèles qui ont été proposés pour représenter une cellule PV, on présentera quatre modèles :

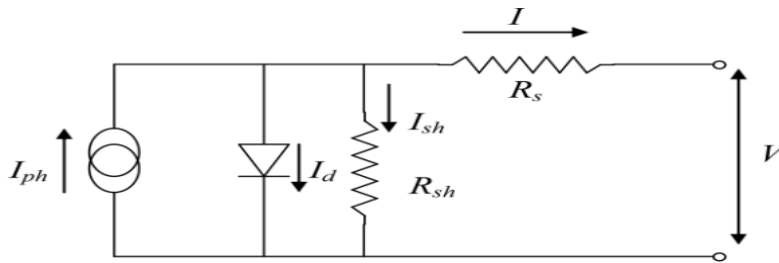
- Modèle à une diode et à deux diodes
- Modèle explicite
- Modèle bishop

## CHAPITRE II : MODELISATION ET SIMULATION D'UN CHAMP PV

### II.2.1. Modèle à une diode

Une cellule photovoltaïque idéale peut être décrite de manière simple comme une source

idéale de courant qui produit un courant proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode (voir figure II.1). En addition au modèle idéal, le modèle réel tient compte des propriétés résistives de la cellule qui sont modélisées par une résistance série mais aussi des courants de fuites modélisés par une résistance shunt.



**Figure II. 1:** schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff :

$$I = I_{PH} - I_d - I_{SH} \quad (\text{II.1})$$

$I_{ph}$  : Photo-courant [A], proportionnel à l'éclairement E, avec correction selon T :

$$I_{ph} = \frac{E}{E_{STC}} [I_{ph,STC} + K_i(T - T_{STC})] \quad (\text{II.2})$$

Avec :

**E et ESTC** : éclairement effective et de référence [ $W/m^2$ ]

**T et TSTC** : Température effective et de référence [K]

**$I_{ph, STC}$  ( $I_{cc}$ )** : Le courant photonique sous condition de référence [A]

**$K_i$**  : Coefficient de température de  $I_{ph}$  [A/K], (habituellement donné par le fabricant sur la datasheet.

Le courant de jonction  $I_d$  (courant traversant la diode) est donné par :

$$I_d = I_0 \left( e^{\frac{q(v+R_s I)}{a.k.T}} - 1 \right) \quad (\text{II.3})$$

Le courant de saturation inverse de la diode en [A], est supposé variable avec la température selon l'expression [32].

## CHAPITRE II : MODELISATION ET SIMULATION D'UN CHAMP PV

$$I_0 = \left(\frac{T}{T_{STC}}\right)^3 \cdot \exp\left[\left(\frac{q \cdot E_g}{a \cdot T \cdot K}\right) \cdot \left(\frac{1}{T_{STC}}\right) - \left(\frac{1}{T}\right)\right]. \quad (\text{II.4})$$

Où : E

g est énergie de Gap de la cellule. ( Eg de : Silicium cristallin = 1.12 eV, Silicium amorphe = 1,7 eV, CIS = 1.03 eV et CdTe = 1.5 eV).

Le courant dérivé par la résistance shunt est] :

$$I_{SH} = \frac{V+IR_S}{R_{SH}} \quad (\text{II.5})$$

A partir de l'équation précédente, on obtient l'expression de courant I :

$$I = I_{PH} - I_0 \left( e^{\frac{V+R_S I}{V_t}} - 1 \right) - \frac{V+IR_S}{R_{SH}} \quad (\text{II.6})$$

$$V_t = \frac{a \cdot k \cdot T}{q} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

**I** : Courant fourni par la cellule [A]

**V** : Tension à la borne de la cellule [V]

**V<sub>t</sub>** : Tension thermique de la diode (V) [22]. Elle dépend de :

**q** : La charge électrique élémentaire 1.602 10<sup>-19</sup> Coulomb [C]

**K** : Constante de Boltzmann = 1.38 10<sup>-23</sup> [J/K]

**T** : Température de la cellule [K]

**a** : Le facteur d'idéalité de diode (1 à 2)

Pour un module :  $V_t = \frac{n_s \cdot a \cdot k \cdot T K}{q}$

**Rs** : Résistance série (Ω)

**Rsh** : Résistance shunts (ou parallèle) (Ω)

La résistance série et parallèle d'un module sont :

**Rs = ns. Rs,c / Rsh = ns. Rsh,c**

Avec **n<sub>s</sub>**: le nombre de cellule connectée en série.

Les conditions de référence E et Eref : sont les conditions extérieures pour lesquelles sont

spécifiées les données de base utilisées pour l'établissement du modèle (Vco, Ico, Vmpp,

Impp),

## CHAPITRE II : MODELISATION ET SIMULATION D'UN CHAMP PV

se sont, soient les spécifications du fabricant, toujours données aux STC (Standard Test Conditions, 1000 W/m<sup>2</sup>, 25°C, spectre AM1.5), soient des valeurs issues d'une mesure du module .

### II.2.2. Modèle à deux diodes

Dans ce modèle une diode supplémentaire est mise en parallèle au circuit du modèle simple d'une diode (figure II.2) pour représenter les phénomènes de polarisation de la jonction P-N. Ces diodes symbolisent la recombinaison des porteurs minoritaires, d'une part en surface du matériau et d'autre part dans le volume du matériau [32].

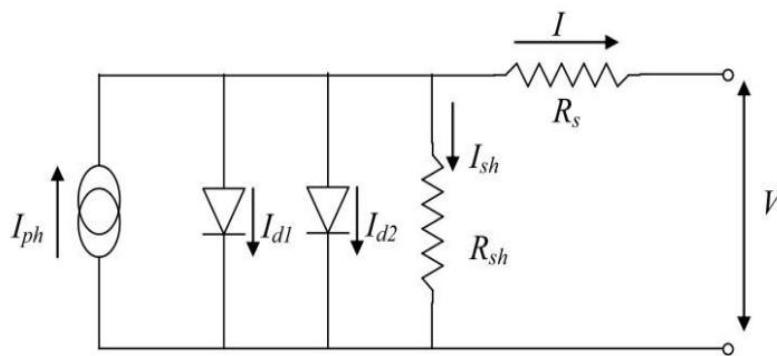


Figure II. 2 : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes

Ce modèle est plus exact que le modèle simple d'une diode (cette diode est incluse pour fournir une courbe caractéristique I-V bien plus précise), mais en raison de la difficulté de la résolution de l'équation du courant, le modèle simple d'une diode est préféré, Par la loi de

**I<sub>ph</sub>** : Courant photonique

**I<sub>d1</sub>** : Courant de diode 1

**I<sub>d2</sub>** : Courant de diode 2

Le courant délivré à la charge sous une tension V est donné par la relation

$$I = I_{PH} - I_{01} \left( \exp \left( \frac{q(V+R_S I)}{a_1 k.T} \right) - 1 \right) - \left( I_{02} \left( \frac{q(V+R_S I)}{a_2 k.T} \right) - 1 \right) - \frac{V+I R_S}{R_{SH}} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

**I<sub>01</sub>** : Courant d'obscurité de la première diode

## CHAPITRE II : MODELISATION ET SIMULATION D'UN CHAMP PV

$I_{02}$ : Courant d'obscurité de la deuxième diode

$a_2$ : Coefficient d'idéalité de la diode D1

$a_2$ : Coefficient d'idéalité de la diode D2

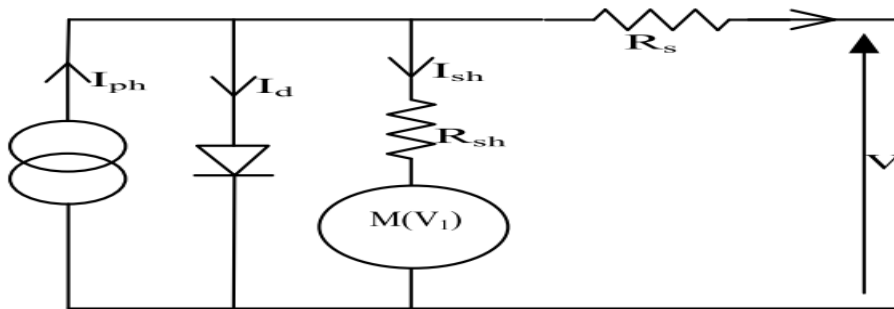
$I_{ph}$  : Courant photonique

$R_s$  : La résistance série

$R_{sh}$  : La résistance shunt

### II.2.3 Modèle de Bishop

L'effet d'avalanche de la cellule est pris en considération dans le modèle de Bishop en ajoutant au modèle à une diode un multiplicateur non linéaire  $M(V_1)$  en série avec la résistance shunt, comme on peut le voir dans la figure II.3.



**Figure II. 3** : schéma équivalent d'une cellule PV Modèle de Bishop

Ce multiplicateur correspond au dernier terme de l'équation qui donne la relation entre le courant ( $I$ ) et la tension ( $V$ ) d'une cellule PV [33].

$$I = I_{PH} - I_0 \left( e^{\frac{V+IR_S}{V_t}} - 1 \right) - \frac{V+IR_S}{R_{SH}} \left[ 1 + \underbrace{\left( 1 - \frac{V+R_S I}{V_b} \right)^{-n}}_{M(v)} K \right] \quad (\text{II.9})$$

Avec :

$K$  : Coefficient de réglage de Bishop (3.4 à 4)

$n$  : Coefficient de réglage de Bishop ( $\sim 0.1$ )

$V_b$  : Tension de claquage de la cellule (-10 V à -30 V)

### II.2.4 Modèle explicite

## CHAPITRE II : MODELISATION ET SIMULATION D'UN CHAMP PV

Ce modèle a besoin de quatre paramètres d'entrées qui peuvent être facilement trouvés dans

les datasheets des constructeurs, le courant du court-circuit  $I_{cc}$ , tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , le courant et la tension maximaux de fonctionnement  $I_{mpp}$  et  $V_{mpp}$ .

Ce modèle a été développé par Borowy et Salameh en (1996). La relation entre le courant et la tension aux bornes de la charge est donnée par :

$$I = I_{CC} \left( 1 - C_1 \left( \text{EXP} \left( \frac{V}{C_2 \cdot V_{CO}} \right) \right) - 1 \right) \quad (\text{II.10})$$

Les paramètres  $C_1$  et  $C_2$  sont comme suit [42]

$$C_1 = \left( 1 - \frac{I_{MPP}}{I_{CC}} \right) \exp \left( \frac{-V_{mpp}}{C_2 \cdot V_{CO}} \right) \quad (\text{II.11})$$

$$C_2 = \frac{\frac{V_{MPP}}{V_{CO}}}{I_n \left( 1 - \frac{I_{MPP}}{I_{CC}} \right)} \quad (\text{II.12})$$

### II.3. Simulation du module pv

Dans cette partie, nous avons procédé à la mise en œuvre de deux modèles du module PV sous Matlab-Simulink (modèle à une diode et modèle bishop). En effet, le modèle simple, peut simuler le comportement de la cellule PV en fonctionnement sans défaut, par-ce-que là on n'a besoin que de la caractéristique directe de la cellule PV, alors que le modèle de Bishop peut être utilisé afin de décrire la cellule en fonctionnement dans le régime inverse, un nouveau terme ajouter par Bishop qui rend le modèle de la cellule PV plus proche à ça réalité, c'est l'effet d'avalanche. La présence d'un défaut dans une cellule PV parmi d'autre pousse cette dernière à fonctionner dans le régime inverse.

Plusieurs études dans la littérature ont utilisé le modèle de Bishop, pour simuler le fonctionnement de la cellule en régime inverse

Le module qui est utilisé comme modèle de simulation est de type : SCHOTT solar ASE - 100-GT -FT/MC, constitué de 48 cellules polycristallin connectées en série et fournit 105W de puissance maximale nominale, les paramètres utilisées pour la simulation de ce module sont données sur le tableau II.1 [34].

## CHAPITRE II : MODELISATION ET SIMULATION D'UN CHAMP PV

Les paramètres qu'on a besoin pour la simulation de ce module sont donnés par le tableau II.1

Paramètres	Valeurs
Résistance série $R_s$ ( $\Omega$ )	0.010
Résistance shunt $R_{sh}$ ( $\Omega$ )	82
Courant de court-circuit $I_{cc}$ (A)	4.92
facteur d'idéalité	1.04
Coefficient de température $K_i$ (%)	0.078
Nombre de cellules en série	48

### II.3.1. Simulation du modèle a une diode

Pour simuler ce modèle, nous utilisons les données électriques du module indiqués dans le tableau (I.1) sur notre modèle en schéma bloc de la Figure (II.4) et on discute les résultats de l'effet des différents paramètres sur les deux caractéristiques (I-V) et (P-V) de notre module PV



**Figure II. 4** : Simulation du modèle à une diode

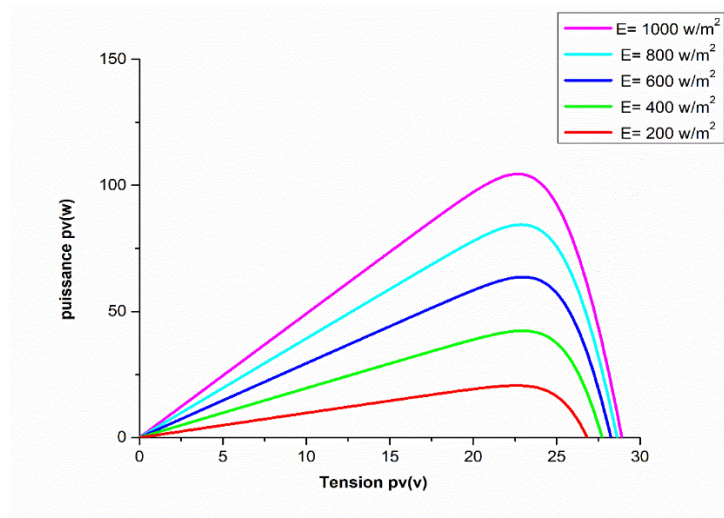
### III.3.1.1. Effet de l'éclairement

Le niveau d'éclairement correspond à l'intensité de la lumière incidente perpendiculairement à la surface de la cellule photovoltaïque. C'est la puissance, mesurée en  $W/m^2$ . Nous utiliserons  $E$  pour représenter le niveau d'éclairage de module.

Le courant électrique délivré par la cellule dépend en grande partie du niveau de luminosité. Nous avons découvert par des expériences que le courant de court-circuit est proportionnel à l'éclairement. Quant à la tension, ce niveau de contraste est peu sensible.

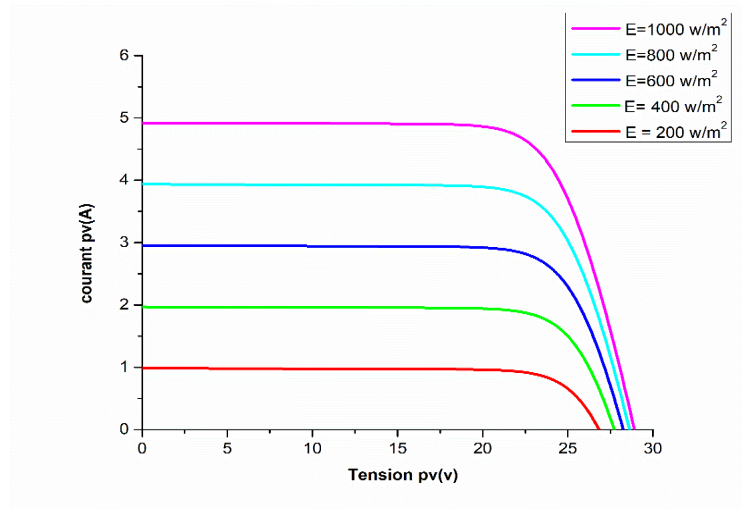
Au cours de la journée, l'intensité lumineuse dans la panneau variera entre  $0 W/m^2$  et  $1000 W/m^2$ . IL est donc important de connaître l'évolution des caractéristiques courant tension et puissance-tension en fonction du niveau d'éclairement.

Les simulations faites permettent d'obtenir les courbes P-V et I-V du champ PV pour différents éclairagements pour ce modèle où le modèle bishop qu'on verra plus loin. Les **Figures II.5** et **II.6** illustrent l'évolution de la puissance et le courant en fonction de la tension pour différentes valeurs de l'ensoleillement à une température  $T = 25^\circ C$  respectivement.



**Figure II .5** : Résultats de de simulation des caractéristiques (P-V) pour différents éclairagements et une température  $T = 25^\circ C$

## CHAPITRE II : MODELISATION ET SIMULATION D'UN CHAMP PV



**Figure II. 6** : Résultats de simulation de la caractéristique (I-V) pour différents éclairements et une température  $T = 25^{\circ}C$

On observe que lorsque  $G = 200 W/m^2, 400 W/m^2, 600 W/m^2, 800 W/m^2$  et  $1000 W/m^2$ , La puissance maximale du champ PV croit avec l'ensoleillement respectivement. IL en est de même pour le courant qui croit avec l'éclairement.

Nous remarquons sur la figure II.6, lorsque nous divisons le niveau de l'éclairement par 2 (de  $800 W/m^2$  à  $400 W/m^2$  par exemple) que le courant de court-circuit  $I_{cc}$  est également divisé par 2 (de 3.8 A à 1.9A). La tension du circuit  $V_{co}$  chute de 6 % environs.

### III.3.1.2 Effet de la température

La température est un paramètre qui affecte les courbes caractéristiques courant-tension et puissance-tension d'une cellule photovoltaïque. Les cellules photovoltaïques convertissent l'énergie de rayonnement en énergie électrique avec un rendement compris entre 5% et 20%, selon la technologie. La majeure partie du rayonnement restant vont se convertir en chaleur et le reste se réfléchis. Par conséquent, la température des cellules photovoltaïques mal ventilées augmente très rapidement.

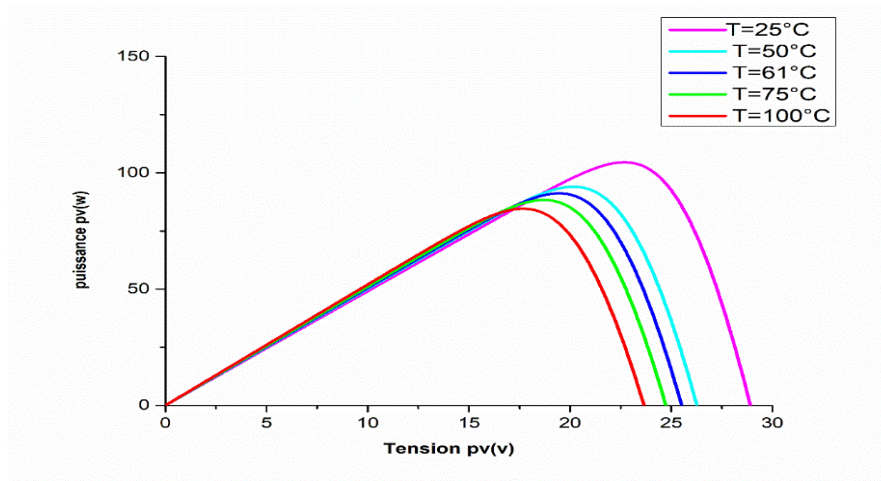
Étant donné que les cellules photovoltaïques sont destinées à être utilisées à l'extérieur, elles résisteront au froid intense des premiers matins d'hiver et aux étés chauds.

Par conséquent, il est important de comprendre leurs caractéristiques électrique sur une large place de températures.

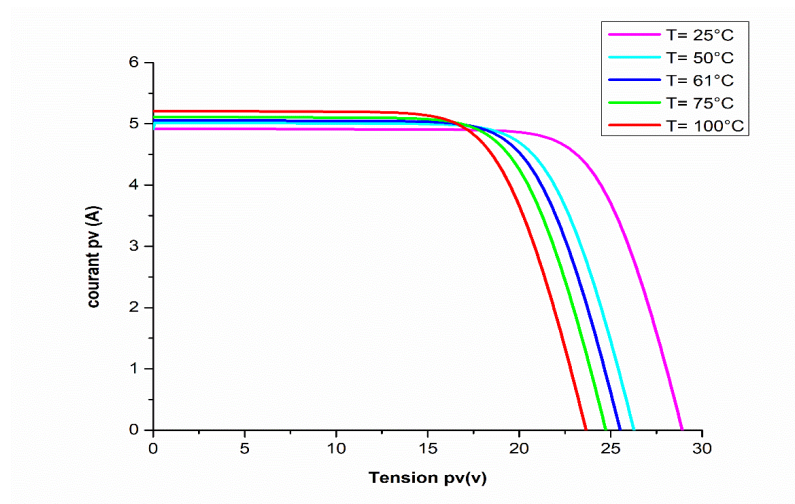
## CHAPITRE II : MODELISATION ET SIMULATION D'UN CHAMP PV

Pour voir l'influence de la température nous avons tracé les courbes P-Vet I-V du module PV pour une irradiation  $G= 1000 \text{ W/m}^2$  et des températures différentes. Elles sont présentées sur la figures II.7 et II.8.

On observe que lorsque  $T= 25^\circ\text{C}$ ,  $50^\circ\text{C}$ ,  $61^\circ\text{C}$ ,  $75^\circ\text{C}$  et  $100^\circ\text{C}$  la tension décroît lorsque la température augmente. IL en est de même pour la puissance maximale qui décroît avec la température et lorsque  $T = 25^\circ\text{C}$ , nous remarquons que la puissance maximale du module PV est la plus importante.



**Figure II .7 :** Résultats de simulation de la caractéristique (p-v) pour différents température et éclairements  $E = 1000 \text{ w/m}^2$



**Figure II.8:** Résultats de simulation de la caractéristique (I-V) pour différentes températures et un éclairement  $E = 1000 \text{ W/m}^2$ .

## CHAPITRE II : MODELISATION ET SIMULATION D'UN CHAMP PV

### II.3.2. SIMULATION DE MODELE BISHOP

Nous avons présenté précédemment le modèle de Bishop qui nous permet d'obtenir la caractéristique (I-V) d'une cellule PV. La figure II.9 montre le schéma bloc de simulation sous Matlab/Simulink.

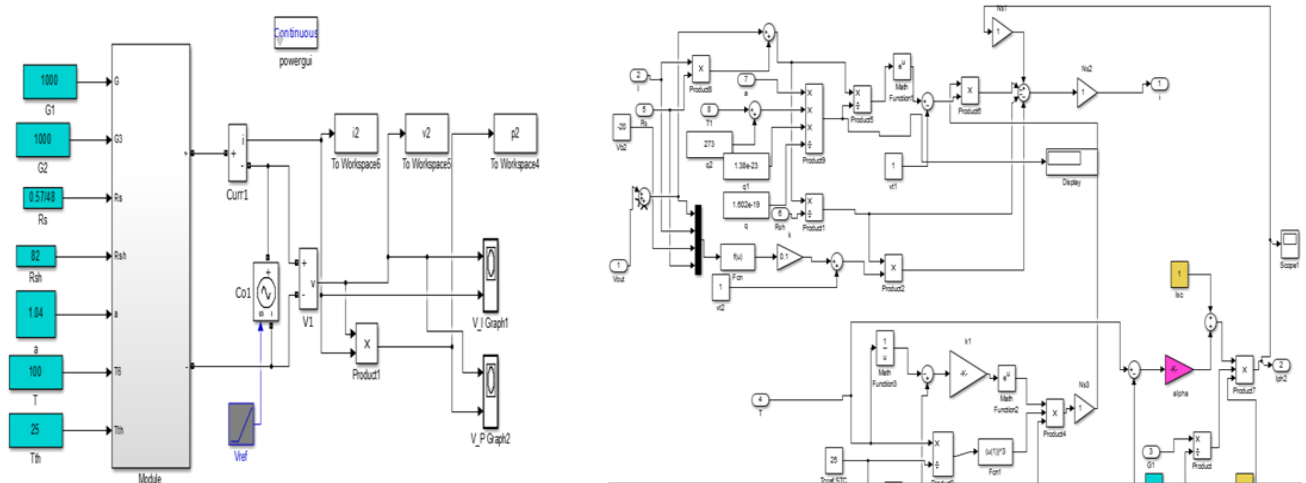
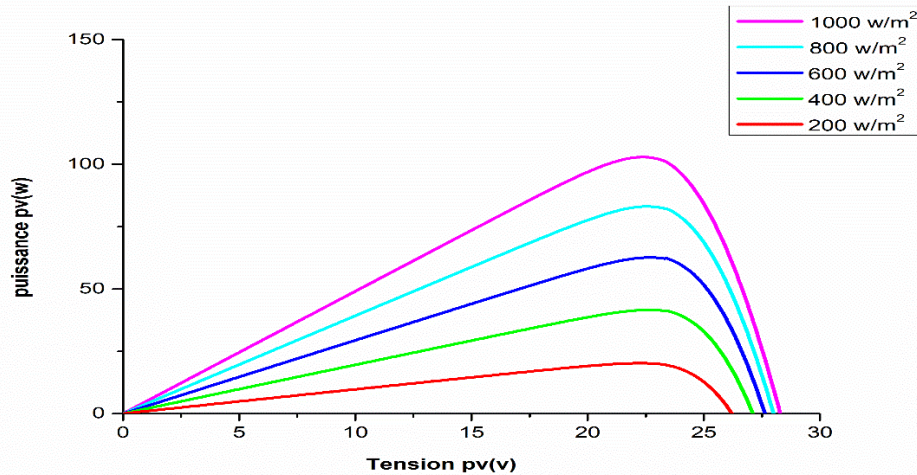


Figure II.9 : Simulation du modèle bishop

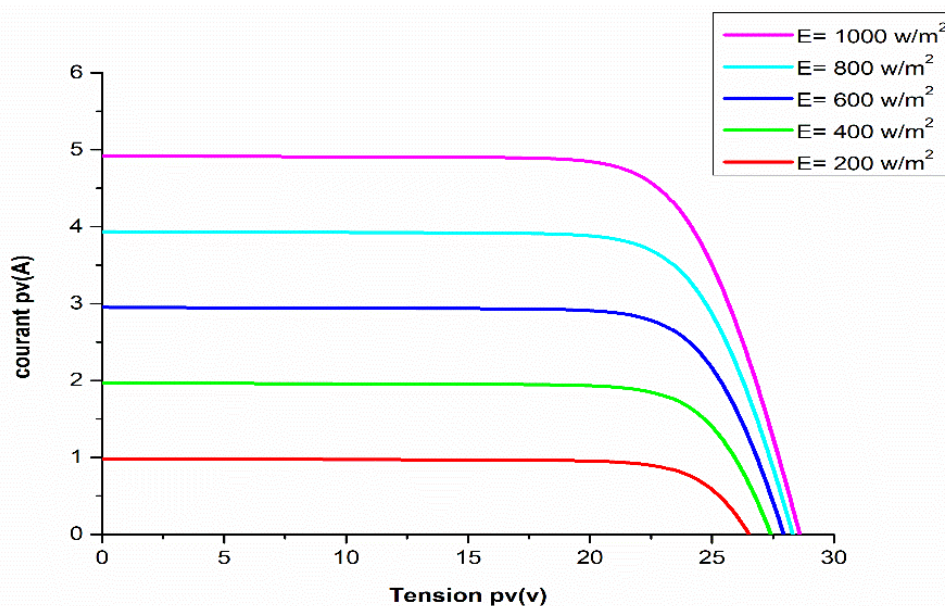
#### III.3.2.1 Effet de l'éclairement

De même que le modèle à une diode les résultats de simulation des caractéristiques puissance-tension (P-V) et courant-tension (I-V) pour différents éclairement sont représentés par les figures II.10 et II.11. On remarque que la valeur du courant et la puissance est proportionnelle à l'intensité du rayonnement, alors que la tension diminue légèrement à faible éclairement.

## CHAPITRE II : MODELISATION ET SIMULATION D'UN CHAMP PV



**Figure II.10** : Résultats de simulations de la caractéristique (P –V) pour différents éclairements et une température  $T = 25^{\circ}\text{C}$

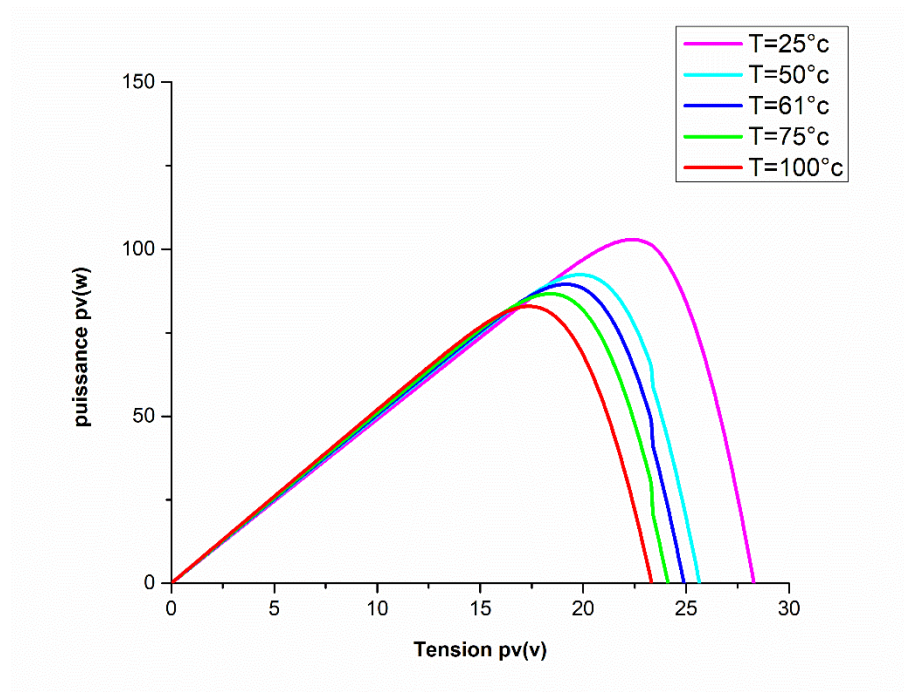


**Figure II.11** : Résultats de simulation de la caractéristique (I-V) pour différents éclairements et une température  $T = 25^{\circ}\text{C}$

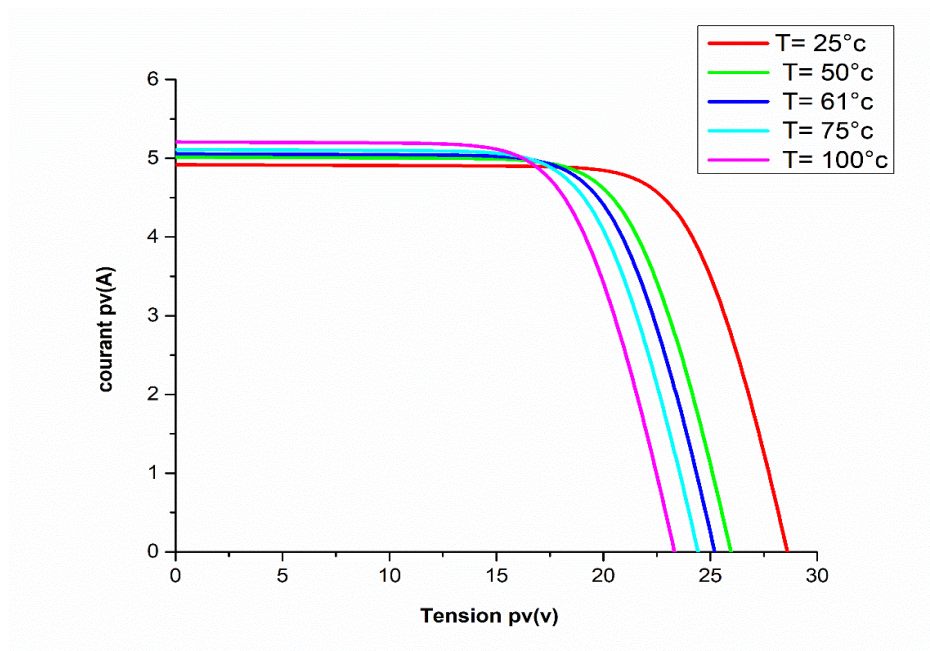
### III.3.2.2 Effet de la température

Les résultats de simulation des caractéristiques puissance-tension (P-V) et courant-tension (I-V) pour différents températures sont représentés sur les figures II.12 et II.13 respectivement. On remarque que la température induit un effet notable sur la tension du module PV, par contre, l'effet de la température sur le courant est négligeable.

## CHAPITRE II : MODELISATION ET SIMULATION D'UN CHAMP PV



**Figure II .12 :** Résultats de simulation de la caractéristique (P-V) pour différents températures et éclairements  $E = 1000 \text{ W/m}^2$

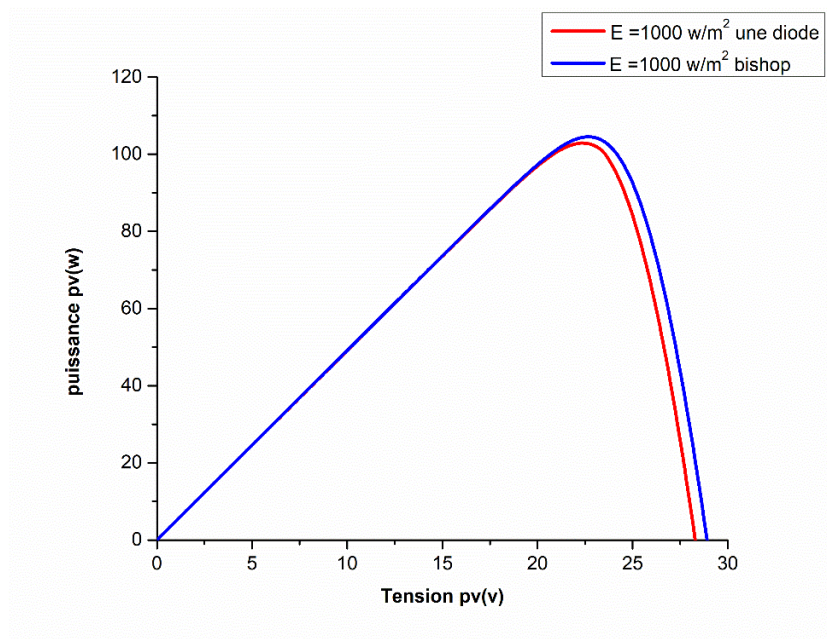


**Figure II.13 :** Résultats de simulation de la caractéristique (I-V) pour différentes températures et un éclairement  $E = 1000 \text{ W/m}^2$

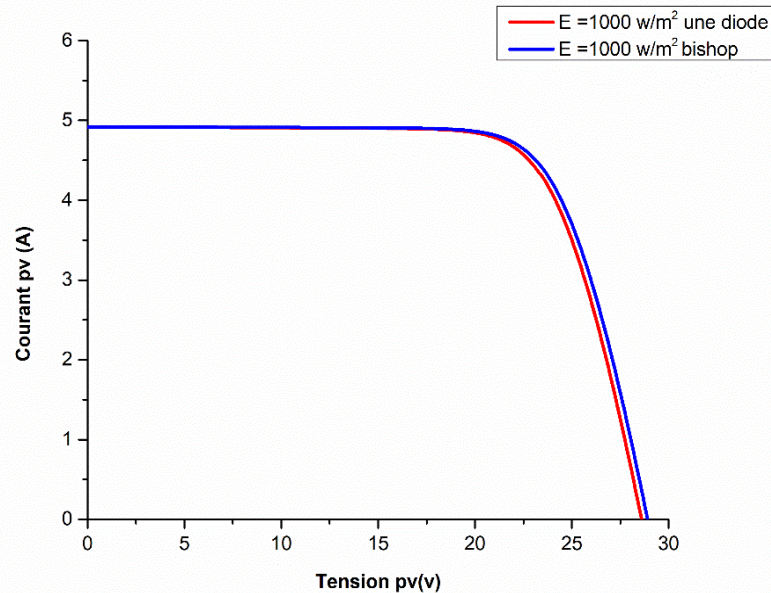
### II.4.Comparaison entre Bishop et une diode

Sur les deux figures (II.14 et II.15) nous avons tracé la courbe de modèle à une diode et Bishop à la fois pour comparer les caractéristiques électriques (I-V) et (P-V).

La comparaison est faite pour un module PV, construit selon le modèle simple et celui de Bishop. La simulation a fourni comme résultat les caractéristiques données en figures suivantes. On observe que dans ce cas, les deux modèles donnent des courbes de caractéristiques I-V et P-V identiques (la courbe en bleu continu du modèle de Bishop et celle en rouge du modèle simple ou bien à une diode).



**Figure II. 14** : Résultats de simulation de la caractéristique (P-V) pour éclairements  $E = 1000 \text{ w/m}^2$  et une température  $T = 25^\circ\text{C}$



**Figure II. 15** : Résultats de simulation de la caractéristique (I-V) pour une température  $T = 25^{\circ}\text{C}$  et un éclairement  $E = 1000 \text{ W/m}^2$

### II.4.1. Comparaison entre Bishop et une diode des caractéristiques I-V

On observe que dans ce cas, les deux modèles donnent des courbes caractéristiques I-V presque identiques. Le modèle à une seule diode donne une représentation simple de la réalité de la cellule solaire, son circuit équivalent comprend, une source de courant d'intensité proportionnelle à l'irradiation incidente, en parallèle avec une diode, la résistance shunt  $R_{sh}$  représente le courant de fuite à la terre. Les pertes internes dues au flux de courant et interconnexion entre les cellules sont modulés par une résistance série  $R_s$ . Le modèle de Bishop est une version développée du modèle à une seule diode de la cellule solaire. Un terme qui décrit l'effet d'avalanche dans la cellule quand elle fonctionne en régime inverse est ajouté par Bishop. Ce dernier fait l'hypothèse que l'effet de claquage ne se produit que dans le chemin parallèle.

Cette étude a démontré, après une simulation considérée, que dans un système sain les deux modèles donnent des caractéristiques I-V et P-V identiques pour les mêmes configurations, mais en trouve un léger décalage. Cette différence entre les deux modèles vient du terme caractérisant l'effet d'avalanche ajouté par Bishop qui stipule que si une cellule fonctionne dans le régime inverse, alors ce terme de Bishop sera considéré.

### **II.5. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation de la cellule photovoltaïque sous Matlab/SIMULINK et nous avons montré bien l'influence de la température et l'éclairement sur les performance de module photovoltaïque.

## CHAPITRE III: étude des défauts dans une installation photovoltaïque

### III.1.Introduction

Un système photovoltaïque constitué d'un ensemble d'organes en relation entre eux. L'élément de base de système est le générateur photovoltaïque (GPV), il est composé d'un groupement de modules élémentaires associés en topologie, et autres équipements comme : les éléments de protection, les batteries, le câblage, la boîte de jonction et le convertisseur de puissance. Ce générateur peut être soumis, au cours de son fonctionnement, à différents défauts et anomalies conduisant à une baisse de la performance du système et donc réduction de la productivité de l'installation et leur profit, sans compter le coût de maintenance pour remettre le système en état normal [35].

Les défauts que l'on peut retrouver dans une installation photovoltaïque, surviennent autant lors de sa conception, de son installation, que lors de son exploitation. Ils sont alors responsables d'une baisse voir d'un arrêt total de la production photovoltaïque, une bonne connaissance des différents défauts possibles permet d'assurer une bonne maintenance du système photovoltaïque.

Dans ce chapitre nous citons les différents défauts que l'on peut trouver dans les installations PV, puis nous allons créer le défaut d'ombrage sur le panneau pour voir l'influence sur les caractéristiques I-V et P-V.

### III .2. Classification des défauts

Les défauts sont classifiés selon la fonction des différents composants constituant l'installation PV. Sept groupes de défauts ont été formés :

- Défauts dans le générateur photovoltaïque
- Défauts dans la boîte de jonction
- Défauts dans le système de câblage
- Défauts dans le système de protection
- Défauts de l'onduleur
- Défauts dans le système d'acquisition des données

Classification des défauts dans les systèmes PV

## CHAPITRE III: étude des défauts dans une installation photovoltaïque

### III.2.1 Défauts dans le générateur photovoltaïque

Le tableau III.1, montre les défauts qui peuvent apparaître au niveau du générateur photovoltaïque [35].

**TABLEAU III. 1. Défauts dans le générateur photovoltaïque**

Défauts	Conséquences
Salissure (pollution, sable, neige)	Perte de puissance
Inversion des liaisons de sortie	Module mal câblé, diminution des performances
Air marin	Diminution des performances, Non fonctionnement de l'installation
Vol des modules	Non fonctionnement de l'installation
Mauvaise orientation et/ou inclinaison des modules	Ombre, diminution des performances
Couple galvanique dû au mélange de matériau de la jonction module/support	Corrosion
Module mal ou pas ventilé	Échauffement
Module mal fixé	Déplacement du module, diminution des performances
Modules non câblés	Déplacement du module, diminution des performances
Modules non câblés	Diminution des performances
Fissure	Perte d'étanchéité, détérioration des cellules, diminution des performances
Rouille par infiltration d'eau	Perte d'étanchéité, détérioration des cellules
Mauvaise isolation entre modules et onduleur	Court-circuit, destruction du module, incendie
Détérioration des joints d'étanchéité	Perte d'étanchéité, détérioration des cellules
Déformation du cadre des modules	Infiltration d'eau
Corrosion du cadre des modules	Perte d'étanchéité, détérioration des cellules
Délaminage	Diminution des performances, échauffement
Foudre	Détérioration des modules
Tempête	Module arraché, cassé
Pénétration de l'humidité	Hotspot, augmentation du courant de fuite, corrosion, perte d'adhérence et d'isolation, diminution de la résistance de CC à la terre
Faiblesse au vent des structures	Module arraché, cassé
Foudre sur l'installation	Destruction des modules
Modules de performances différentes	Diminution des performances du champ
Sortie par le bas des boîtes de connexions impossible	Mauvais câblage
Bouchons de presse-étoupe manquant sur la boîte de connexion	Pénétration d'eau, corrosion des liaisons
Boîte de connexion montée à l'envers	Entrée d'eau dans le boîtier par le presse-étoupe

### CHAPITRE III: étude des défauts dans une installation photovoltaïque

<b>Ombrage partiel (feuilles d'arbre, déjections)</b>	Hotspot, détérioration de cellules
<b>Dégradation de l'encapsulant à cause des ultraviolets, EVA jaunissant</b>	Absorbe les photons qui n'arrivent plus jusqu'à la cellule, diminution des performances
<b>Augmentation de la résistance série due au cycle thermique</b>	Diminution des performances
<b>Détérioration de la couche anti-reflet</b>	Diminution des performances
<b>Dégradation à cause de la lumière</b>	Diminution des performances, surtension, destruction de diodes
<b>Dégradation à cause de la chaleur</b>	Diminution des performances, échauffement, détérioration des joints
<b>Inclinaison des modules trop faible</b>	Stagnation d'eau, dépôt de terre, prolifération de champignons, problème d'étanchéité
<b>Dégradation des interconnexions</b>	Détérioration des joints, diminution des performances, augmentation de la résistance série, de la chaleur
<b>Support mécanique des modules inadéquat ou mal posé</b>	Efforts mécaniques importants sur les modules
<b>Mauvaise résistance mécanique des supports des modules</b>	Déformation du support
<b>Diffusion du phosphore (dopant) vers la surface</b>	Perte d'adhérence de l'encapsulant
<b>Important courant de fuite</b>	Échauffement
<b>Échauffement des modules par la boîte de connexion</b>	Décollement du Tedlar, diminution des performances
<b>Nid d'insectes sur les modules</b>	Diminution des performances
<b>Panneaux inaccessibles</b>	Nettoyage impossible
<b>Module produisant moins que prévu</b>	Diminution des performances

### CHAPITRE III: étude des défauts dans une installation photovoltaïque

Apparition de bulles à la surface des modules	Diminution des performances
---	-----------------------------

**TABLEAU III .2 . Défauts dans la boîte de jonction**

Absence de parafoudre ou protection foudre inadaptée	Destruction en cas de foudre
Presse-étoupe mal serré	Corrosion des contacts, rupture du circuit électrique
Liaison de mise à la terre non fixée ou sectionnée	Pas de mise à la terre
Boîte de jonction sans presse-étoupe	Pas d'étanchéité, corrosion des contacts, rupture du circuit électrique
Presse-étoupe en caoutchouc	Corrosion des contacts, rupture du circuit électrique
Infiltration d'eau par les vis de fixation	Corrosion des contacts, rupture du circuit électrique
Boîte de jonction non repérée	Problème pour contrôle et maintenance
Déconnexion des soudures	Arc électrique, incendie, diminution des performances
Boîtier infesté d'insectes	Rupture du circuit électrique
Fourreaux non prévus pour usage extérieur	Destruction de la protection
Liaison sans protection	Destruction de la liaison
Pénétration de l'eau ou de l'humidité	Corrosion des connexions, des diodes, des bornes, incendie

**TABLEAU III .2 .3. Défauts dans le système de câblage**

Défaut	Conséquences
Mauvais dimensionnement des câbles	Chute de tension >3 %, échauffement
Connexion desserrée ou cassée	Arc électrique, incendie, destruction de la boîte de jonction, destruction des diodes
Principe de câblage en goutte d'eau non respecté	Mauvais câblage
Câbles inter module de section trop faible par rapport au presse-étoupe	Corrosion des contacts, rupture du circuit électrique
Bornes rouillées	Faux contacts, circuit ouvert, arc électrique
Câbles non fixés	Boucle de câblage, circuit ouvert

### CHAPITRE III: étude des défauts dans une installation photovoltaïque

<b>Mauvais câblage</b>	Court-circuit, claquage des diodes anti-retour, destruction des connecteurs (circuit ouvert), aléas de fonctionnement sur disjoncteur
<b>Toron</b>	Boucle électromagnétique
<b>Câbles d'arrivée des sous-champs entamés lors du dénudage</b>	Mauvais câblage, faux contacts, circuit ouvert, arc électrique
<b>Absence de graisse de silicone</b>	Humidité
<b>Câble mal dénudé</b>	Mauvais câblage, faux contacts, circuit ouvert, arc électrique
<b>Câble rongé par des rats</b>	Faux contacts, circuit ouvert, arc électrique
<b>Modification du câblage par l'utilisateur non compétent</b>	Mauvais câblage, faux contacts, circuit ouvert, arc électrique
<b>Boîte de connexion décollée</b>	Connexion des cellules en série endommagée

**TABLEAU III .2 .4. Défauts dans le système de protection**

<b>Défauts</b>	<b>Conséquences</b>
<b>Protections inappropriées ou mal dimensionnées</b>	<b>Court-circuit, hot spot, incendie, arrêt de l'installation</b>
<b>Interrupteur, disjoncteur inapproprié</b>	<b>Arc électrique, incendie, destruction à l'ouverture</b>
<b>Disjoncteur différentiel non conforme à la norme</b>	<b>Non déclenchement, tension entre neutre et terre</b>
<b>Armoire électrique posée à même le sol à l'extérieur</b>	<b>Dysfonctionnement en cas de pluie</b>

### CHAPITRE III: étude des défauts dans une installation photovoltaïque

<b>Parafoudre non connecté à la terre</b>	<b>Pas de protection</b>
<b>Impossibilité de déconnecter les modules par branche</b>	<b>Problème de sécurité</b>
<b>Pas de possibilités de sectionnement extérieur au coffret</b>	<b>Problème de sécurité</b>
<b>Mauvaise dissipation de la chaleur des diodes</b>	<b>Échauffement</b>
<b>Sous dimensionnement des diodes de bypass</b>	<b>Hot spot, destruction des diodes, échauffement de la boîte de jonction</b>
<b>Absence de protection contre les courants inverses</b>	<b>Hot spot, destruction des diodes, échauffement de la boîte de jonction</b>
<b>Diode mal connectée</b>	<b>Non fonctionnement des diodes, absence de protection contre les courants inverses</b>
<b>Inversion de la polarité des diodes au montage</b>	<b>Non fonctionnement des diodes, court-circuit, hot spot</b>
<b>Phénomènes de résonance</b>	<b>Non fonctionnement des fusibles et des protections de surtension</b>
<b>Dégradation à cause de la lumière</b>	<b>Non fonctionnement des diodes de bypass</b>
<b>Échauffement des diodes placées dans un endroit mal ventilé</b>	<b>Température de destruction atteinte</b>
<b>Viellissement des disjoncteurs</b>	<b>Non fonctionnement des disjoncteurs</b>

**TABLEAU III .2 .5. Défauts de l'onduleur**

<b>Dégradation à cause de la chaleur</b>	<b>Détérioration de l'onduleur, des connexions</b>
<b>Faux contact</b>	<b>Arrêt de l'onduleur</b>
<b>Surtension</b>	<b>Déconnexion de l'onduleur</b>
<b>Fusible fondu</b>	<b>Arrêt de l'onduleur</b>
<b>Foudre sur le réseau</b>	<b>Surtension, destruction de l'onduleur</b>
<b>Tension du générateur inférieure à la limite basse de l'onduleur</b>	<b>Déconnexion de l'onduleur</b>

### CHAPITRE III: étude des défauts dans une installation photovoltaïque

<b>Onduleur sous dimensionné</b>	<b>Destruction de l'onduleur</b>
<b>Bobine des filtres, thyristors, capacités en défaut</b>	<b>Arrêt de l'onduleur</b>
<b>Problème d'interface avec le réseau</b>	<b>Découplage de l'onduleur</b>
<b>Surchauffe des onduleurs</b>	<b>Diminution des performances</b>
<b>Onduleur installé dans un lieu non étanche</b>	<b>Panne de l'onduleur</b>
<b>Onduleur mal fixé</b>	<b>Chute de l'onduleur</b>
<b>Onduleur surdimensionné</b>	<b>Perte de puissance, diminution des performances</b>
<b>Visserie et bouton de commande oxydés</b>	<b>Réglage impossible</b>
<b>Mauvais choix de la tension nominale d'entrée</b>	<b>Diminution des performances</b>
<b>Pile de sauvegarde HS</b>	<b>Perte de données</b>
<b>Témoins de défaut d'intensité allumé en permanence</b>	<b>Mauvaise information sur l'intensité</b>
<b>Onduleur non mis à la terre</b>	<b>Disjoncteur différentiel non actif</b>
<b>Perte de la mémoire (mauvaise manipulation du technicien)</b>	<b>Perte de données</b>
<b>Afficheur de cristaux liquide endommagé ou illisible</b>	<b>Pas d'information sur le fonctionnement</b>

**TABLEAU III .2 .6. Défaut du système d'acquisition des données**

<b>Défaut</b>	<b>Conséquences</b>
<b>Coupure de courant</b>	<b>Perte de données</b>
<b>Sonde de température non câblée</b>	<b>Mesure impossible</b>
<b>Sonde d'ensoleillement non câblée</b>	<b>Mesure impossible</b>
<b>Défaut de paramétrage</b>	<b>Enregistrement de fausses données</b>
<b>Mauvais câblage des shunts de mesure</b>	<b>Mesure impossible ou erronée</b>

### CHAPITRE III: étude des défauts dans une installation photovoltaïque

<b>Afficheur de données mal placé (trop haut)</b>	<b>Données non visibles</b>
<b>Carte électronique mal positionnée</b>	Touches inactives, défaut de commande
<b>Non configuré pour l'acquisition des données</b>	Pas de donnée enregistrée
<b>Armoire fermée par le service de maintenance ou présence d'un code</b>	Lecture des données par l'exploitant impossible
<b>Bornier de mesures et de sonde de température trop proches</b>	Câblage difficile, risque de court circuit
<b>Acquisition de données vierge</b>	Aucune information enregistrée
<b>Mesure de données non nulles alors que système PV à l'arrêt</b>	Données non fiables

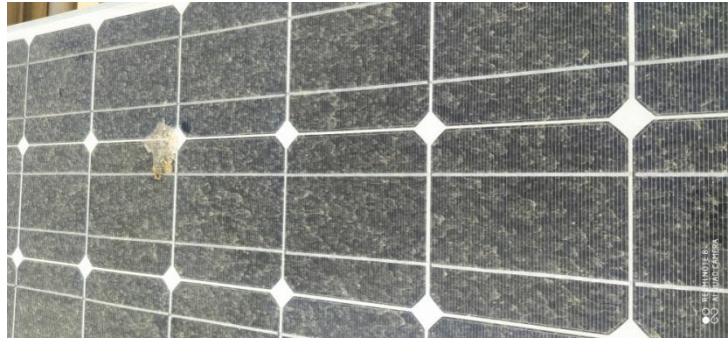
#### III.3. Quelques défauts trouvés au sein de L'UREAR - GHARDAIA

La première façon (la plus simple) pour découvrir les défauts dans n'importe quel système est l'observation visuelle. Certains défauts dans les GPV peuvent être détectés par inspection visuelle, à titre d'exemple : Décoloration des cellules PV ; Défaut de la Salissure  
Défaut de déconnection de la diode .



**Figure III .1.**Décoloration des cellules PV en marron ou jaune (URAER)

## CHAPITRE III: étude des défauts dans une installation photovoltaïque



**Figure III .2.** Défaut de la Salissure (URAER)



**Figure III .3.** Défaut de déconnection de la diode (URAER)

### III .4. Validation expérimentale du model a une diode

Comme le modèle et plus utilisé dans le cas de sans défaut nous avons comparé les résultats de simulation de ce modèle avec de les résultats expérimentaux,

#### III .4.1. Description de la plateforme d'expérimentation

Nous décrivons tout d'abord dans cette partie la plateforme d'expérimentation pour la validation du modèle Bishop. Une série de mesure sur un module PV polycristallin a été réalisée. Le module qui est utilisé est de type : SCHOTT solar ASE -100-GT –FT/MC, constitué de 48 cellules polycristallin connectées en série et fournit 105W de puissance maximale nominale connecté a une charge électronique (voir Figure III .4).



## CHAPITRE III: étude des défauts dans une installation photovoltaïque

Module SCHOTT solar ASE -100-GT –FT/MC Capteurs (température et éclairement)

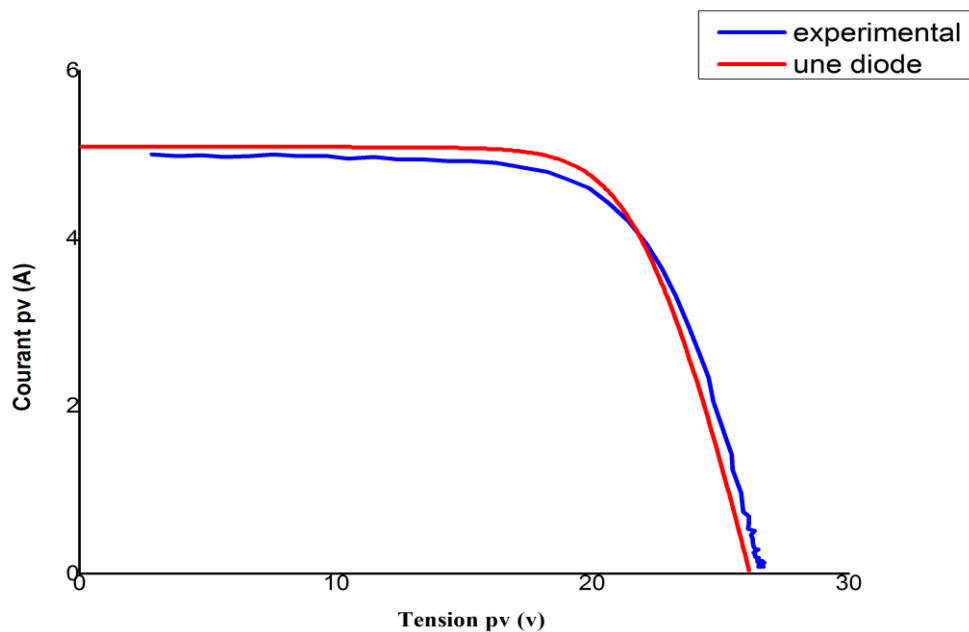


Logiciel de la charge électronique PVA 600 PV Analyzer

**Figure III .4.** Banc d'essai au sein de l'URAER

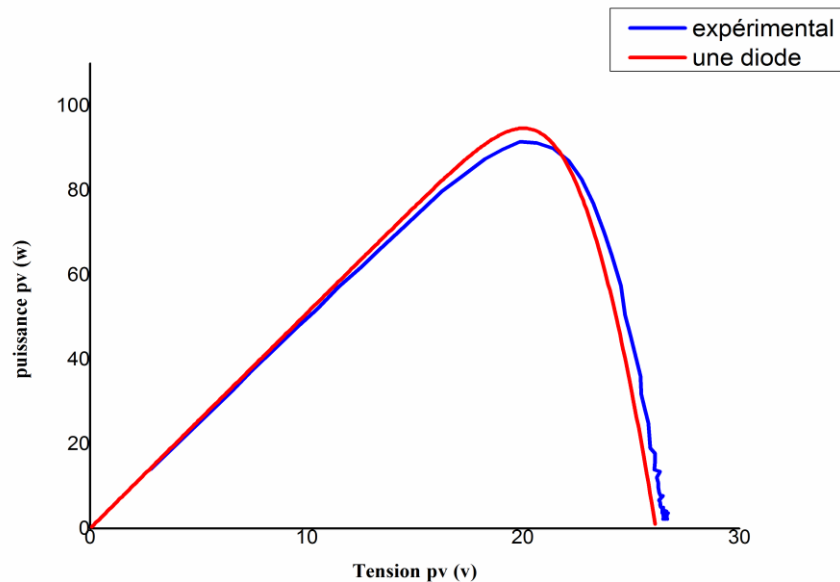
### III.4.2. Résultats expérimentaux

Les figures (III. 5) et (III. 6) montrent les courbes caractéristiques I-V (Courant-Tension) et P-V (Puissance-Tension) obtenues pour module SCHOTT solar ASE -100-GT –FT/MC.



**Figure III. 5 :** Caractéristiques (I-V) expérimentale et simulé (module SCHOTT solar ASE -100-GT –FT/MC)  $E = 1000\text{W/m}^2$  et  $T = 52^\circ\text{C}$

## CHAPITRE III: étude des défauts dans une installation photovoltaïque



**Figure III. 6 :** Caractéristiques (P-V) expérimentale et simulé (module SCHOTT solar ASE – 100-GT –FT/MC)  $E = 1000\text{W/m}^2$  et  $T = 52^\circ\text{C}$ .

- Nous constatons que le modèle Bishop est en bon accord avec les données expérimentales.

### IV.4.3 Les scénarios du test

Dans ce scénario, nous effectuerons deux différents types d'ombrage sur un panneau solaire

#### IV.4.3.1 : défaut d'ombrage d'une cellule

Dans ce scénario, nous effectuerons un ombrage sur une seule cellule (voir figure III.7).

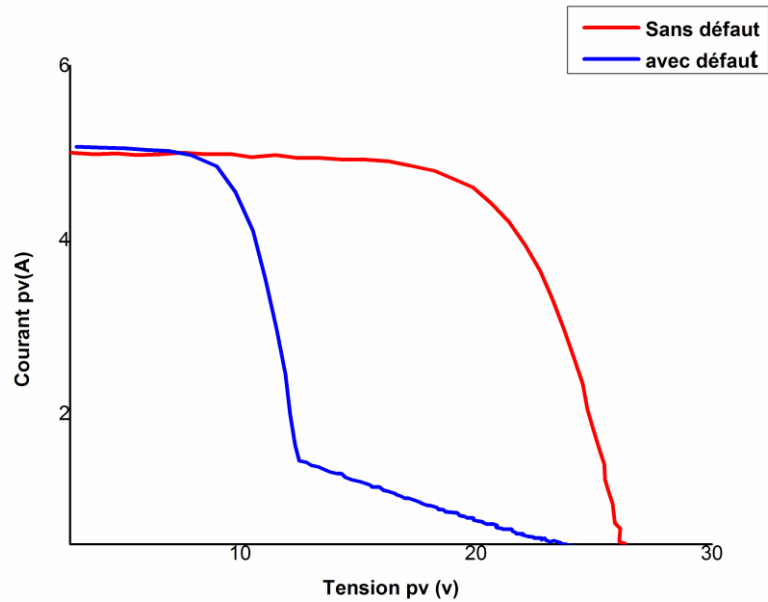


**Figure III.7 :** défaut d'ombrage d'une cellule

### III .4.2.2.Présentation des résultats expérimentaux des caractéristique I -V et P-V

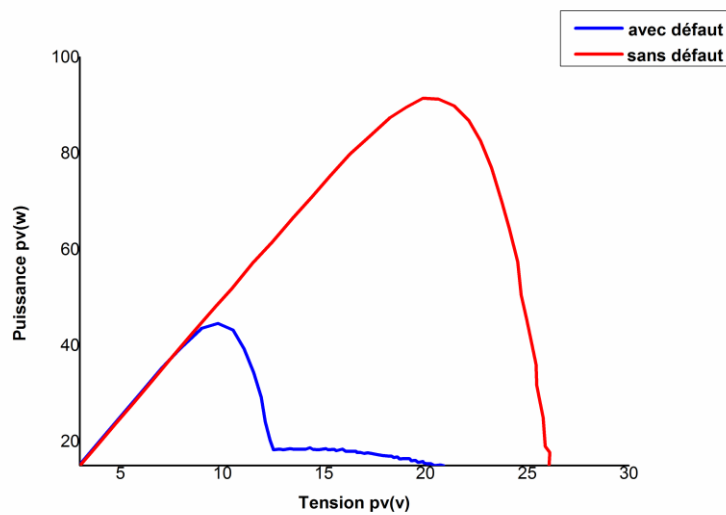
Dans ce cas nous allons comparer les résultats expérimentaux avec défaut d'ombrage d'une seule cellule et les résultats sans défaut.

### CHAPITRE III: étude des défauts dans une installation photovoltaïque



**Figure III .8.**Résultats des caractéristiques (I-V) avec défaut d'ombrage d'une cellule et sans défaut

$$E = 1000\text{W/m}^2 \text{ et } T = 52^\circ\text{C}$$



**Figure III. 9. :** Résultats des caractéristiques (P-V) avec défaut d'ombrage d'une cellule et sans défaut

$$E = 1000\text{W/m}^2 \text{ et } T = 52^\circ\text{C}$$

#### Observation

- une perte de puissance au point maximale PPM.
- la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  diminue

### CHAPITRE III: étude des défauts dans une installation photovoltaïque

- déviation de la pente.

#### Justification

L'ombrage d'une seule cellule couvre une partie de panneau solaire, donc le module sera polarisé en sens inverse et la cellule qui a été ombragée ne reçoit plus de lumière et elle devient comme une charge très résistif alors le panneau produit moins d'intensité et donc la production de toute l'installation est modifiée.

La diode est montée en sens inverse dans chaque rangée des cellules, alors dans le cas d'ombrage le courant électrique traverse la diode et circule seulement dans celle ombragée, ce qui préservera la rentabilité de l'ensemble des autres cellules.

Donc le panneau solaire produit moins de courant électrique et alors moins de tension et de puissance.

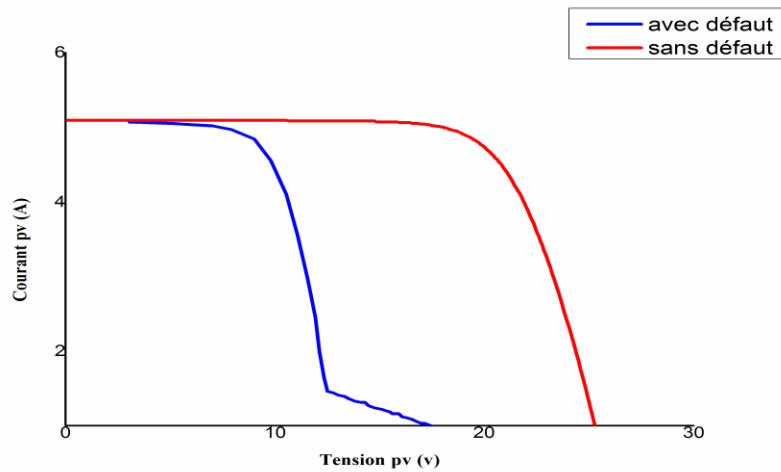
#### IV.4.2.4 : défaut d'ombrage 18 cellules horizontales

Dans ce scénario, nous effectuerons un ombrage sur une 18 cellule (voir Figure III.10).

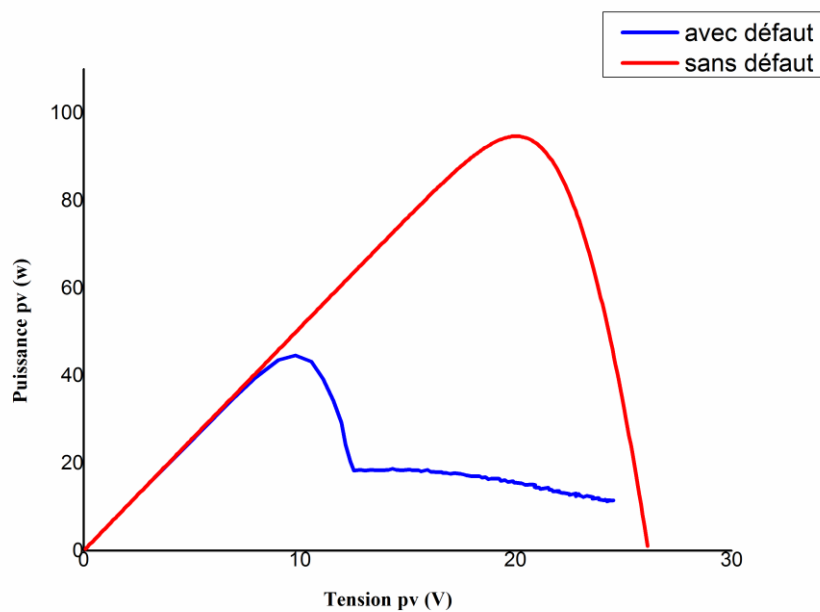


**Figure III .10** : Défaut d'ombrage de 18 cellules horizontales

### CHAPITRE III: étude des défauts dans une installation photovoltaïque



**Figure III .11.** Résultats des caractéristiques (I-V) avec défaut d'ombrage de 18 cellules horizontales et sans défaut avec éclairement  $E = 1000\text{W/m}^2$  et  $T = 52^\circ\text{C}$



**Figure.III.12 :** Résultats des caractéristiques (P-V) avec défaut d'ombrage de 18 cellules horizontale set sans défaut  $E = 1000\text{W/m}^2$  et  $T = 52^\circ\text{C}$

#### Observation

- une perte de puissance au point maximale PPM.
- la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  diminue
- déviation de la pente.

## CHAPITRE III: étude des défauts dans une installation photovoltaïque

### Justification

L'ombre d'une rangée de 18 cellules recouvre une partie du panneau solaire, donc le module sera polarisé en inverse ; tandis que les 18 cellules qui ont été ombragées ne sont plus exposées à la lumière et deviennent des charges résistives, donc le panneau produit moins d'intensité. Les diodes sont installées dans chaque rangé de cellules dans le sens opposé, donc dans l'ombrage de 18 cellules, le courant passe dans les diodes et ne circule que dans les cellules ombragé, cela gardera tous les autres cellules rentables. En conséquence, le panneau solaire produit moins de courant et donc moins de tension et de puissance.

- ✓ D'après la comparaison des résultats expérimentaux en cas normal ; avec les résultats de la simulation de modèle a une diode, on conclut que les deux résultats expérimentaux et théorique (simulation) sont identique.

### III.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons cité les différents défauts qu'on peut trouver dans une installation photovoltaïque, ainsi que les défauts qui se présentent à L'UREAR – GHARDAIA.

Nous avons fait une expérience sur le module PV pour étudier deux cas de défaut d'ombrage, d'une seule cellule et de 18 cellules ombragées horizontales. La comparaison des résultats des caractéristique P-V et I-V de l'expérience et de modèle a une diode ont montré une bonne concordance entre eux.

## **CHAPITRE III: étude des défauts dans une installation photovoltaïque**

### **Conclusion générale**

Dans ce mémoire de fin d'étude, nous avons étudié le générateur photovoltaïque. Nous avons tout d'abord étudié le contexte et la problématique de l'énergie PV. En présentant dans un premier temps, des généralités sur les systèmes PV, un bref historique donc a été proposé, puis nous avons parlé de gisement solaire et le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque ainsi que sa structure et la formation de la jonction PN qui est l'élément principal de la cellule photovoltaïque, par la suite nous avons abordé le principe de l'effet photovoltaïque et les avantages et les inconvénients de système photovoltaïque.

Dans le deuxième chapitre nous avons vu que le module PV présente une caractéristique  $I(V)$  non linéaire, et qu'elle peut être modélisée par différents circuits électriques (modèle à une diode, le modèle à deux diodes et le modèle Bishop ainsi que le modèle explicite). De ce fait, nous avons choisis deux modèles pour résoudre leurs équations caractéristiques sous MATLAB / SIMULINK, permettant de déterminer la caractéristique P-Vet I-V d'un module pour différentes valeurs d'éclairement et de température en fonctionnement sain.

D'après les résultats de la simulation obtenus, on peut dire que :

Les performances d'un système PV se dégradent avec l'augmentation de la température et la diminution de l'intensité de l'éclairement.

La validation des résultats de simulation de modèle bishop de module PV soumis à un éclairement solaire uniforme a montré une bonne concordance entre ce modèle et l'expérience en fonctionnement sain. Ce choix réside sur le fait que ce modèle peut représenter un panneau PV tant en régime de fonctionnement normal qu'en régime inverse.

Le défaut d'ombrage a été abordé en dernière partie de ce mémoire, nous avons testé deux scénarios, ombrage d'une seule cellule et plusieurs cellules. Les résultats expérimentaux montrent que la présence de l'ombrage sur le panneau provoque une polarisation en sens inverse et la cellule (où cellules) deviendra comme une charge résistive et donc la production de panneau diminue.

### CHAPITRE III: étude des défauts dans une installation photovoltaïque

#### Références bibliographique

- [1] Rouabah Lahcene , Zitouni Djallel , etude et détection de défauts dans un système photovoltaïque , Mémoire de master ; Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj Faculté des Sciences et de la technologie, Département d'Electronique, 2020 .
- [2] Belaout Abdesslam , etude et diagnostic des défauts fréquents aux systèmes photovoltaïques (PV) par emploi de la caractéristique courant-tension Mémoire de master Université – Setif-1-U-S-1 (Algerie) ; 2014 .
- [3] Helali Kamelia ; modélisation d'une cellule photovoltaïque :Etude Comparative Mémoire de magister en electronique ; faculte de genie electrique et d'informatique departement d'electrotechnique , 2012.
- [4] Djelloul Benatiallah , Détermination du gisement solaire par imagerie satellitaire avec intégration dans un système d'information géographique pour le sud d'Algérie , universite africane ahmed draia Adrar, faculte des sciences et de la technologies departement des sciences de la matiere 2019 .
- [5] Imessaoudene Saïd ; Laced Chafie , Détection et Localisation de Défauts dans un Système Photovoltaïque ;Mémoire de master , Université Mouloud Mammeri de tizi-ouzou faculté de génie électrique et d'informatique département d'électrotechnique 2013.
- [6] <https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=dopage+de+jocntion+pn>
- [7] <https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=photovolta%C3%AFque>
- [8] [https://www.google.com/search?q=photovolta%C3%AFque&client=firefox-b-d&sxsrf=ALiCzsaxOXLBcWKKhePraNn01MFseyo3YQ:1664413475517&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwihRn6v57j6AhUFQEEAHX22BeUQ\\_AUoAXoECAIQAw&biw=1366&bih=643&dpr=1](https://www.google.com/search?q=photovolta%C3%AFque&client=firefox-b-d&sxsrf=ALiCzsaxOXLBcWKKhePraNn01MFseyo3YQ:1664413475517&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwihRn6v57j6AhUFQEEAHX22BeUQ_AUoAXoECAIQAw&biw=1366&bih=643&dpr=1)
- [5] Thomas Mambrini ; Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies ,thèse de doctorat Université paris-sud école doctorale : stits laboratoire de génie electrique de paris (lgep) discipline physique ; 2014 .
- [6][https://www.researchgate.net/publication/337562355\\_detection\\_et\\_classification\\_de\\_defauts\\_dans\\_un\\_systeme\\_photovoltaique\\_en\\_utilisant\\_l%27ap\\_proche\\_neuronale](https://www.researchgate.net/publication/337562355_detection_et_classification_de_defauts_dans_un_systeme_photovoltaique_en_utilisant_l%27ap_proche_neuronale) .
- [7]<https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=definition+de+l%27energie+solaire+phtovoltaique> .
- [8] <https://www.emse.fr/~dutertre/enseignement.html>
- [9] Babaouamer Hocine , Ider Amine, etude des defauts dans un generateur photovoltaique ,Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de master , Université de Ghardaïa , 2017.

### CHAPITRE III: étude des défauts dans une installation photovoltaïque

[10] Mohamed Lakhdar Louazene , etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla ; Université el Hadj Lakhdar – Batna ,Faculté des Sciences de l'Ingénieur Département d'électrotechnique mémoire de Magister 2008 .

[11] Long Bun . Détection et Localisation de Défauts pour un Système pv ; Université Grenoble ; Thèse soutenue publiquement Pour obtenir le grade de docteur de L'université de Grenoble ,2011 .

[12] Etude comparatif Etude comparative des régulateurs de charge pour l'optimisation de l'énergie photovoltaïque ; Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master, Faculté des Sciences et Technologies Département d'automatique et électrique [ctromécanique Soutenu publiquement ,2020.

[ 14] N. Aouchiche ; Défauts liés aux systèmes photovoltaïques autonomes et techniques de diagnostic - Etat de l'art pdf ; Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Algeria , 2018.

[15] Abderrahmane Jarrou , Diagnostic de défauts et commande tolérante aux défauts des systèmes à énergie renouvelable these Doctorat de l'Université de Lorraine 2020 .

[16] Bouchakour Abdelhak , Modélisation et Simulation d'un Système de Pompage Photovoltaïque Pour l'obtention du grade de docteur en sciences  
filière : électrotechnique , Université Djillali Liabes de Sidi-bel-abbès ,Faculté de Génie Electrique, Département d'Electrotechnique , 2018 .

[17] <https://www.totalenergies.fr/particuliers/nos-services/autoconsommation-solaire/fonctionnement-panneaux-photovoltaïques/differents-types-de-cellules-photovoltaïques> .