

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Abderrahmane Mira – Béjaïa



Faculté de Technologie  
Département de Génie Electrique  
Spécialité : Energies renouvelables en électrotechnique

## *Mémoire de fin d'étude*

Pour l'obtention du diplôme de Master en énergies renouvelables en  
électrotechnique  
Filière : Energies renouvelables

Thème

---

# **Impact de dépôt des différentes impuretés sur la surface d'un générateur photovoltaïque**

---

Réalisé par :

**SAIMI Assia**

**IKHLEF Imene**

Encadré par :

**Mr. MOHAMMEDI Ahmed**

---

Année Universitaire 2022/2023



## *Remerciement*

---

Tout d'abord, nous remercions Dieu de nous avoir donné une bonne santé afin d'accomplir le travail du début à la fin

On tient à remercier Monsieur AMED MOHAMMEDI, Professeur à l'université d'Abed-Rahman mira BEJAIA pour l'encadrement qu'il nous a assurés et ses précieux et judicieux conseils qu'il n'a cessés de nous prodiguer tout au long de ce projet. Il trouve ici notre gratitude et notre reconnaissance profonde.

On adresse aussi nos sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions et ont accepté de nous rencontrer et de répondre à nos questions durant nos recherches.

On remercie nos très chers parents, qui ont toujours été là pour nous. On remercie, nos frères et sœurs, pour leurs encouragements.

On remercie également nos chers maris pour leur patience et leur gentillesse durant cette épreuve.

Enfin, on remercie nos amis et nos cousin(e)s qui ont toujours été là pour nous. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

À tous ces intervenants, on présente nos remerciements, notre respect et notre gratitude.

Merci.

## *Dédicaces*

---

On dédie ce modeste travail à :

Nos très chers parents, pour leur sacrifices, et qui n'ont jamais cessé de nous encourager que Dieu les garde.

Ma chère sœur : Selma Saimi.

Mes très chers frères : Ikhlef Abed-allah et Ikhlef Rahim.

Nos chers maris : Walid Boumedjmadjen et Youba Ziane.

Tous nos amis (es).

## *Table des matières*

---

Introduction générale.....	01
----------------------------	----

### **Chapitre 1 : Généralités sur les énergies renouvelables**

I. Introduction.....	02
II. Sources de production conventionnelles.....	02
III. Sources d'énergies renouvelables.....	03
IV. Energie solaire.....	08
IV.1. Définition.....	08
IV.2. Solaire thermique.....	08
IV.3. Solaire photovoltaïque.....	08
IV.3.1. Cellule photovoltaïque.....	08
A- Historique.....	08
B- Fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	09
C- Technologie des cellules.....	10
IV.3.2. Caractéristique de la cellule photovoltaïque.....	12
A- Caractéristique courant-tension (I-V).....	12
IV.4. Les systèmes photovoltaïques.....	13
IV.4.1. Description des systèmes photovoltaïques.....	13
IV.4.2. Les systèmes autonomes.....	13
IV.4.3. Les systèmes raccordés au réseau.....	14
IV.4.4. Les systèmes hybrides.....	15
IV.5. Avantages et limites.....	16
V. Les énergies renouvelables en Algérie.....	16
VI. L'énergie renouvelable dans l'économie.....	17
VII. Conclusion.....	17

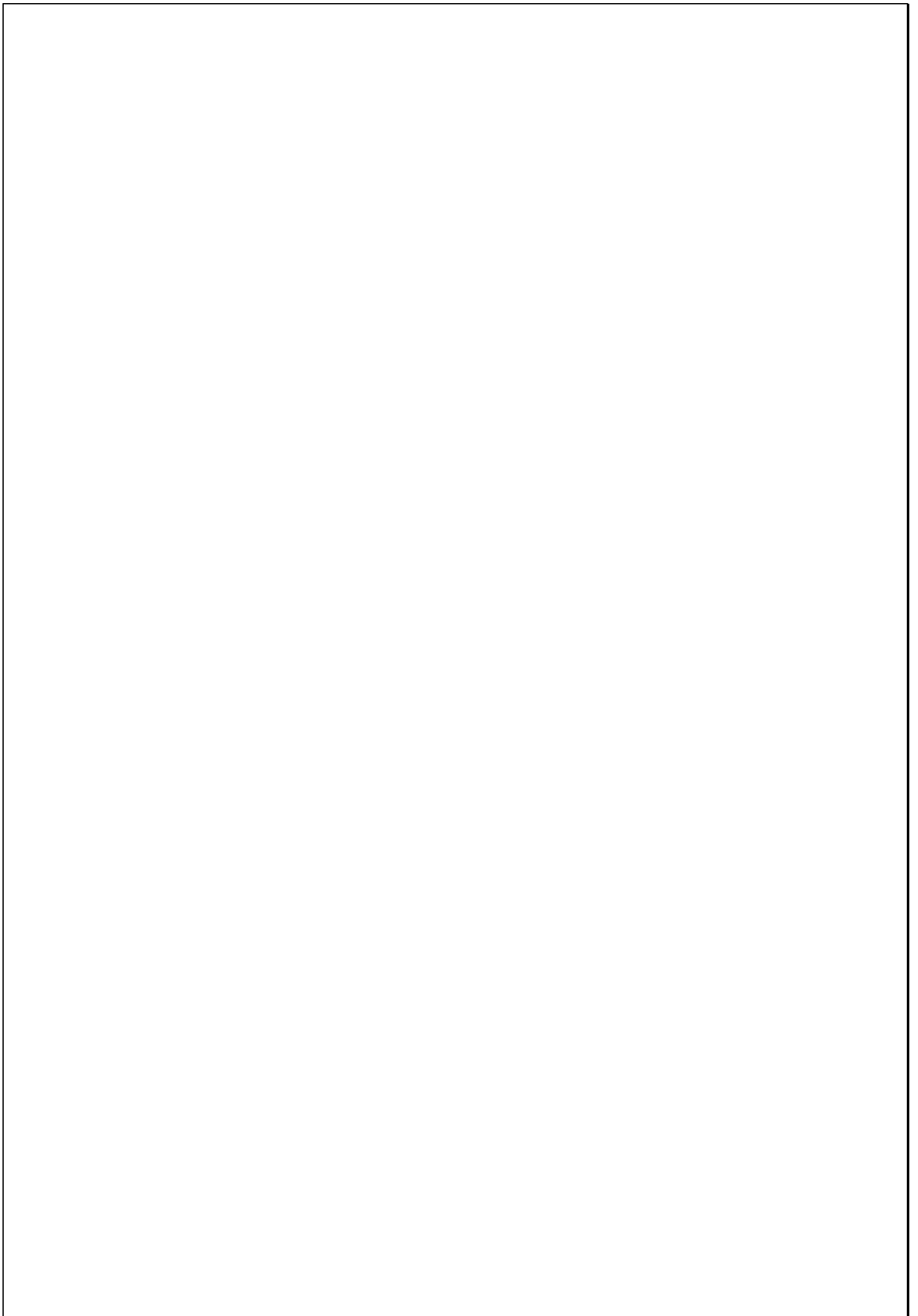
### **Chapitre 2 : caractérisation d'un générateur photovoltaïque sous différents états**

I. Introduction.....	18
----------------------	----

II. De la cellule au générateur photovoltaïque.....	18
II.1. Association série.....	18
II.2. Association parallèle.....	19
II.3. Association série / parallèle.....	19
III. Modélisation de la cellule photovoltaïque.....	20
III.1. Schéma équivalent de la cellule photovoltaïque.....	20
III.2. Modèle à quatre paramètres.....	21
III.3. Modèle à cinq paramètres.....	22
III.4. Modèle à six paramètres.....	24
IV. Caractéristiques électriques du générateur étudié.....	25
IV.1. La simulation du générateur PV à l'état sain (ensoleillement homogène).....	25
IV.2. La simulation du générateur PV à l'état ombragé (ensoleillement non homogène).....	26
V. Conclusion.....	29

### **Chapitre 3 : impact de dépôt de différentes impuretés sur les performances du générateur photovoltaïque**

I. Introduction.....	31
II. Le rayonnement solaire.....	31
III. Types d'ombrage et leur impact sur la production.....	32
IV. Conséquence d'ombrage (Hot spot).....	33
IV.1. Les raisons de l'apparition de hot spot.....	34
V. Méthodologie de test.....	35
V.1. Etude de l'impact des différents dépôts sur le générateur PV.....	36
VI. conclusion.....	40
Conclusion générale.....	42



## Liste des figures

---

### Chapitre 01 : Généralités sur les énergies renouvelables

<b>Figure I.1</b> : Les différentes sources des énergies conventionnelles.....	02
<b>Figure I.2</b> : Les différentes sources des énergies renouvelables.....	03
<b>Figure I.3</b> : schéma de fonctionnement d'une centrale hydraulique.....	04
<b>Figure I.4</b> : Les différents éléments de l'usine marémotrice.....	04
<b>Figure I.5</b> : Fonctionnement de l'énergie des vagues.....	04
<b>Figure I.6</b> : Utilisation de la biomasse.....	05
<b>Figure I.7</b> : Schéma descriptif d'une centrale géothermique.....	05
<b>Figure I.8</b> : Conversion éolienne.....	06
<b>Figure I.9</b> : Panneaux solaire.....	06
<b>Figure I.10</b> : Exemple de chauffe-eau solaire thermique à charge.....	08
<b>Figure I.11</b> : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	09
<b>Figure I.12</b> : les cellules monocristallines et poly-cristallines.....	10
<b>Figure I.13</b> : Les différentes technologies des cellules photovoltaïques .....	11
<b>Figure I.14</b> : La caractéristique I-V d'une cellule PV.....	12
<b>Figure I.15</b> : Structure d'un système autonome.....	14
<b>Figure I.16</b> : Architecture d'un système connecté au réseau.....	14
<b>Figure I.17</b> : Exemple d'une architecture d'un système hybride.....	15
<b>Figure I.18</b> : La consistance du programme en énergie renouvelables horizon 2030.....	17

### Chapitre 02 : caractérisation d'un générateur photovoltaïque sous différents états

<b>Figure II.1</b> : Association des cellules PV en série.....	18
<b>Figure II.2</b> : Association des cellules PV en parallèle.....	19
<b>Figure II.3</b> : Association mixte des cellules PV.....	19
<b>Figure II.4</b> : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	20
<b>Figure II.5</b> : Schéma électrique équivalent du modèle à deux diodes d'une cellule PV.....	24
<b>Figure II.6</b> : Caractéristiques dans les conditions STC du générateur (élémentaire) étudié.....	25
<b>Figure II.7</b> : Caractéristiques dans les conditions STC du générateur étudié (mise en série).....	26



<b>Figure II.8:</b> Caractéristiques dans les conditions STC du générateur étudié (mise en parallèle).....	26
<b>Figure II.9:</b> Caractéristique I(V) du générateur (mise en série) sous différents état d’ombrage .....	27
<b>Figure II.10:</b> Caractéristique P(V) du générateur (mise en série) sous différents états d’ombrage.....	27
<b>Figure II.11:</b> Caractéristique I(V) du générateur (mise en parallèle) sous différents états d’ombrage.....	27
<b>Figure II.12:</b> Caractéristique P(V) du générateur (mise en parallèle) sous différents états d’ombrage.....	28
<b>Figure II.13:</b> Evolution de la puissance PV pour les différents états d’ombrage des deux configurations.....	28
<b>Figure II.14:</b> Comparaison de la puissance délivrée par les deux configurations.....	28
<b>Figure II.15:</b> Comparaison de la puissance délivrée par les le même taux d’ombrage.....	29

### **Chapitre 03 : impact de dépôt de différentes impuretés sur la performance d’un générateur photovoltaïque**

<b>Figure III.1 :</b> Rayonnements solaire.....	32
<b>Figure III.2 :</b> Exemple d’ombrage partiel.....	33
<b>Figure III.3 :</b> Exemple d’ombrage total.....	33
<b>Figure III.4 :</b> Exemple du phénomène hot spot.....	34
<b>Figure III.5 :</b> Schéma synoptique du montage voltampère-métrique.....	35
<b>Figure III.6 :</b> Identification du panneau photovoltaïque principale.....	35
<b>Figure III.6 :</b> Caractéristiques électriques du générateur photovoltaïque étudié.....	36
<b>Figure III.7 :</b> Exemple de ces d’ombrage envisagés (a) GPV-OD4, (b) GPV-OI6, (c) GPV-OF2, (d) GPV-OS4.....	37
<b>Figure III.8 :</b> Puissance PV générée dans le cas d’ombrage direct GPV-OD.....	37
<b>Figure III.9 :</b> Puissance PV générée dans le cas d’ombrage indirect GPV-OI.....	38
<b>Figure III.10 :</b> Puissance PV générée dans le cas d’ombrage par feuille d’arbre GPV-OF..	38
<b>Figure III.11 :</b> Puissance PV générée dans le cas d’ombrage par saleté GPV-OS.....	38

<b>Figure III.12</b> : Puissance PV générée pour différents scénarios en fonction du nombre de panneaux ombragés.....	39
<b>Figure III.13</b> : Pertes de puissance pour différents scénarios (a) GPV-OD, (b) GPV-OI, (c) GPV-OF, (d) GPV-OS.....	39
<b>Figure III.14</b> : Comparaison des petites pertes de puissance pour différents scénarios.....	40



## *Liste des tableaux*

---

### **Chapitre 01 : Généralités sur les énergies renouvelables**

**Tableau I.1** : Récapitulatif sur les différentes ressources renouvelable..... 07

**Tableau I.2** : Avantages et limites des systèmes photovoltaïques..... 16

### **Chapitre 02 : caractérisation d'un générateur photovoltaïque sous différent états**

**Tableau II.1** : Paramètres électriques des panneaux SOLARA SM 55..... 25

### **Chapitre 03 : impact de dépôt de différentes impuretés sur la performance d'un générateur photovoltaïque**

**Tableau III.1** : Résumé des scénarios d'ombrage envisagés..... 36

## Introduction générale

Les énergies renouvelables font référence aux sources d'énergie qui se produisent en permanence à l'échelle humaine on peut citer : l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, l'énergie de la biomasse et l'énergie géothermique. Elles respectent l'environnement, leur impact est minime par rapport aux énergies traditionnelles (énergies fossiles, nucléaire, etc.) et elles sont souvent réversibles. Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont fortement augmenté ces dernières années. Au cours des 20 prochaines années, tout système énergétique durable dépendra d'une utilisation rationnelle des sources traditionnelles et d'une utilisation accrue de l'énergie renouvelables. Dans ce cadre, la disponibilité de l'énergie (électrique, thermique,...) représente un des problèmes les plus urgents que rencontrent plusieurs pays en voie de développement,

Dans cette optique, des populations ont opté pour l'utilisation de systèmes renouvelables en utilisant l'énergie solaire, cette dernière est reconnue comme étant l'un des moyens les plus efficaces moins. Mais installer des panneaux photovoltaïques nécessite certainement une surveillance régulière, en effet, une baisse importante, voire, totale de production peut survenir suite à un dysfonctionnement de l'installation. Le problème le plus fréquent est l'ensoleillement non homogène « ombre ». En effet, les cellules photovoltaïques sont montées en série, par conséquent, si une cellule produit moins à cause d'une ombre, cela engendre une baisse de production pour l'ensemble des cellules du panneau.

Heureusement, quelques solutions existent pour éviter ce désagrément, et les nouveaux panneaux solaires sont désormais équipés de diodes by-pass. Cela permet, au sein d'un panneau solaire, de ne pas couper l'ensemble de la production si une cellule se trouve à l'ombre.

Dans ce travail, notre recherche vise à examiner l'influence des différents ombres (impuretés) sur les performances des générateurs photovoltaïques.

Le premier chapitre est consacré globalement à l'énergie solaire photovoltaïque, nous présentons au passage quelques types des énergies renouvelables.

Le second chapitre décrit l'étude des caractéristiques électrique d'un générateur photovoltaïque sur lequel nous allons simuler les différentes caractéristiques.

Le troisième chapitre fera l'objet d'une étude expérimentale sur les différents obstacles qui peuvent impactés la production PV du générateur photovoltaïque.

Une conclusion générale.

# CHAPITRE 1 : Généralités sur les énergies renouvelables

## I. Introduction :

L'énergie est dite renouvelable quand il s'agit de sources reconstituées naturellement, plutôt que de l'énergie non renouvelable qui épuise ses stocks. Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont fortement augmenté ces dernières années. Au cours des 20 prochaines années, tout système énergétique durable dépendra d'une utilisation rationnelle des sources traditionnelles et d'une utilisation accrue de l'énergie. La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sécurité aux consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant, les sources aléatoires imposent certaines règles en termes de dimensions et d'utilisation des systèmes de récupération d'énergie.

Le présent chapitre sera consacré pour un état de l'art sur les énergies de ressources renouvelables, ainsi que quelques caractéristiques et statistiques relatives à ces technologies avec un accent sur l'énergie solaire photovoltaïque.

## II. Sources de production conventionnelles

La production d'énergie par sources conventionnelles est réalisée en brûlant des combustibles fossiles tels que le gaz naturel, le pétrole et le charbon. L'énergie nucléaire est également considérée comme une forme d'énergie non renouvelable ou conventionnelle.



Figure I.1 : Les différentes sources des énergies conventionnelles

- ✓ **Le charbon :** est une source d'énergie accessible, surtout en termes de coût. Nous aimerions donc l'utiliser le plus longtemps possible. Cependant, la combustion de

ce matériau fossile libère de grandes quantités de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. L'industrie est donc en partie responsable du réchauffement climatique.

- ✓ **Le pétrole** : C'est la combustion des matières fossiles. Cette énergie, principalement utilisée dans le secteur des transports, est fortement influencée par la géopolitique.
- ✓ **Le gaz naturel** : La production de chaleur dans les habitations privées est principalement autorisée. Les centrales électriques utilisent également cette énergie pour produire de l'électricité.
- ✓ **L'énergie nucléaire** : l'énergie nucléaire pose sur l'uranium, un combustible fissile, donc les minerais se trouvent sous terre. Grâce à la chaleur dégagée par la fission des atomes d'uranium.

### III. Sources d'énergies renouvelables

Une source d'énergie renouvelables est une source qui n'est pas détruite lorsqu'elle est utilisée et qui a la capacité de se régénérer (renouveler) naturellement presque à la même vitesse qu'elle est utilisée.

Parmi les énergies renouvelables, on compte celle qui provient du soleil, de l'eau, du biocarburant, du vent, de la chaleur...etc.

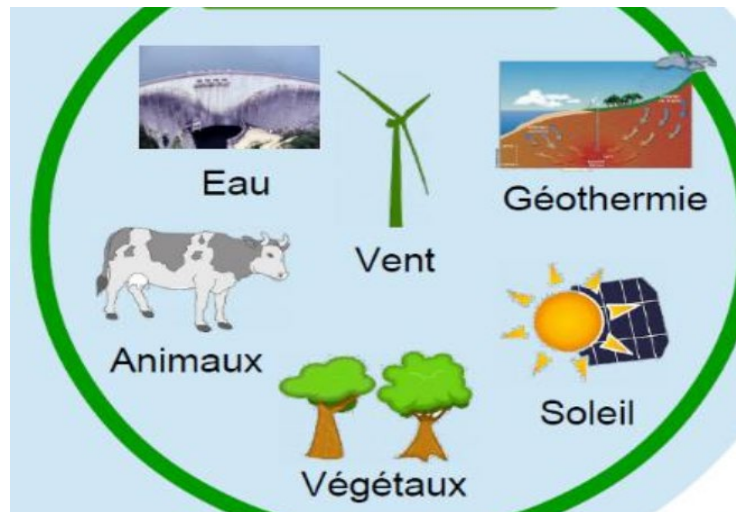


Figure I.2 : Les différentes sources des énergies renouvelables

⇒ **L'énergie hydraulique** : permet de produire de l'électricité à partir de centrale hydroélectrique grâce à la puissance de l'eau cette force dépend soit de la hauteur de la chute (centrale haute ou moyenne chute) soit du débit de la rivière et des fleuves.



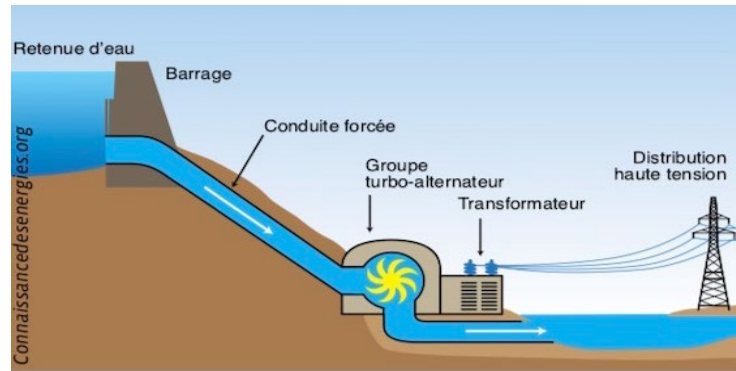


Figure I.3 : schéma de fonctionnement d'une centrale hydraulique

⇒ **L'énergie marémotrice** : l'énergie des marées provient du mouvement de l'eau créée par les marées et est causée par l'attraction gravitationnelle combinée de la lune et du soleil.

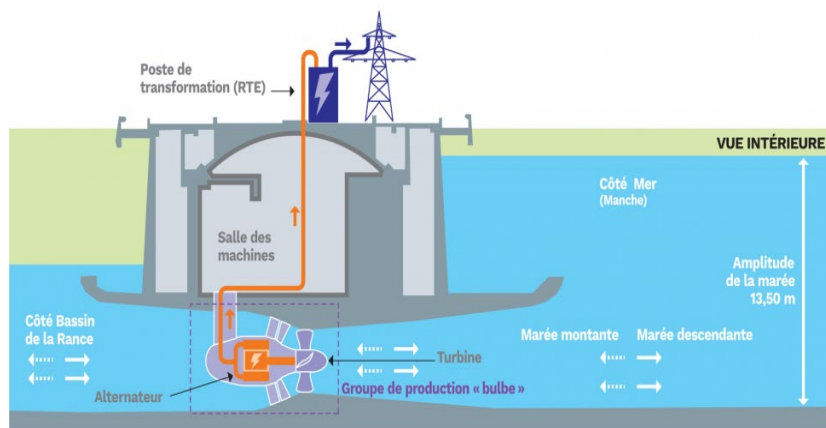


Figure I.4 : Les différents éléments de l'usine marémotrice

⇒ **L'énergie des vagues et des courants** : autrement c'est l'énergie houlomotrice fait référence à l'énergie électrique générée par les vagues de houle, c'est-à-dire par les vagues continues générées par l'effet du vent a la surface de la mer, parcourant parfois de grandes distances.

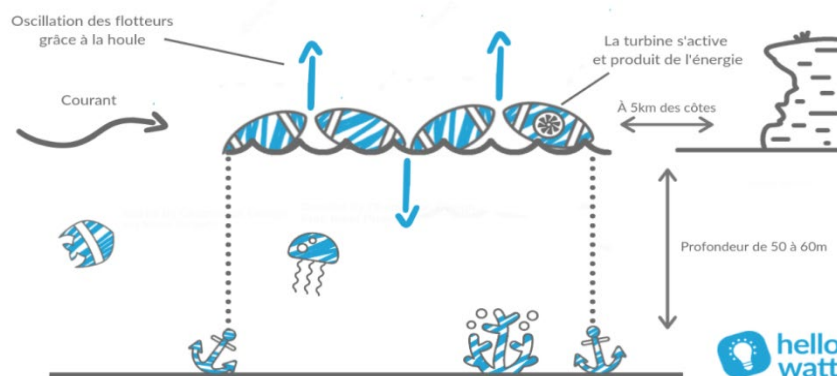


Figure I.5 : Fonctionnement de l'énergie des vagues

⇒ **La biomasse** : l'énergie de biomasse est une source d'énergie renouvelable qui repose sur la circulation de matières végétales et animales vivantes. La biomasse est la plus ancienne forme d'énergie utilisée par l'homme de la découverte préhistorique du feu.

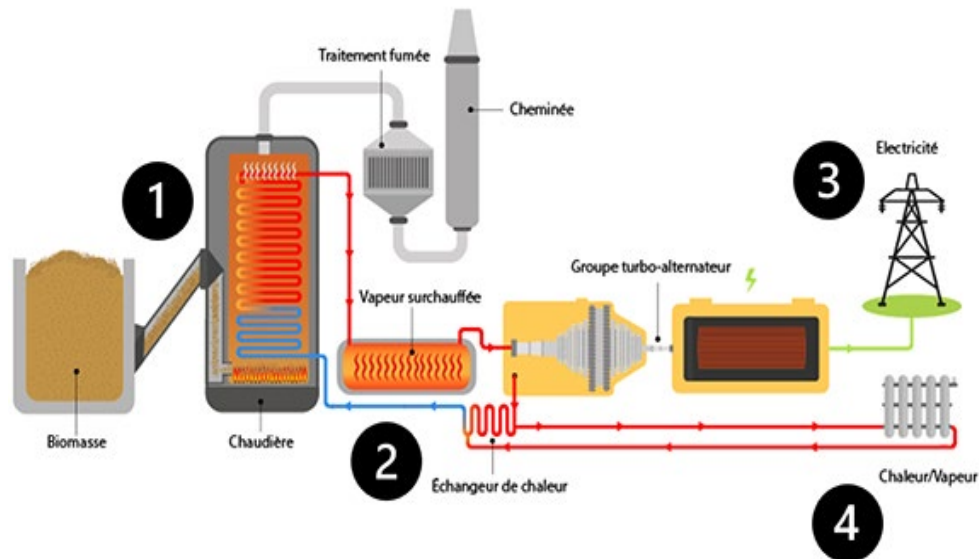


Figure I.6 : Utilisation de la biomasse

⇒ **L'énergie géothermique** : dépend de la chaleur de la terre. Cette énergie permet aux centrales géothermiques de produire de l'électricité grâce à l'eau très chaude des nappes dans le sous-sol de la terre. Pour chaque 30 mètres de profondeur, la température de la roche augmentait en moyenne de 1°C.

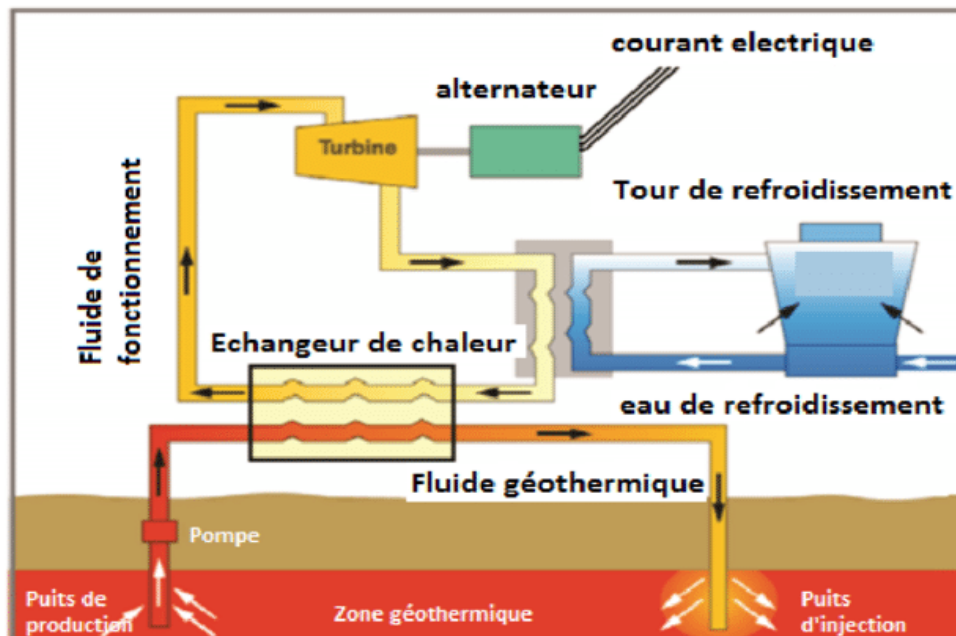


Figure I.7: Schéma descriptif d'une centrale géothermique

⇒ **L'énergie éolienne** : est l'énergie générée par le vent, c'est à dire par le déplacement des masses d'air. Ce dernier est généré lors d'une différence de températures, conséquemment de pression entre deux masses d'air.



**Figure I.8** : Conversion éolienne

⇒ **L'énergie solaire** : Le soleil libère une énorme quantité d'énergie. L'énergie solaire fait donc référence à la partie du rayonnement solaire qui traverse l'atmosphère et atteint la Terre. peut utiliser directement le rayonnement solaire pour satisfaire ses besoins. Par exemple, le Soleil nous donne la possibilité d'éclairer ou de chauffer un bâtiment en l'orientant selon le rayonnement. Il est également possible de convertir l'énergie solaire en énergie utile, notamment en électricité, à l'aide de panneaux solaires.



**Figure I.9** : Panneaux solaire

On peut illustrer ces différentes sources renouvelables dans ce tableau :

<i>Quelle source</i>	<i>Comment la capter et la transformer</i>	<i>Sous quelle forme l'utiliser</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Photovoltaïque</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cellules photovoltaïques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Electricité direct ou stockée dans des batteries</li> <li>• Electricité injectée dans le réseau</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Thermique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capteur solaires à basse températures</li> <li>• Capteur solaire à haute températures</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eau chaude sanitaire</li> <li>• Chaleur à très hautes températures dans le four                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Chauffage</li> </ul> </li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eolien</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• moulin à vent</li> <li>• éolienne mécanique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• force mécanique</li> <li>• force mécanique (pompage de l'eau)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• hydraulique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• petite centrale hydroélectrique</li> <li>• grande centrale hydroélectrique</li> <li>• marémotrice (courant marins et vagues)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Electricité direct ou stockée dans des batteries</li> <li>• Electricité injectée dans le réseau</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biomasse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• chaudières biocombustibles (bois, rafles de maïs, paille...)</li> <li>• distillerie, unité d'estérification (blé betterave, colza...)</li> <li>• bio digesteur (déchets organique, poubelle)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• chauffage</li> <li>• biocarburant pour les transports</li> <li>• bio gaz pour les transports ou pour le chauffage ou l'électricité</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• géothermie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pompes à chaleur (à moins de 30 C°)</li> <li>• centrales basse et moyenne énergie (130 à 150 C°)</li> <li>• centrales hautes énergie (plus de 150 C°)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Chauffage</li> <li>• Climatisation</li> <li>• chauffage</li> <li>• électricité injectée dans le réseau</li> </ul>

**Tableau I.1** : Récapitulatif sur les différentes ressources renouvelable

## IV. Energie solaire

### IV.1. Définition

L'énergie solaire est l'une des sources d'énergie renouvelables et la plus abondante au monde, c'est rayonnement solaire qui peut être utilisé dans plusieurs choses, la production de chaleur et la production d'électricité, elle a récemment assisté à une baisse des coûts de production d'une manière qui la qualifie pour concurrencer le pétrole et le gaz.

### IV.2. Solaire thermique

Elle produisant de la chaleur à partir du rayonnement solaire infrarouge, afin de chauffer de l'eau, de l'air ou un autre fluide (la technologie est assez simple, comparée au photovoltaïque) donc moins onéreuse. Il s'agit de capter les calories grâce à des surfaces absorbant de la chaleur, des plaques métalliques peintes en noir par exemple, ils sont très répandus dans le pays à fort ensoleillement pour produire de l'eau sanitaire destinée aux habitations n'ayant pas besoin de chauffage central (pays d'Afrique, Grèce...).

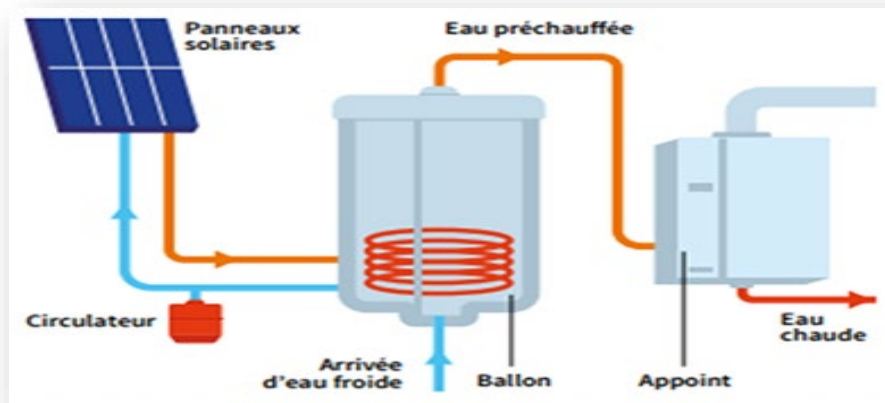


Figure I.10 : Exemple de chauffe-eau solaire thermique à charge

### IV.3. Solaire photovoltaïque

Dans ce type, l'exploitation photovoltaïque de l'énergie solaire se fait à partir de l'utilisation des modules ou panneaux photovoltaïque, composée de cellules solaires ou de photopiles qui sont des composants électroniques qui permettent de produire l'électricité à partir du rayonnement lumière de soleil, elles sont constituées de semi-conducteurs.

#### IV.3.1. Cellule photovoltaïque

##### A- Historique

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

- ✓ 1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide.

✓ 1875: Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

✓ 1958: Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

✓ 1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.

✓ 1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux États-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell.

En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé Modélisation et caractérisation des modules photovoltaïques.

### B- Fonctionnement de la cellule photovoltaïque

La transformation de la cellule PV pour produire l'électricité est basée sur les mécanismes suivants :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif
- conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur
- collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant.

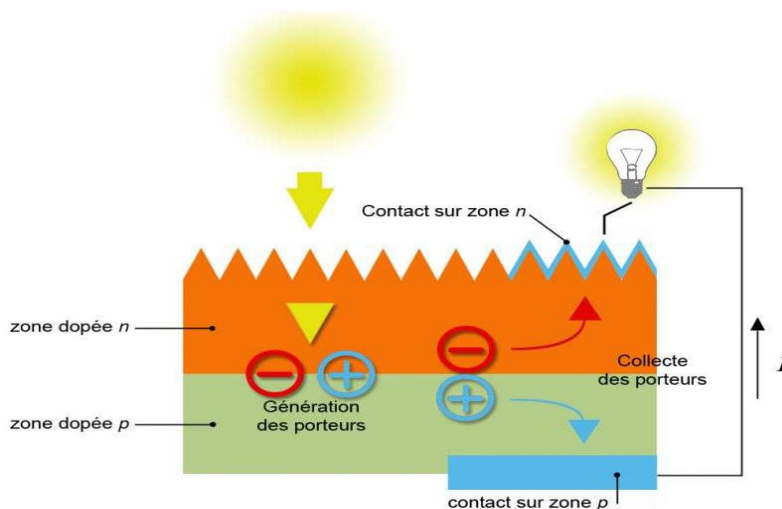


Figure I.11 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque



- Dans la zone (n) ou (p), les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont "envoyés" par le champ électrique dans la zone p (pour les trous) ou dans la zone n (pour les électrons) où ils seront majoritaires. On aura un courant de diffusion.
- Dans la zone de charge d'espace, le pair électron /trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique ; les électrons vont aller vers la région (n), les trous vers la région (p). Ces deux contributions s'ajoutent pour donner une photo courant résultant qui il est proportionnel à l'intensité lumineuse [1].

### C- Technologie des cellules

#### ❖ Silicium monocristallin

Il existe deux méthodes par lesquelles il est possible d'obtenir du silicium monocristallin de qualité microélectronique, mais nécessitant cependant une dépense d'énergie considérable, proche du MWh [2].

#### ❖ Le silicium poly-cristallin (multi cristallin)

La majorité des modules photovoltaïques sont à base de silicium poly ou multi-cristallin, son intérêt est au niveau de coûts de production plus faibles, il est constitué de cristaux de 1 mm à environ 2 cm assemblés, appelés « grains ». Le refroidissement est une étape essentielle parce qu'il détermine la grosseur du grain et la distribution des impuretés. Comparé au Si monocristallin, la structure est moins idéale ayant pour résultat une perte d'efficacité de conversion d'environ de 1% comparé à du monocristallin [3].

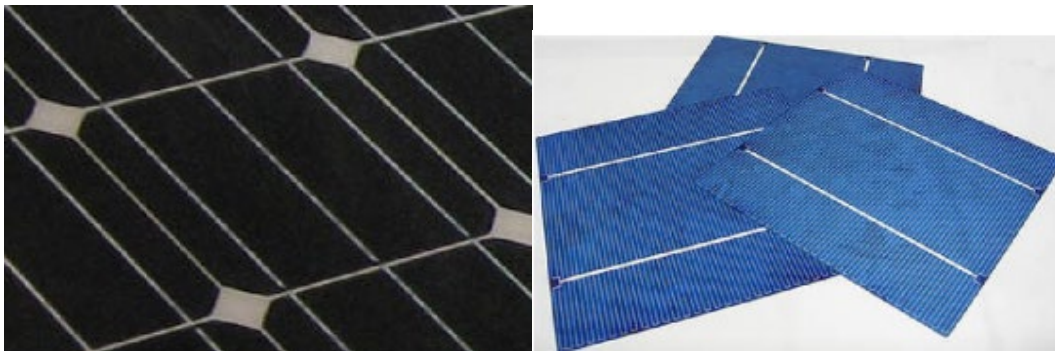


Figure I.12 : les cellules monocristallines et poly-cristallines [4]

#### ❖ Silicium en ruban autosupporté

Les techniques de production de silicium en rubans autosupportés ont été très séduisantes sur le plan technologique. Plusieurs procédés ont été développés. Ces rubans ont connu de nombreux développements au niveau de la recherche et, pour certains d'entre eux, jusqu'à la conception de chaînes de production préindustrielles. La plus connue est basée sur

l'effet de la capillarité entre deux lèvres de carbone. La méthode RST est l'obtention de silicium ruban très mince ( $< 100 \mu\text{m}$ ), permettant ainsi un gain matière très important donc la vitesse de croissance linéaire est lent.

❖ **Silicium nanocristallin et amorphe**

Les cellules à base de silicium amorphe sont basées sur l'empilement de base constitué par une couche de type p, une couche non dopée dite intrinsèque et notée i, et une couche de type n. Il s'agit de technologies largement similaires à celles utilisées dans le domaine des écrans plats. Les cellules solaires au silicium amorphe, à l'origine cantonnées dans des marchés de niches (exemple : calculettes) ont élargi leur champ d'application.

❖ **Cellules à base de tellurure de cadmium CdTe**

Les cellules à base de CdTe sont également basées sur la formation de jonction p-n mais cette fois-ci par la mise en contact de deux matériaux différents, on parle alors d'hétérojonction. Hétérojonction est une jonction formée par deux semi-conducteurs différents ou par un métal et un semi-conducteur. Quand les deux semi-conducteurs ont le même type de conductivité, on parle d'hétérojonction *isotype*. Lorsque le type de conductivité diffère, on parle d'hétérojonction *anisotype*. C'est ce dernier type d'hétérojonction qui présente davantage d'intérêt.

❖ **Les cellules multi-jonctions**

La première jonction à grande bande interdite permet de convertir efficacement les photons UV en minimisant les pertes par thermalisation. La seconde jonction située immédiatement derrière possède un gap plus petit et convertit alors de façon optimale les photons visibles qui traversent la première jonction. La troisième jonction à petit gap convertit les photons infrarouges. [5] Utilisant actuellement généralement des alliages dérivés de l'arséniure de gallium GaAs. Comme montre la figure :

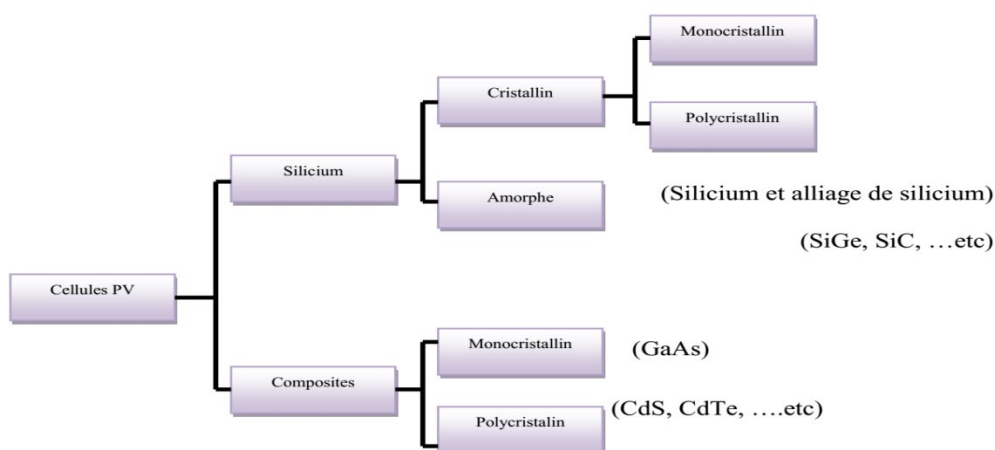


Figure I.13 : Les différentes technologies des cellules photovoltaïques



Récemment des cellules photovoltaïques dites organiques sont apparus dont au moins la couche active est constituée de molécules organiques.

### IV.3.2. Caractéristique de la cellule photovoltaïque

#### A- Caractéristique courant-tension (I-V)

Sous un éclairage donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension (I-V) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. La caractéristique I(V) représente les trois zones essentielles :

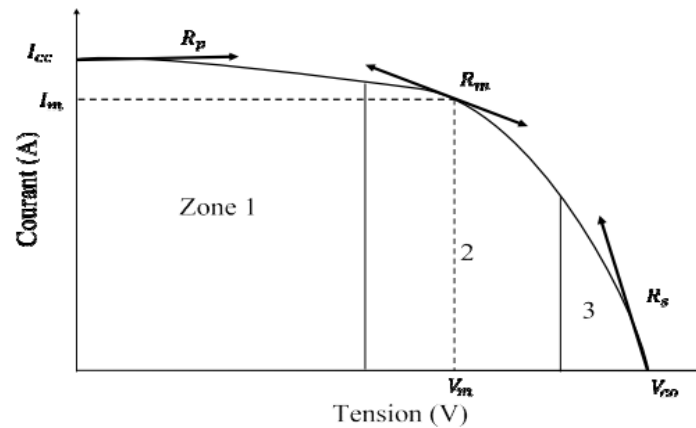


Figure I.14 : La caractéristique I-V d'une cellule PV

- La zone (1) : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
  - La zone (2) : représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.
  - La zone (3) : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension [6].
- Deux grandeurs physiques définissent cette courbe, qui sont, le courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert.

#### ➤ Courant de court-circuit

Le courant de court-circuit noté ( $I_{cc}$ ) il s'agit du courant qui traverse la cellule photovoltaïque lorsque celle-ci est court-circuit, c'est-à-dire lorsque le pôle (+) est relié au pôle (-) (la tension à ses bornes est alors nulle). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule est nulle [7].

#### ➤ Tension en circuit ouvert

La tension en circuit ouvert notée ( $V_{co}$ ) il s'agit de la tension aux bornes de la cellule lorsque celle-ci est en circuit ouvert, c'est-à-dire lorsque le pôle (+) et le pôle (-) sont isolés

électriquement de tout autre circuit électrique (le courant la traversant est alors nul). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule est nulle [8].

➤ **Point de puissance maximale**

C'est le point qui correspond à la valeur maximale de la puissance de fonctionnement du générateur PV. C'est le produit de la tension et du courant au point de puissance maximale.

$$P_{ppm} = V_m \cdot I_m$$

#### IV.4. Les systèmes photovoltaïques

##### IV.4.1. Description des systèmes photovoltaïques :

Dans les pays où le coût élevé de l'extension du réseau électrique vers les clients isolés est très élevé, a fait que de nombreuses communautés, propriétés et ménages du monde entier s'appuient désormais sur des systèmes utilisant les énergies renouvelables pour subvenir à leurs besoins en électricité. Les systèmes photovoltaïques autonomes offrent une option très intéressante dans ce domaine et peuvent aussi servir de complément aux technologies plus anciennes (par exemple le diesel). Ils sont largement utilisés dans des petites installations, voir même dans les grandes installations.

Il existe trois types d'installations PV qui s'appuient sur un générateur photovoltaïque:

- système photovoltaïque connecté au réseau
- système photovoltaïque autonome (isolé)
- système hybrides

##### IV.4.2. Les systèmes autonomes :

Sont appelés aussi « stand-alone » ne sont pas raccordés au réseau électrique public. L'énergie solaire est stockée provisoirement dans des batteries. En cas de besoin d'électricité peut être utilisée directement avec des appareils électriques en courant continu. Ou transformée en courant alternatif par un onduleur puis injectée dans une installation à courant alternatif (couplage AC). Des appareils usuels à courant alternatif (réfrigérateur, téléviseur, pompe, etc.) peuvent être ainsi alimentés. En Algérie, les installations en site isolé sont surtout utilisées pour les chalets de montagne ou les maisons difficilement accessibles. Les systèmes en site isolé permettent également d'alimenter en électricité les maisons situées dans des régions éloignées de tout réseau. Dans les pays émergents, ces installations sont souvent le seul moyen d'alimenter en électricité des villages isolés. La demande est immense : dans le monde, il existe encore environ deux milliards de personnes sans électricité et loin de tout réseau électrique public.

Comme on le remarque sur la (figure I.15) qui représente l'exemple d'un système PV isolé,

un système de stockage est associé au générateur PV pour assurer l'alimentation à chaque instant et pendant plusieurs jours malgré l'intermittence de la production.

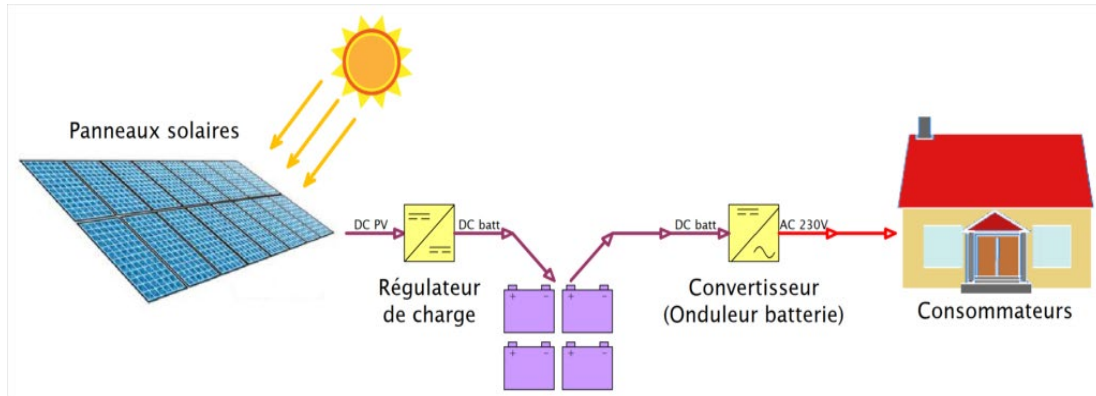


Figure I.15 : Structure d'un système autonome

#### IV.4.3. Les systèmes raccordés au réseau :

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectés à un réseau (figure I.16) sont une résultante de la tendance à la décentralisation du réseau électrique. L'énergie est produite plus près des lieux de consommation. Les systèmes connectés à un réseau réduisent la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Il produit sa propre électricité et achemine son excédent d'énergie vers le réseau, auprès duquel il s'approvisionne au besoin, ces transferts éliminent le besoin d'acheter et d'entretenir une batterie. Il est toujours possible d'utiliser ceux systèmes pour servir d'alimentation d'appoint lorsque survient une panne de réseau. Les installations photovoltaïques peuvent être raccordées au réseau, ce qui représente une économie importante en investissement et en fonctionnement. Elles utilisent le réseau comme un stock, et transforment la totalité de l'électricité produite en courant alternatif de 220 V ou 380V, ainsi que le photovoltaïque est la seule filière qui peut être installée n'importe où.

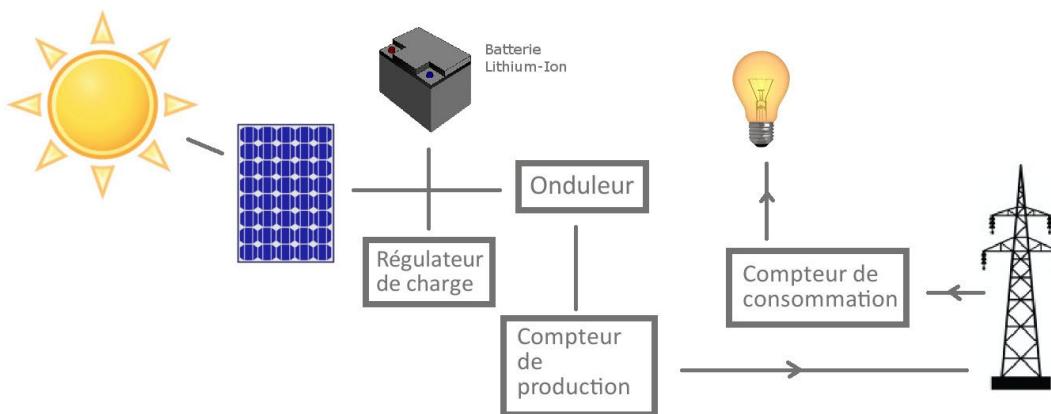


Figure I.16 : Architecture d'un système connecté au réseau

On distingue deux types d'installations connectées au réseau :

- **Installation centralisée** : génération de la puissance Photovoltaïque à grand - échelle centralisée dans les stations de puissance Photovoltaïque.
- **Installation décentralisée** : forme alternative de génération de puissance distribuée dans les unités situées directement dans le lieu du consommateur.

De jour, les installations photovoltaïques couplées au réseau injectent de l'énergie dans le réseau à travers le convertisseur. Au contraire, pendant la nuit le propriétaire de l'installation peut "récupérer" cette énergie, dans le cas des installations décentralisées, et travaillent en cas de charges de pic avec le réseau, dans le cas des installations centralisées. Comme la consommation électrique est importante de jour, cette manière de procéder est très raisonnable.

#### IV.4.4. Les systèmes hybrides :

Les systèmes d'énergie hybride associent au moins deux sources d'énergie renouvelable aussi une ou plusieurs sources d'énergie classiques. Les sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque et l'éolienne ne délivrent pas une puissance constante, mais vu leurs complémentarités, leur association permet d'obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées.

- Les différentes sources dans un système hybride peuvent être connectées en deux configurations, architecture à bus continu et architecture à bus alternatif.

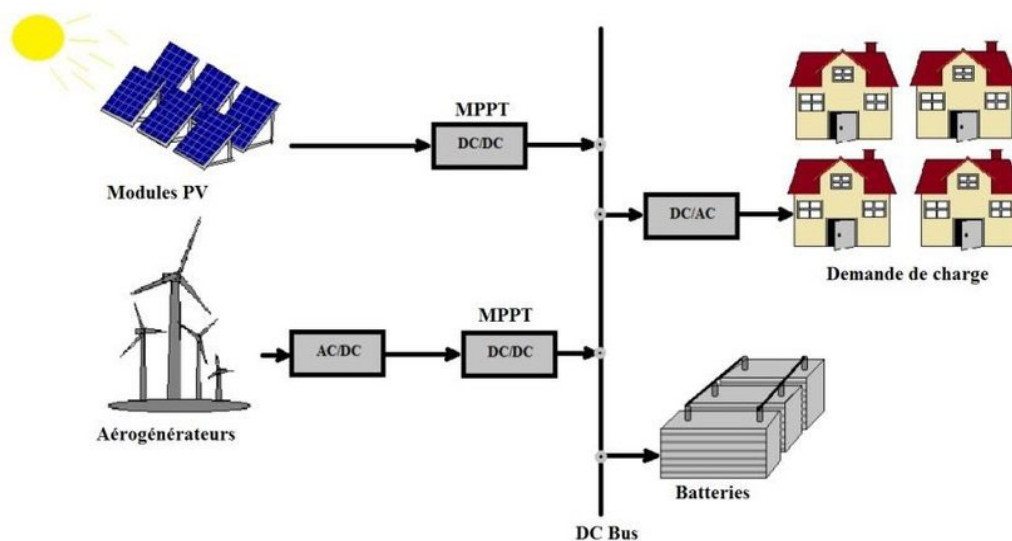


Figure I.17 : Exemple d'une architecture d'un système hybride

Dans la première configuration, la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus continu. Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à courant alternatif (CA) fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie ensuite en courant continu (CC). Les générateurs sont connectés en série avec l'onduleur pour alimenter les charges alternatives. L'onduleur doit alimenter les charges alternatives à partir du bus continu et doit suivre la consigne fixée pour l'amplitude et la fréquence. La fonction spécifique du système de supervision est la commande de mise en marche et arrêt des générateurs et du système de stockage. L'avantage de cette topologie est la simplicité de commande. Dans la seconde configuration tous les composants du système hybride sont reliés à la charge alternative.

**IV.5. Avantages et limites :**

<i>Avantages</i>	<i>Limites</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Technologie sûre et sans risque.</li> <li>➤ Pas de combustion</li> <li>➤ Des systèmes fiables et stables.</li> <li>➤ Énergie propre, non-polluante.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Le rendement des cellules PV reste assez faible.</li> <li>➤ Le coût d'investissement est relativement élevé.</li> <li>➤ Il n'y a aucune production d'électricité le soir et la nuit.</li> <li>➤ Production plus faible l'hiver, alors que la consommation est plus forte.</li> </ul>

**Tableau I.2 :** Avantages et limites des systèmes photovoltaïques

**V. Les énergies renouvelables en Algérie**

L'Algérie s'engage avec détermination sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile.

Ce choix stratégique est motivé par l'immense potentiel en énergie solaire et éolienne. Cette énergie constitue l'axe majeur du programme qui consacre au solaire thermique et au solaire

photovoltaïque une part essentielle Le solaire devrait atteindre d’ici 2030 plus de 37% de la production nationale d’électricité.

Malgré un potentiel assez faible, le programme n’exclut pas l’éolien qui constitue le second axe de développement et dont la part devrait avoisiner les 3% de la production d’électricité en 2030.

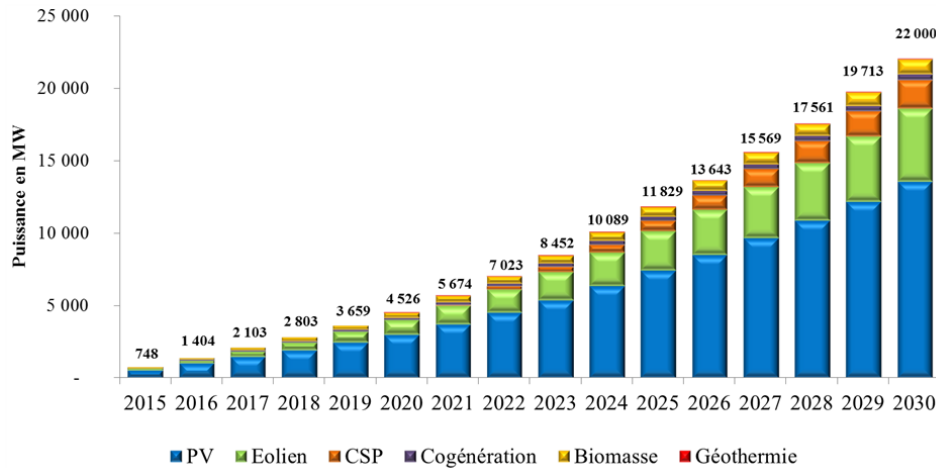


Figure I.18 : La consistance du programme en énergie renouvelables horizon 2030 [9]

## VI. L’énergie renouvelable dans l’économie

L’Algérie est considérée comme l’un des gisements solaires les plus élevés au monde. En effet, grâce de sa position géographique, ce pays dispose d’un potentiel qui dépasse les cinq (5) milliards GW h /an, avec plus de 2 500 heures d’ensoleillement en moyenne par an sur une partie très importante de son territoire. Cette durée peut dépasser 3 800 heures d’ensoleillement dans les hauts-plateaux et Sahara.

L’énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m<sup>2</sup> est de l’ordre de 5 KW / h sur la majeure partie du territoire national, ce potentiel est décomposé comme suit : au nord, près de 1 700 KW h / m<sup>2</sup> / an et 2263 KW h /m<sup>2</sup> /an au sud. [10]

## VII. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les bases indispensables à la compréhension des énergies renouvelables, l’énergie électrique et l’énergie solaire en particulier. On a rappelé quelques notions sur les cellules photovoltaïques, ses différentes technologies, ainsi que les systèmes photovoltaïques utilisés dans ce domaine, enfin on a conclu avec le potentiel d’énergie renouvelable en Algérie. Le chapitre deux sera consacré pour l’étude des caractéristiques électrique d’un générateur photovoltaïque.

## CHAPITRE 2 : Caractérisation d'un générateur photovoltaïque sous différents états

## I. Introduction :

L'énergie solaire est une source d'énergie renouvelable abondante et propre qui peut être convertie en électricité grâce à des cellules photovoltaïques. Les cellules photovoltaïques sont des dispositifs électroniques qui convertissent la lumière du soleil en électricité en utilisant l'effet photoélectrique. Elle est composée de plusieurs couches de matériaux semi-conducteurs qui agissent ensemble pour générer un courant électrique.

L'énergie photovoltaïque est de plus en plus utilisée dans le monde entier pour produire de l'électricité, car elle est durable, respectueuse de l'environnement et économique à long terme. Le terme générateur photovoltaïque GPV est utilisé pour désigner, selon l'application considérée, un module ou un panneau PV. Toutefois, il peut faire allusion au système PV tout entier. Pour la suite de ce manuscrit, on utilisera nous allons explorer les différentes propriétés, la modélisation et les caractéristiques d'un GPV sous différents états de fonctionnement [16].

## II. De la cellule au générateur photovoltaïque

Les caractéristiques électriques d'une seule cellule sont généralement insuffisantes pour alimenter les équipements électriques. Il faut donc associer plusieurs cellules solaires pour constituer un module photovoltaïque afin d'augmenter la tension et le courant d'utilisation. Un module photovoltaïque est un ensemble en série ou en parallèle de cellules solaires.

### II.1. Association série

Lorsqu'on additionne des cellules photovoltaïques identiques en série, la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules solaires et le courant de la branche reste le même limité par le courant de la cellule la plus faible. Lorsque les cellules des modules en série ne sont pas identiques ou certaines sont partiellement ombragées, la tension d'utilisation sera légèrement diminuée [17].

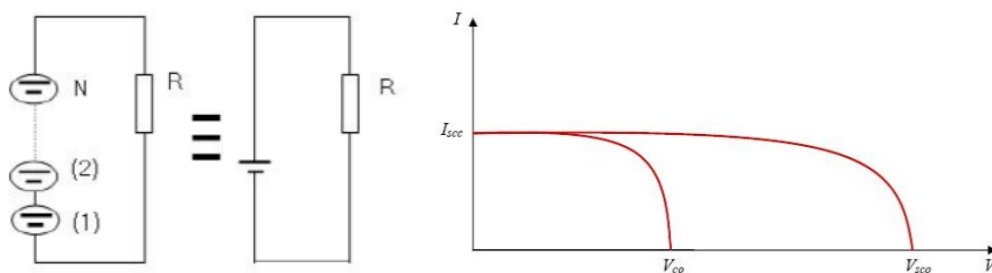


Figure II.1 : Association des cellules PV en série [18]



Les résistances séries s'ajoutent. L'augmentation de la résistance série induit une perte de puissance. L'association série est généralement le système le plus utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce [19].

### II.2. Association parallèle

Lorsqu'on additionne des cellules photovoltaïques identiques en parallèle, l'intensité augmente proportionnellement au nombre de cellules en parallèle, et la tension de la branche est égale à celle de chaque cellule. Lorsque les cellules ne sont pas identiques ou quelques-unes sont ombragées, le courant total d'utilisation sera un peu plus faible [17].

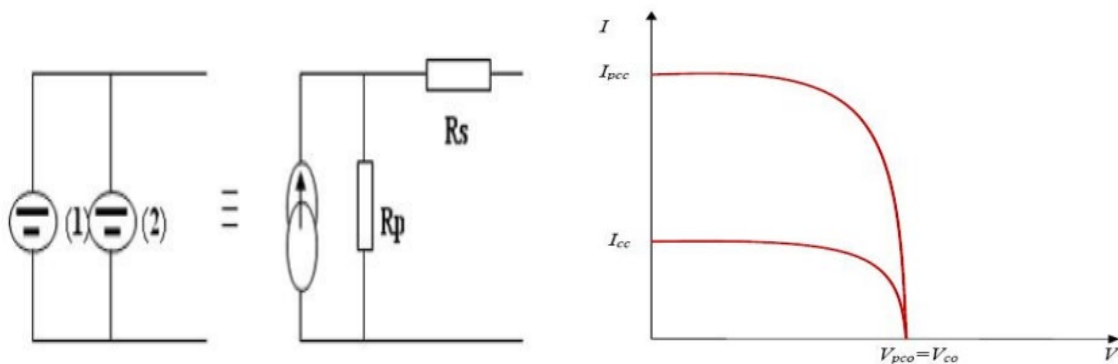


Figure II.2 : Association des cellules PV en parallèle [18]

### II.3. Association série / parallèle

Ce montage série/parallèle permet de régler la tension et le courant à la fois, selon les caractéristiques de la charge. Les cellules photovoltaïques sont montées en série et les modules en parallèle. On équipe donc les modules avec des diodes by-pass pour protéger les cellules qui deviennent passives et on utilise aussi des diodes anti-retour pour éviter le retour du courant des autres modules.

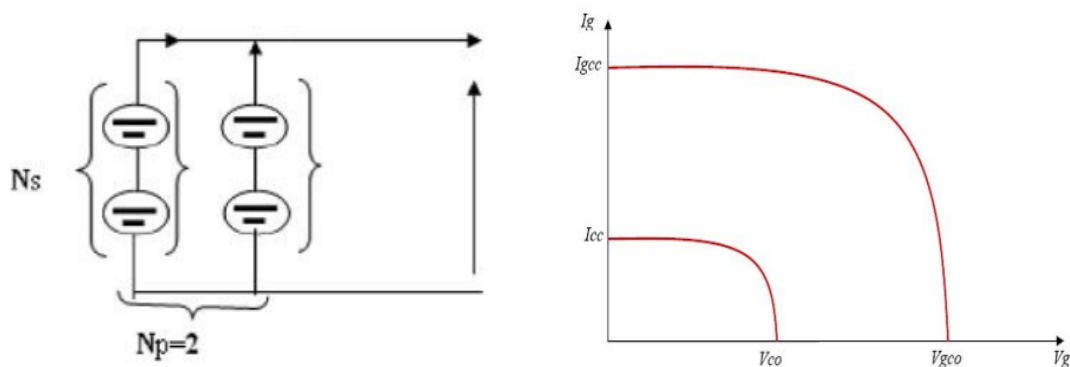


Figure II.3 : Association mixte des cellules PV [20]

### III. Modélisation de la cellule photovoltaïque

Les modèles mathématiques de la cellule photovoltaïque peuvent être basés sur des équations de conservation de l'énergie et des équations de transport des porteurs de charge. Ces modèles prennent en compte les interactions entre les photons, les électrons et les trous dans la cellule. Les résultats de ces modèles peuvent être utilisés pour optimiser la conception de la cellule, améliorer son rendement et prévoir sa durée de vie.

Nous allons présenter d'abord trois modèles mathématiques. Ces modèles sont basés aussi sur les caractéristiques techniques du module, et puis nous allons choisir un modèle pour la suite du travail :

#### III.1. Schéma équivalent de la cellule photovoltaïque

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule photovoltaïque, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. Selon cette philosophie, plusieurs modèles électriques ont été proposés dans la littérature pour représenter la cellule photovoltaïque [9] [10] [11]. Pour tenir compte des différentes limitations de la cellule photovoltaïque, on introduit cette figure représentant ces différentes limitations.

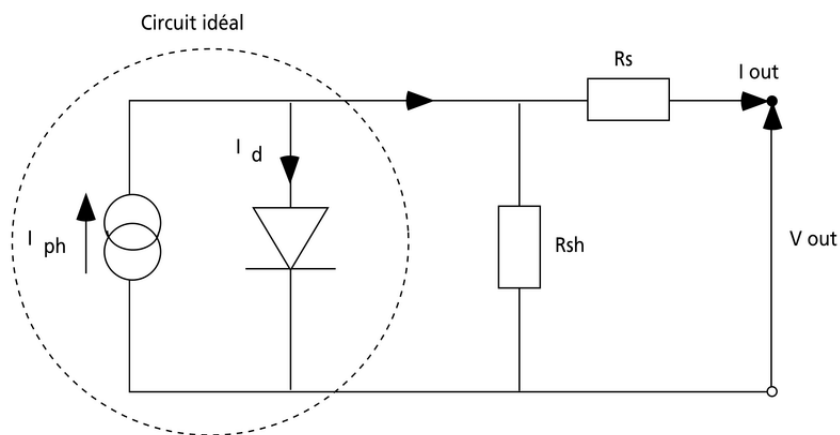


Figure II.4 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque [8]

Les différents paramètres de ce modèle sont :

⇒ **Le générateur de courant** : il délivre le courant  $I_{ph}$  correspondant au photo courant générer.

⇒ **La résistance série** : elle prend en compte la résistivité propre aux contacts entre les différentes régions constitutives de la cellule, à savoir l'émetteur, la base et les contacts

métalliques. Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule. Ceci peut être réalisé en optimisant le contact métal-semi-conducteur, et en diminuant la résistivité du matériau utilisé. Son effet devient très remarquable dans un module photovoltaïque composé de beaucoup de cellules connectées en série, et la valeur de la résistance est multipliée par le nombre de cellules.

⇒ **La résistance parallèle (shunt)**: elle traduit l'existence de shunts à travers l'émetteur, causé par un défaut. Ceci est le cas lorsque la diffusion des contacts métalliques à haute température perce l'émetteur. Elle peut aussi être due à un court-circuit sur les bords de la cellule. Cette valeur devra être la plus élevée possible. Son effet est beaucoup moins remarquable dans un module photovoltaïque par rapport à la résistance série, et il deviendra seulement apparent quand un certain nombre de modules photovoltaïques sont reliés en parallèle pour un plus grand système.

⇒ **La diode (d)** : modélise la diffusion des porteurs dans la base et l'émetteur. Son influence sera d'autant plus grande que le matériau présentera une bonne longueur de diffusion.

### III.2. Modèle à quatre paramètres

Appelés aussi modèles de trois points (point de court-circuit, point de puissance maximale et point de circuit-ouvert), les modèles explicites nécessitent seulement quatre paramètres d'entrée, à savoir : le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ), la tension de circuit-ouvert ( $V_{co}$ ), le courant maximal ( $I_m$ ) et la tension maximale ( $V_m$ ). . Les équations de ce modèle sont représentées comme suite : [21]

- Calcul du courant  $I_m$  :

$$I_m(i) = I_{sc} n_p \left[ 1 - C_1 \left( \exp \left( \frac{n_s \cdot V_m(i)}{C_2 \cdot V_{oc}} \right) - 1 \right) \right] \quad (II.1)$$

Avec :  $I_m = I_m(i) + \Delta I$

Où  $C_1$  et  $C_2$  sont des paramètres qui peuvent être calculés respectivement.

$$C_2 = \frac{\frac{V_{max}}{V_{oc}} - 1}{\ln \left( 1 - \frac{I_{max}}{I_{sc}} \right)} \quad (II.2)$$

$$C_1 = \left( 1 - \frac{I_{max}}{I_{sc}} \right) \exp \left( - \frac{V_{max}}{C_2 \cdot V_{oc}} \right) \quad (II.3)$$

$$\Delta I = \alpha_{ref} \cdot \left( \frac{E_s}{E_{sref}} \right) \cdot \Delta T + \left( \frac{E_s}{E_{sref}} - 1 \right) n_p I_{sc} \quad (II.4)$$

Avec :  $\Delta T = T_j - T_{jref}$

La température de jonction  $T_j$  de la cellule est donnée par la relation suivante :

$$T_j = T_a + E_s \cdot \left( \frac{Noct-20}{800} \right) \quad (II.5)$$

Avec NOCT : la température nominale de fonctionnement de la cellule solaire.

$T_a$  : est la température ambiante.

- calcul de la tension  $V_m$  :

$$V_m = V_{max} \cdot \left[ 1 + 0.0539 \ln \frac{E_s}{E_{sref}} \right] + \beta_{ref} \cdot \Delta T \quad (II.6)$$

Avec :

- $\beta_{ref}$ : Le coefficient de la tension en fonction de température ( $V/^\circ C$ ).
- $E_{sref}$  : L'irradiation solaire de référence.
- $T_{jref}$  : La température de référence.
- $V_{max}$  = donnée
- Calcul de la puissance  $P_m$  :

$$P_m = I_m \cdot V_m \quad (II.7)$$

### III. 3. Modèle à cinq paramètres

C'est un modèle simplifié à cinq paramètres ( $I_{cc}, V_{co}, I_{mpp}, V_{mpp}, R_s$ ) qui tient compte de la variation du courant et de la tension du panneau photovoltaïque en fonction des conditions climatiques. Le courant ( $I_{pv}$ ) de la cellule photovoltaïque sous les conditions standard de fonctionnement est donné par l'équation (II.8) suivant la figure (II.4) : [22]

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{Rsh} \quad (II.8)$$

Avec :

- $I_{ph}$  : Représente le photo-courant, il dépend de l'irradiation et de la température.
- $I_d$  : Courant de polarisation de la jonction PN.
- $I_{Rsh}$  : Courant traversant la résistance shunte.

L'expression du courant de la cellule solaire est donné par :

$$I_{pv} = I_{cc} \{ 1 - K_1 [ \exp (K_2 \cdot V_{mpv} - 1) ] \} \quad (II.9)$$

Ou les coefficients  $K_1, K_2$  et  $m$  sont donnés par [22] :

$$\begin{aligned} \checkmark K_1 &= 0.01175 \\ \checkmark K_2 &= \frac{K_4}{V_{co}^m} \end{aligned} \quad (II.10)$$

$$\checkmark K_3 = \ln \left[ \frac{I_{cc} (1+K_1) - I_{mpp}}{K_1 * I_{cc}} \right] \quad (II.11)$$

$$\checkmark K_4 = \ln \left[ \frac{1+K_1}{K_1} \right] \quad (II.12)$$

$$\checkmark m = \frac{\ln \left[ \frac{K_3}{K_4} \right]}{\ln \left[ \frac{V_{mpp}}{V_{co}} \right]} \quad (II.13)$$

Ou

- $I_{mpp}$  : Courant au point de puissance maximale.
- $V_{mpp}$  : Tension au point de puissance maximale.
- $I_{cc}$  : Courant en court-circuit.
- $V_{co}$  : Tension en circuit ouvert.

Il est à noter que l'équation (II.9) n'est applicable que pour un niveau d'ensoleillement  $E$  et de température particuliers ( $E=1000W/m^2$ ,  $T=25^\circ C$ ), relatif aux conditions standards de fonctionnement. Quand l'ensoleillement et la température varient, la tension et le courant du panneau photovoltaïque changent suivant les équations suivantes [22]:

$$\Delta T_c = T_c - T_{stc} \quad (II.14)$$

$$\Delta I_{PV} = \alpha_{cc} \left( \frac{E}{E_{stc}} \right) \Delta T_c + \left( \frac{E}{E_{stc}} - 1 \right) I_{cc, stc} \quad (II.15)$$

$$\Delta V_{PV} = -\beta_{co} \Delta T_c - R_s \Delta I_{pv} \quad (II.16)$$

Avec :

- $E_{stc}$  et  $E$  : Représente respectivement, le niveau d'ensoleillement dans les conditions standards de fonctionnement et dans des conditions quelconque
- $\Delta E$ : Représente la variation de l'ensoleillement.
- $T_{stc}$  et  $T_c$  : Représente respectivement, la température dans les conditions standard de fonctionnement et dans des conditions quelconques.
- $\Delta T_c$  : Représente la variation de la température.
- $\Delta I_{pv}$  : Représente la variation du courant par rapport à l'ensoleillement et à la température.
- $\Delta V_{pv}$  : Représente la variation de la tension par rapport à l'ensoleillement et à la température.

- $\alpha_{cc}$  : Représente un coefficient d'incrémentatation du courant  $I_{sc}$  quand la température de surface augmente de un degré Celsius ( $A/^{\circ}C$ ) (sous les conditions standard de fonctionnement).
- $\beta_{co}$  : Représente un coefficient d'incrémentatation de la tension  $V_{oc}$  quand la température de la surface augmente de un degré Celsius ( $V/^{\circ}C$ ) (sous les conditions standard de fonctionnement).

$\alpha_{cc}$  et  $\beta_{co}$  : Sont appelés coefficients de température.

Les nouvelles valeurs de la tension et du courant photovoltaïque sont donné par :

$$V_{nouv,pv} = V_{stc} + \Delta V_{pv} \tag{II.17}$$

$$I_{nouv,pv} = I_{stc} + \Delta I_{pv} \tag{II.18}$$

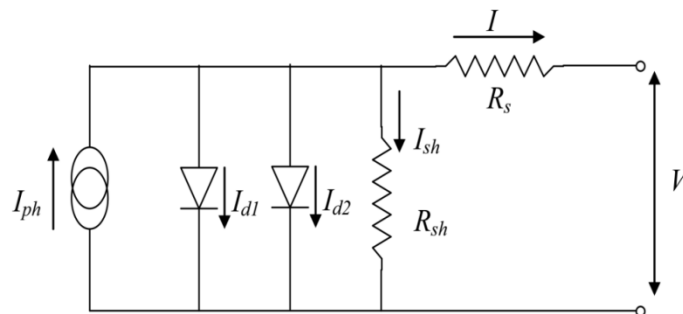
### III.4. Modèle à six paramètres

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé on considérant le schéma électrique équivalent ci-dessous figure (II.5). On considère le cas d'une cellule solaire idéale comprenant une source de courant et deux diodes en parallèles. La source de courant  $I_{ph}$  modélise le courant photo-généré. Les branches de chacune des diodes représentent respectivement le courant de diffusion dans la base et l'émetteur ( $I_{d1}$ ), et le courant de génération-recombinaison ( $I_{d2}$ ) dans la zone de charge d'espace de la jonction (ZCE).

Pour envisager le cas d'une cellule solaire réelle, le circuit équivalent doit intégrer :

- Une résistance série  $R_s$ , qui modélise les pertes résistives au sein de la photopile et donc les métallisations.
- Une résistance parallèle  $R_p$ , modélisant les courants de fuite qui court-circuitent la jonction (fuites par les bords de la cellule et au niveau de la jonction).

Le circuit électrique équivalent est donné dans la figure ci-dessous : [23]



**Figure II.5 :** Schéma électrique équivalent du modèle à deux diodes d'une cellule PV

Le courant fourni par la cellule est donné d'une manière similaire au modèle à une diode et  $I_p$  et  $I_{sh}$  garderont les mêmes expressions que celles du modèle à une diode.

Le courant total s'écrit par la relation (II.19)

$$I = P_1 \cdot E_s \left( 1 + P_2(E_s - E_{sref}) + P_3(T_j - T_{jref}) \right) - \frac{V+R_s}{R_{sh}} - \left[ P_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp\left(\frac{E_g}{k \cdot T_j}\right) \right] \cdot \left[ \exp\left(\frac{q(V+R_s I)}{k \cdot A \cdot n_s \cdot T_j}\right) - 1 \right] - \left[ P_5 \cdot T_j^3 \cdot \exp\left(\frac{E_g}{2k \cdot T_j}\right) \right] \cdot \left[ \exp\left(\frac{q(V+R_s I)}{2k \cdot A \cdot n_s \cdot T_j}\right) - 1 \right] \quad (II.19)$$

#### IV. Caractéristiques électriques du générateur étudié

La variation du courant en fonction de la tension et celle de la puissance en fonction de la tension, représentent les caractéristiques d'un générateur photovoltaïque. Dans ce travail nous avons utilisé le panneau SOLARA SM 55 de 55 Wc. Le tableau (II.1) donne les paramètres électriques du panneau utilisé.

Paramètres	Valeurs
Puissance max du panneau $P_{mpp}$	55 W
Courant au point de puissance max $I_{mpp}$	3,1 A
Tension au point de puissance max $V_{mpp}$	17,6 V
Courant de court-circuit $I_{cc}$	3,4 A
Tension en circuit ouvert $V_{co}$	21,3 V

Tableau II.1 : Paramètres électriques des panneaux SOLARA SM 55

##### IV.1. La simulation du générateur PV à l'état sain (ensoleillement homogène):

Les figures suivantes représentent les caractéristiques  $I=f(V)$  et  $P=f(V)$  à l'état sain du panneau élémentaire et dans les conditions STC ; suivie d'une simulation du générateur PV utilisé :

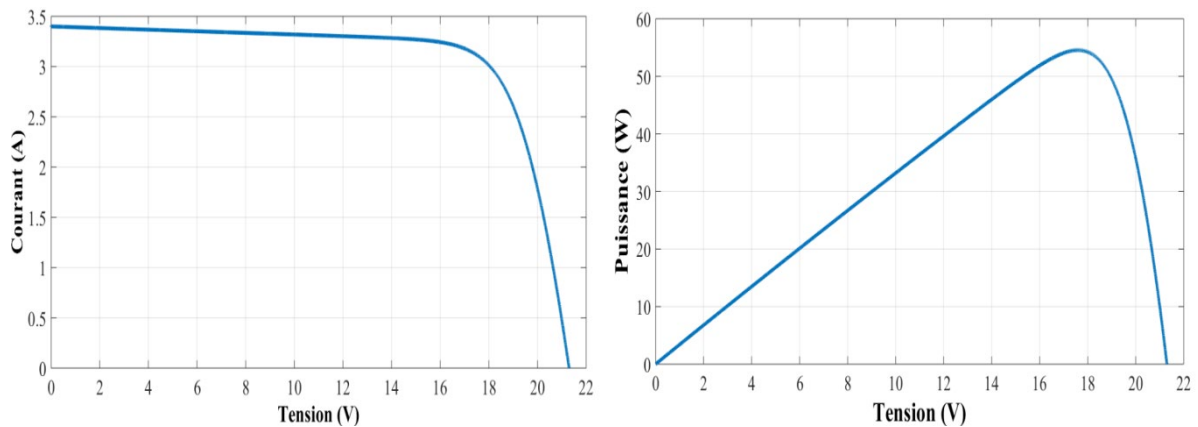
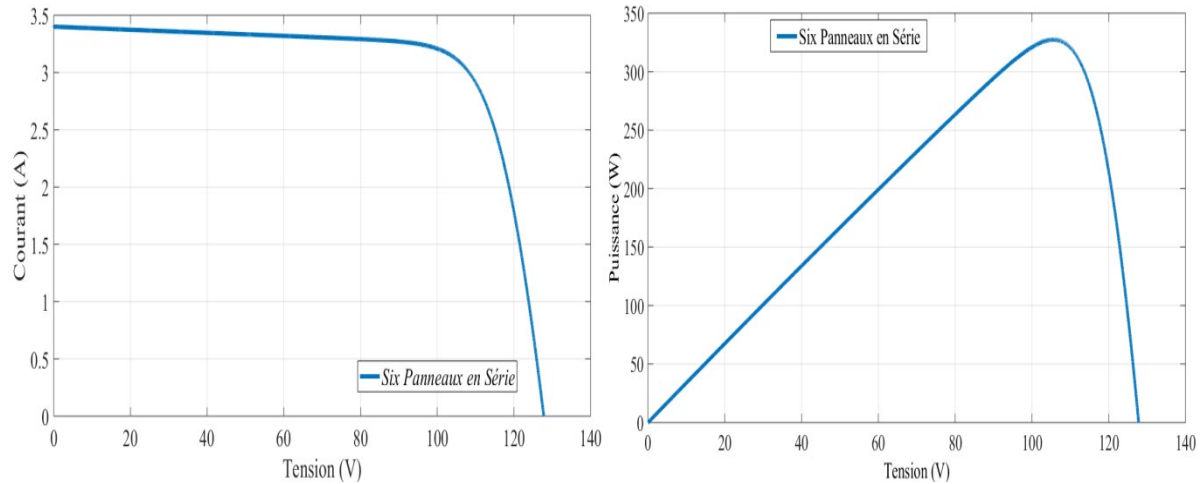
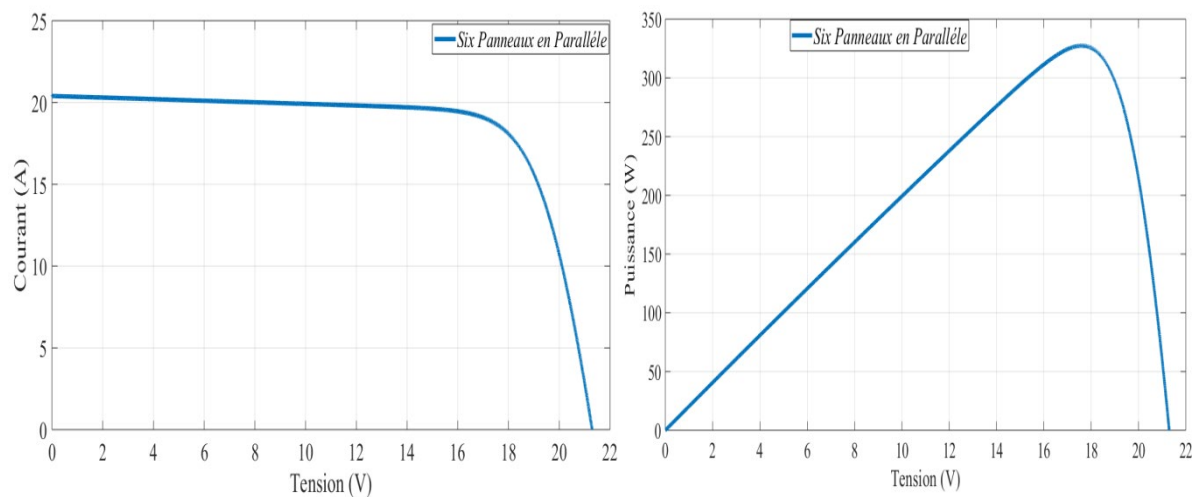


Figure II.6 : Caractéristiques dans les conditions STC du générateur (élémentaire) étudié

Dans ce travail nous avons opté pour un générateur constitué de six panneaux SOLARA de 55 W chacun, nous allons explorer les différentes configurations de connexions des panneaux à savoir (série et parallèle).



**Figure II.7 :** Caractéristiques dans les conditions STC du générateur étudié (mise en série)



**Figure II.8:** Caractéristiques dans les conditions STC du générateur étudié (mise en parallèle)

#### IV.2. La simulation du générateur PV à l'état ombragé (ensoleillement non homogène)

Dans cette partie nous allons simuler le fonctionnement du générateur PV dans les conditions d'ensoleillement non homogène (ombre), dans un premier temps un ensoleillement maximal sera reçu sur le générateur, puis une ombre surgit pour réduire à la moitié l'ensoleillement reçu par une portion du générateur PV.



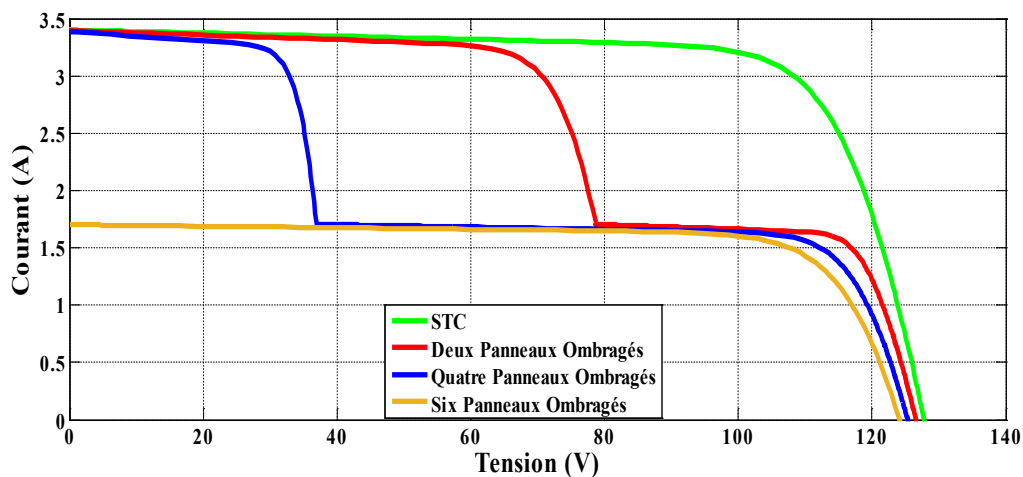


Figure II.9:Caractéristique I(V) du générateur (mise en série) sous différents états d'ombrage

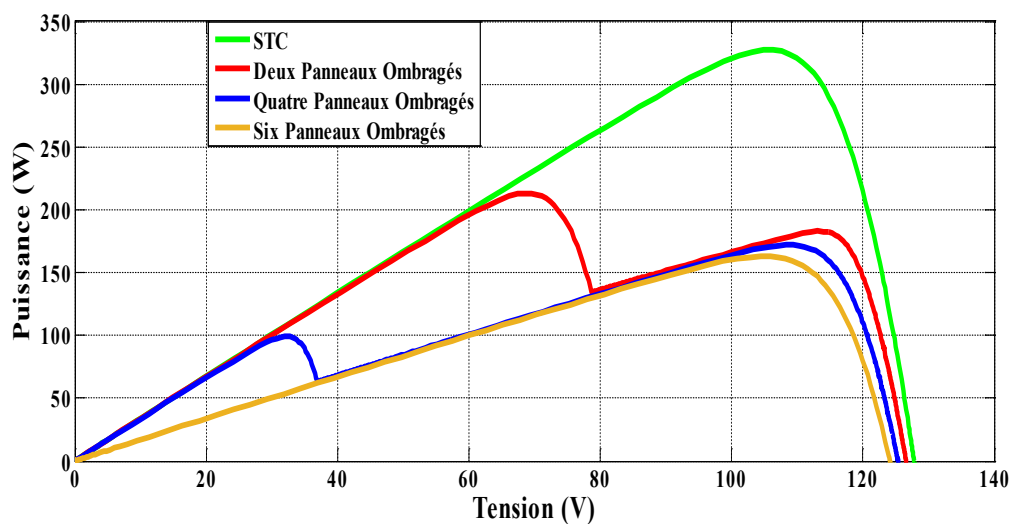


Figure II.10:Caractéristique P(V) du générateur (mise en série) sous différents états d'ombrage

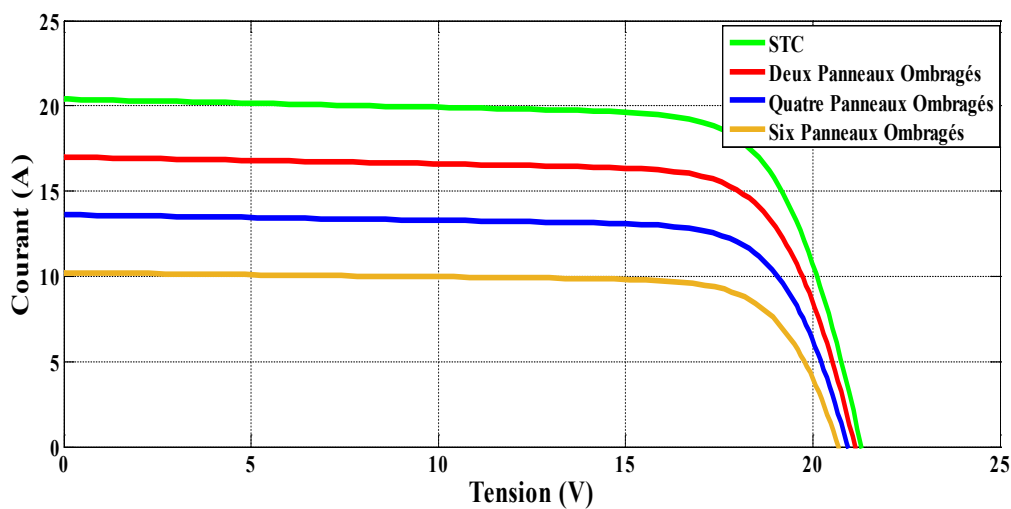


Figure II.11:Caractéristique I(V) du générateur (mise en parallèle) sous différents états d'ombrage

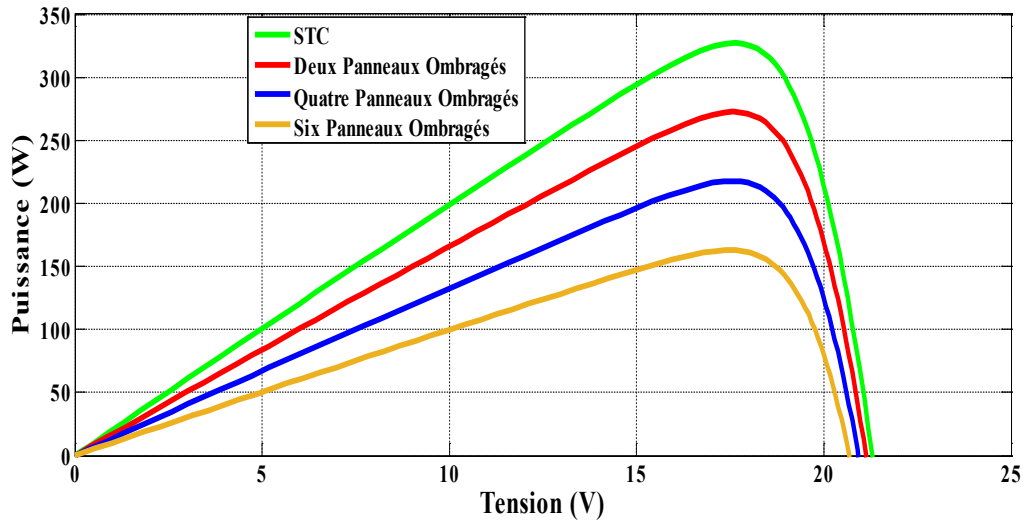


Figure II.12:Caractéristique P(V) du générateur (mise en parallèle) sous différents états d'ombrage

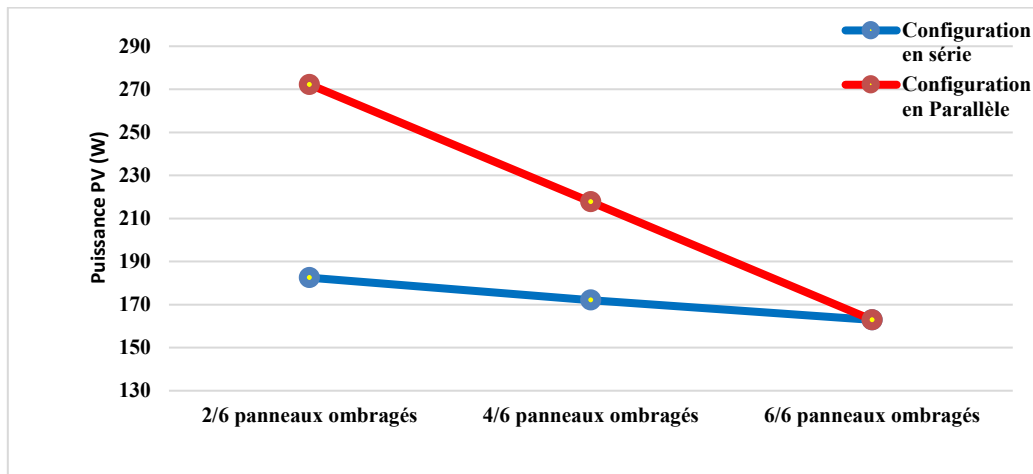


Figure II.13:Evolution de la puissance PV pour les différents états d'ombrage des deux configurations

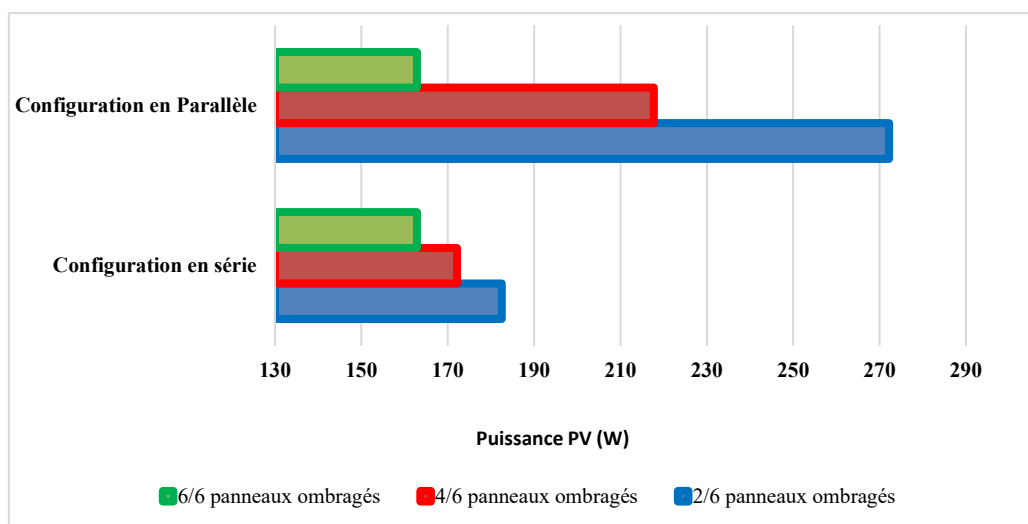
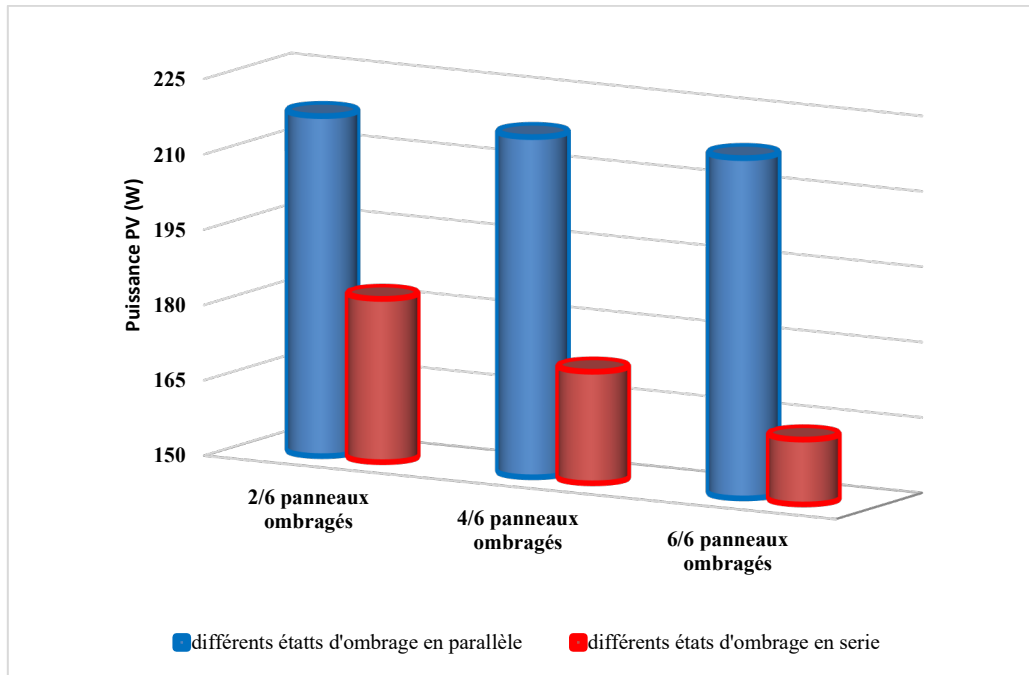


Figure II.14:Comparaison de la puissance délivrée par les deux configurations



**Figure II.15:** Comparaison de la puissance délivrée par les le même taux d'ombrage

Une ombre signifie qu'un masque empêche l'arrivée de photons sur les cellules photovoltaïques. Si une cellule (panneau) est à l'ombre, sa production de courant est dégradée. Les cellules (panneaux) photovoltaïques d'un panneau (générateur) solaire sont connectées en série. La cellule (panneau) qui produit le moins impose son courant à toutes les cellules (panneaux) du panneau (générateur).

On constate que l'ombre en série impacte la production du générateur d'une manière plus importante qu'en parallèle (contrairement à une matrice).

C'est pour cela que des diodes by-pass équipent les panneaux photovoltaïques pour minimiser la dégradation de production d'une ou plusieurs cellules voisines.

## V. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons penché sur la modélisation des générateurs photovoltaïques en vue de les caractérisés. Une simulation des caractéristiques électriques du générateur choisit à l'état sain et en présence d'ensoleillement inhomogène (ombre) a été réalisé.

Il a été conclu que les pertes de puissance sont considérablement augmentées lorsque le nombre de panneaux ombragés dans la même chaîne s'accroît, cependant, quand les panneaux ombrés sont placés dans des chaînes différentes, le MPP ne serait pas affecté.

Au chapitre suivant une investigation expérimentale sur les différents obstacles qui peuvent impacté la production photovoltaïque sera menée.

# CHAPITRE 3 : Impact de dépôt des différentes impuretés sur les performances du générateur photovoltaïque

## **I. Introduction :**

L'énergie solaire est une source d'énergie propre très utilisée grâce à sa fiabilité et son coût d'exploitation et de maintenance. Ce domaine se montre de plus en plus indispensable presque dans tous les secteurs de l'industrie et l'utilisation par le public.

Le dimensionnement d'un système photovoltaïque est basé sur un point de puissance optimale qu'elle peut fournir sous des conditions standard. Les panneaux solaires sont soumis à toutes les impuretés et peuvent subir une baisse de rendement, cela est vrai pour tous les types d'installations solaires. De plus le changement des conditions météorologiques rend ces systèmes non capables à assurer leurs points de fonctionnement optimal à cause des pertes générées par ces conditions d'exploitation inhomogènes.

Les panneaux photovoltaïques sont montés en série. Par conséquent, si une cellule produit moins à cause d'un obstacle, cela engendre une baisse de production pour l'ensemble des cellules du panneau. Pour cela nous avons opté pour les panneaux solaires équipés de diodes by-pass.

Dans ce chapitre nous allons étudier les performances du générateur photovoltaïque, en présence de différents dépôts d'impuretés qui survienne au niveau des cellules, des panneaux et des chaines photovoltaïques. Ces dépôts peuvent avoir plusieurs origines tels que : la saleté (sable, les fientes des oiseaux, la poussière, les feuilles mortes ou encore les cartons, film en nylon) ; ils se classent aussi comme étant des impuretés ayant un contact direct avec la surface des panneaux solaires.

## **II. Le rayonnement solaire**

Le rayonnement solaire qui arrive au sol se décompose en deux parties [16] : L'une provient directement du soleil (direct), l'autre a été diffusée par l'atmosphère diffus (indirect), L'atmosphère et la terre possèdent également un rayonnement propre.

### **✓ Rayonnement direct :**

C'est le rayonnement qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications, il est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère, ses rayons sont parallèles entre eux. Autrement dit, un rayon qui atteint directement la surface de la terre sans être bloqué par des nuages notamment. Le niveau de rayonnement direct dépend de l'épaisseur de l'atmosphère

que la radiation solaire doit traverser et de l'inclinaison des rayons par rapport au sol. Cette composante est nulle lorsque le soleil est caché par des nuages ou par un obstacle.

✓ **Rayonnement indirect (diffus) :**

Le rayonnement diffus est un rayonnement solaire indirect causé par la diffusion de la lumière dans les nuages et les particules atmosphériques. C'est la part du rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols,). Il n'a pas de direction privilégiée.

✓ **Rayonnement réfléchi :**

Elle correspond au rayonnement renvoyé par le sol et l'environnement par exemple l'eau ou la neige cette composante est nulle sur le plan horizontal.

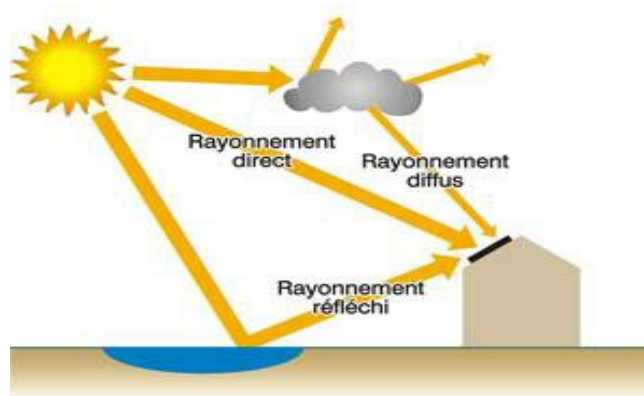


Figure III.1 : Rayonnements solaire

### III. Types d'ombrage et leur impact sur la production

Il existe deux types d'ombrage pouvant impacter les panneaux solaires [17] :

⇒ **L'ombrage partiel** : Le phénomène le plus répandu dans la pratique est l'ombrage partiel, qui est causé par des masques solaires tels que les nuages, les poteaux électriques, les immeubles, etc. Les composants des panneaux photovoltaïques ombragés produisent moins de courant que ceux sains. En raison de leur polarisation inverse, les cellules ombragées sont obligées de consommer la différence de courant générée par les autres cellules. En branchant des diodes de contournement (by-pass) en parallèle, il est possible de les protéger de ce phénomène [18]. Lorsqu'un arbre se trouve à proximité d'un panneau on peut dire que l'ombrage partiel laisse passer une partie des rayons de soleil.

Dans ce cas, quelques photons peuvent toujours atteindre le panneau, mais cela réduit considérablement la quantité de lumière captée.



**Figure III.2 :** Exemple d'ombrage partiel

⇒ **L'ombrage total** : L'ombrage total, ou complet, est le deuxième type d'ombrage qu'on peut observer. L'ombrage complet empêche tout rayonnement d'atteindre une partie de la cellule photovoltaïque (directement ou indirectement), comme une éjection d'oiseau, une branche d'arbre sur le panneau ou une couverture. Dans ce cas, la ou les cellules photovoltaïques recouvertes ne peuvent pas être atteintes par la lumière. Cela affecte encore plus la production d'électricité.



**Figure III.3 :** Exemple d'ombrage total

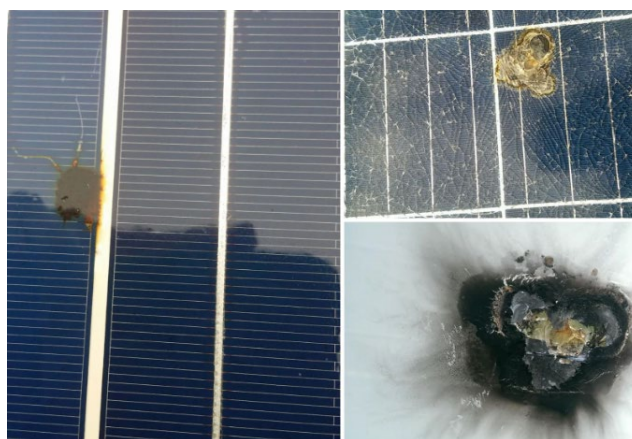
#### **IV. Conséquence d'ombrage (Hot spot)**

Les points chauds appelé hot spot en anglais sont une conséquence directe des propriétés des cellules photovoltaïques : lorsqu'une cellule photovoltaïque est éclairée, elle produit de l'électricité, elle est alors en mode générateur ; si celle-ci est ombragée, elle consomme de l'électricité, elle est alors en mode réceptrice (mode inverse).



C'est le résultat d'un échauffement de cellule. C'est cet échauffement qui va créer une petite tache brune sur votre panneau solaire. Elle ne fait qu'accumuler de l'énergie qu'elle garde pour elle et entraîne sa dégradation à cause de courant très élevés.

Le panneau solaire est constitué de cellules photovoltaïques montés en série, si l'une d'elle est endommagé par un hot spot (éclat, impact et diverse...) à ce moment le panneau est endommagé et une baisse de rendement considérable sera constaté.



**Figure III.4 :** Exemple du phénomène hot spot

#### **IV.1. Les raisons de l'apparition de hot spot**

Sont nombreuses et peuvent être classées on peut les classes comme fonctionnelles ou opérationnelles. [19]

❖ *Les raisons fonctionnelles peuvent être divisées en deux domaines :*

Non-concordance des cellules, qui se produit lorsque des cellules de courant différent sont connectées en série. Endommagement ou mauvaise qualité de la cellule solaire, pouvant survenir lors de la fabrication, car la cellule en silicium sera soumise à un processus stressant lors du roulement, de la manipulation et du transport.

❖ *Les raisons opérationnelles des hots spots sont liées à la conception et au fonctionnement de l'installation photovoltaïque et peuvent être :*

Ombrage saisonnier sur les panneaux solaires : Un installateur peut accepter des conditions d'ombrage en hiver pour augmenter la production d'électricité en été. Mais en conséquence, les panneaux seront systématiquement isolés de la rangée inférieure de cellules tous les matins et soirs d'hiver. Si nécessaire, une solution possible serait d'installer les panneaux dans une orientation horizontale, permettant aux diodes de dérivation d'être pilotées

à des moments critiques et de générer de l'électricité tout en minimisant les dommages causés par les points chauds, même en hiver. En plus de connecter la série ombragée à diverses entrées d'onduleur.

## V. Méthodologie de test

Dans cette partie nous allons effectuer des essais sur un générateur photovoltaïque composé de six panneaux en série de 55 watts chacun. La première étape consiste à identifier le panneau de base qui est le SOLARA-M55, puis vérifier les caractéristiques électriques du générateur à étudier. Les expériences se feront sur un bac expérimental basé sur un montage voltampère-métrique. Il faut noter que tous les essais ont été effectués avec les mêmes conditions météorologiques ; à savoir un ensoleillement de  $735 \text{ W/m}^2$  et une température de  $19,5^\circ\text{C}$ .

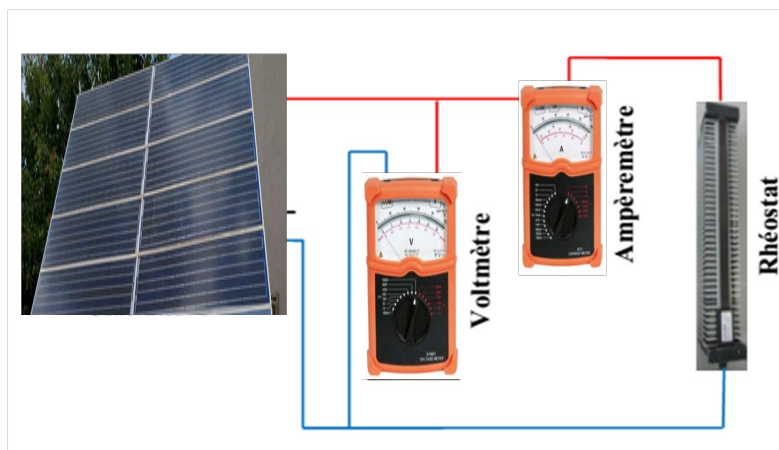


Figure III.5 : Schéma synoptique du montage voltampère-métrique

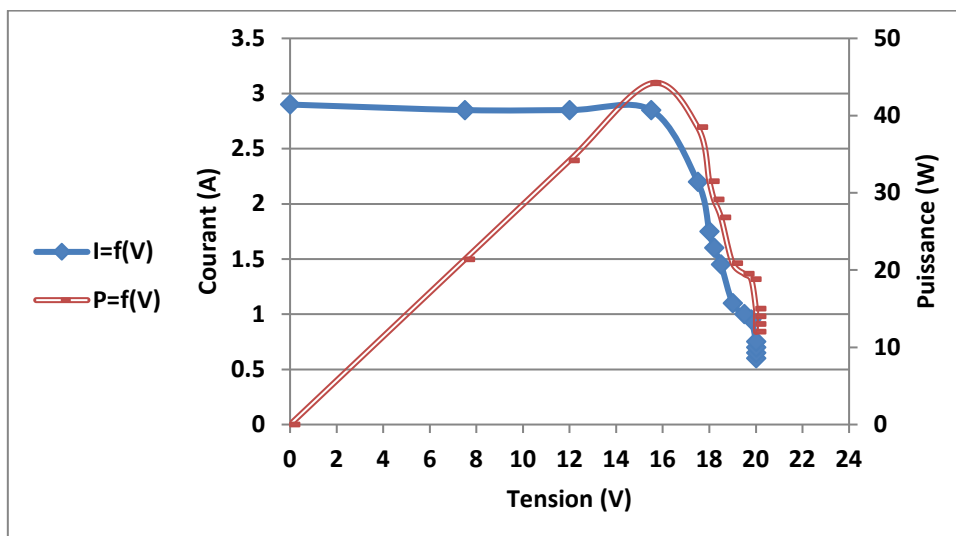


Figure III.6 : Identification du panneau photovoltaïque principale

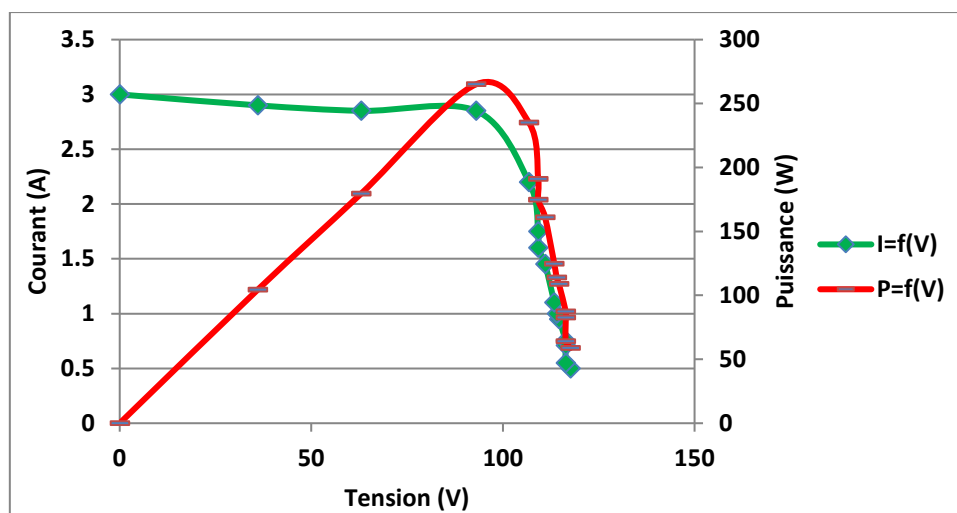


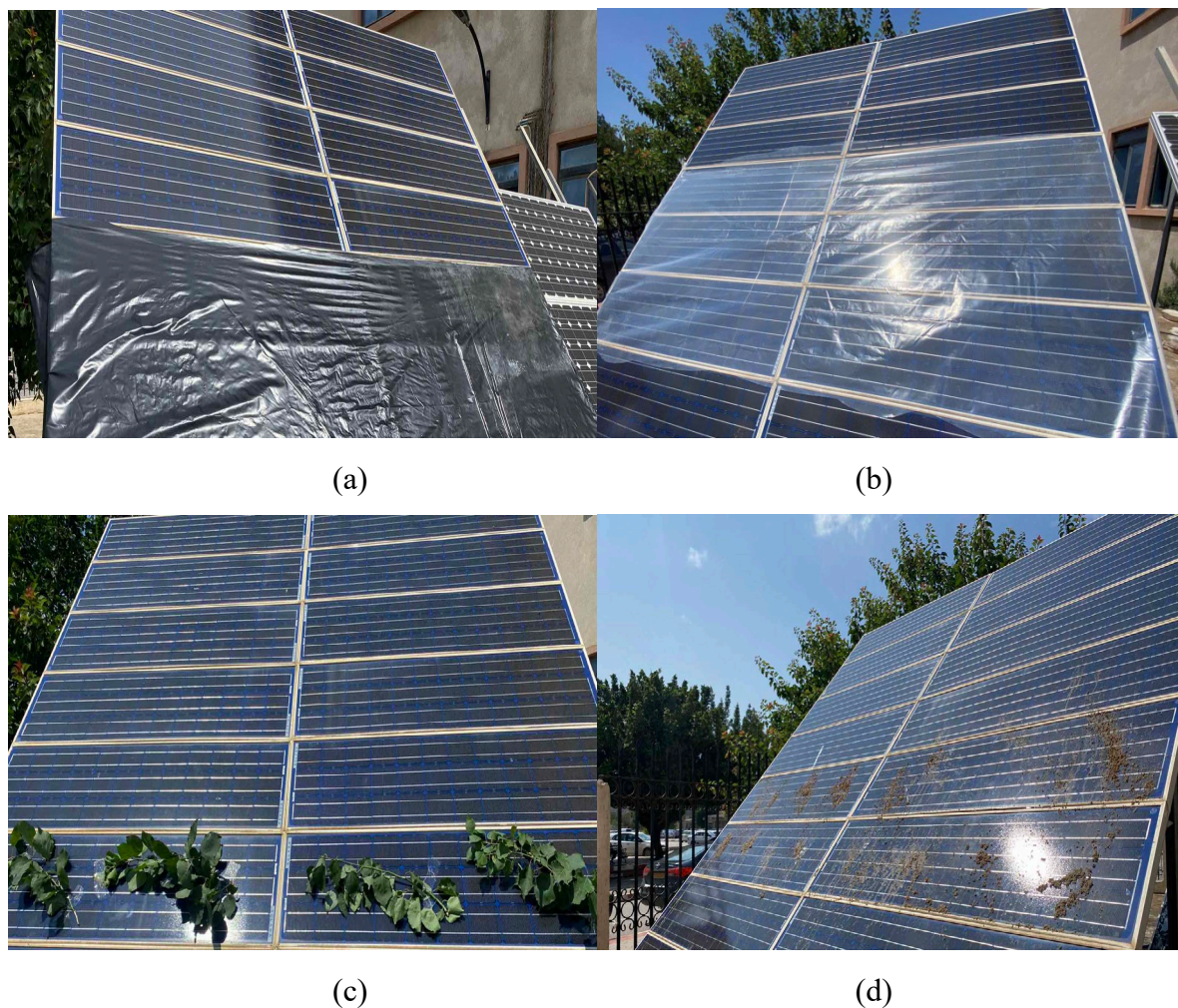
Figure III.6 : Caractéristiques électriques du générateur photovoltaïque étudié

### V.1. Etude de l'impact des différents dépôts sur le générateur PV

Dans cette partie nous allons aborder le phénomène d'ombrage par différents dépôts sur la surface du générateur PV. Le tableau suivant résume les cas et scénarios étudiés.

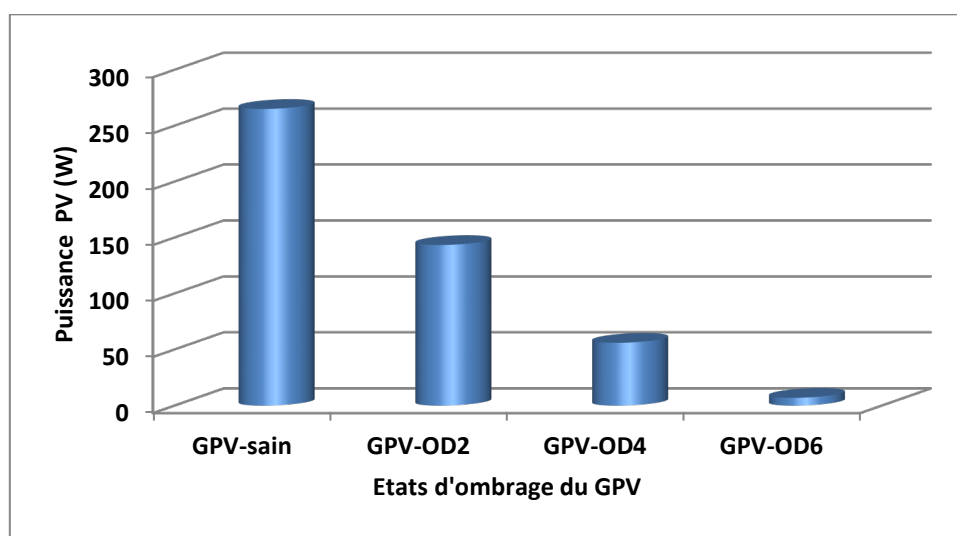
Type d'ombre	N <sup>bre</sup> de panneaux ombragés	Symbole	Obstacle utilisé
<i>Direct</i>	2/6	GPV-OD2	Film agriculture noir
	4/6	GPV-OD4	
	6/6	GPV-OD6	
<i>Indirect</i>	2/6	GPV-OI2	Film agriculture transparent
	4/6	GPV-OI4	
	6/6	GPV-OI6	
<i>Saleté</i>	2/6	GPV-OS2	Particules d'argile + sable
	4/6	GPV-OS4	
	6/6	GPV-OS6	
<i>Feuille d'arbre</i>	2/6	GPV-OF2	Petites branches d'arbre
	4/6	GPV-OF4	
	6/6	GPV-OF6	
<i>Sain</i>	0	GPV-sain	/

Tableau III.1 : Résumé des scénarios d'ombrage envisagés



**Figure III.7 :** Exemple de ces d'ombrage envisagés (a) GPV-OD4, (b) GPV-OI6, (c) GPV-OF2, (d) GPV-OS4

Les figures suivantes montrent l'impact des obstacles précités sur la surface du générateur PV étudié.



**Figure III.8 :** Puissance PV générée dans le cas d'ombrage direct GPV-OD

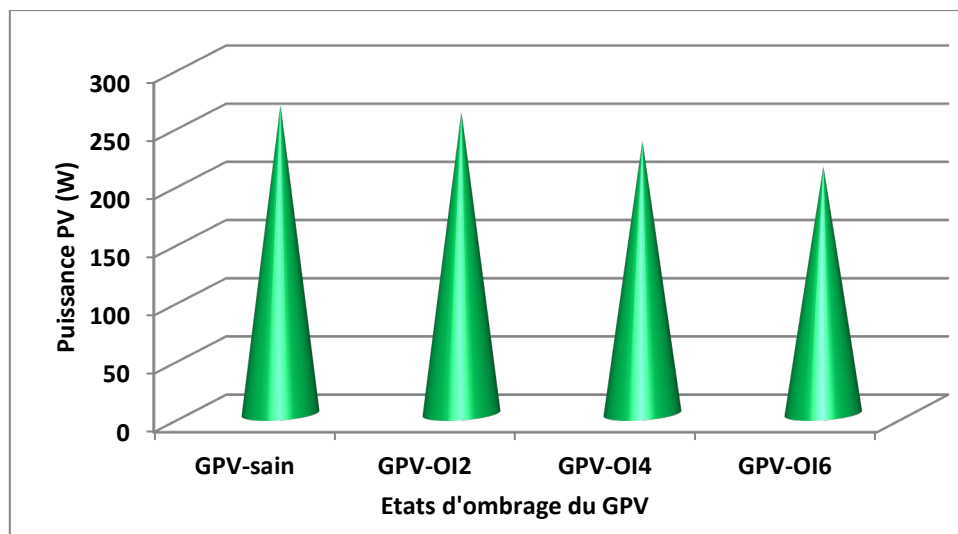


Figure III.9 : Puissance PV générée dans le cas d'ombrage indirect GPV-OI

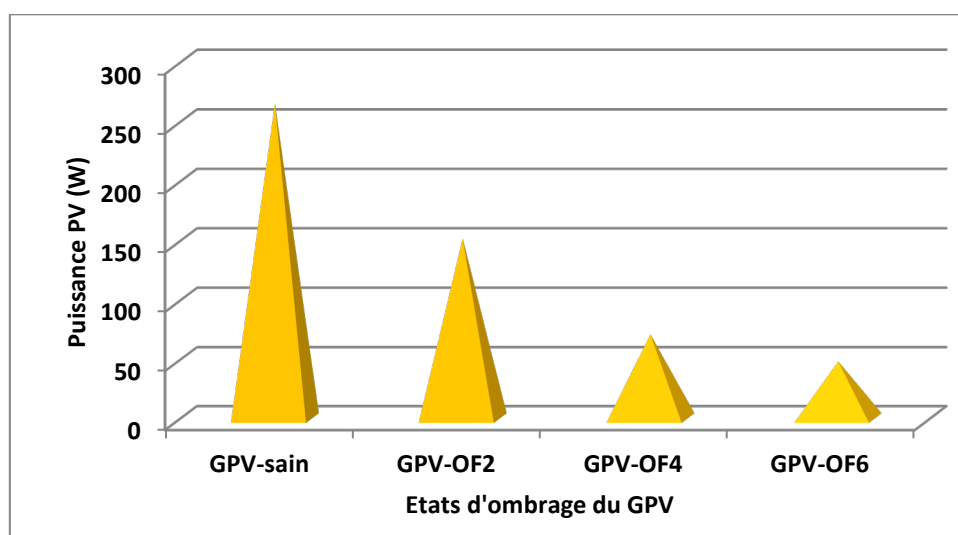


Figure III.10 : Puissance PV générée dans le cas d'ombrage par feuille d'arbre GPV-OF

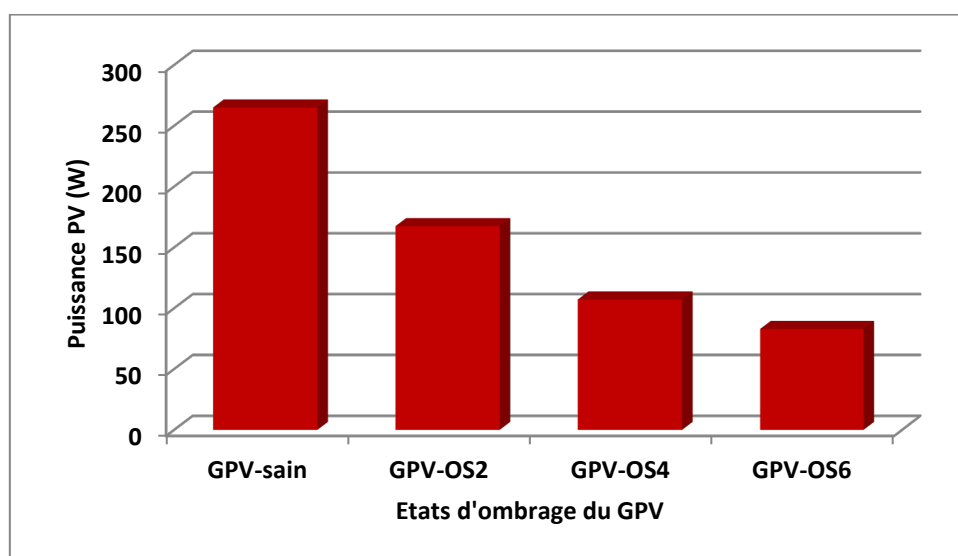


Figure III.11 : Puissance PV générée dans le cas d'ombrage par saleté GPV-OS



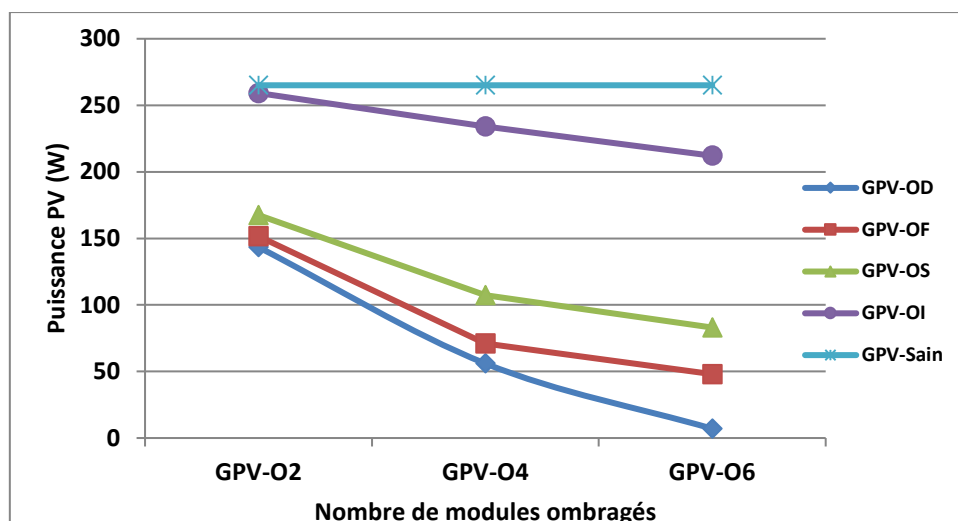


Figure III.12 : Puissance PV générée pour différents scénarios en fonction du nombre de panneaux ombragés

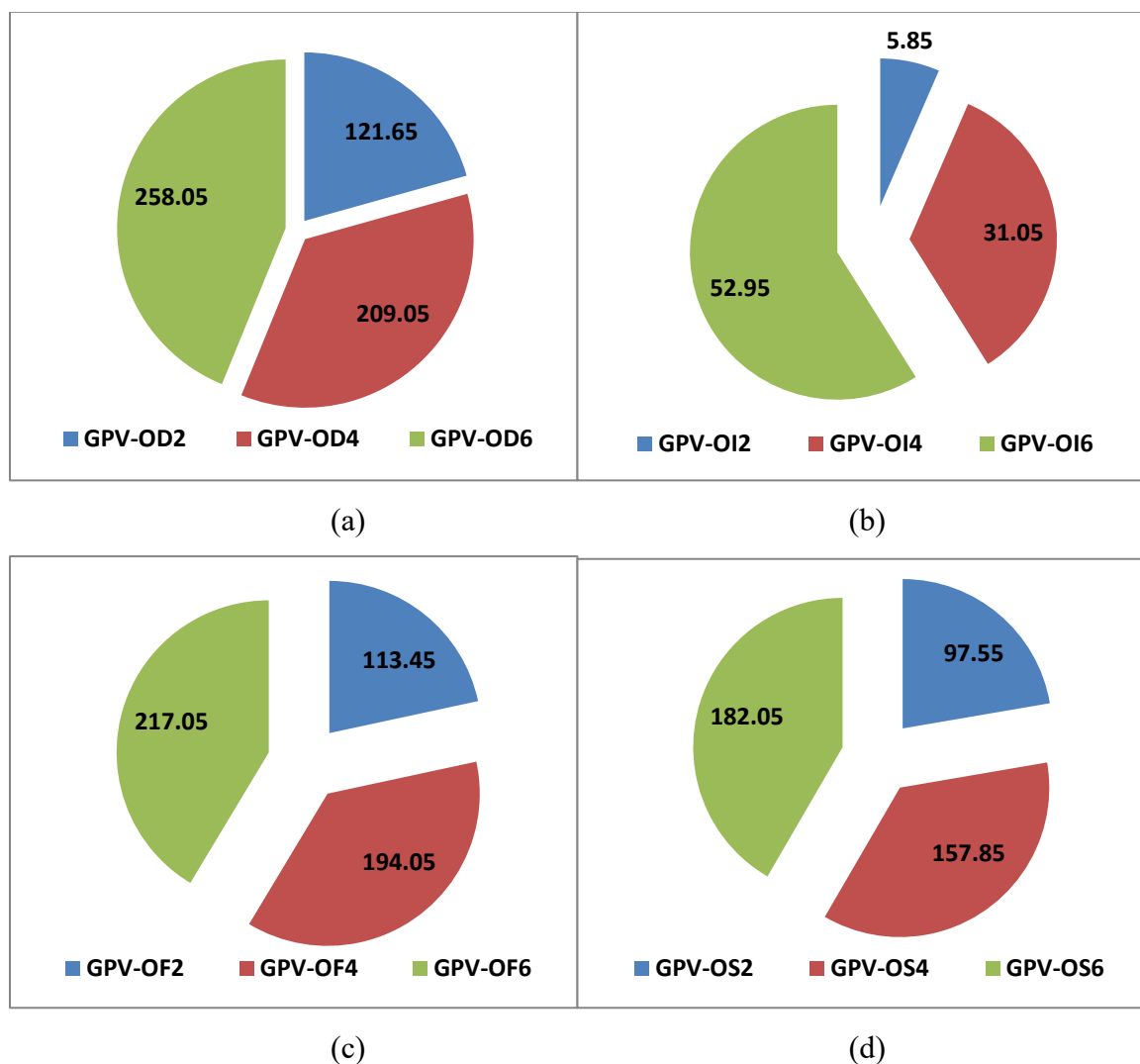
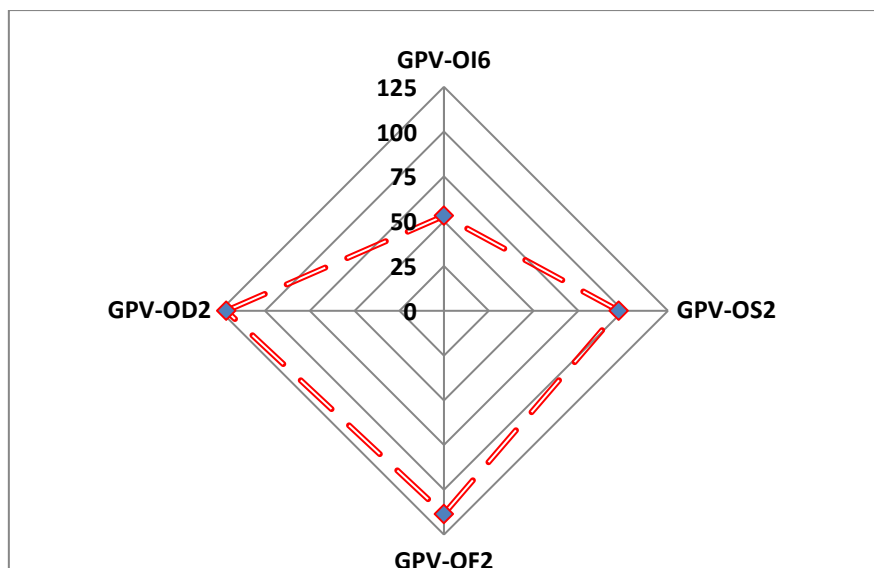


Figure III.13 : Pertes de puissance pour différents scénarios (a) GPV-OD, (b) GPV-OI, (c) GPV-OF, (d) GPV-OS



**Figure III.14 :** Comparaison des petites pertes de puissance pour différents scénarios

D’après les résultats obtenus on remarque que la production photovoltaïque est impactée par la présence d’ombre sur la surface du générateur PV, cette influence varie en fonction de la nature de l’obstacle ainsi que la portion de la surface du générateur touchée (Figures III.8, 9, 10, 11).

Il est bien clair que la puissance PV générée par notre générateur décroît avec l’intensité de l’ombre présente (Figure III.12) par exemple dans le cas GPV-OD la production tend à s’annuler au bout du 6<sup>ème</sup> panneau ombragé soit une production de 7 watts, contrairement au cas de l’ombre indirecte ou le GPV-OI présente les pertes les plus minimales. Pour le cas du GPV-OS et GPV-OF les pertes s’intensifient et atteignent des valeurs qui dépassent nettement les 100 watts pour la plus petite portion des panneaux occultés (2 panneaux) (Figure III.13).

Au finale il est préférable d’avoir la totalité du générateur ombragé par une ombre indirecte GPV-OI que d’avoir 2 panneaux ombragés par les autres obstacles (Figure III.14).

Les ombres peuvent être classé selon l’intensité croissante de leur impact sur la production de la manière suivante ; GPV-OI, GPV-OS, GPV-OF et en fin GPV-OD.

## **V.I. conclusion**

Dans ce dernier chapitre a fait l’objet d’une étude expérimentale, portant sur les variations des obstacles qui ont été mis en évidence en étant des paramètres influençant les performances des systèmes photovoltaïques.

Ainsi les résultats ont montré à un certain degré, l'importance du choix de l'emplacement du générateur photovoltaïque et si un ombre est inévitable notre étude à montrer laquelle sera moins agressive sur la production du générateur.



## **Conclusion générale**

L'énergie photovoltaïque devient progressivement une source d'énergie à part entière, de plus en plus sollicitée pour produire de l'énergie allant du domestique à de grandes centrales connectées au réseau. Cependant, il reste encore pas mal de freins à son développement en termes de manques de production.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude de l'impact des différentes impuretés sur les performances des générateurs photovoltaïques. Cette étude a touché à un paramètre essentiel dans la production photovoltaïque qui est le non homogénéité de l'ensoleillement reçu sur la surface du générateur PV, autrement dit ombrage.

Le chapitre un a fait l'objet d'un état de l'art sur les énergies renouvelables, un intérêt est porté au solaire photovoltaïque.

La modélisation de la cellule photovoltaïque est un domaine important qui permet de prédire la performance de la cellule dans différentes conditions environnementales et de concevoir des systèmes photovoltaïques plus efficaces. Dans ce contexte que le deuxième chapitre a été conçu pour identifier le générateur PV sous plusieurs états notamment en présence d'ombre.

Le chapitre trois traite l'effet des impuretés qui se posent sur la surface d'un générateur photovoltaïque pouvant avoir un impact significatif sur son rendement. Il est donc important d'estimer les pertes causées par les obstacles les plus fréquents dans la technologie solaire

D'après l'étude menée, on a conclu que la nature de l'obstacle joue un rôle important dans la limitation de la production et cela selon le degré de pénétration des rayonnements ; dans notre cas nous les avons classifié par ordre croissant des pertes comme suite : GPV-OI (ombrage indirect ou partiel), GPV-OS (ombrage par saleté), GPV-OF (ombrage par feuille d'arbre) et en dernier GPV-OD (ombrage direct ou total). Il est préférable d'avoir 6 panneaux (la totalité) du générateur ombragé indirectement que d'avoir un tiers (1/3) du générateur ombragé par les trois autres types d'ombre.

Comme perspectives on propose d'équiper les générateurs d'un système de nettoyage (jet d'eau ;...) et appliquer des technique de reconnections des panneaux dans le cas des matrices importantes pour minimiser l'impact de l'ombre.

## *Noms abrégés et leur signification*

---

**PV** : panneau photovoltaïque

**GPV** : générateur photovoltaïque

**STC** : conditions de tests standards

**ZCE** : zone de charge d'espace de la jonction

**MPP** : le point maximal de puissance

**I<sub>cc</sub>** : courant en court-circuit

**V<sub>co</sub>** : tension en circuit-ouvert

**V<sub>m</sub>** : tension moyenne

**I<sub>m</sub>** : courant moyen

**I<sub>ph</sub>** : courant photon

**CA** : courant alternatif

**CC** : courant continue

**GPV-S** : générateur photovoltaïque à l'état sain

**GPV-OD** : générateur photovoltaïque ombrage direct

**GPV-OI**: générateur photovoltaïque ombrage indirect

**GPV-OS**: générateur photovoltaïque ombrage par saletés

**GPV-OF**: générateur photovoltaïque ombrage par feuilles d'arbres

## Références bibliographique

---

- [1] Nichipourk Oleksiy, “Simulation fabrication et analyse de cellules photovoltaïques“, mémoire France, 2005,
- [2] J.C. Muller, “Techniques de l'ingénieur“, Dossier BE8579.
- [3] Site Internet: <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16678>
- [4] Site Internet:<https://epdf.tips/electricity-from-sunlight-an-introduction-to-photovoltaics.html>
- [5] A. Ait Mokrane, A. Moussaoui, “Extraction des Paramètres d’une Cellule Photovoltaïque“, Thème master, Université de Bejaïa, 2017
- [6] Elsy Mansour, “Modélisation des panneaux photovoltaïques sur compact rio“, Université Libanaise Faculté de Génie II,2012
- [7] <http://www.photovoltaique.guidenr.fr/cours-photovoltaique-autonome-1/caracteristiqucourant-tension-cellule-photovoltaique.php>
- [8] W.C. Benmoussa, S. Amara et A. Zerga, “ Etude comparative des modèles de la caractéristique courant-tension d’une cellule solaire au silicium monocristallin“, Université de Tlemcen,2007
- [10]: T.Markvart and L. Castafier, “Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications. ELSEVIER, 2003
- [11] Alain Bilbao Learreta, “Rapport de stage projet de fin d’études Ingénieur Technique Industrielle“, Université Virgile, Septembre 2006
- [12] Townsend, Timothy U, “A Method for Estimating the Long-Term Performance of DirectCoupled Photovoltaic Systems“ M. S. Thesis – Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, 1989
- [13] MEZZA.I.M et Mr.MOULOUDJ.I.S “Contribution à l’étude d’un système de pompage photovoltaïque“ mémoire fin d’étude, université de Bejaia, Juin 2014
- [14] Djamila Rekioua,Ernest Mantagne “optimization of photovoltaic power systemes“, edition sprigner, 2012
- [15] Olivier GERGAUD, “Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur“, Thèse de Doctorat de l’école Normale Supérieure de Cachan, 9 décembre 2002

[16] M. L. Louazene,” Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla,” mémoire de magistère, Université El Hadj Lakhdar – Batna, Soutenu le : 12/06/2008.

[17] R.Lahcene,Z.djallel, “Etude et détection de défauts dans un système photovoltaïque,” Mémoire de Master, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, 2020.

[18] A.Woyte,J.Nijs and R.Belmans, “Partial Shadowing of photovoltaic Arrays With Different System configurations: Literature Review and Field Test Results“ ,Solar Energy,Vol.74,N°3,pp.217-233,2003.

[19] B.M.Abdelmoutalib.B.Walid,” Détection et compensation de défaut dans un système photovoltaïque,” Mémoire de Master, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi - B.B.A, 2021.