

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique



Université Abderrahmane Mira-Bejaia  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Electrique

# Mémoire de fin Cycle

*En vue l'obtention du diplôme de Master en  
Electrotechnique Option : Energies renouvelables*

*Thème*

*Caractérisation des panneaux  
photovoltaïques*

**Réalisé par :**  
Mr. BALOUL YACINE  
Mr. KACI ANIS

**Encadré par :**  
Mme. REKIOUA. D  
Mme. TADJINE. K

**Promotion 2023/2024**

# *Remerciements*

# ***Remerciements***

*Ce mémoire a été réalisé au sein du laboratoire L.T.I.I de l'Université Abderrahmane Mira de Bejaia. Nous tenons tout d'abord à exprimer notre gratitude envers Dieu pour nous avoir donné la force et la patience nécessaires pour accomplir ce travail.*

*Nous souhaitons remercier sincèrement Madame D.REKIOUA, Professeur à l'Université de Bejaia, pour avoir accepté de rapporter ce travail et pour le temps qu'elle y a consacré.*

*Nous sommes également reconnaissants envers Mme K.TADJINE pour l'ambiance chaleureuse et le soutien qu'elle nous a apportés. Nous tenons également à remercier toute l'équipe du laboratoire L.T.II de l'Université Abderrahmane Mira de Bejaia.*

*Nous adressons nos remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer notre travail. C'est un grand honneur pour nous.*

*Enfin, nous voulons exprimer notre profonde gratitude à nos familles. Sans leur encouragement constant et leur soutien moral, nous n'aurions pas pu arriver là où nous en sommes aujourd'hui. Nous espérons que ce manuscrit leur montrera toute notre reconnaissance.*

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à*

*Mes chers parents précieux et très aimés qui m'ont toujours soutenu et qui ont montré un grand intérêt pour mes études. Je ne pourrai jamais assez les remercier pour tout ce qu'ils ont fait pour moi. Que Dieu les protège.*

*Mes très chers frères, et mes sœurs ainsi que leurs conjoints.*

*Ma chère femme, Yamina pour son soutien*

*Mes oncles et mes cousins*

*Ainsi que oute ma famille.*

*Mes chers amis, Fouad, Abdou, Fateh et Kouceila qu'ils soient proches ou lointains.*

*Tout le personnel du laboratoire de recherche L.T.I.I.*

*Mon binôme et mon frère, YACINE.*

ET aussi à la plus magnifique personne du monde, moi-même,

Last but not least, I wanna thank me  
I wanna thank me for believing in me  
I wanna thank me for doing all this hard work  
I wanna thank me for having no days off  
I wanna thank me for, for never quitting

I wanna thank me for always being a giver  
And tryna give more than I recieve  
I wanna thank me for tryna do more right than wrong  
I wanna thank me for just being me at all times

*La promotion de génie électrique de Bejaia 2023/2024.*

*À tous, je dédie ce travail.*

*KACI ANIS*





# Dédicace

À mes chers parents,

Votre amour et soutien inconditionnel ont été les piliers de ma réussite. Merci de m'avoir toujours encouragé à suivre mes rêves et à persévérer, même dans les moments les plus difficiles.

À mon frère Adel,

Ta présence et ton soutien constant dans ma vie tu es toujours là pour moi comme je suis là pour toi BADBOYS.

À mon meilleur ami et frère Rahim,

Merci d'avoir été à mes côtés à chaque étape de ce parcours de ma vie. Ton amitié et ta compréhension ont rendu ce voyage beaucoup plus agréable et supportable et à MOHAMMED son petit-fils.

À toutes les personnes qui ont été à mes côtés tout au long de ma vie et de mes études,

À mes camarades, professeurs et amis, votre aide et votre compagnie ont été inestimables. Merci de m'avoir permis de rencontrer des personnes en or parmi eux mes chères frères FOUAD et ABDOU, et d'avoir partagé ces moments inoubliables.

À mon compatriote et binôme Anis,

Merci pour ton soutien indéfectible et pour avoir partagé ce chemin avec moi. Ton aide et ta camaraderie ont été essentielles à mon succès.

ET aussi à la plus magnifique personne du monde, moi-même,

Last but not least, I wanna thank me  
I wanna thank me for believing in me  
I wanna thank me for doing all this hard work  
I wanna thank me for having no days off  
I wanna thank me for, for never quitting

I wanna thank me for always being a giver  
And tryna give more than I receive  
I wanna thank me for tryna do more right than wrong  
I wanna thank me for just being me at all times

BALOUL YACINE

# *Sommaire*

## *Sommaire*

Introduction Générale.....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables</b>	
I.1. Les énergies renouvelables .....	3
I.1.1. L'énergie solaire .....	3
I.1.2. L'énergie éolienne .....	4
I.1.3. L'hydrogène .....	5
I.1.3.1. Hydrogène vert : .....	5
I.1.3.2. L'hydrogène gris .....	6
I.1.3.3. L'hydrogène bleu .....	6
I.1.3.4. L'hydrogène noir .....	7
I.1.3.5. L'hydrogène rose.....	8
I.1.3.6. L'hydrogène turquoise .....	8
I.1.3.7. L'hydrogène brun.....	8
I.1.3.8. L'hydrogène jaune .....	9
I.1.4. L'énergie hydraulique .....	9
I.1.5. L'énergie géothermique .....	10
I.1.6. L'énergie de la biomasse.....	11
I.1.7. L'énergie marémotrice.....	11
I.1.8. L'énergie osmotique .....	12
I.1.9. L'énergie par biométhanisation .....	12
I.2. Consommation des énergies renouvelable à l'échelle mondiale (2022-2024) .....	13
I.2.1. Représentation de l'évolution de la consommation d'énergie de 2022 à 2024 .....	18
I.3. Consommation des énergies renouvelables en Algérie (2022-2024).....	19
I.3.1. Objectifs de développement des énergies renouvelables en Algérie [60].....	21
I.4. Les avantages et inconvénients et défis des énergies renouvelables [65].....	23
I.5. L'énergie solaire photovoltaïque .....	24
I.6. La cellule photovoltaïque.....	26
I.6.1. Matériaux composant d'une cellule solaire.....	26
I.6.2. Les différents types de cellule photovoltaïque .....	27
I.6.3. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque .....	30
I.7. Champs photovoltaïques et leurs connexions .....	32
I.7.1. Connexion des modules Pv en série .....	32
I.7.2. Connexion des modules Pv en parallèle.....	33
I.7.3. Connexion des modules Pv en série-parallèle (SP).....	33

## Sommaire

---

I.7.4. Connexion d'un module Pv en Croix Totale (Total Cross-Tied « TCT ») .....	34
I.7.5. Connexion d'un module PV en Pont-Lié (Bridge Linked « BL ») .....	35
I.7.6. Connexion d'un module pv en Nid D'Abeilles (Honey Comb « HC ») .....	36
I.8. Le système photovoltaïque .....	37
I.8.1. Différents systèmes photovoltaïques .....	38
I.9. Le montage des modules photovoltaïques .....	39
I.9.1. Montages de modules en série .....	39
I.9.2. Montages de modules en parallèle .....	39
I.10. Le stockage de l'énergie photovoltaïque .....	40
I.11. La protection des panneaux photovoltaïques .....	41
I.12. Les avantages et les inconvénients des panneaux photovoltaïques .....	42
I.13. Conclusion .....	43

## Chapitre II : Modélisation des panneaux photovoltaïques

II.1. Introduction.....	45
II.2. Courbe caractéristique d'une cellule solaire.....	45
II.3. Modèles électriques .....	47
II.3.1. Modèle simplifié .....	47
II.3.2. Modèles à une seule diode .....	49
II.3.3. Modèles à une diode simplifié .....	50
II.3.4. Modèles à deux diodes .....	51
II.3.5. Modèle Lambert W .....	52
II.3.6. Modèles à circuit équivalent .....	54
II.4. Paramètres électriques d'une cellule solaire.....	54
II.4.1. Courant court-circuit $I_{CC}$ : .....	54
II.4.2. Tension de circuit ouvert $V_{CO}$ (tension à vide).....	55
II.4.3. Puissance crêtes-Point de puissance maximale ( $P_{mac}$ ) ( $P_{Pm}$ ).....	55
II.4.4. Facteur de forme (FF) .....	56
II.4.5. Rendement électrique ou efficacité ( $\eta$ ) .....	56
II.5. Caractéristique du panneaux Pv (modèle Suntech STP080S-12/Bp).....	57
II.6. Caractérisation électrique d'un module PV sous Matlab/simulink .....	59
II.6.1. Influence de la température sur les caractéristiques électriques .....	60
II.6.2. Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques électriques .....	60
II.6.3. Caractéristique courant et puissance en fonction de la tension .....	61
II.7. Caractérisation électrique d'un module PV avec la méthode voltampère métrique.....	62
II.7.1. Résultats expérimentaux obtenus Simulation/Méthode volt ampèremètre.....	64

II.8. Conclusion .....	65
 <b>Chapitre III : Défaillances des panneaux photovoltaïques</b>	
III.1. Introduction .....	66
III.2. Les défaillances des panneaux photovoltaïques .....	66
III.3. Généralités sur les types de défaillances des panneaux PV .....	66
III.3.1. Défaillances liées à la fabrication .....	66
III.3.2. Défaillances électroniques et de système .....	68
III.3.3. Défaillances liées à l'installation .....	69
III.3.4. Défaillances dues aux conditions environnementales .....	71
III.3.6. Dégradation induite par la température (PID) .....	73
III.3.7. Défaillances liées à l'âge et à l'usure .....	73
III.4. Les types de défaillance utilisées dans les essais expérimentaux .....	74
III.5. Bloc Simulink/Matlab pour ombrage .....	77
III.5.1. Interprétations des résultats obtenus par les essais expérimentaux .....	77
III.5.2. Interprétation de tous les essais .....	83
III.5.3. Essais expérimentaux sur des panneaux PV pollués et sales .....	84
III.5.4. Interprétation des résultats et analyse pour chaque panneau .....	85
III.5.5. Interprétation de tous les essais .....	89
III.6. Calculs des rendements, les facteurs de forme et l'indicateur d'erreurs .....	89
III.7. Conclusion.....	97
Conclusion Générale .....	98

# *Liste des tableaux*

# *Liste des figures*



***CHAPITRE I :***

- Tableau (I-1) :** présente une vue claire et structurée des avantages, inconvénients.....24  
et défis des énergies renouvelables avec les catégories bien en évidence
- Tableau (I-2) :** Récapitulatif des différentes générations de cellules solaires.....28
- Tableau (I-3) :** avantages et les inconvénients des panneaux photovoltaïques.....43

***CHAPITRE III :***

- Tableau (III-1) :** Tableau résume les Calculs des rendements,.....89  
les facteurs de forme et l'indicateur d'erreurs pour le module PV Modèles Suntech (STP080-  
12/Bb) de 80 watts.
- Tableau (III-2) :** Tableau résume les Calculs des rendements, les facteurs.....94  
de forme et l'indicateur d'erreurs pour différents modèles module PV

*Liste des symboles et  
abréviations*

*Liste des symboles*

**ENR** :Energie renouvelable.

**V<sub>t</sub>** : Tension thermique.

**I** : Courant.

**I<sub>ph</sub>** : Photo courant.

**ID** : Courant de diode.

**I<sub>s</sub>** : Courant de saturation de la diode.

**V** : Tension aux bornes du panneau.

**T** : Température de la cellule (Kelvin).

**K** : Constante de Boltzmann ( $K=1.38 * 10^{-23}$  J/K).

**I<sub>s</sub>STC** : Courant de saturation aux conditions standard.

**E<sub>g</sub>** : L'énergie de gap du semi-conducteur.

**T** : Température absolu.

**Q** : Charge de l'électron.

**R<sub>s</sub>** : Résistance série.

**R<sub>sh</sub>** : Résistance parallèle (shunt).

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

**I<sub>sh</sub>** : le courant appelé par la résistance shunt.

**STC** : Condition de Test Standard.

**S** : Surface du panneau.

**PV** : Photovoltaïque.

**P<sub>pv</sub>** : Puissance délivré par la cellule. \*

**V<sub>pv</sub>** : Tension délivré par la cellule.

**I<sub>pv</sub>** : Courant délivré par la cellule.

**P<sub>max</sub>** : Puissance maximale.

**η** : Rendement.

**FF** : Facteur de forme.

**PV** : Photovoltaïque.

**VI** : virtuel instrument.

## Liste des symboles et abréviations

---

# *Introduction générale*

### Introduction Générale

Depuis environ 2600 ans, l'humanité utilise des énergies renouvelables pour diverses applications, comme la propulsion des bateaux, le pompage de l'eau, ou le broyage des grains. La conversion de ces énergies en électricité, cependant, n'a réellement commencé qu'au 19<sup>ème</sup> siècle. Pratiquement toutes les énergies renouvelables dérivent du soleil : le vent, le rayonnement solaire, et la force de l'eau en sont des produits directs ou indirects. Seule la géothermie échappe à cette classification. Chaque année, le soleil envoie à la surface de la Terre environ dix fois plus d'énergie que ce que la planète consomme. Ce potentiel immense nous pousse légitimement à exploiter ces ressources [17-18].

Les préoccupations mondiales croissantes concernant l'épuisement des ressources fossiles et les impacts environnementaux des énergies conventionnelles ont suscité un intérêt accru pour les énergies renouvelables, parmi lesquelles l'énergie solaire occupe une place centrale. Les panneaux photovoltaïques (PV), dispositifs essentiels de la conversion de l'énergie solaire en électricité, jouent un rôle crucial dans la transition énergétique actuelle. Toutefois, la caractérisation précise de ces panneaux, incluant leur modélisation et l'analyse de leur performance sous diverses conditions, demeure un défi technique et scientifique essentiel.

Le présent mémoire se propose de fournir une vue d'ensemble des panneaux photovoltaïques, en se concentrant sur leur caractérisation détaillée à travers plusieurs approches et méthodes de modélisation, ainsi que sur l'évaluation des défaillances potentielles liées à des conditions réelles d'ombrage et de salissure.

Dans le premier chapitre ont établi les bases théoriques nécessaires à la compréhension des énergies renouvelables, en mettant particulièrement l'accent sur l'énergie solaire. Ce chapitre traite des principes fondamentaux de la conversion photovoltaïque et présente un panorama des différents types de technologies photovoltaïques disponibles sur le marché. Une attention particulière est portée à l'évolution technologique et aux avantages environnementaux des systèmes photovoltaïques, qui jouent un rôle clé dans la diversification du bouquet énergétique mondial.

Dans ce deuxième chapitre, nous abordons la modélisation des modules photovoltaïques en détail. Nous explorons divers modèles électriques simplifiés, allant des modèles à une diode

## Introduction générale

---

aux modèles à deux diodes, afin de représenter fidèlement le comportement des panneaux sous différentes conditions de fonctionnement. En utilisant le logiciel MATLAB, nous établissons des schémas blocs pour la simulation et effectuons une caractérisation électrique des modules PV. La méthode voltampère métrique est employée pour une analyse expérimentale, et une comparaison est réalisée entre cette méthode et les résultats de simulation afin de valider les modèles théoriques et identifier les écarts potentiels.

Le troisième chapitre se concentre sur les défis pratiques liés aux panneaux photovoltaïques, notamment les défaillances dues à l'ombrage partiel et à l'accumulation de salissures. À l'aide de MATLAB et de la méthode voltampère métrique, nous analysons l'impact de divers niveaux d'ombrage (25%, 34%, 50%, 68%) et de différents types de salissures (feuilles d'arbres, sable, terre) sur la performance des panneaux. Les résultats obtenus sont comparés pour fournir une compréhension approfondie des conditions réelles d'exploitation et des stratégies potentielles pour atténuer les effets négatifs des défaillances.

Ce mémoire, en fusionnant modélisation théorique et validation pratique, aspire à contribuer à l'optimisation et à la fiabilité des systèmes photovoltaïques, permettant ainsi une meilleure intégration de l'énergie solaire dans le mix énergétique global.

Le mémoire se conclut par une conclusion générale qui résume les résultats et propose des perspectives pour de futures recherches et applications.

# CHAPITRE I

## Généralités sur les énergies Renouvelables





### I.1. Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables (EnR) représentent une solution essentielle pour un avenir énergétique propre et durable. En effet, elles se distinguent des énergies fossiles par leur capacité à se régénérer naturellement à un rythme plus rapide que leur consommation. Contrairement au charbon, au pétrole et au gaz naturel, qui s'épuisent sur des millions d'années, les EnR sont inépuisables à long terme.

Provenant de sources naturelles variées comme le soleil, le vent, les marées et la chaleur de la Terre, les EnR offrent un approvisionnement en énergie propre et durable. Leur utilisation permet de réduire notre dépendance aux combustibles fossiles, de lutter contre le changement climatique et de favoriser une économie plus durable et résiliente. De plus, les EnR créent des emplois et stimulent le développement durable. [1]

Les énergies renouvelables englobent une diversité de technologies, chacune tirant parti d'une source d'énergie particulière et se regroupe comme suit

#### I.1.1. L'énergie solaire

L'énergie solaire, puisant son origine dans l'immense source d'énergie qu'est le soleil, s'impose comme une ressource énergétique cruciale pour répondre aux défis environnementaux actuels. Bien que son exploitation par l'humanité remonte à plusieurs millénaires pour le chauffage domestique et de l'eau, c'est au cours des derniers siècles que son potentiel a été pleinement exploré grâce aux progrès scientifiques. Les premières recherches sérieuses ont débuté au 19ème siècle, avec des avancées majeures réalisées durant la première moitié du 20ème siècle.

Deux technologies principales dominent le domaine de l'énergie solaire :

- **Photovoltaïque** : Développée dans les années 1950, cette technologie utilise des cellules solaires pour convertir directement la lumière du soleil en électricité. Offrant des solutions modulables et évolutives, elle répond à une large palette de besoins en énergie.
- **Thermique solaire** : Utilisée depuis les années 1860, cette technologie exploite la chaleur du soleil pour générer de la vapeur, alimentant ainsi des turbines productrices d'électricité ou fournissant de la chaleur pour des applications domestiques et industrielles.

L'énergie solaire s'inspire également des innovations dans le stockage d'énergie solaire, l'intégration architecturale des systèmes solaires dans les bâtiments, et le développement de matériaux photovoltaïques de pointe. [1]



**Figure (I-1) :** Le parc solaire Mohammed ben Rashid al-Maktoum à dubai,émiirates arab unis [2].

### I.1.2. L'énergie éolienne

L'énergie éolienne, exploitant la force du vent à travers des turbines géantes dans des parcs éoliens, représente une alternative propre et abondante aux énergies fossiles, jouant un rôle clé dans la lutte contre le changement climatique et renforçant la sécurité énergétique.

Le principe de conversion de l'énergie éolienne repose sur l'utilisation de l'énergie cinétique du vent pour produire de l'électricité. Les éoliennes sont équipées de grandes pâles conçues pour optimiser la capture de l'énergie cinétique du vent. Lorsque le vent fait tourner les pales, cela actionne un générateur qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Cette énergie électrique peut ensuite être utilisée pour alimenter des foyers, des entreprises ou être injectée dans le réseau électrique [5] [6].



**Figure (I-3) :** parc éolien géant considéré comme le plus grand du genre situé en ultra-haute altitude à 4 650 mètres en Chine,Tibet [4].

### I.1.3. L'hydrogène

L'hydrogène s'impose comme un vecteur énergétique propre, durable et polyvalent. Bien qu'il ne soit pas naturellement présent sous forme pure sur Terre, il se trouve dans divers composés, notamment l'eau et le méthane. Sa production implique généralement la dissociation des molécules d'eau par électrolyse, un processus qui peut être alimenté par des sources d'énergie renouvelable telles que l'énergie solaire ou éolienne, permettant ainsi la production d'hydrogène "vert" sans émissions de gaz à effet de serre. En outre, l'hydrogène joue un rôle essentiel dans la transition énergétique en contribuant à la décarbonation de certains secteurs industriels, au stockage de l'électricité et à l'alimentation des transports [8].

Il existe plusieurs types de L'hydrogène chacun ses présent propres caractéristiques et spécifiques applications et ils se distinguent comme suit :

#### I.1.3.1. Hydrogène vert :

**L'hydrogène vert émerge comme une solution énergétique d'avenir, étroitement liée aux énergies renouvelables comme l'éolien et le solaire. Sa production est un processus en plusieurs étapes. D'abord l'électricité est générée à partir de sources renouvelables, puis dirigée vers un électrolyseur, un équipement clé qui réalise l'électrolyse de l'eau. Ce processus divise l'eau (H<sub>2</sub>O) en hydrogène (H<sub>2</sub>) et en oxygène (O<sub>2</sub>), créant ainsi de l'hydrogène pur sans émissions de gaz à effet de serre. L'hydrogène produit est stocké dans des installations dédiées, prêt à être utilisé. L'hydrogène peut être transporté ou utilisé localement dans divers secteurs tels que les transports, l'industrie, le chauffage et la production**

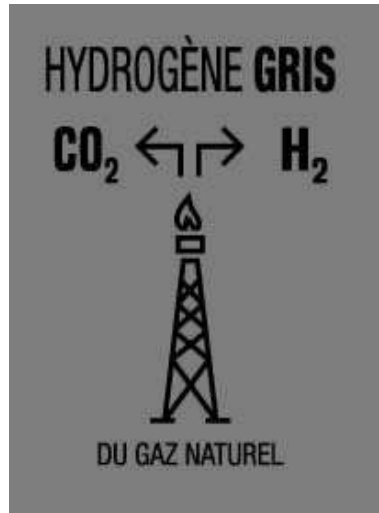


d'électricité via des piles à combustible [9].

**Figure (I-5) : Vers un avenir plus propre : l'essor de l'hydrogène comme source d'énergie renouvelable [10].**

### I.1.3.2. L'hydrogène gris

L'hydrogène "gris", dont la production est courante aujourd'hui, est obtenu à partir du vaporeformage d'hydrocarbures, notamment le gaz naturel. Cette méthode est à l'origine d'importantes émissions de gaz à effet de serre, y compris le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), ce qui en fait un producteur d'hydrogène à forte empreinte environnementale, d'où son appellation "gris" [11].



Figure(I-7) : "Production de l'Hydrogène Gris" [12].

### I.1.3.3. L'hydrogène bleu

L'hydrogène bleu, souvent présenté comme une alternative plus écologique que l'hydrogène gris, est produit par un processus similaire à ce dernier, à savoir le vaporeformage des hydrocarbures. Ce qui le différencie, c'est l'ajout d'un système de capture et de stockage du carbone (CSC) qui permet de contenir les émissions de  $\text{CO}_2$ . Cependant, cette méthode ne supprime pas totalement les émissions, soulignant ainsi des doutes sur son efficacité et sa pérennité future [13].

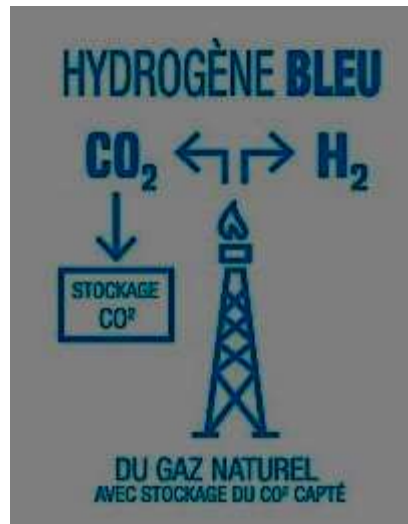


Figure (I-8) : Production de l'Hydrogène bleu" [12].

#### I.1.3.4. L'hydrogène noir

L'hydrogène noir, aussi connu sous le nom d'hydrogène provenant du charbon, est obtenu par la gazéification du charbon. Ce processus transforme le charbon en gaz synthétique pour en extraire l'hydrogène. C'est le mode de production d'hydrogène le plus néfaste pour l'environnement, générant une grande quantité de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques dangereux. La teinte noire associée à cet hydrogène est une symbolique de la pollution et des effets néfastes qu'il engendre sur l'environnement [14].



Figure (I-9) : charbon [15].

### I.1.3.5. L'hydrogène rose

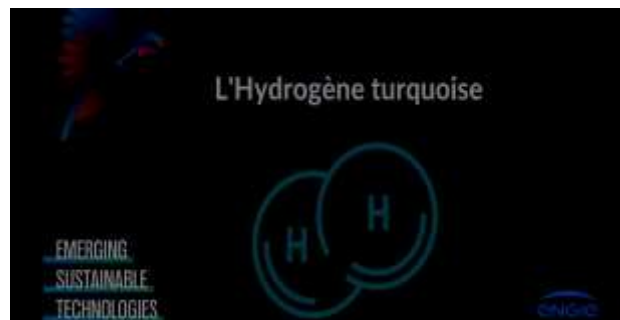
L'hydrogène rose, autrement connu sous le nom d'hydrogène nucléaire électrolytique, est généré par l'électrolyse de l'eau en utilisant de l'électricité fournie par la puissance nucléaire. Bien que cet hydrogène soit exempt de carbone, cette méthode soulève des inquiétudes en matière de sécurité, de gestion des déchets nucléaires et d'acceptation du public pour l'énergie nucléaire. Sa dénomination "rose" émane de ces complexités et des questions qui y sont associées [16].



Figure (I-10) : nucléaire et hydrogène rose [17].

### I.1.3.6. L'hydrogène turquoise

L'hydrogène turquoise, produit par thermolyse électrochimique de l'eau, utilise un mélange de chaleur et d'électricité pour décomposer l'eau en hydrogène et oxygène. Même si cette



technologie en est encore à ses balbutiements, elle présente un grand potentiel pour une production d'hydrogène dans le respect de l'environnement et sans émissions de carbone, frayant ainsi la voie à une nouvelle ère dans la production durable d'hydrogène [18].

Figure (I-11) : l'essor de l'hydrogène turquoise [19].

### I.1.3.7. L'hydrogène brun

L'hydrogène brun est produit par le biais d'une technique appelée gazéification du charbon. Cette méthode est réputée pour être encore plus polluante que le vaporeformage du gaz naturel en termes d'émissions nocives. Compte tenu de son impact considérable sur l'environnement, sa production est en baisse constante et est en train d'être remplacée par des solutions plus écologiques et durables [20].

### I.1.3.8. L'hydrogène jaune

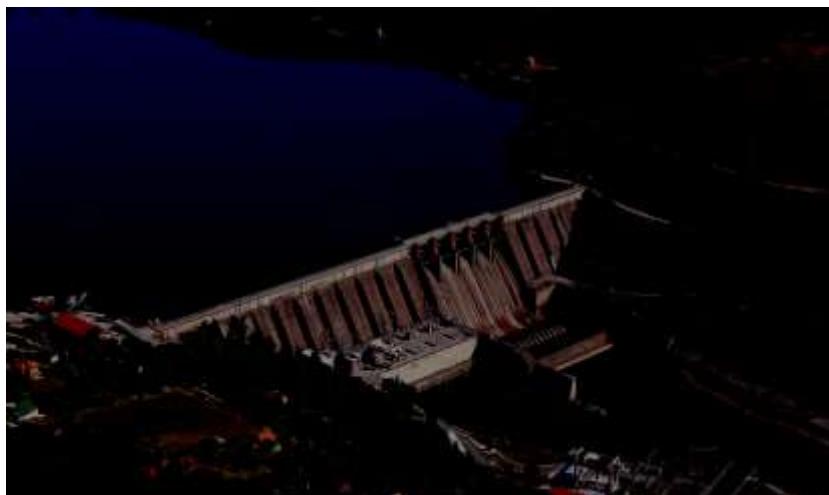
Souvent appelé hydrogène solaire, l'hydrogène jaune est produit par une combinaison révolutionnaire de procédés thermochimiques et photochimiques, utilisant l'énergie de la lumière solaire pour décomposer l'eau. Bien que cette technologie en soit encore à ses débuts, elle constitue un secteur de recherche pleine de promesses en plein développement pour la production d'hydrogène de façon propre et durable [21].



Figure (I-12) : La palette de couleur de l'hydrogène [22].

### I.1.4. L'énergie hydraulique

L'énergie hydroélectrique, utilisant le mouvement de l'eau, est une forme d'énergie renouvelable qui s'est perfectionnée au fil du temps et est cruciale pour la production mondiale d'électricité. Les centrales hydroélectriques transforment l'énergie potentielle de l'eau en électricité via des turbines et des générateurs. Elles comprennent différents types de centrales : au fil de l'eau, de hautes chutes, et de pompage-turbinage. Cette énergie, historiquement utilisée pour des tâches





comme la mouture des céréales et l'irrigation, a évolué avec les premières turbines au XVIIIe siècle, les centrales au XIXe siècle, et les grands barrages au XXe siècle. Aujourd'hui, elle représente environ 17% de la production mondiale d'électricité renouvelable [25].

**Figure(I-13) :** La centrale hydroélectrique sur le lac Perucac et la rivière Drina, Bajina Basta, Serbie [24].

### I.1.5. L'énergie géothermique

L'énergie géothermique, utilisant la chaleur interne de la Terre, est une ressource énergétique renouvelable fiable et constante, indépendante des variations climatiques. Cette chaleur, provenant de la formation de la planète et de la désintégration d'éléments radioactifs, est exploitée pour produire de l'électricité, chauffer directement des eaux, et utiliser des pompes à chaleur géothermiques pour le chauffage et la climatisation des bâtiments. Depuis ses premières utilisations pour les bains thermaux antiques, la géothermie a évolué, notamment avec les premières installations électriques au XIXe siècle. Les crises pétrolières des années 1970 ont stimulé son développement, faisant de la géothermie une solution énergétique clé pour diverses applications. [6]



**Figure(I-15) :** La centrale géothermique de Hellisheiði à Hengill, Islande [27].



### I.1.6. L'énergie de la biomasse

La biomasse, provenant de matières organiques végétales ou animales, est une source d'énergie durable et renouvelable. Elle offre une alternative aux énergies fossiles par la combustion de bois, de cultures énergétiques ou de déchets organiques, contribuant ainsi à la diminution des émissions de gaz à effet de serre et à la sécurisation de notre approvisionnement énergétique. L'énergie de la biomasse est basée sur la transformation de son énergie chimique en diverses formes d'énergie, comme la chaleur, l'électricité et les biocarburants, par le biais de méthodes telles que la combustion directe, la cogénération, la gazéification, la pyrolyse et la méthanisation [30].



Figure (I-17) : Les granulés de bois en combustion [29].

### I.1.7. L'énergie marémotrice

L'énergie marémotrice exploite la puissance des marées pour produire de l'électricité à l'aide de turbines sous-marines, offrant une alternative écologique aux énergies fossiles et contribuant à la lutte contre le changement climatique. Depuis les premiers projets du XXe siècle, comme la centrale de La Rance en France, cette technologie a progressé avec l'utilisation de barrages et



hydro-turbines. Malgré son potentiel, son déploiement reste limité en raison des coûts élevés et des impacts environnementaux. Cependant, des projets innovants continuent de se développer, soulignant ses qualités renouvelables et prévisibles [33].

**Figure (I-19) :** La centrale marémotrice de la Rance se situe en France, C'est la première usine marémotrice au monde [32].

### I.1.8. L'énergie osmotique

L'énergie osmotique, encore en phase d'expansion, utilise la différence de salinité entre l'eau douce et l'eau de mer pour créer de l'électricité. Elle s'avère particulièrement utile dans les zones côtières, où le potentiel de production d'énergie renouvelable est significatif. Grâce à l'utilisation de membranes semi-perméables pour séparer les ions, cette technologie transforme la pression osmotique en électricité. Elle apparaît alors comme une solution encourageante pour diversifier les sources d'énergie et réduire la dépendance envers les énergies fossiles [44].



**Figure(I-26) :** centrale osmotique en Norvège [43].

### I.1.9. L'énergie par biométhanisation

L'énergie obtenue par biométhanisation utilise le processus de dégradation de la matière organique par des micro-organismes pour générer du biogaz, une ressource énergétique avec une forte concentration de méthane. Ce biogaz peut être transformé soit en électricité soit en biocarburant, offrant ainsi une alternative versatile pour répondre aux demandes énergétiques. Cette technologie offre non seulement la possibilité de réutiliser les déchets organiques, favorisant une gestion écologique des déchets, mais contribue également à la production d'une

ressource d'énergie renouvelable et locale, diminuant par conséquent la dépendance vis-à-vis des hydrocarbures et les émissions de gaz à effet de serre [47].

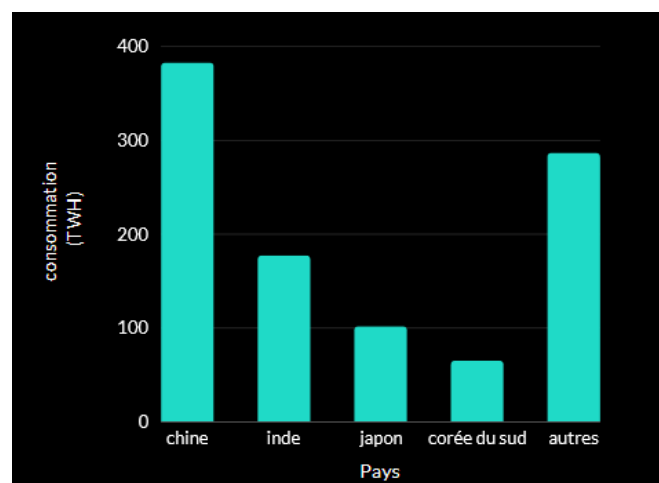
**Figure (I-28) :** Usine et ferme de biogaz dans la république tchèque Europe [46].



### I.2. Consommation des énergies renouvelable à l'échelle mondiale (2022-2024)

La consommation mondiale d'énergie renouvelable a fortement augmenté en raison de la prise de conscience des impacts environnementaux des combustibles fossiles et de la baisse des coûts des technologies vertes. En 2022, elle a atteint 264 exajoules, soit une hausse de 7% par rapport à 2021, avec des projections de 280 EJ pour 2023 et de 300 EJ pour 2024 [49]. Les figures suivantes démontrent le classement de la consommation d'énergie renouvelable par continent et par pays en 2022 :

- **Asie :**



**Figure(I-30) :** Consommation d'énergie renouvelable en Asie (2022).

L'Asie est le premier continent en termes de consommation d'énergie renouvelable. La Chine mène avec 383,1 TWh (27,1% du total mondial), suivie par l'Inde avec 177,5 TWh (12,6%), le Japon avec 102,1 TWh (7,3%), la Corée du Sud avec 65,2 TWh (4,6%), et les autres pays d'Asie cumulant 286,7 TWh (20,4%) [50].



Figure (I-31) : Plus grand parc solaire flottant de l'Asie du Sud-est, Jakarta [51].

- Amérique du Nord :

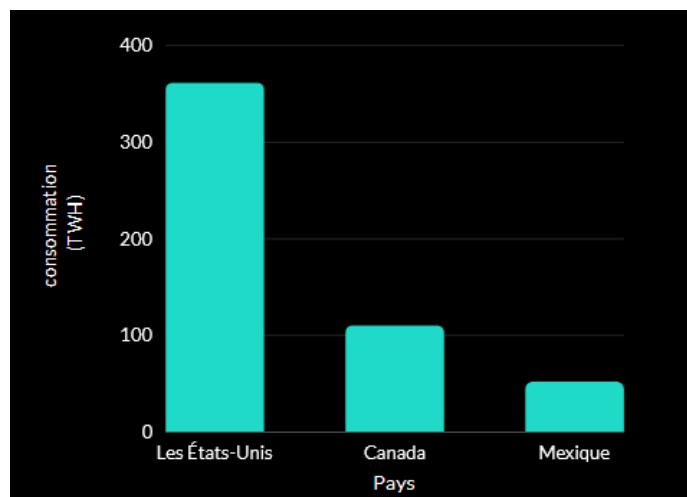


Figure (I-32) : Consommation d'énergie renouvelable en Amérique du nord (2022).

Les États-Unis dominent ce continent avec 361,8 TWh (25,7% du total mondial), suivis par le Canada avec 110,8 TWh (7,9%) et le Mexique avec 52,3 TWh (3,7%).[50].



Figure (I-33) : Centrale de biomasse, états unis [52].

- **Europe :**

En Europe, l'Allemagne est en tête avec 127,9 TWh (9,1% du total mondial), suivie par l'Espagne (65,7 TWh, 4,7%) et la France (64,9 TWh, 4,6%). L'Italie consomme 59,1 TWh (4,2%), tandis que le reste de l'Europe totalise 329,4 TWh (23,4%) [50].

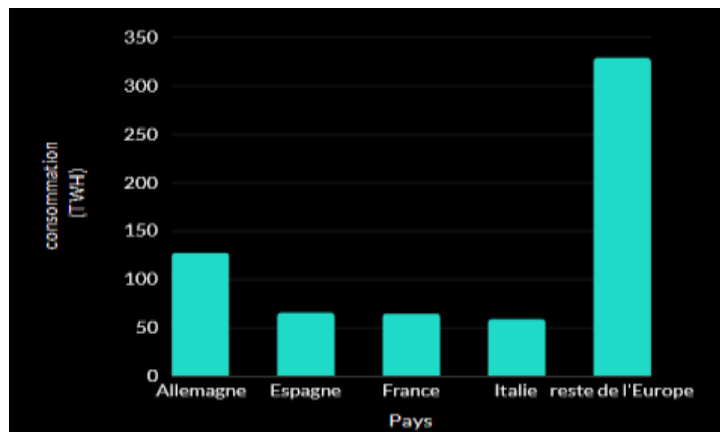


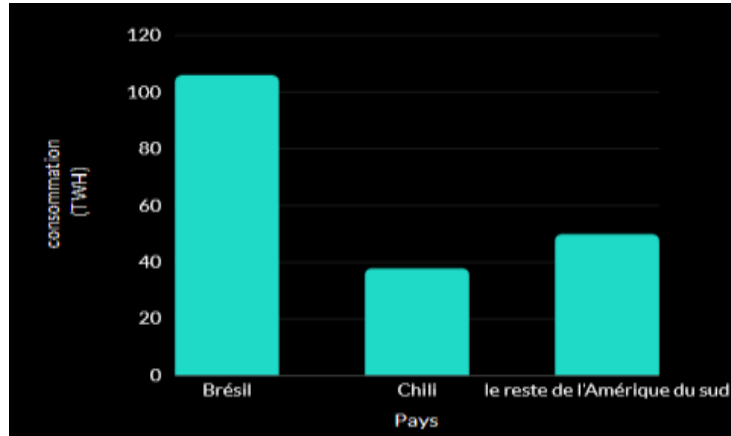
Figure (I-35) : Consommation d'énergie renouvelable en Europe (2022).



Figure (I-34) : Parkwind, Allemagne [53].

- **Amérique du Sud :**

En Amérique du Sud, le Brésil domine avec 106,1 TWh (7,5% du total mondial). Le Chili suit avec 37,9 TWh (2,7%) et le reste du continent consomme 50,0 TWh (3,6%) [50].

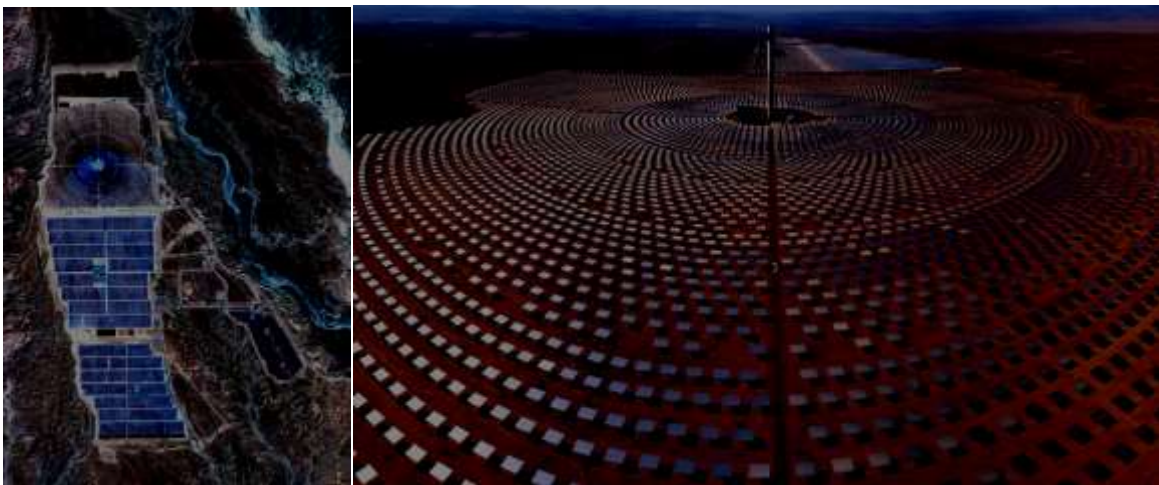


**Figure (I-37) :** Consommation d'énergie renouvelable en Amérique du sud (2022).



**Figure (I-36) :** Barrage d'Itaipu, Brésil [54].

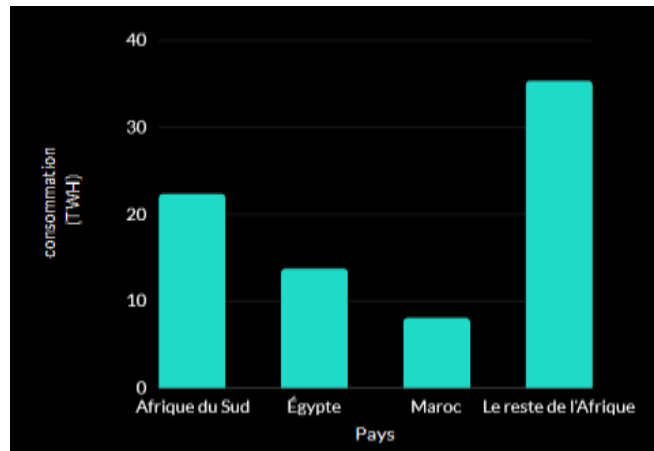
- **Afrique :**



**Figure (I-38) :** Complexe solaire Noor Ouarzazate, Maroc [55] [56].



En Afrique, l'Afrique du Sud est en tête avec 22,4 TWh (1,6% du total mondial), suivie par l'Égypte avec 13,8 TWh (1,0%) et le Maroc avec 8,1 TWh (0,6%). Le reste de l'Afrique consomme 35,4 TWh (2,5%). [50].



**Figure (I-39) :** Consommation d'énergie renouvelable en Afrique (2022).

- **Océanie :**



**Figure (I-40) :** Parc éolienne Stockyard Hill victoria, Australie [57].

En Océanie, l'Australie est en tête avec 66 TWh (4,7% du total mondial), suivie par la Nouvelle-Zélande avec 25,7 TWh (1,8%) [50].

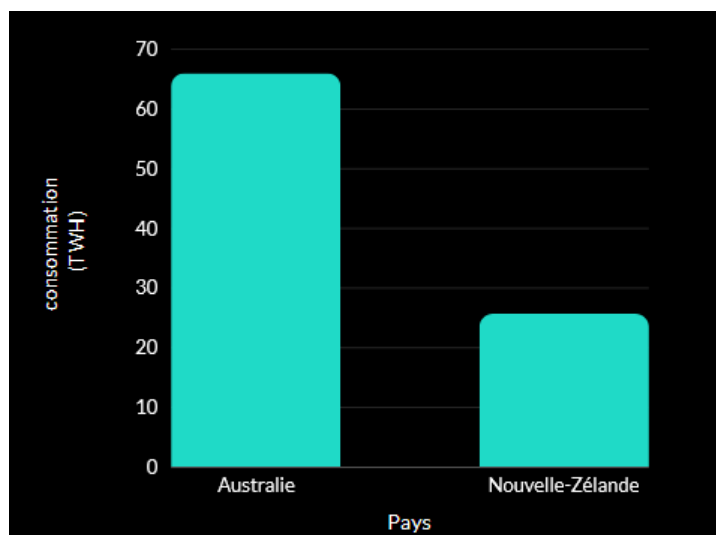


Figure (I-41) : consommation d'énergie renouvelable en Océanie (2022).

### I.2.1. Représentation de l'évolution de la consommation d'énergie de 2022 à 2024

- En 2022, les énergies renouvelables ont représenté 29% de la consommation mondiale d'électricité, soit une augmentation de 3% par rapport à l'année précédente, principalement grâce à l'énergie solaire et éolienne.
- En 2022, les énergies renouvelables ont constitué 29% de la consommation mondiale d'électricité, en hausse de 3% par rapport à l'année précédente, avec une contribution significative de l'énergie solaire et éolienne.
- Pour 2024, les prévisions optimistes indiquent que les énergies renouvelables représenteront 33% de la consommation mondiale d'électricité. Cette croissance est stimulée par des investissements persistants dans le secteur des énergies renouvelables et l'adoption de politiques publiques favorables [49].

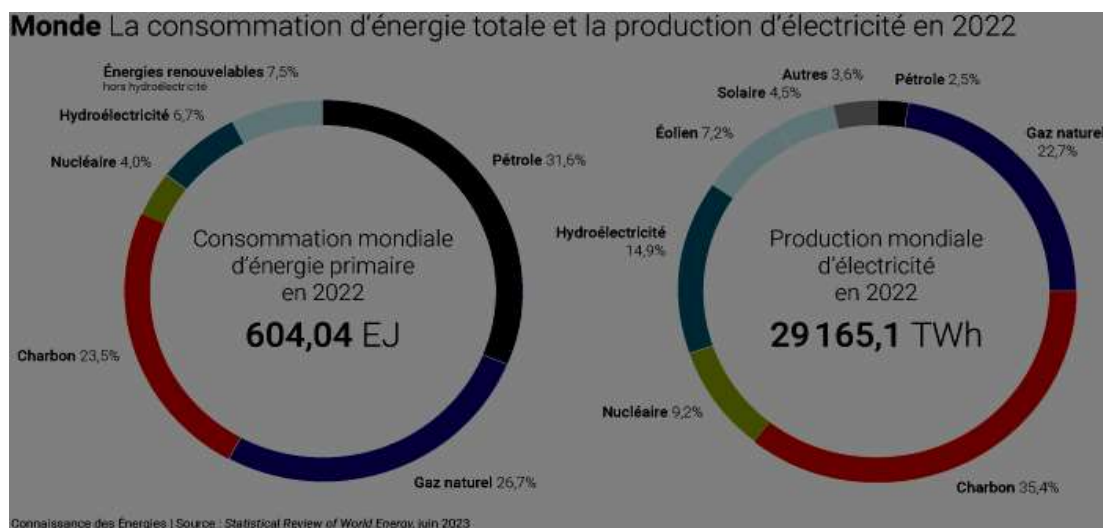


Figure (I-42) : La consommation d'énergie totale et la production d'électricité en 2022 [58].

(OCDE) : Organisation de coopération et de développement économiques.



### I.3. Consommation des énergies renouvelables en Algérie (2022-2024)

L'Algérie possède un potentiel important en énergies renouvelables, principalement solaires et éoliennes, grâce à son ensoleillement abondant et à ses vastes déserts. Cependant, malgré ces ressources naturelles prometteuses, l'utilisation effective des énergies renouvelables reste limitée par rapport à la consommation totale d'énergie du pays.

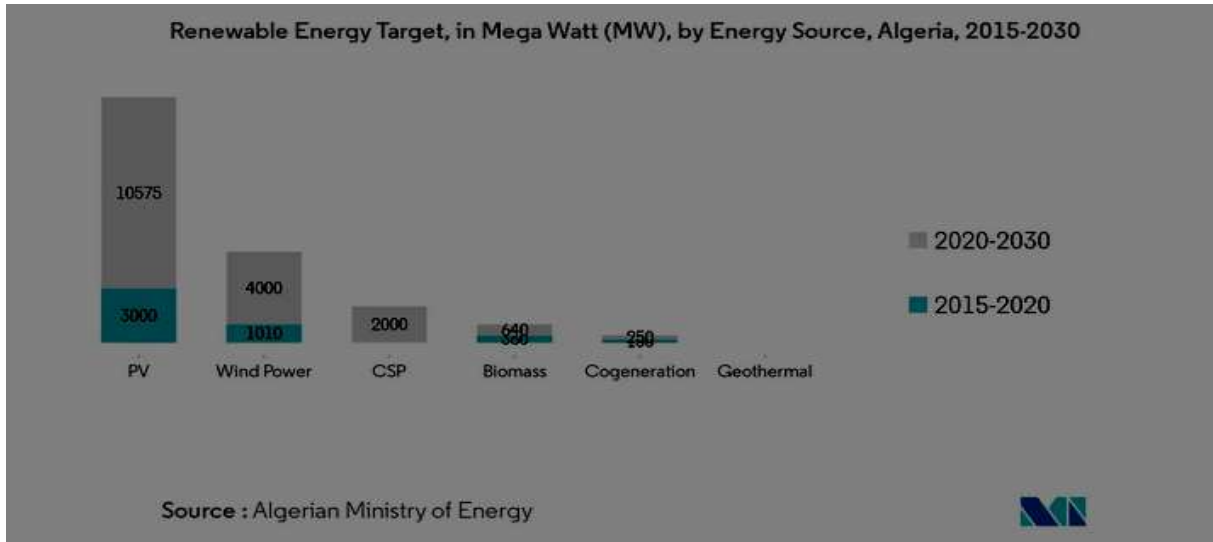


Figure (I-45) : Objectif d'énergie renouvelable en mégawatt (MW) par source d'énergie en Algérie, 2015-2030 [59].

En 2022, les énergies renouvelables ont représenté 11% de la consommation finale d'électricité et 3% de la consommation finale de chaleur [60].

**La consommation d'électricité d'origine renouvelable en 2022 se répartit comme suit :**

**L'énergie Solaire :**

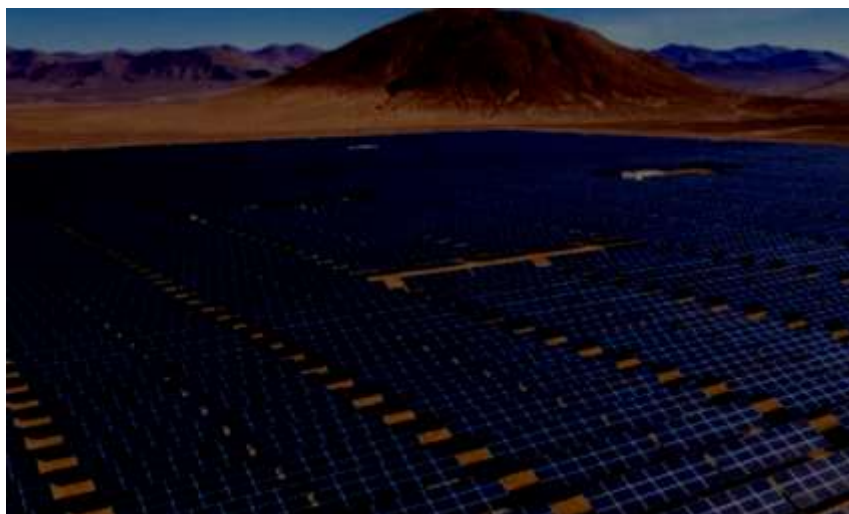
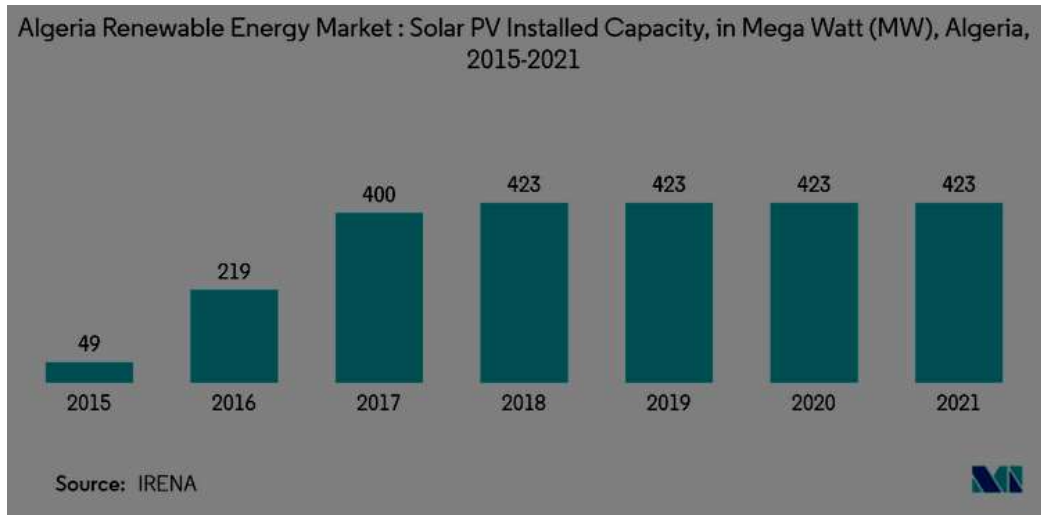


Figure (I-46) : Projet d'une première centrale solaire photovoltaïque à Béchar, Algérie [61].

En Algérie, en 2022 [60] :

- L'énergie solaire représentait 8% de la consommation totale d'électricité.
- La capacité installée totale des centrales solaires était de 544 MW.
- La production effective d'électricité solaire s'est élevée à 2832 GWh.



**Figure (I-47) :** Capacité installée du système solaire photovoltaïque en mégawatt (MW) en Algérie, 2015-2021 [59].

### • L'énergie éolienne :



**Figure (I-48) :** Ferme éolienne de 10 MW, Kaberten-Adrar Algérie [63].

- La consommation d'énergie éolienne représentait 3% de la consommation totale d'électricité.
- La capacité installée totale des éoliennes était de 541 MW.
- La production réelle d'électricité éolienne était de 1867 GWh.

Le pays possède un potentiel éolien terrestre considérable estimé à 7 700 GW, soit plus de 11 fois la capacité éolienne mondiale actuellement installée, avec des zones particulièrement favorables dans le sud et les hauts plateaux [62].

### · L'énergie Hydraulique :



**Figure(I-49) :** Barrage Beni Haroun Mila, Algérie.

- La consommation d'énergie hydraulique représentait 3% de la consommation totale d'électricité.
- La capacité installée totale des centrales hydroélectriques était de 2 248 MW.
- La production réelle d'électricité hydraulique était de 7 200 GWh.

Le pays possède un potentiel hydroélectrique important estimé à 13 000 MW, concentré principalement dans les massifs montagneux du nord et du nord-est. En 2023, la capacité hydroélectrique installée en Algérie atteint 2 400 MW, représentant seulement 18% du potentiel total [62].

L'Algérie compte 81 barrages hydroélectriques, dont les plus importants sont :

- **Barrage de Beni Haroun (108 MW) :** Situé dans la wilaya de Tizi Ouzou, ce barrage est le plus important en Algérie en termes de capacité de production.
- **Barrage de Timgad (66 MW) :** Situé dans la wilaya de Batna, ce barrage est le deuxième plus important en Algérie en termes de capacité de production [60].

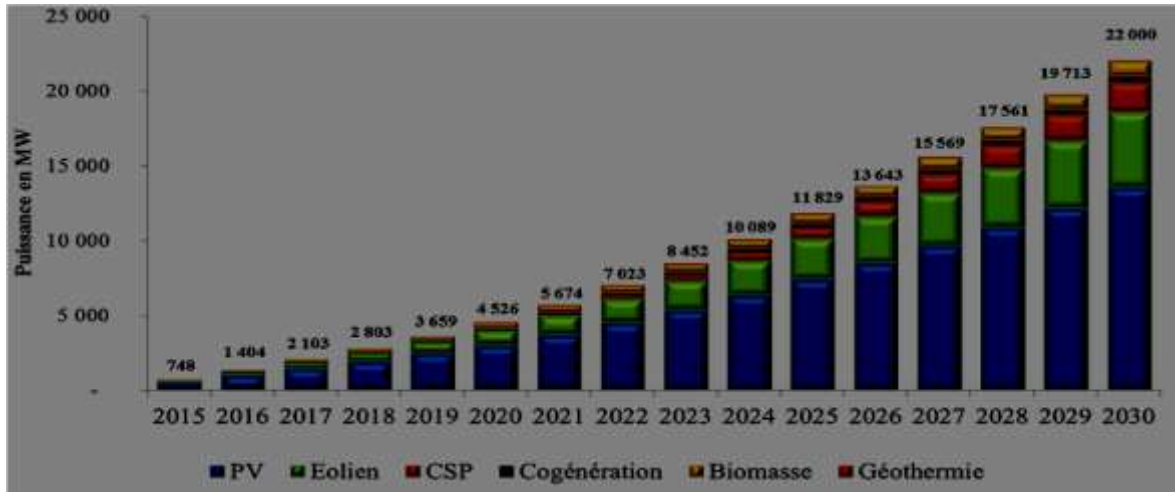
### **I.3.1. Objectifs de développement des énergies renouvelables en Algérie [60]**

Le gouvernement algérien prévoit de développer :

- L'énergie solaire avec une capacité installée visée de 4 800 MW d'ici 2030 et 14 000 MW d'ici 2040.
- L'énergie éolienne avec une capacité installée visée de 4 300 MW d'ici 2030 et 10 000 MW d'ici 2040.

- D'autres sources d'énergies renouvelables telles que l'énergie solaire et éolienne pour réduire la dépendance à l'hydroélectricité.

La consistance du programme en énergie renouvelables à réaliser pour le marché national sur



la période 2015-2030 est de 22 000 MW, répartie par filière comme suit :

**Figure (I-50) :** Consistance du programme en énergie renouvelables à réaliser pour le marché national sur la période 2015-2030.

Projets des énergies renouvelables en cours en Algérie (2024) [60] :

### Solaire :

- **Projet Noor El-Dzad Extension (200 MW) :** Située dans la wilaya de M'sila, cette extension de la centrale Noor El-Dzad devrait être mise en service en 2024.
- **Projet Solar 1000 (1 000 MW) :** Ce projet, composé de plusieurs centrales solaires réparties sur différentes wilayas, devrait être mis en service en 2024 et 2025.
- **Projet Oued Hammim Extension (200 MW) :** Située dans la wilaya d'Ouargla, cette extension de la centrale solaire flottante Oued Hammim devrait être mise en service en 2025.
- **Projet de 2.000 mégawatts (MW) d'énergie solaire photovoltaïque,** initié par Sonelgaz, consistant en la réalisation de 15 centrales solaires photovoltaïques, d'une capacité de production de 80 à 220 MW chacune, réparties sur 12 wilayas [60].

### Éolien :

- **Parc éolien de Bouzina (50 MW) :** Situé dans la wilaya de Wilaya d'Ouargla, ce parc devrait être mis en service en 2024.
- **Parc éolien de Tindouf (100 MW) :** Situé dans la wilaya de Tindouf, ce parc devrait être mis en service en 2025.

- **Parc éolien de Béchar (200 MW) :** Situé dans la wilaya de Béchar, ce parc devrait être mis en service en 2030 [60].

**Hydraulique :**

- **Projet de barrage de Koudiat Lamdaouar (200 MW) :** Situé dans la wilaya de Batna, ce barrage devrait être mis en service en 2025.
- **Barrage de Tamsa (180 MW) :** Situé dans la wilaya de Khenchela, ce barrage devrait être mis en service en 2025.
- **Barrage de Bounamoussa (100 MW) :** Situé dans la wilaya de Bejaïa, ce barrage devrait être mis en service en 2026.
- **Projet de barrage de Souk N'tlata (90 MW) :** Situé dans la wilaya de Tizi Ouzou, ce barrage devrait être mis en service en 2026 [60].

**Hydrogène vert :** L'Algérie envisage de développer un projet de production d'hydrogène vert à grande échelle, avec un objectif de production de 30 à 40 TWh d'ici 2040.

**I.4. Les avantages et inconvénients et défis des énergies renouvelables [65]**

Le tableau (I-3) structure les avantages, inconvénients et les défis des énergies renouvelables :

Avantages	Inconvénients	Défis
Durabilité	Intermittence de la production : Dépendent des conditions climatiques	Fiabilité et intermittence : Dépendance aux conditions environnementales, rendant le vent et le soleil intermittents.
Respect de l'environnement en ne produisant pas de gaz à effet de serre ou d'autres polluants lors de leur exploitation	Coûts d'installation initiaux élevés	Coûts et investissements : Investissements initiaux pour les infrastructures d'énergies renouvelables peuvent être élevés.
Autonomie énergétique et sécurité : Réduisent la dépendance des pays aux importations de combustibles fossiles, améliorant leur sécurité énergétique et leur indépendance.	Besoin d'espace : Nécessitent de grandes surfaces pour être efficaces, ce qui peut entraîner des conflits d'utilisation des terres.	Stockage et distribution : Capacité de stocker et distribuer efficacement l'électricité produite.

<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>	<b>Défis</b>
Facilité d'installation : Technologies comme les panneaux solaires peuvent être facilement installées sur les bâtiments et les maisons	Besoins en matières premières : Construction de panneaux solaires et de turbines éoliennes nécessite des matériaux qui doivent être extraits, pouvant avoir des effets environnementaux.	Réglementations et politiques doivent soutenir le développement des énergies renouvelables.
Possibilités d'emploi : Génèrent des emplois variés Favorables aux zones rurales particulièrement appropriées pour les zones rurales et éloignées		Formation et compétences : Nécessité de disposer de travailleurs qualifiés pour installer, entretenir et améliorer les systèmes d'énergie renouvelable.

**Tableau(I-1) :** présente une vue claire et structurée des avantages, inconvénients et défis des énergies renouvelables avec les catégories bien en évidence [65].

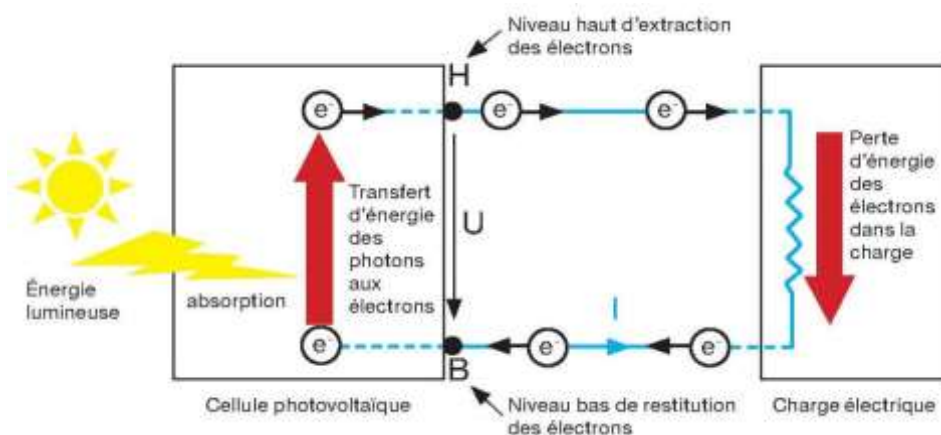
### **I.5. L'énergie solaire photovoltaïque**

Le terme "photovoltaïque" vient du grec "photos" (lumière) et de "volta" (unité de potentiel électrique, d'après Alessandro Volta) et désigne la conversion de la lumière en électricité. Découvert par Edmond Becquerel en 1839, l'effet photovoltaïque est la base de cette technologie. En 1883, Charles Fritts a créé la première cellule photovoltaïque avec du sélénium, et en 1876, William Grylls Adams et Richard Evans Day ont découvert que le sélénium produit de l'électricité sous l'effet de la lumière. Audobert et Stora ont découvert l'effet photovoltaïque dans le sélénium de cadmium en 1932. La première cellule solaire en silicium monocristallin a été réalisée en 1941, et Bell Labs a fabriqué en 1954 la première cellule solaire en silicium à haute efficacité, lançant ainsi la commercialisation de l'énergie solaire photovoltaïque. Depuis 1839, cette technologie a évolué grâce à des innovations continues.

L'effet photovoltaïque est un processus où la lumière transforme en électricité à l'intérieur d'une cellule solaire. Les photons excitent les électrons dans un matériau semi-conducteur comme le silicium, les faisant passer à un niveau d'énergie plus élevé et créant des "trous". Un champ électrique interne dirige ces électrons et trous dans des directions opposées, générant un courant électrique. Les photons doivent avoir une énergie supérieure à un certain seuil, appelé énergie de gap, pour libérer des électrons. Les photons avec moins d'énergie traversent le matériau, tandis que l'excès d'énergie des photons plus énergétiques est dissipé sous forme de chaleur [67].



**Figure (I-52)** : la première cellule photovoltaïque pratique, inventée par Daryl Chapin, Gerald Pearson et Calvin Souther Fuller de Bell Laboratories en 1954 [68] [69].



**Figure (I-53)** : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque convertissant l'énergie solaire en électricité [70].



## I.6. La cellule photovoltaïque

Les panneaux photovoltaïques convertissent l'énergie solaire en électricité grâce à l'effet photovoltaïque dans des matériaux semi-conducteurs. Fabriqués pour maximiser la capture du rayonnement solaire, ils jouent un rôle crucial dans la réduction de la dépendance aux combustibles fossiles. Les panneaux sont constitués de cellules encapsulées dans de la résine EVA, protégées par du verre trempé à faible teneur en fer et recouvertes de Tedlar pour l'étanchéité et l'isolation. Encadrés par de l'aluminium, ces panneaux sont conçus pour une durabilité et une performance optimale. Les cellules photovoltaïques, souvent en silicium, voient leur efficacité s'améliorer grâce à la recherche sur d'autres semi-conducteurs comme le tellure de cadmium [73].

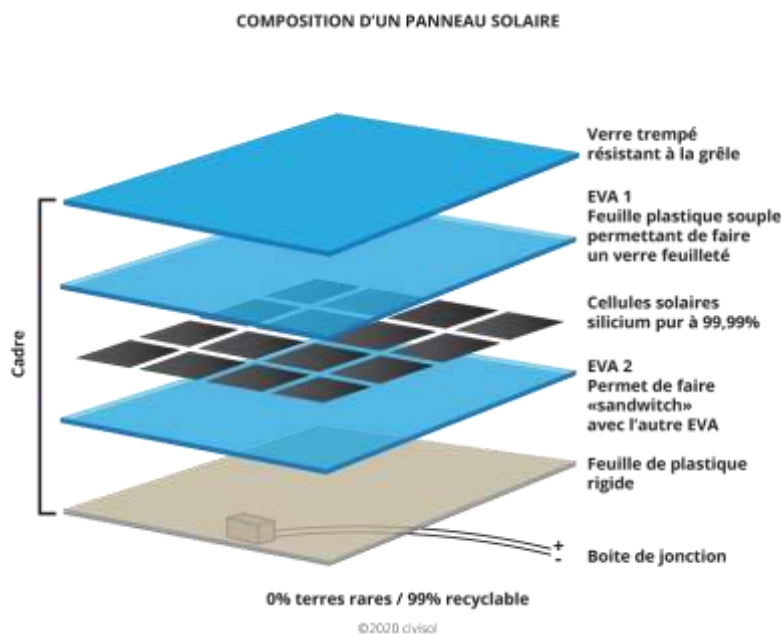
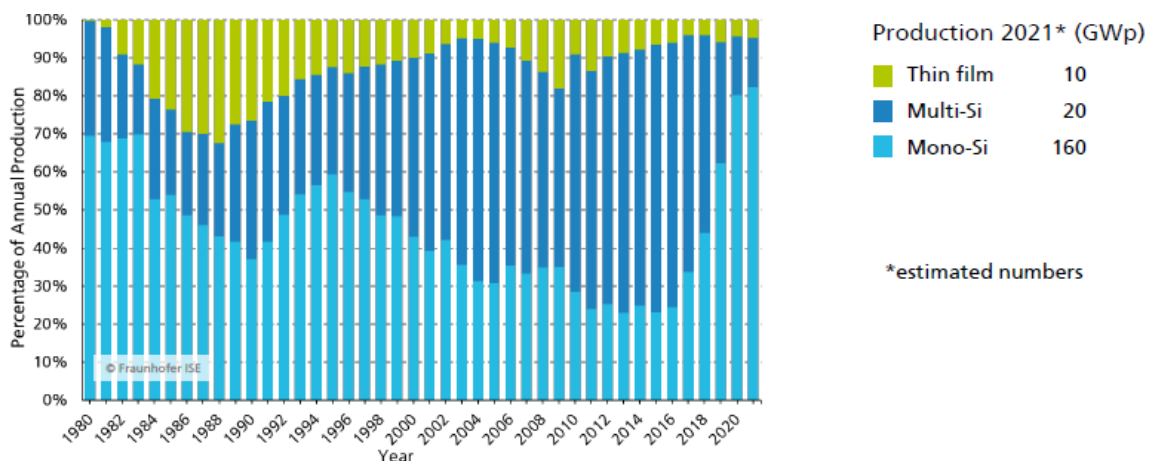


Figure (I-56) : composition d'un panneau photovoltaïque.

### I.6.1. Matériaux composant d'une cellule solaire

Pour optimiser la technologie photovoltaïque, la recherche se concentre sur de nouvelles générations de cellules solaires. Les cellules de première génération, en silicium cristallin (c-





Si), dominant le marché (95%) grâce à la disponibilité du silicium, mais leur fabrication est coûteuse et énergivore. Les cellules solaires de deuxième génération, dites à couches minces, sont plus abordables et efficaces. Elles utilisent des semi-conducteurs qui absorbent beaucoup plus de rayonnement, nécessitant moins de matériau. Leur fabrication est également plus tolérante aux impuretés, rendant le processus plus simple et économique [71] [74].

**Figure (I-57) :** Pourcentage annuel de production de panneaux PV dotés de cellules de 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> Génération [75].

Les cellules solaires de troisième génération, en développement, incluent les cellules multi-jonctions, capables d'absorber un large spectre du rayonnement solaire et souvent utilisées dans les concentrateurs photovoltaïques (CPV) pour un rendement élevé. Cette génération comprend également les cellules solaires pérovskites et organiques, encore en phase exploratoire [76].

### I.6.2. Les différents types de cellule photovoltaïque


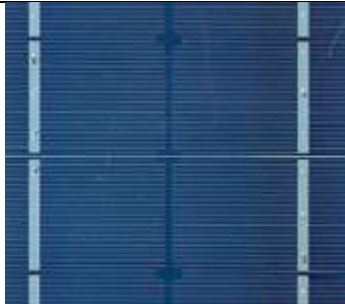

Récapitulatif des différentes générations de cellules solaires :


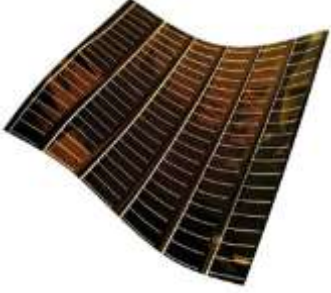
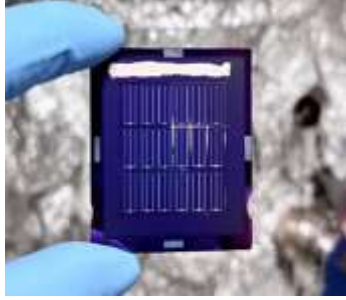

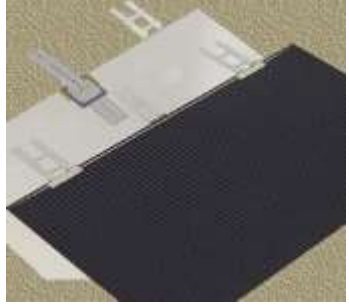
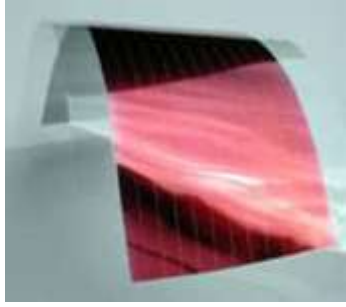

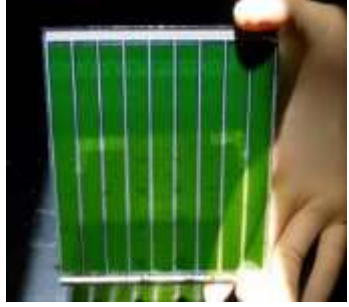
Type		Rendements record (%) (Green et al., 2022)	Avantages et inconvénients	Mode de fabrication
1 <sup>ère</sup> génération (c – Si)	Silicium monocristallin	26.7% (cellule) 24.4% (module)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rendement le plus élevé de cette génération.</li> <li>• Elaboration complexe et coûteuse</li> </ul>	Croissance d'un lingot par la méthode de Czochralski, avant son découpage en fines tranches pour l'élaboration des cellules.
	Silicium polycristallin	24.4% (cellule) 20.4% (module)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Moins complexe à réaliser</li> <li>• Faible coût.</li> <li>• Efficacité plus faible.</li> </ul>	Moulage du silicium liquide par le processus de Bridgman, ou bien par la méthode de Polyx (block-casting)
2 <sup>ème</sup> génération (couches minces)	Silicium amorphe(a)	10.2%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Faible efficacité.</li> <li>• Bon rapport qualité/prix.</li> <li>• Moins sensible à la température</li> <li>• Bonne réponse au faible rayonnement.</li> </ul>	Diffusion d'une fine couche du semi-conducteur, de
	CdTe	21% (cellule) 19.5% (module)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Faible coût.</li> <li>• Flexibles.</li> </ul>	

	CuInGaSe	23.4% (cellule) 19.2% (module)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Qualités optique et électrique élevées.</li> <li>Certains matériaux sont rares et toxiques.</li> <li>Durabilité limitée.</li> <li>Les cellules tandem, permettent d'élargir la plage de longueurs d'onde absorbées.</li> </ul>	l'ordre de quelques $\mu\text{m}$ , sur un substrat ou superstrat (métal, plastique, verre...) par évaporation thermique.
	Tandem (a-Si/nc-Si)	14% (cellule) 12.3% (module)		
3 <sup>ème</sup> génération (multi-jonctions et technologies émergentes)	Multi-jonctions	38.8% (cellule) 32.6% (module) 47.1% (cellule + CPV) 38.9% (module + CPV)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rendements les plus élevés de la filière PV.</li> <li>Coût excessivement élevé</li> <li>Leur utilisation est limitée à des fins particulières.</li> </ul>	Empilement de couches semi-conductrices de différentes propriétés électroniques et optiques permettant des rendements élevés.
	Pérovskite	23.7% (cellule) 17.9% (module)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rendement compétitif</li> <li>Faible coût.</li> <li>Instabilité à long terme.</li> </ul>	Techniques de dépôt additives simples à base de matériau pérovskite sur un substrat.
	Technologie DyeSensitized Solar	15.2% (cellule) 8.7% (module)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Faible coût.</li> <li>Flexible.</li> <li>Bonne réponse au faible rayonnement.</li> <li>Faible rendement.</li> <li>Instabilité à long terme.</li> <li>Durabilité limitée.</li> <li>Au stade de recherche</li> </ul>	Dépôt d'une solution à base de matériaux organiques (polymères ou molécules) sur un substrat.
		11.9% (cellule) 10.7% (module)		se fait par la superposition de colorant photo-sensible et de dioxyde de titane entre deux électrodes.

**Tableau (I-2) :** Récapitulatif des différentes générations de cellules solaires [76].

Images des différents types de cellule photovoltaïque :

		
Cellule en silicium polycristallin	Cellule en silicium monocristallin	Cellule en silicium amorphe en couche mince

		
<p>Cellule en silicium en couche mince CIS / CIGS</p>	<p>Cellule en tellure de cadmium (CdTe)</p>	<p>Cellule à base de CuInGaSe (CIGS)</p>
		
<p>Cellule Tandem(a-Si) (nc-Si)</p>	<p>Cellule multi-jonction</p>	<p>Cellule Technologie organique</p>
		
<p>Cellule pérovskite</p>	<p>Cellule à colorant ou cellules de Grätzel ou DSSC (Dye-Sensitized Solar Cells)</p>	

### I.6.3. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque transforme la lumière en électricité en utilisant un semi-conducteur, généralement du silicium. Les photons excitent les électrons, les faisant circuler selon leur charge grâce à une polarité négative d'un côté et positive de l'autre, obtenue par le dopage du silicium. Les électrons libérés se dirigent vers les polarités opposées, générant un courant électrique. Ce courant est ensuite converti en courant alternatif par un onduleur, fournissant une source d'énergie utilisable ou stockable [89].

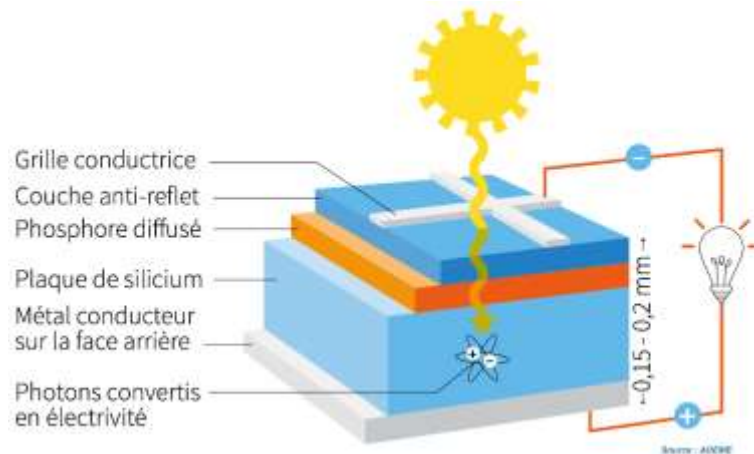


Figure (I-69): Schéma détaillé d'une cellule photovoltaïque [90].

#### I.6.3.1. La jonction P-N :

##### La jonction P-N :

Dans un panneau solaire, la jonction P-N représente le cœur de l'action où toute la magie se produit, permettant la conversion de l'énergie lumineuse en électricité. Voici le processus simplifié :

**Création de la jonction P-N :** Un panneau solaire est constitué de plusieurs cellules photovoltaïques, chacune d'elle contenant une jonction P-N. Pour créer cette jonction, on commence par prendre un morceau de silicium pur (un semi-conducteur) et on le dope. Le dopage est un processus où des atomes étrangers sont ajoutés au silicium pour modifier ses propriétés. Une partie du silicium est dopée avec du bore pour créer une couche de type P (p pour positive), qui a plus de "trous" que de libre électron. L'autre partie est dopée avec du phosphore pour créer une couche de type N (n pour négatif), qui a plus d'électrons libres que de trous. Lorsqu'on assemble ces deux types de silicium, on obtient une jonction P-N.

**Absorption de la lumière :** Lorsque la lumière (sous forme de photons) frappe la cellule photovoltaïque, elle peut être réfléchiée, transmise ou absorbée. Nous sommes surtout intéressés par la lumière absorbée, car elle peut transmettre son énergie aux électrons.

**Création de paires électron-trou :** Les photons qui sont absorbés par la couche de type N peuvent donner leur énergie à un électron. Cette énergie peut permettre à l'électron de se libérer de son atome (on dit qu'il est "excité") et de se déplacer librement. Ce phénomène crée un "trou" là où se trouvait l'électron. On parle de création de paires électron-trou.

**Création du courant :** Dans la jonction P-N, le côté N est rempli d'électrons libres et le côté P est rempli de trous. Un champ électrique naturel se forme à travers la jonction P-N et pousse les électrons vers le côté N et les trous vers le côté P. Si on connecte ensuite un circuit extérieur à la cellule solaire (en reliant le côté P au côté N), les électrons peuvent alors passer du côté N au côté P en passant par le circuit, créant ainsi un courant électrique.

**Flux d'énergie :** Ce courant, combiné à la tension créée par le champ électrique à travers la jonction P-N, produit de l'énergie. C'est cette énergie qui est utilisée pour alimenter des appareils ou chargée dans des batteries pour une utilisation ultérieure [89].

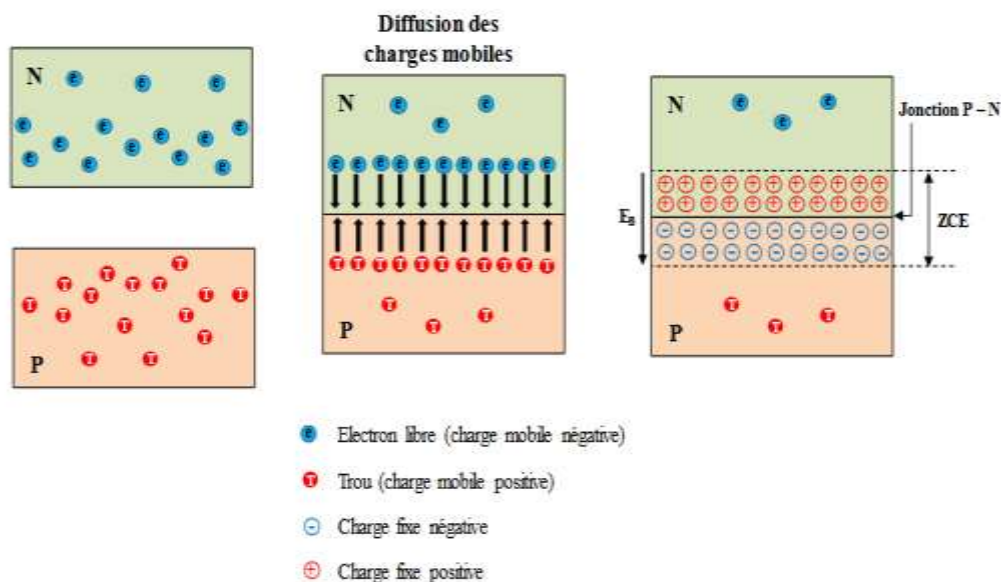


Figure (I-70) : Principe de création de la jonction P – N.

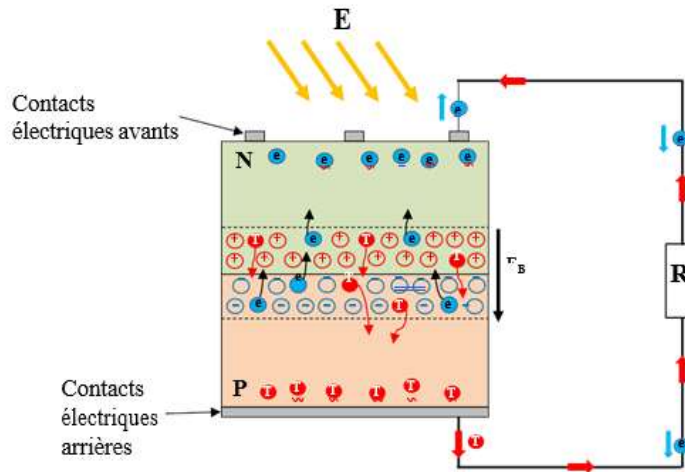


Figure (I-71) : Schéma explicatif du comportement de base d'une cellule solaire.

## I.7. Champs photovoltaïques et leurs connexions

Un champ photovoltaïque consiste en une combinaison de panneaux photovoltaïques connectés en série et en parallèle. Lorsqu'ils sont connectés en série, tous les panneaux partagent le même courant et leurs tensions se cumulent. En revanche, lorsqu'ils sont connectés en parallèle, ils sont soumis à une tension identique, mais les courants de chaque panneau se somment pour former le courant total du champ. Cette configuration en série-parallèle permet d'ajuster les niveaux de courant et de tension pour répondre aux besoins spécifiques des charges de haute puissance.

### I.7.1. Connexion des modules Pv en série

Tous les modules photovoltaïques sont connectés en série, comme illustré à la figure (II-9) Bien que cette configuration augmente la tension de sortie globale, elle présente un inconvénient majeur : en cas d'ombrage partiel ou de défaillance d'un module, la tension totale du système peut diminuer considérablement [102] [103].

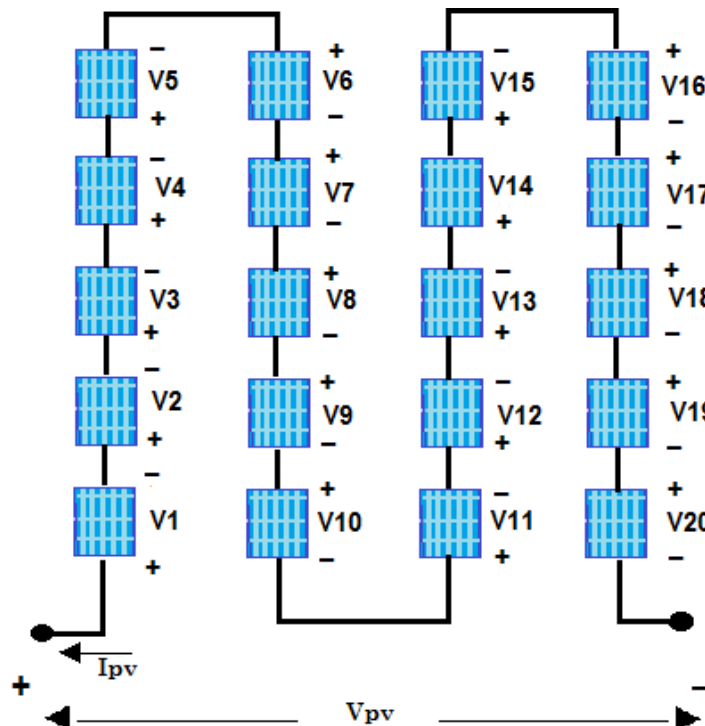


Figure (I-72) : Connexion des modules Pv en série.

### I.7.2. Connexion des modules Pv en parallèle

Tous les modules photovoltaïques sont connectés en parallèle, comme montré à la figure (II-10) Cette configuration permet d'augmenter le courant de sortie total du système. Cependant, si certains modules sont partiellement ombragés ou défectueux, le courant global produit par l'ensemble du système peut diminuer [102] [103].

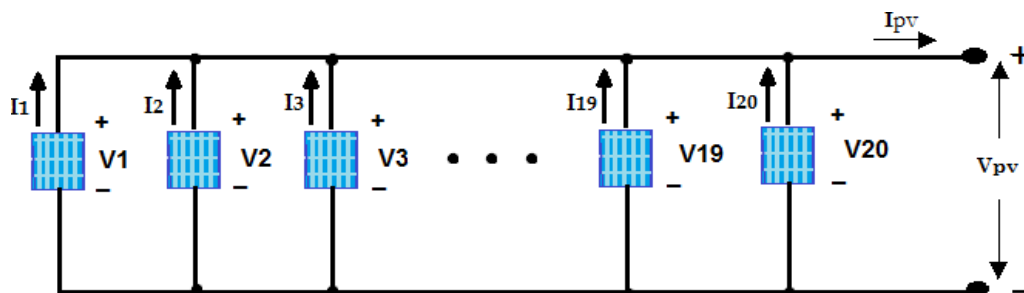


Figure (I-73) : Connexion des modules Pv en parallèle.

### I.7.3. Connexion des modules Pv en série-parallèle (SP)

Les modules photovoltaïques sont d'abord connectés en série, puis en parallèle, comme illustré à la figure (II-11) Cette configuration permet d'augmenter à la fois la tension et le courant de sortie, et son schéma de connexion est simple et facile à réaliser. Par conséquent, les configurations en série-parallèle sont parmi les plus couramment utilisées. Cependant, lorsque l'une des branches de cette configuration subit un ombrage partiel ou des dysfonctionnements, le courant total de sortie peut diminuer de manière significative [102] [103].



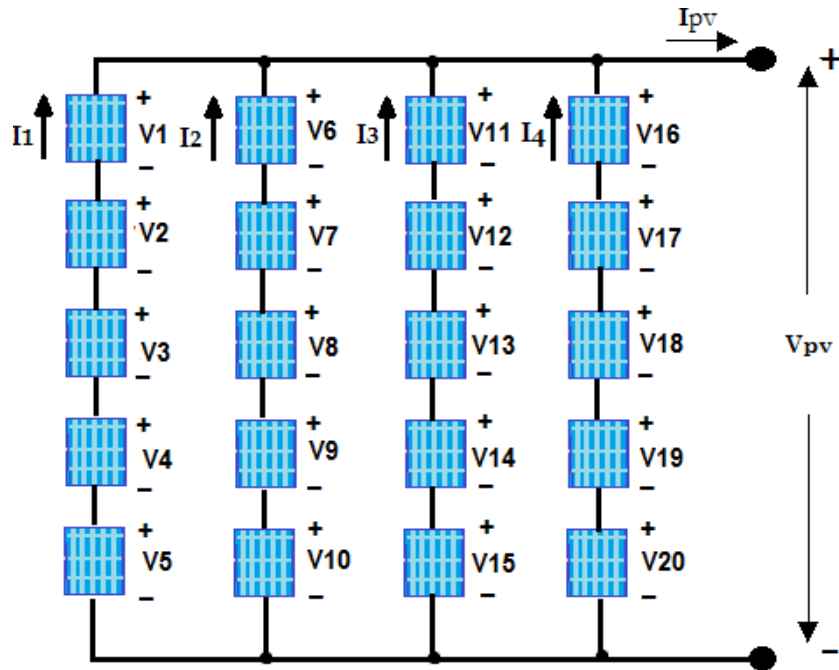
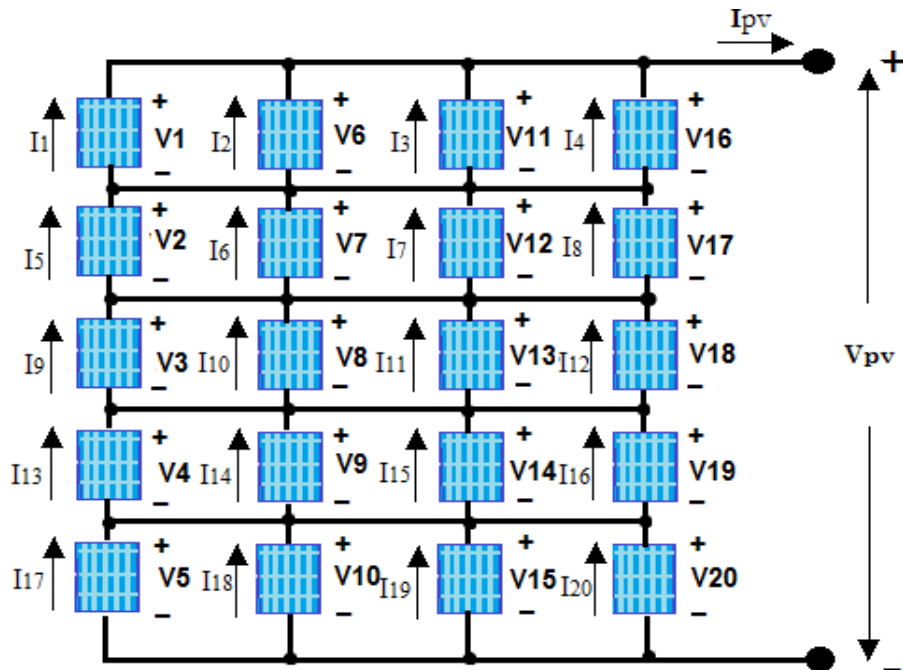


Figure (I-74) : Connexion des modules Pv en série-parallèle (SP).

#### I.7.4. Connexion d'un module Pv en Croix Totale (Total Cross-Tied « TCT »)

La connexion en croix totale implique de connecter tous les panneaux photovoltaïques en parallèle sur la même ligne des différents ensembles, voir figure(II-12). Cette méthode crée un champ solaire en forme de matrice avec plusieurs points de connexion. La somme des courants dans les différents points de connexion et la tension des panneaux photovoltaïques montés en parallèle sont équilibrées. Dans la plupart des modèles d'ombrage testés, cette configuration offre généralement de meilleures performances que les trois autres. Cela est attribué aux multiples connexions qui évitent l'activation des diodes by-pass dans toutes les conditions d'ombrage. Cette approche permet d'augmenter à la fois la tension et le courant tout en minimisant les pertes de puissance. Cependant, un inconvénient de cette configuration est son coût de mise en œuvre plus élevé [102] [103].





Figure(I-75) : Connexion d'un module Pv en Croix Totale (Total Cross-Tied « TCT »).

### I.7.5. Connexion d'un module PV en Pont-Lié (Bridge Linked « BL »)

Dans cette configuration, le système est divisé en plusieurs îlots distincts, voir figure (II-13). Chaque îlot se compose de deux ensembles de panneaux solaires connectés en parallèle, avec deux panneaux solaires en série dans chaque ensemble et des connexions intercalées entre les ensembles. Cette configuration permet d'augmenter à la fois la tension et le courant tout en réduisant les pertes de puissance dans le système photovoltaïque. Comparée à la configuration en croix totale, la configuration en pont-lié est moins performante en cas d'ombrages partiels, mais elle présente une meilleure performance en plein ensoleillement. Cela s'explique par le fait qu'elle nécessite moins de câblage, ce qui réduit les pertes de puissance. En comparaison avec la configuration série-parallèle, la configuration en pont-lié est plus coûteuse à mettre en œuvre, mais elle génère moins de pertes que la configuration série-parallèle [102] [103].

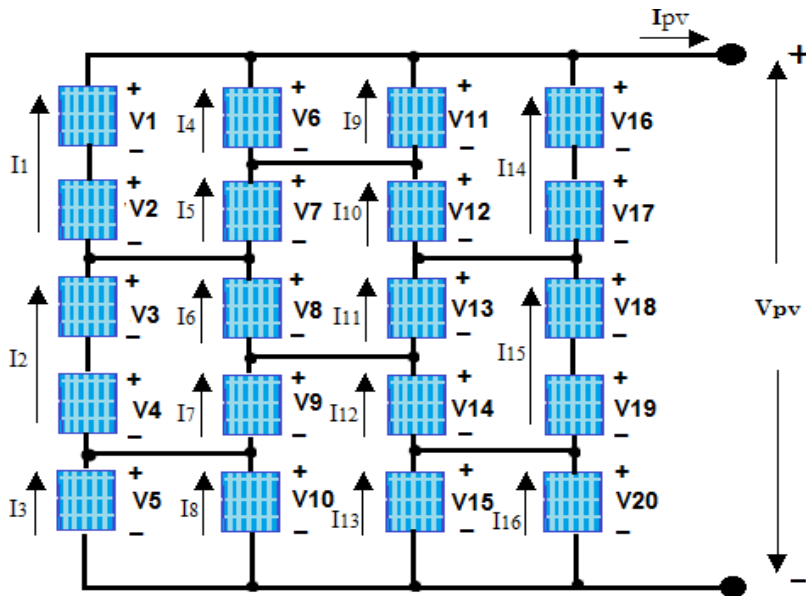


Figure (I-76) : Connexion d'un module PV en Pont-Lié (Bridge Linked « BL »).

### I.7.6. Connexion d'un module pv en Nid D'Abeilles (Honey Comb « HC »)

Cette configuration se compose de deux ensembles parallèles, chacun composé de trois modules connectés en série (voir figure 1.11). Comparée aux configurations en croix totale et en pont-lié, la configuration en nid d'abeilles est considérée comme ayant des performances moyennes, car elle présente légèrement plus de pertes de puissance. Cependant, elle offre de meilleures performances dans des situations où le champ solaire est disposé de manière asymétrique ou lorsque le nombre de colonnes exposées au même ensoleillement dépasse le nombre de lignes [102] [103].

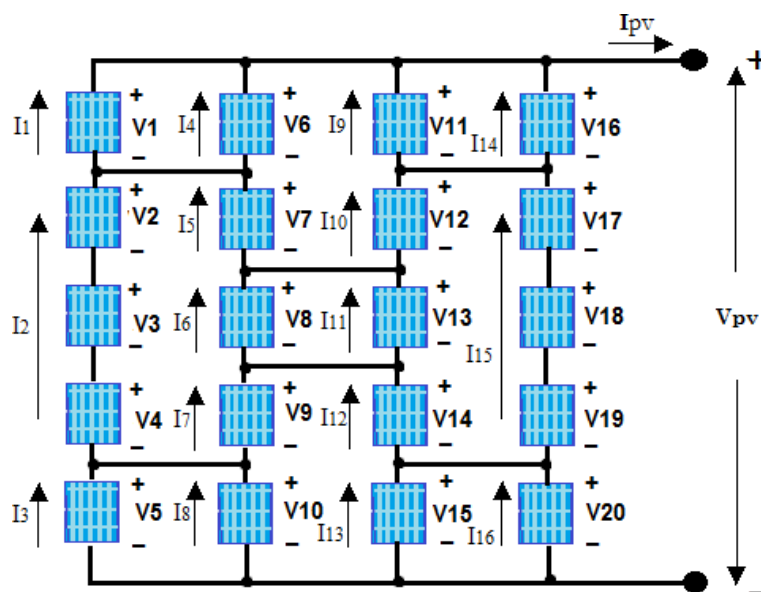


Figure (I-77) : Connexion d'un module pv en Nid D'Abeilles (Honey Comb « HC »).

### I.8. Le système photovoltaïque

Un système de panneaux solaires comprend de nombreux modules photovoltaïques, chaque module étant constitué de plusieurs cellules photovoltaïques. Pour assurer le bon fonctionnement des panneaux solaires, il est nécessaire de mettre en place un « système photovoltaïque » complet, également connu sous le nom de B.O.S. (Balance Of System). Ce système inclut divers composants tels que le système de fixation, le régulateur de charge et le câblage, qui ensemble permettent au système photovoltaïque de fonctionner efficacement.

L'onduleur est un autre composant crucial du B.O.S. Il convertit le courant continu produit par les panneaux en courant alternatif, lequel est utilisé pour la consommation domestique.

Le courant généré est ensuite acheminé vers le panneau de distribution principal, où tous vos équipements électriques sont connectés [91].

Le B.O.S. comprend également :

- Un système de fixation des panneaux solaires, capable de supporter les contraintes environnementales et le poids des panneaux, qui pèsent environ 20 kg chacun.
- Des câbles, connectiques et protections qui relient les panneaux entre eux et aux autres composants.
- Un régulateur de charge qui gère le courant produit par les panneaux, parfois intégré à l'onduleur.
- Un système de supervision pour surveiller le bon fonctionnement de l'ensemble de l'installation.
- Un compteur de production pour suivre la quantité d'énergie produite par l'installation.
- Des disjoncteurs, préférablement à haute immunité, pour la sécurité électrique.
- Un panneau de distribution pour la gestion et la distribution de l'énergie électrique dans le bâtiment.

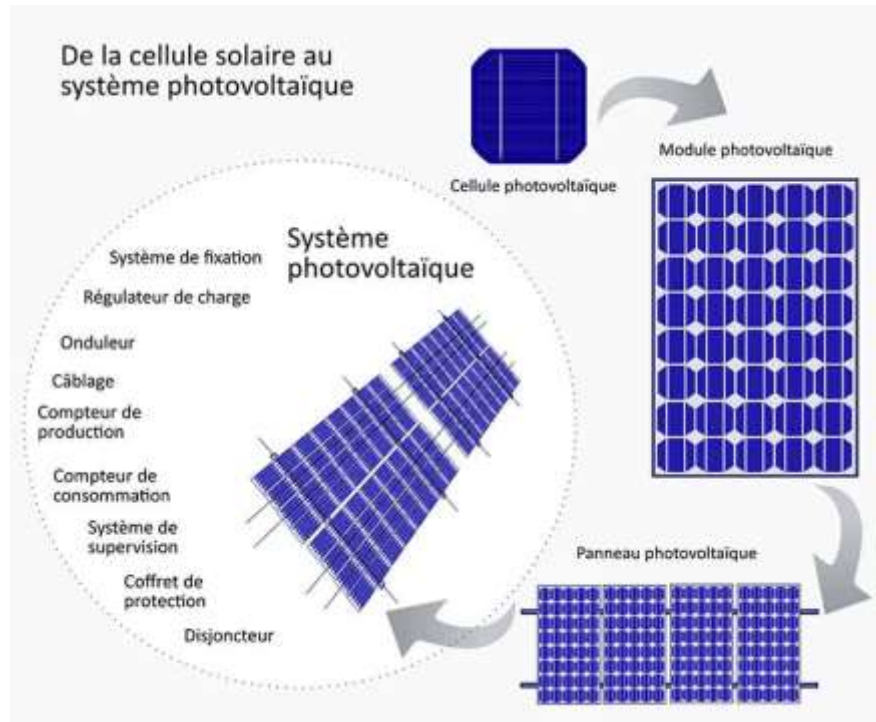


Figure (I-78) : De la cellule photovoltaïque au système photovoltaïque complet [91].

### I.8.1. Différents systèmes photovoltaïques

Le monde des installations photovoltaïques se répartit en trois grandes catégories : les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes raccordés au réseau.

**Systèmes autonomes :** Ces systèmes photovoltaïques fonctionnent en totale indépendance du réseau électrique. Leur utilisation est courante dans les zones reculées où l'accès au réseau n'est pas possible. L'énergie générée au cours de la journée est stockée dans des batteries pour assurer une alimentation continue, même lorsque l'ensoleillement est faible ou pendant la nuit [92].

**Systèmes hybrides :** Comme son nom l'indique, un système hybride combine les fonctionnalités des systèmes raccordés au réseau et des systèmes autonomes. Non seulement ils peuvent injecter de l'électricité dans le réseau, mais ils disposent également de batteries pour stocker l'énergie en surplus. Ces systèmes peuvent aussi être combinés avec d'autres sources d'énergie renouvelable comme une éolienne ou une génératrice à combustible, offrant ainsi une plus grande flexibilité et fiabilité, surtout lors des périodes de forte demande d'énergie [93].

**Systèmes raccordés au réseau :** Ce type de système convertit l'énergie solaire en électricité grâce aux panneaux photovoltaïques, puis l'alimente directement dans le réseau électrique. La tendance à la décentralisation des réseaux électriques impulse la popularité de ces systèmes. Ils sont généralement utilisés dans les zones urbaines où le raccordement au réseau est facile [94].

## I.9. Le montage des modules photovoltaïques

### I.9.1. Montages de modules en série

Quand des modules photovoltaïques sont connectés en série, les tensions de chaque module s'additionnent tout en maintenant un ampérage constant. Cet arrangement est généralement effectué entre des modules qui ont le même ampérage. Si ce n'est pas le cas, l'ampérage de l'ensemble correspondra à l'ampérage le plus bas.

Pour une connexion en série, il faut connecter le pôle positif (+) d'un module au pôle négatif (-) du module suivant [91].

Branchement de panneaux en série

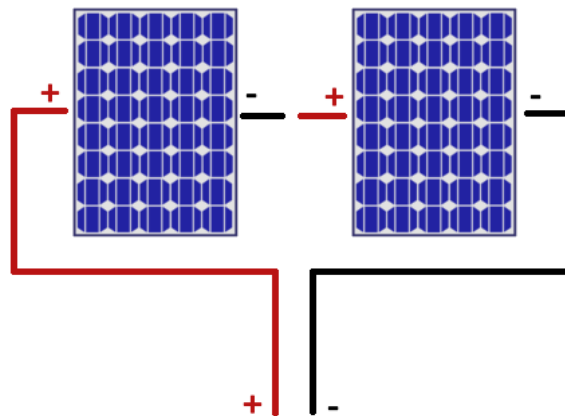


Figure (I-79) : branchement de panneaux en série [91].

### I.9.2. Montages de modules en parallèle

Dans une installation où les modules photovoltaïques sont connectés en parallèle, c'est l'ampérage qui s'additionne, tandis que le voltage reste constant. C'est donc l'opposé d'une connexion en série. Habituellement, cette configuration se fait entre des modules ayant le même voltage pour prévenir tout risque de surtension ou de court-circuit. Les ampérages peuvent varier car ils s'additionnent. Ce type de montage est privilégié quand une haute intensité est requise. Pour une installation en parallèle, les connecteurs positifs sont reliés entre eux, tout comme les connecteurs négatifs [91].

Branchement de panneaux en parallèle

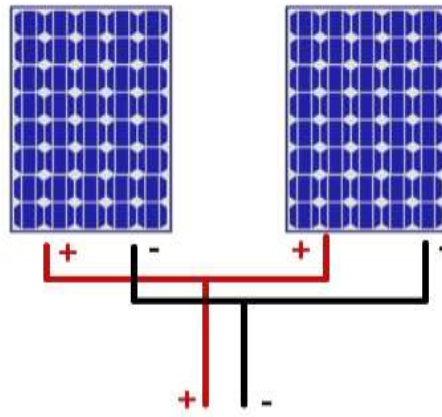


Figure (I-80) : Branchement de panneaux en parallèle [91].

### I.10. Le stockage de l'énergie photovoltaïque

Le stockage de l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques est essentiel pour assurer une alimentation électrique stable et continue, notamment durant la nuit ou les jours sans ensoleillement suffisant. Les batteries solaires sont l'une des solutions les plus courantes pour cela. Voici quelques types de systèmes de stockage de batteries :

**Batteries au plomb-acide :** Ce sont parmi les plus anciennes et les plus couramment utilisées. Elles sont connues pour leur robustesse et leur coût relativement faible. Toutefois, elles ont une durée de vie plus courte et nécessitent une maintenance plus régulière que d'autres types de batteries.

**Batteries au lithium-ion :** Ces batteries sont devenues de plus en plus populaires grâce à leur longue durée de vie et leur efficacité énergétique élevée. Elles sont également plus légères et compactes que les batteries au plomb-acide. Leur principal inconvénient est leur coût relativement élevé.

**Batteries à flux :** Elles sont idéales pour le stockage d'énergie à grande échelle en raison de leur capacité à maintenir leur capacité de charge indépendamment du nombre de cycles de charge et de décharge. Cependant, elles ont des coûts initiaux plus élevés et des densités énergétiques plus basses que les autres types de batteries.

**Batteries à sodium-ion :** Elles offrent une alternative prometteuse aux batteries au lithium-ion, avec une densité énergétique et une durée de vie comparables, mais potentiellement à moindre coût et avec des matériaux plus abondants.

**Batteries à sels fondus :** Elles utilisent un sel fondu comme électrolyte et peuvent fonctionner à des températures élevées, ce qui les rend attrayantes pour des applications à grande échelle, bien qu'elles soient encore largement en phase de recherche et de développement.

Le choix du type de batterie dépend de nombreux facteurs, dont les besoins énergétiques, le budget, les conditions climatiques, l'espace disponible pour l'installation et les préférences personnelles [95].

### I.11. La protection des panneaux photovoltaïques

La protection des panneaux photovoltaïques est essentielle pour maintenir leurs performances optimales et prolonger leur durée de vie. Voici les différentes méthodes et considérations pour protéger vos panneaux solaires :

**Protection physique :** Les panneaux photovoltaïques sont généralement construits avec des matériaux durables pour résister aux intempéries. Ils sont souvent encadrés par de l'aluminium et recouverts d'un verre spécial résistant aux chocs et conçu pour permettre une transmission optimale de la lumière. Certains panneaux sont même conçus pour résister à la grêle.

**Nettoyage :** Pour maintenir une efficacité optimale, il est important de nettoyer régulièrement les panneaux pour enlever la poussière, la saleté, les débris d'oiseaux et autres particules qui peuvent s'accumuler à la surface et bloquer la lumière du soleil. Cependant, le nettoyage doit être effectué avec prudence pour éviter de rayer la surface du panneau.

**Emplacement :** L'emplacement des panneaux peut également contribuer à leur protection. Il est préférable de les installer dans des zones qui sont moins susceptibles d'être touchées par des objets volants, des branches d'arbres, etc. Ils doivent également être installés à un angle approprié pour maximiser l'absorption de la lumière solaire et minimiser l'accumulation de débris.

**Protection contre les surtensions :** Les surtensions peuvent causer des dommages significatifs aux panneaux solaires et à l'équipement associé. L'installation de dispositifs de protection contre les surtensions (DPS) peut aider à protéger votre système contre les pics de tension souvent causés par la foudre.

**Inspection régulière :** Il est recommandé de faire inspecter régulièrement les panneaux solaires pour déceler tout signe de dommage ou de détérioration pouvant affecter leur performance. Cela inclut la vérification des connexions, la recherche de signes de corrosion, la vérification de l'intégrité des supports, entre autres.

**Assurance** : Pensez à protéger votre investissement en souscrivant une assurance. Plusieurs compagnies d'assurance proposent des politiques spécifiques aux installations solaires qui couvrent une variété de risques, y compris les dommages et vol des panneaux.

**Sécurité** : Dans certaines régions, le vol de panneaux solaires peut être un problème. Les mesures de sécurité, comme l'installation d'alarmes ou de clôtures, peuvent aider à protéger les panneaux contre le vol.

Un soin approprié et une maintenance régulière peuvent grandement prolonger la durée de vie de vos panneaux photovoltaïques et assurer un rendement constant de l'énergie solaire [97].

### **I.12. Les avantages et les inconvénients des panneaux photovoltaïques**

Les panneaux photovoltaïques présentent des avantages et des inconvénients qui peuvent varier en fonction de facteurs spécifiques tels que l'emplacement géographique, l'installation et la maintenance.

Ce tableau présente un panorama élargi des considérations liées à l'utilisation des panneaux photovoltaïques, en prenant en compte divers aspects environnementaux, économiques et sociaux [98] :

<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<b>Énergie renouvelable</b>	<b>Coût initial élevé</b>
Les panneaux photovoltaïques captent l'énergie du soleil, source d'énergie renouvelable, abondante et inépuisable.	L'achat et l'installation de panneaux solaires peuvent représenter un investissement initial important.
<b>Indépendance énergétique</b>	<b>Production d'énergie intermittente</b>
Les panneaux solaires peuvent vous aider à devenir moins dépendant du réseau électrique. De plus, l'excédent d'énergie peut souvent être vendu à votre fournisseur d'électricité, générant un revenu supplémentaire.	Les panneaux ne produisent pas d'énergie solaire la nuit et leur production peut être affectée par le mauvais temps. Cela nécessite souvent d'avoir une solution de stockage de l'énergie ou de rester connecté au réseau électrique.
<b>Maintenance limitée</b>	<b>Impact environnemental de la fabrication</b>
Les panneaux solaires nécessitent peu d'entretien, souvent juste un nettoyage régulier pour garder la surface libre de débris.	La fabrication, le transport et le recyclage des panneaux solaires peuvent avoir un impact environnemental non négligeable.



<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<b>Réduction de la dépendance aux combustibles fossiles</b>	<b>Esthétique</b>
L'utilisation des panneaux solaires contribue à réduire la dépendance aux combustibles fossiles, aidant ainsi à réduire la pollution et le réchauffement climatique.	Certains trouvent que les panneaux solaires peuvent être inesthétiques et ne s'intègrent pas bien dans le design architectural de certains bâtiments.
<b>Technologie évolutive</b>	<b>Impact sur l'environnement local</b>
La technologie solaire continue d'évoluer, offrant des améliorations constantes en termes d'efficacité et de coût.	L'installation de panneaux solaires peut affecter l'environnement local, notamment en modifiant l'écosystème et la biodiversité.
<b>Création d'emplois</b>	<b>Élimination et recyclage</b>
Le secteur des énergies renouvelables, y compris l'industrie solaire, crée des emplois dans la fabrication, l'installation et la maintenance des panneaux solaires.	À la fin de leur cycle de vie, les panneaux solaires doivent être éliminés ou recyclés, ce qui peut poser des défis environnementaux et logistiques.
<b>Flexibilité d'installation</b>	<b>Impact sur la faune</b>
Les panneaux solaires peuvent être installés sur diverses structures (toits, au sol, sur des bâtiments industriels, etc.) offrant une grande flexibilité d'application.	L'installation de panneaux solaires dans certaines zones peut affecter la faune locale, notamment les oiseaux et autres animaux.

**Tableau (I-3) : avantages et les inconvénients des panneaux photovoltaïques [98].**

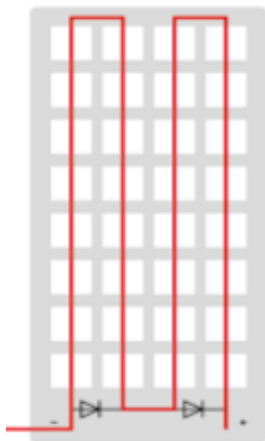
### **I.13. Conclusion**

En conclusion, ce chapitre a offert une vue d'ensemble sur les énergies renouvelables, en explorant les différents types d'énergies renouvelables et leur consommation à l'échelle mondiale ainsi qu'en Algérie. Nous avons également discuté des avantages et des inconvénients de ces sources d'énergie. Ensuite, nous nous sommes focalisés sur l'énergie photovoltaïque, en expliquant l'effet photovoltaïque, les cellules PV, leurs matériaux, et les différents types de cellules photovoltaïques. Nous avons détaillé le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, les systèmes photovoltaïques, leurs différentes configurations, le montage des modules photovoltaïques, ainsi que les mesures de protection des panneaux. Enfin, nous avons mis en lumière les avantages et les inconvénients des panneaux photovoltaïques. Cette analyse

complète met en évidence l'importance et le potentiel des énergies renouvelables, en particulier du photovoltaïque, dans la transition vers une énergie plus durable et respectueuse de l'environnement.

# CHAPITRE II

## Modélisation des Panneaux Photovoltaïques



## II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous avons exploré la modélisation des panneaux photovoltaïques (PV) en utilisant leur modèle électrique et leurs paramètres spécifiques. Plus particulièrement, nous nous sommes concentrés sur la caractérisation du panneau photovoltaïque Suntech (STP080-12/Bb) de 80 watts. À travers une série de simulations réalisées sous MATLAB et Simulink, nous avons analysé les performances de ce modèle, en étudiant les différents aspects de son comportement électrique. Cette approche nous a permis de mieux comprendre les dynamiques du panneau PV et d'optimiser son utilisation dans diverses applications énergétiques.

## II.2. Courbe caractéristique d'une cellule solaire

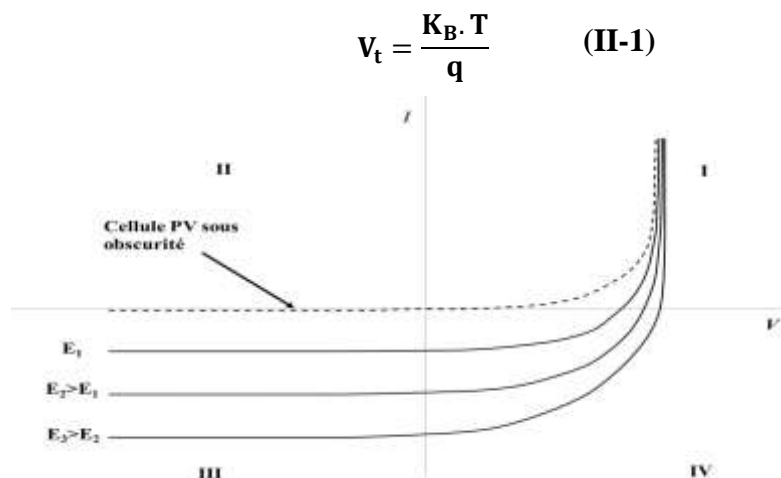
La représentation de la courbe caractéristique courant-tension I-V sur le cadran IV de la Figure (II-1) illustre diverses intensités d'éclairement (E). Les cadrans I et III dépeignent le fonctionnement non souhaitable de la cellule PV en tant que récepteur. En revanche, le cadran IV représente le fonctionnement de la cellule PV en tant que générateur, et est modélisé en utilisant l'équation de la diode  $I_D$ . Cette équation permet de simuler le fonctionnement de la cellule PV sous obscurité, tout en tenant compte du photo courant  $I_{ph}$  généré lorsque la cellule est éclairée [63].

Avec :

$I_D$  : courant qui traverse la cellule sous obscurité qui est assimilée à une diode.

$V_t$  : tension thermique.

$I_S$  : courant de saturation de la diode.

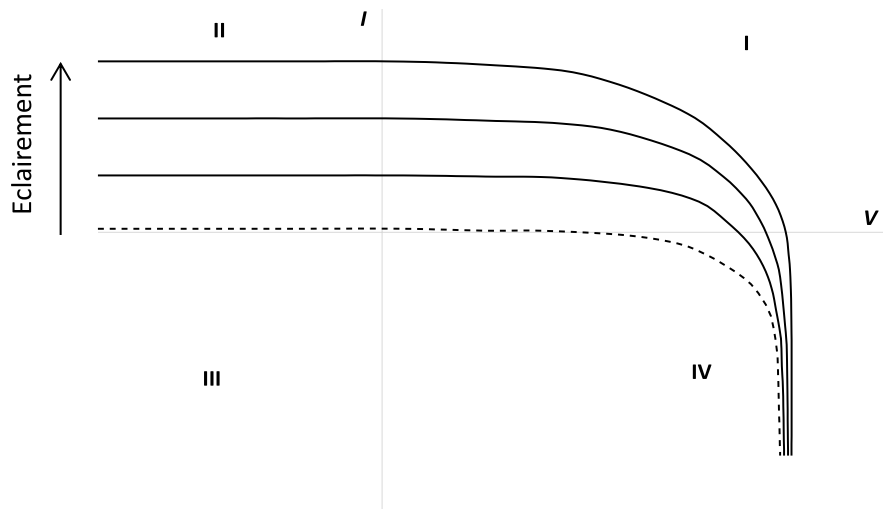


**Figure (II-1) :** Courbe caractéristique I – V d'une photodiode pour différentes intensités d'éclairement.

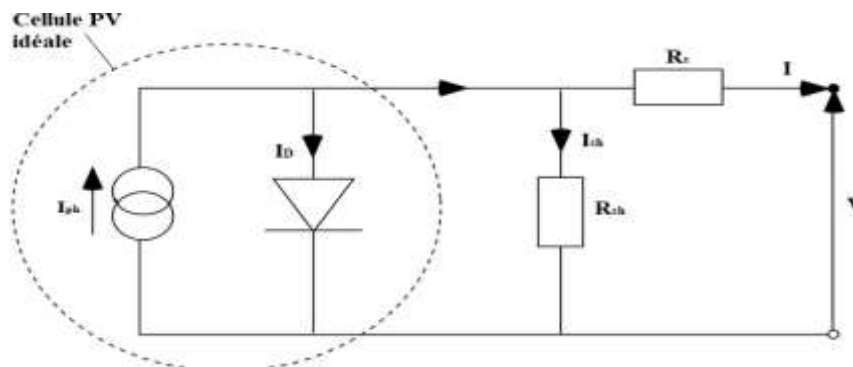
En règle générale, lorsqu'on se concentre uniquement sur ce mode de fonctionnement, le courant  $I$  est considéré comme positif et la tension est maintenue positive. Dans ce scénario, les caractéristiques I-V de la cellule PV sont représentées dans le cadran I de la Figure (II-2), l'équation de la diode ajoutée au photo courant devient alors :

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_S \left( e^{\left(\frac{V}{V_t}\right)} - 1 \right) \quad (II-2)$$

Il s'agit d'une représentation simplifiée d'une cellule photovoltaïque (PV) qui est considérée comme idéale. La figure (II-3) fournit le diagramme électrique équivalent de cette cellule.



**Figure (II-2) :** Courbe caractéristique I – V d'une cellule solaire pour différentes intensités d'éclairement.



**Figure (II-3) :** Schéma électrique équivalent d'un générateur PV associé au modèle standard.

## II.3. Modèles électriques

### II.3.1. Modèle simplifié

La modélisation simplifiée des cellules photovoltaïques (PV) est une méthodologie qui cherche à minimiser la complexité tout en mettant l'accent sur les caractéristiques électriques principales des cellules PV. Ce modèle s'avère particulièrement efficace pour les simulations accélérées et les études de conception initiales où un degré extrême de précision pourrait ne pas être requis. En incorporant des éléments fondamentaux tels que des sources de courant, des diodes et des résistances, ce modèle simplifié réussit à saisir les attributs essentiels des cellules PV, tout en demeurant pratique et accessible. Bien qu'il puisse être moins précis que certains modèles plus élaborés, il demeure un choix fréquemment utilisé pour les simulations rapides et les évaluations préliminaires [64].

La caractéristique courant-tension (I-V) pour le modèle simplifié est donnée par l'équation suivante :

$$I = I_{Ph} - I_S \left( e^{\left( \frac{V + I R_S}{\eta \cdot V_t} \right)} - 1 \right) - \frac{V + I R_S}{R_{Sh}} \quad (\text{II-3})$$

Où :

$I_{Ph}$  : courant photo-généré

$I_S$  : courant de saturation de la diode

$V$  : tension aux bornes du panneau

$R_S$  : résistance série

$R_{Sh}$  : résistance parallèle (shunt)

$\eta$  : facteur d'idéalité de la diode

$V_t$  : tension thermique.

Paramètres importants du modèle :

**Courant Photo-généré ( $I_{Ph}$ ) :**

Dépend de l'irradiance solaire incidente et des propriétés de la cellule. et son équation est donnée par :

$$I_{Ph} = I_{Ph_{STC}} \cdot \frac{E}{E_{STC}} \cdot (1 + \alpha(T - T_{STC})) \quad (\text{II-4})$$

Où :

**$I_{ph\_STC}$**  : Courant photo-généré aux conditions standard (STC).

**$E$**  : L'irradiance réelle.

**$E_{STC}$**  : L'irradiance standard.

**$A$**  : Coefficient de température.

**$T$**  : Température de la cellule.

**$T_{STC}$**  : Température standard.

**Courant de saturation de la diode ( $I_s$ ) :**

Dépend des propriétés de matériau et de la température, est donné par l'équation :

$$I_s = I_{s\_STC} \cdot \left(\frac{T}{T_{STC}}\right)^3 \cdot e^{\left(\frac{E_g}{K} \left(\frac{1}{T_{STC}} - \frac{1}{T}\right)\right)} \quad (\text{II-5})$$

Où :

**$I_{s\_STC}$**  : Courant de saturation aux conditions standard.

**$E_g$**  : L'énergie de gap du semi-conducteur.

**$K$**  : Constante de Boltzmann.

**Résistance Série ( $R_s$ )** : Représente les pertes ohmiques internes, et influence directement la pente de la courbe I-V dans la région de forte tension.

**Résistance Shunt ( $R_{sh}$ )** : Représente les pertes par fuite, et influence la pente de la courbe I-V dans la région de faible tension.

**Facteur d'Idéalité de la Diode ( $\eta$ )** : Détermine la pente de la courbe I-V dans la région de la jonction directe, et varie typiquement entre 1 (diode idéale) et 2 (recombinaison dans la région de charge d'espace).

**Tension Thermique ( $V_t$ )** : Dépend de la température.

$$V_t = \frac{K_t}{q} \quad (\text{II-6})$$

Où :

**$K$**  : Constante de Boltzmann.

**$T$**  : Température absolue.

**$Q$**  : Charge de l'électron.

Le modèle simplifié est largement utilisé dans diverses applications, telles que :

- **Conception préliminaire** : Utilisé pour les études de faisabilité et la conception initiale des systèmes photovoltaïques.
- **Éducation et formation** : Sert d'outil pédagogique pour enseigner les principes de base des cellules photovoltaïques.
- **Analyses de performance rapide** : Permet d'effectuer des évaluations rapides des performances des cellules PV sous diverses conditions d'irradiance et de température.

### II.3.2. Modèles à une seule diode

Ce modèle offre une représentation plus précise du comportement réel d'une cellule photovoltaïque en incorporant la résistance en série  $R_S$  et la résistance shunt  $R_{Sh}$ , qui sont présentées dans le diagramme électrique de la Figure (II-3).  $R_S$  symbolise les pertes ohmiques principalement dues aux contacts entre le semi-conducteur et la grille métallique qui recueille le courant. Pendant ce temps,  $R_{Sh}$  prend en compte les courants de fuite à l'intérieur de la cellule photovoltaïque. En ce qui concerne le facteur «  $n$  », désigné comme l'idéalité, sa valeur est généralement située entre 1 et 2, [63].

Ce modèle est gouverné par une relation dérivée de la loi de Kirchhoff :

$$I = I_{Ph} - I_D - I_{Sh} = I_{Ph} - I_S \left( e^{\left( \frac{V + I R_S}{\eta V_t} \right)} - 1 \right) - \frac{V + I R_S}{R_{Sh}} \quad (II-7)$$

Où :

$I_{Ph}$  : courant photo-généré

$I_S$  : courant de saturation de la diode

$V$  : tension aux bornes du panneau

$R_S$  : résistance série

$R_{Sh}$  : résistance parallèle (shunt)

$\eta$  : facteur d'idéalité de la diode

$V_t$  : tension thermique, définie par  $V_t = \frac{kT}{q}$ , où  $k$  est la constante de Boltzmann,  $T$  est la température absolue, et  $q$  est la charge de l'électron.

Le modèle à une diode est largement utilisé dans diverses applications, telles que :

- **Conception et dimensionnement des systèmes PV** : Permet d'estimer les performances des panneaux solaires sous différentes conditions d'exploitation.
- **Optimisation des systèmes PV** : Utile pour maximiser le rendement énergétique des installations solaires.



- **Recherche académique et développement technologique** : Offre un cadre théorique pour étudier et améliorer les cellules photovoltaïques.

### II.3.3. Modèles à une diode simplifié

Le modèle à une diode simplifié est une version simplifiée du modèle à une diode standard, omet souvent la résistance shunt ( $R_{Sh}$ ) pour réduire la complexité des calculs tout en fournissant une représentation suffisamment précise du comportement des cellules photovoltaïques. Ce modèle est particulièrement utile pour des analyses rapides et des simulations où une précision extrêmement élevée n'est pas cruciale [64].

La caractéristique courant-tension (I-V) du modèle à une diode simplifié est donnée par l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{V+IR_s}{\eta V_t}} - 1 \right) \quad (\text{II-8})$$

Où :

$I_{ph}$  : courant photo-généré.

$I_0$  : courant de saturation de la diode.

$V$  : tension aux bornes du panneau.

$R_s$  : résistance série.

$\eta$  : facteur d'idéalité de la diode.

$V_t$  : tension thermique, définie par  $V_t = \frac{kT}{q}$ , où  $k$  est la constante de Boltzmann,  $T$  est la température absolue, et  $q$  est la charge de l'électron.

Pour simplifier encore davantage, en supposant que  $R_s$  est très petit ou négligeable, l'équation

$$\text{devient : } I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{V}{\eta V_t}} - 1 \right) \quad (\text{II-9})$$

Le modèle à une diode simplifié est utilisé dans diverses applications, telles que :

- **Simulations initiales de performance** : Pour estimer rapidement les performances d'un panneau PV sous différentes conditions.
- **Études de rendement énergétique** : Pour des calculs approximatifs du rendement énergétique dans des scénarios simples.
- **Optimisation des systèmes PV** : Pour aider à dimensionner et optimiser les systèmes photovoltaïques, notamment dans les applications où les conditions d'ombrage ou de température varient peu.

### II.3.4. Modèles à deux diodes

La figure (II-4) illustre le modèle électrique à deux diodes, qui est employé pour simuler de manière plus précise le comportement de la cellule PV en intégrant les pertes dues au courant de recombinaison dans la ZCE grâce à l'ajout d'une autre diode en parallèle. Ce modèle est par ailleurs plus performant dans les conditions de faible rayonnement. La relation suivante permet d'évaluer le courant  $I$  fourni par la cellule [65]:

$$I = I_{ph} - I_{S1} \left( e^{\left( \frac{V+I.R_s}{n_1.V_t} \right)} - 1 \right) - I_{S2} \left( e^{\left( \frac{V+I.R_s}{n_2.V_t} \right)} - 1 \right) - \frac{V + I.R_s}{R_{sh}} \quad (\text{II-10})$$

Où :

$I_{S1}$  et  $I_{S2}$  : courants de saturation des deux diodes.

$\eta_1$  et  $\eta_2$  : facteurs d'idéalité des deux diodes.

$$I = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - I_{sh} \quad (\text{II-11})$$

Où :

$I_{D1}$  : est le courant à travers la première diode, modélisant la recombinaison au niveau de la jonction.

$I_{D2}$  : est le courant à travers la deuxième diode, modélisant la recombinaison dans la région quasi-neutre.

$I_{sh}$  : est le courant à travers la résistance shunt.

Les courants à travers les diodes sont donnés par les équations suivantes :

$$I_{D1} = I_{S1} \left( e^{\left( \frac{V+I.R_s}{\eta_1.V_t} \right)} - 1 \right) \quad (\text{II-12})$$

$$I_{D2} = I_{S2} \left( e^{\left( \frac{V+I.R_s}{\eta_2.V_t} \right)} - 1 \right) \quad (\text{II-13})$$

Et le courant à travers la résistance shunt est donné par :

$$I_{sh} = \frac{V + I.R_s}{R_{sh}} \quad (\text{II-14})$$

En combinant ces équations, nous obtenons la relation **qui** permet d'évaluer le courant  $I$  fourni par la cellule.

Le modèle à deux diodes est particulièrement utile dans :

- **Recherche et développement** : Permet des études détaillées et précises des phénomènes de recombinaison dans les cellules photovoltaïques.
- **Optimisation des cellules PV** : Aide à identifier et à minimiser les pertes de recombinaison, améliorant ainsi les performances des cellules.
- **Simulations avancées** : Utilisé dans les simulations où une précision élevée est requise, par exemple, pour des analyses de performance sous diverses conditions d'illumination et de température.

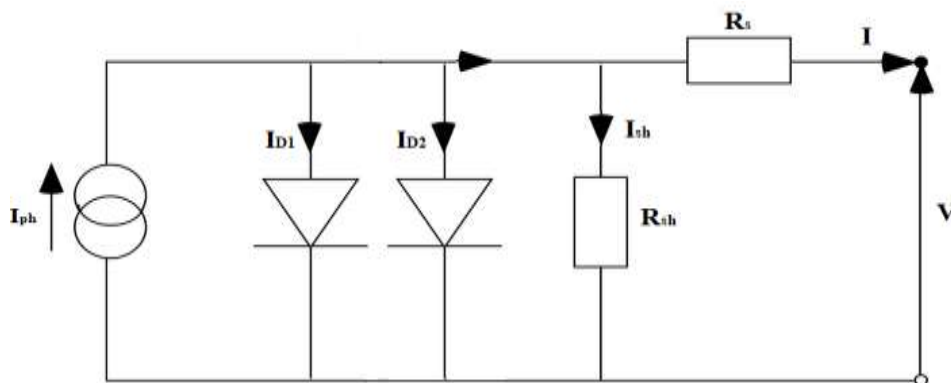


Figure ( II-4) : Schéma électrique équivalent d'un générateur PV associé au modèle à deux diodes.

### II.3.5. Modèle Lambert W

Le Modèle Lambert W emploie la fonction mathématique Lambert W pour solutionner de façon explicite les équations non linéaires inhérentes aux panneaux photovoltaïques. Ce modèle est spécialement bénéfique pour parvenir à des solutions analytiques des caractéristiques de courant par rapport à la tension (I-V) des cellules photovoltaïques, ce qui favorise une compréhension accrue et une simplification des simulations et des analyses [64].

Le courant de sortie (I) du panneau PV dans le modèle de Lambert W est donné par l'équation

$$\text{suivante : } I = I_{ph} - I_0 \left| W \left( \frac{I_0 R_s}{n_i V_t} \cdot e^{\left( \frac{V + I R_s}{n_i V_t} \right)} \right) \right| \quad (\text{II-15})$$

Où  $W(x)$  est la fonction Lambert W. La fonction Lambert W est définie comme l'inverse de  $f(W) = We^W$ , c'est-à-dire que si  $W(x) = y$ , alors  $x = ye^y$ .

Pour utiliser la fonction Lambert W dans le contexte des panneaux photovoltaïques, nous devons d'abord réarranger l'équation I-V standard pour qu'elle corresponde à la forme  $ye^y$  :

Partons de l'équation de courant :

$$I + I_0 \left( e^{\left(\frac{V+I.R_s}{\eta.V_t}\right)} - 1 \right) + \left(\frac{V+I.R_s}{\eta.V_t}\right) = I_{ph} \quad (\text{II-16})$$

En supposant que  $R_{sh}$  est très grand (ce qui simplifie les calculs en négligeant le terme  $\left(\frac{V+I.R_s}{R_{sh}}\right)$  l'équation devient :

$$I \approx I_{ph} - I_0 \cdot e^{\left(\frac{V+I.R_s}{\eta.V_t}\right)} \quad (\text{II-17})$$

En réarrangeant pour isoler le terme exponentiel :

$$I_0 \cdot e^{\left(\frac{V+I.R_s}{\eta.V_t}\right)} \approx I_{ph} - I \quad (\text{II-18})$$

Prenons le logarithme naturel des deux côtés :

$$\frac{I + I \cdot R_s}{\eta \cdot V_t} = \ln\left(\frac{I_{ph} - I}{I_0}\right) \quad (\text{II-19})$$

En isolant I :

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot e^{\left(\frac{V+I.R_s}{\eta.V_t}\right)} \quad (\text{II-20})$$

En définissant  $x = \frac{I_0 \cdot R_s}{\eta \cdot V_t} e^{\left(\frac{V}{\eta \cdot V_t}\right)}$  et  $W(x)$  comme la fonction Lambert W, nous avons :

$$I = I_{ph} \cdot I_0 \cdot W\left(\frac{I_0 \cdot R_s}{\eta \cdot V_t} \cdot e^{\left(\frac{V}{\eta \cdot V_t}\right)}\right) \quad (\text{II-21})$$

Le modèle de Lambert W est particulièrement utile dans :

- **Simulations analytiques** : Permet de résoudre explicitement les équations I-V sans itérations.
- **Conception et optimisation des systèmes PV** : Utile pour optimiser les paramètres du système en minimisant les calculs itératifs.
- **Études académiques et de recherche** : Offre une perspective claire et analytique des caractéristiques I-V des cellules photovoltaïques.

### II.3.6. Modèles à circuit équivalent

Le modèle de circuit équivalent est une approche couramment utilisée pour représenter les caractéristiques électriques des cellules photovoltaïques (PV). Il se compose d'éléments électriques simples qui permettent de capturer les principaux comportements des cellules

solaires. Ce modèle est essentiel pour la conception, l'analyse et la simulation des systèmes photovoltaïques [64].

Les variantes courantes incluent le modèle à une diode et le modèle à deux diodes.

L'équation I-V pour le modèle à une diode est :

$$I = I_{Ph} - I_S \left( e^{\left( \frac{V+I.R_S}{n.V_t} \right)} - 1 \right) - \frac{V + I.R_S}{R_{Sh}} \quad (\text{II-22})$$

L'équation I-V pour le modèle à deux diodes est :

$$I = I_{Ph} - I_{S1} \left( e^{\left( \frac{V+I.R_S}{n_1.V_t} \right)} - 1 \right) - I_{S2} \left( e^{\left( \frac{V+I.R_S}{n_2.V_t} \right)} - 1 \right) - \frac{V + I.R_S}{R_{Sh}} \quad (\text{II-23})$$

Modèles à circuit équivalent est particulièrement utile dans :

- **Conception et dimensionnement des systèmes PV** : Utilisé pour évaluer et optimiser les performances des systèmes photovoltaïques.
- **Simulations et analyses** : Utilisé dans les simulations pour prédire les performances sous différentes conditions environnementales.
- **Recherche académique et développement** : Fournit une base pour étudier les comportements des cellules PV et développer de nouveaux matériaux et technologies.

## II.4. Paramètres électriques d'une cellule solaire

Les courbes typiques I - V et P - V d'une cellule PV sous un certain rayonnement et à une température spécifique sont illustrées par la Figure (II-5). Chaque point sur la courbe représente une charge imposée sur la cellule. Alors que la tension s'accroît avec la charge, le courant tend à diminuer. Les points importants à considérer sont :

### II.4.1. Courant court-circuit $I_{CC}$ :

Le courant de court-circuit représente le courant maximal qu'on peut obtenir. Il correspond au courant généré lorsqu'une cellule PV est court-circuitée, et donc lorsqu'il n'y a pas de tension aux bornes de la cellule. À l'image du photo-courant  $I_{Ph}$ , le courant de court-circuit est proportionnel à l'éclairement incident. En fait, un grand nombre de photons incidents sur la cellule permet de produire plus d'électrons libres, qui peuvent ensuite participer à la conduction du courant. Par ailleurs, la température de la cellule influe également sur le courant de court-circuit, du fait de l'augmentation de l'énergie des électrons, qui ont donc besoin de moins d'éclairement pour passer à la bande de conduction [64]. Toutefois, l'impact de la température sur  $I_{CC}$  est moindre par rapport à celui induit par l'éclairement.

### II.4.2. Tension de circuit ouvert $V_{CO}$ (tension à vide)

La tension maximale aux bornes d'une cellule PV, obtenue lorsque la résistance est infinie et qu'aucun courant ne circule Figure (II-5), est principalement impactée par la température de la cellule. Habituellement, pour chaque augmentation d'un degré Celsius au-delà de la valeur standard ( $T_{STC}=25^{\circ}C$ ), la tension de circuit ouvert d'une cellule en silicium diminue en moyenne de 0.4%. De plus, la tension  $V_{CO}$  présente une légère augmentation avec l'éclairement.

### II.4.3. Puissance crêtes-Point de puissance maximale ( $P_{mac}$ ) ( $P_{Pm}$ )

La puissance maximale qu'une cellule PV peut produire correspond à la multiplication de  $I_{pm}$  par  $V_{pm}$  ou ( $I_{opt}$  et  $V_{opt}$ ), ce qui représente le point associé à la charge optimale de la cellule. Les figures illustrent que la puissance générée par la cellule PV croît avec l'éclairement, mais décroît lorsque la température de fonctionnement augmente.

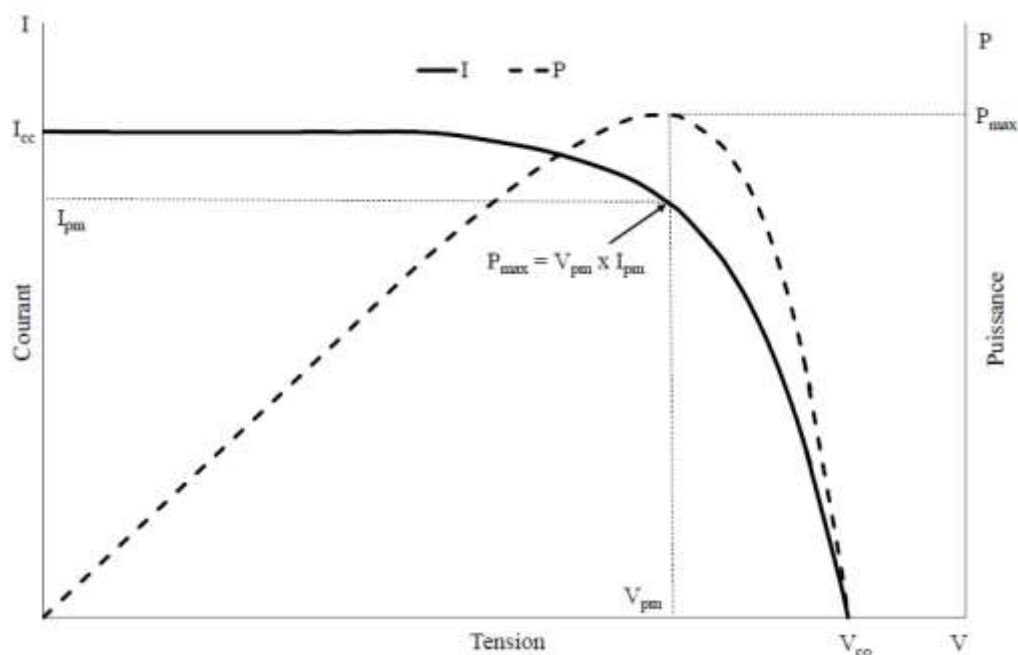


Figure (II-5) : Courbes caractéristiques d'un générateur PV.

### II.4.4. Facteur de forme (FF)

Le facteur de forme, qui est le quotient de la puissance maximale générée par la cellule PV et le produit de  $I_{cc}$  par  $V_{co}$ , est un indicateur de la qualité d'une cellule solaire. Une cellule de bonne qualité aura un facteur de forme proche de 1. Quand le facteur de forme est égal à 1, on qualifie la cellule de solaire d'idéale.

$$FF = \frac{P_{\max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} = \frac{I_{pm} \cdot V_{pm}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (\text{II-24})$$

#### II.4.5. Rendement électrique ou efficacité ( $\eta$ )

C'est le quotient de la puissance électrique produite par un panneau PV d'une surface donnée  $S$ , et l'intensité du rayonnement solaire qui atteint cette même surface. Cela se traduit par :

$$\eta = \frac{P_{\max}}{E \cdot S} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{E \cdot S} \quad (\text{II-25})$$

Où :

**E** : Eclairement ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

**S** : Surface de la cellule ( $\text{m}^2$ ).

## II.5. Caractéristique des panneaux Pv (modèle Suntech STP080S-12/Bp)

Le modèle Suntech STP080S-12/Bp est un panneau solaire photovoltaïque produit par Suntech Power, un des principaux fabricants de panneaux solaires. Ce modèle est conçu pour une gamme d'applications, y compris les systèmes solaires résidentiels, commerciaux et à l'échelle des services publics [65].

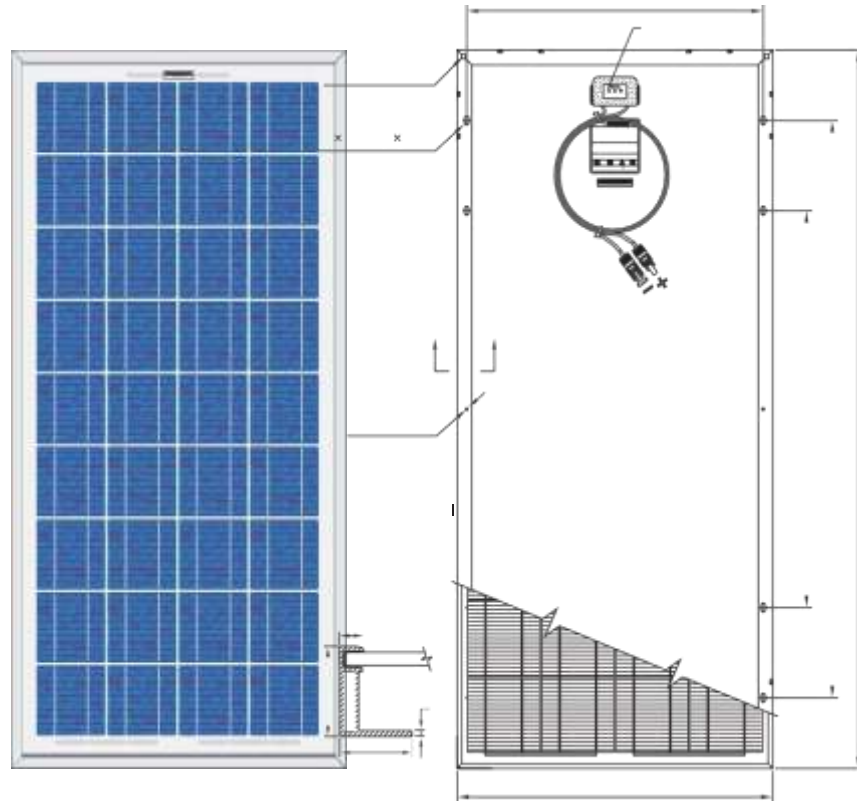


Figure (II-6) : Panneaux Pv (modèle Suntech STP080S-12/Bp).

Spécifications du panneau :

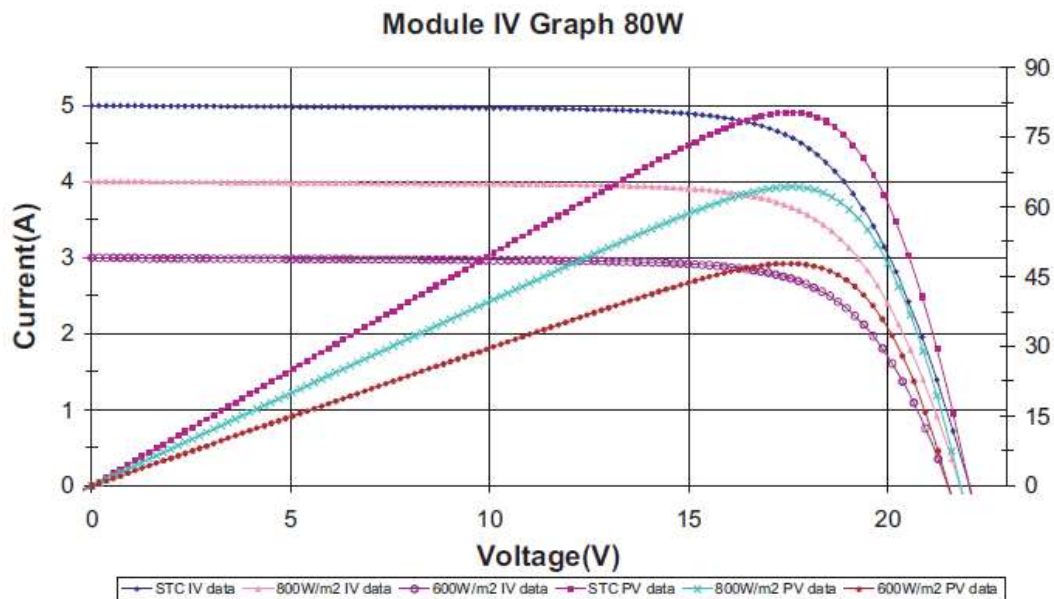
Spécifications	Valeurs
Type de cellule	Silicium multicristallin
Dimensions de la cellule	125 mm x 125 mm
Nombre de cellules	36 (4 x 9)
Dimensions du module	1195 mm x 541 mm x 30 mm
Poids du module	8 kg



Caractéristique du panneau :

Caractéristiques	Valeurs
Tension de circuit ouvert (Voc)	21.2V
Tension de fonctionnement optimale (Vmp)	16.8 V
Courant de court-circuit (Isc)	5.12A
Courant de fonctionnement optimal (Imp)	4.76A
Puissance maximale à STC (Pm)	80Wp

- STC : Irradiance 1000 W/m<sup>2</sup>, Température du module 25°C, AM=1.5



**Figure (II-7) : module IV graphique 80w.**

Limites spécifiées :

Limites	Valeurs
Température de fonctionnement	-40 à +85°C
Tension système maximale	1000 V DC

Température et Coefficients :

Température et Coefficients	Valeurs
NOCT	48°C + 2°C
Coefficient de température actuelle	0.06 + 0.01 %/K
Coefficient de température de tension	-(155 + 10) mV/K
Coefficient de température de puissance	-(0.5 + 0.05) %/K

NOCT (Température Normale de Fonctionnement en Conditions)

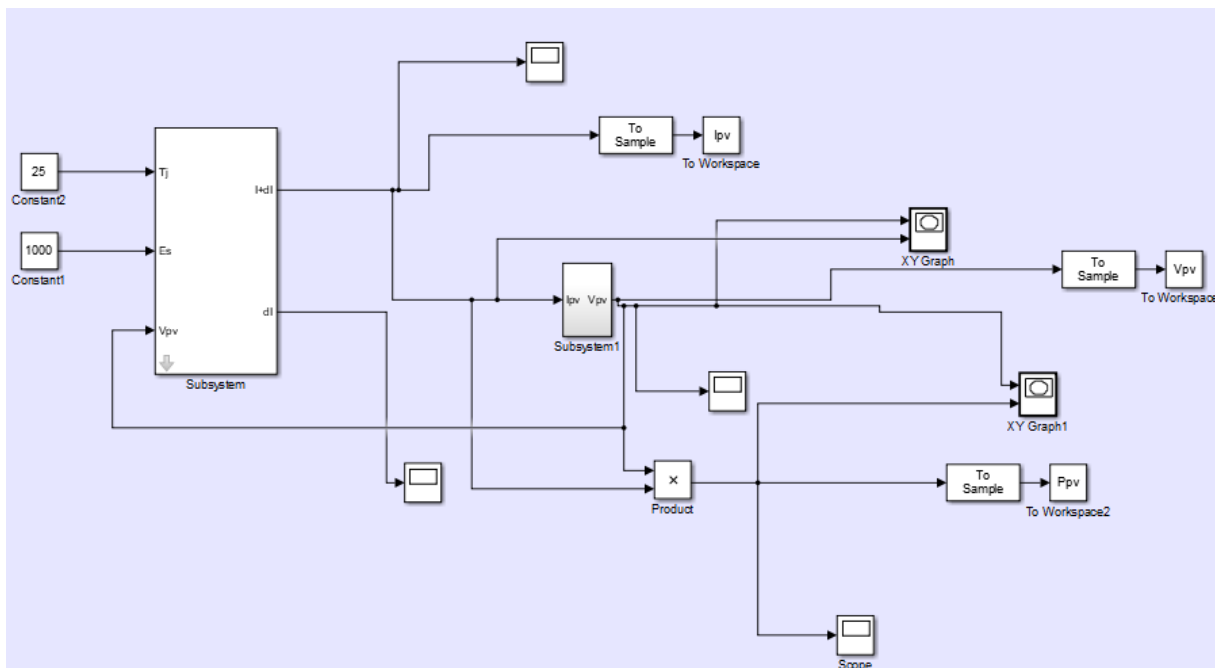
Spécifications de sortie :

Sortie	Valeurs
Type de borne de sortie	Boîtier de jonction
Câble	LAPP (4,0 mm)
Longueurs asymétriques	750 mm (-) et 750 mm (+)
Connexion	Connecteur Suntech Type IV

## II.6. Caractérisation électrique d'un module PV sous Matlab/simulink

Nous avons opté pour le modèle à une diode avec résistance shunt sous Matlab/Simulink afin d'explorer les caractéristiques électriques du module photovoltaïque.

La figure (II-8) illustre le bloc utilisé pour la simulation sous Matlab/Simulink :



**Figure (II-8) : Bloc de simulation Matlab/simulink.**

### II.6.1. Influence de la température sur les caractéristiques électriques

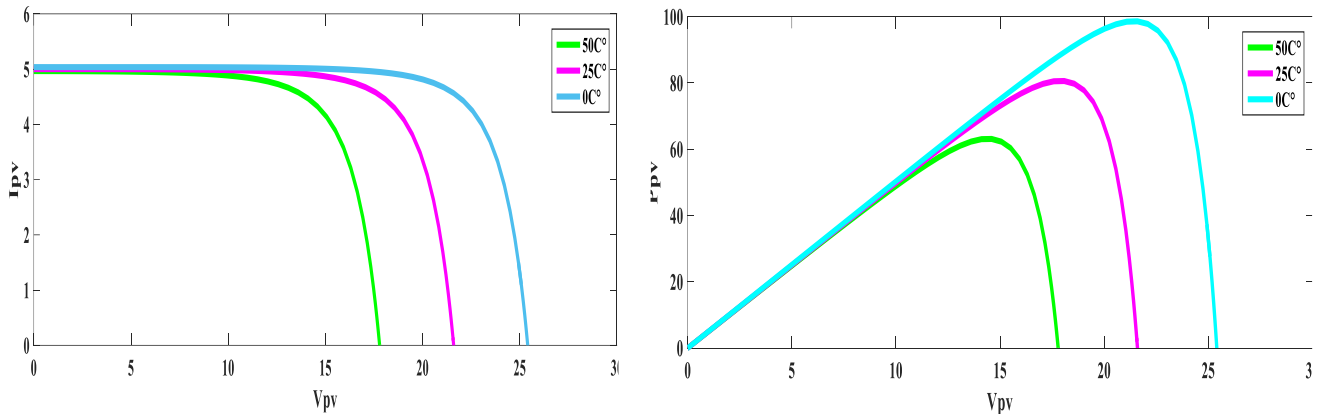


Figure (II-9) : Influence de la température sur la caractéristique  $I_{pv}=f(V_{pv})$  et  $P_{pv}=f(V_{pv})$ .

Chaque courbe montre la réponse d'un module photovoltaïque (PV) à une température spécifique : 0°C, 25°C, et 50°C. Le point où la puissance atteint son maximum est appelé le point de puissance maximale (MPP). Un tracker de point de puissance maximale (MPPT) est utilisé pour maintenir le module à ce point et maximiser la puissance extraite. Cependant, la puissance maximale diminue avec l'augmentation de la température, en raison de la baisse de la tension à vide ( $V_{oc}$ ) et du courant de court-circuit ( $I_{sc}$ ). Ces graphiques soulignent l'importance de la température sur les performances des modules PV, car une température plus élevée réduit leur efficacité.

### II.6.2. Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques électriques

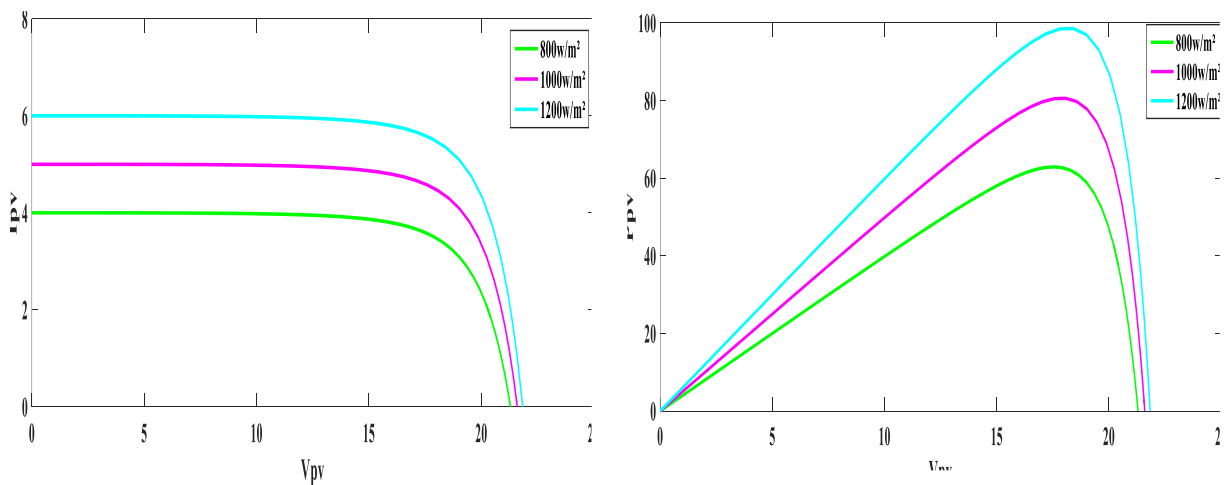
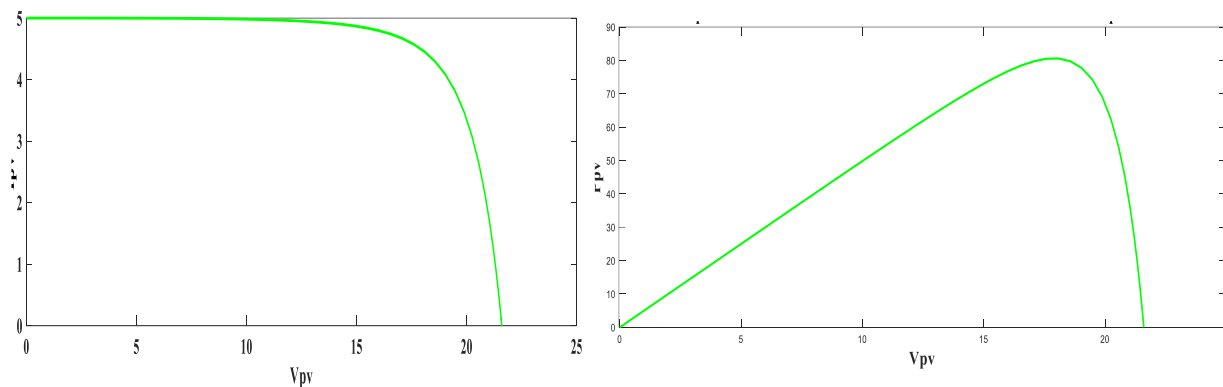


Figure (II-10) : Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques électriques  $I_{pv}=f(V_{pv})$  et  $P_{pv}=f(V_{pv})$ .

Chaque courbe illustre la réponse d'un module photovoltaïque (PV) à une intensité lumineuse spécifique : 400 W/m<sup>2</sup>, 600 W/m<sup>2</sup>, 800 W/m<sup>2</sup>, et 1000 W/m<sup>2</sup>. Le premier graphique (I-V) montre que le courant de court-circuit (I<sub>sc</sub>) augmente avec l'intensité lumineuse, car une lumière plus intense permet de produire plus de courant. Le deuxième graphique (P-V) révèle que le point de puissance maximale (MPP) se déplace vers des tensions et des puissances plus élevées à mesure que l'intensité de la lumière augmente, ce qui signifie que le module PV peut générer plus de puissance sous une lumière plus intense. Ces graphiques démontrent l'importance de l'intensité lumineuse sur les performances des modules PV : une lumière plus intense augmente le courant et la puissance produits, améliorant ainsi l'efficacité globale du système photovoltaïque.

### II.6.3. Caractéristique courant et puissance en fonction de la tension

La figure suivante représente Caractéristique courant et puissance en fonction de la tension sous les conditions stc



**Figure (II-11) :** Caractéristique courant et puissance en fonction de la tension.

On observe un point où le courant commence à chuter rapidement à mesure que la tension augmente, appelé point de puissance maximale (MPP). Ce point représente le produit maximal de la tension et du courant, où la puissance est maximale. Un dispositif appelé "tracker de point de puissance maximale" (MPPT) est souvent utilisé pour maintenir le module photovoltaïque (PV) à ce point afin d'extraire le maximum de puissance possible. Les points clés à noter sur cette courbe sont le courant de court-circuit (I<sub>sc</sub>), qui est le courant maximal produit par le module à une tension de 0V, et la tension à circuit ouvert (V<sub>oc</sub>), qui est la tension maximale produite sans courant circulant. La forme de la courbe I-V illustre le comportement du module PV sous différentes charges et conditions de luminosité. Pour une analyse détaillée, il est nécessaire de connaître les conditions spécifiques de la simulation, telles que la température et l'intensité de la lumière, ainsi que les paramètres du module PV utilisé.

## II.7. Caractérisation électrique d'un module PV avec la méthode voltampère métrique

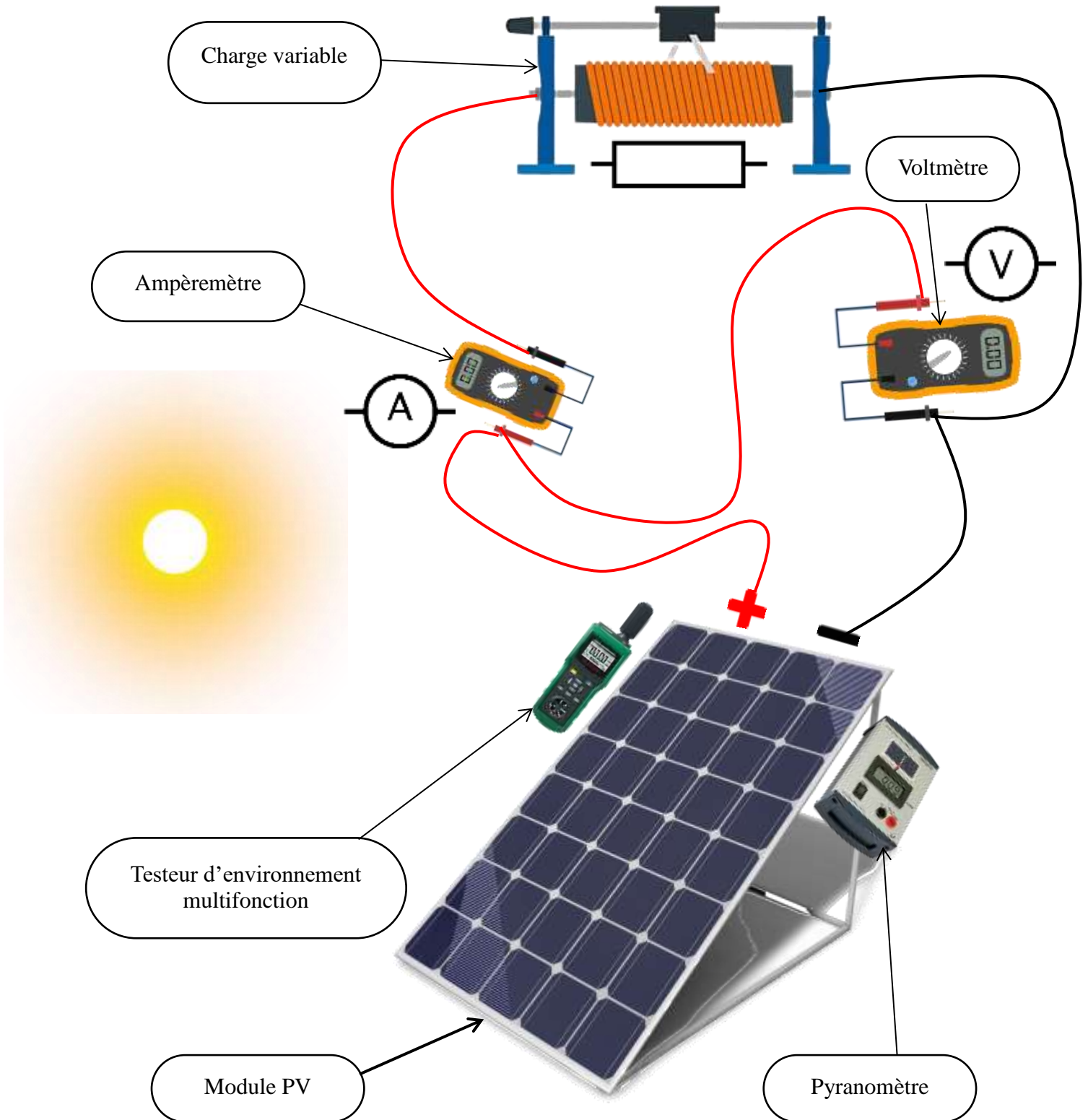


Figure (II-12) : Schéma représentatif de la méthode voltampère métrique.

La caractérisation électrique d'un module photovoltaïque (PV) avec la méthode voltampère métrique consiste à évaluer les performances électriques du module en mesurant les relations entre la tension (volt) et le courant (ampère) sous différentes conditions de fonctionnement. Voici un aperçu des principaux aspects de cette méthode :

### Mesure de la Courbe I-V (Courant-Tension) :

**Courant de Court-Circuit ( $I_{sc}$ )** : Le courant qui circule lorsque les bornes du module sont court-circuitées (tension nulle).

**Tension en Circuit Ouvert ( $V_{oc}$ )** : La tension aux bornes du module lorsque le circuit est ouvert (courant nul).

**Point de Puissance Maximale (MPP)** : Le point où le produit de la tension et du courant est maximal, indiquant l'efficacité optimale du module.

### Paramètres Importants :

**Facteur de Remplissage (FF)** : Indique la qualité du module, calculé comme le rapport entre la puissance réelle au MPP et le produit de  $V_{oc}$  et  $I_{sc}$ .

**Efficacité de Conversion** : Le pourcentage de la lumière solaire convertie en énergie électrique par le module.

### Conditions de Mesure :

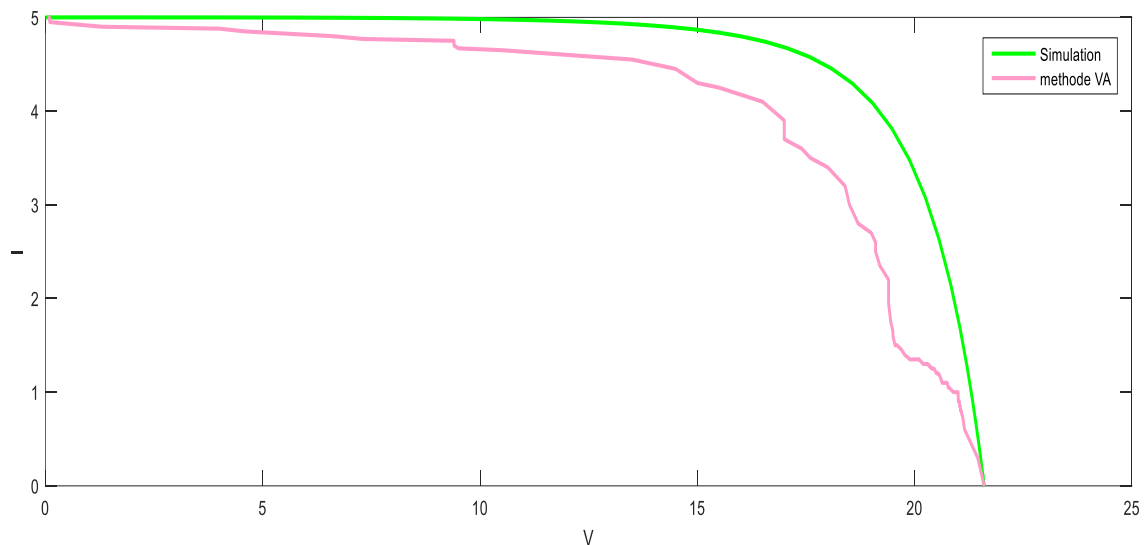
Les mesures sont prises sous différentes conditions d'irradiation et de température pour simuler diverses situations réelles.

### Outils Utilisés :

- Panneau photovoltaïque : Modèle Suntech STP080S-12/Bp.
- Testeur d'environnement multifonctions : Modèle MASTECH MS6300, Pour mesurer la température à l'instant précis en degrés Celsius °C.
- Pyranomètre : Modèle Frederiksen 4890.20, Pour mesurer l'ensoleillement à l'instant précis.
- Charge variable (Résistance) : Modèles PHYWE 06112.01, Pour appliquer différentes charges au module et mesurer la réponse en tension et en courant.
- Ampèremètre : Pour mesurer le courant de court-circuit ( $I_{sc}$ ) connecté en série avec le module PV.

- Voltmètre : Pour mesurer la tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) connecté en parallèle avec le module PV.
- Câbles : Pour relier les différents outils utilisés et réaliser le montage.
- **Logiciels de Simulation** : Matlab/Simulink pour modéliser et analyser les caractéristiques électriques du module.

### II.7.1. Résultats expérimentaux obtenus Simulation/Méthode volt ampèremètre



**Figure (II-13) :** Comparaison entre la courbe de simulation (en vert) et la courbe obtenue par la méthode volt ampèremètre (en rose) pour un panneau solaire.

Ce graphique présente une comparaison entre la courbe de simulation (en vert) et la courbe obtenue par la méthode volt ampèremètre (en rose) pour un panneau solaire.

Interprétation et commentaires :

#### **Courbe de Simulation (Vert) :**

- La courbe de simulation représente la réponse théorique idéale du panneau solaire.
- On observe que la tension reste relativement stable à haute valeur pour des courants faibles jusqu'à ce qu'elle chute abruptement au-delà d'un certain point de courant. Cela indique le comportement typique attendu d'un panneau solaire où la tension chute lorsque le courant atteint un seuil critique.

#### **Courbe de la Méthode Volt ampèremètre (Rose) :**

- La courbe expérimentale obtenue par la méthode de volt ampèremètre montre des valeurs de tension inférieures à celles de la courbe de simulation pour des valeurs de courant similaires.
- Cette courbe présente également des fluctuations et une instabilité apparente, notamment pour des valeurs de courant plus élevées. Cela peut être dû à des pertes de performance dans le panneau solaire réel, des variations dans les conditions de mesure, ou des facteurs non pris en compte dans le modèle de simulation.

On conclut :

La comparaison entre les deux courbes met en évidence les écarts entre la performance théorique idéale et la performance réelle d'un panneau solaire. La courbe de volt ampèremètre, qui est inférieure à la courbe de simulation, illustre les pertes de performance dues à des facteurs tels que les imperfections matérielles, les conditions environnementales, et d'autres inefficacités dans le système réel. Cette analyse souligne l'importance de prendre en compte les limitations pratiques lors de l'évaluation des performances des panneaux solaires, en complément des modèles théoriques.

### II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation des panneaux photovoltaïques, en nous concentrant sur leurs modèles électriques, les équations mathématiques et les paramètres associés. Nous avons particulièrement examiné les caractéristiques du panneau photovoltaïque Suntech STP080S-12/Bp et utilisé MATLAB Simulink pour simuler son comportement. Nous avons interprété les graphes obtenus et caractérisé la méthode volt ampèremètre, comparant les résultats expérimentaux obtenus à l'état sain du module PV avec ceux de la simulation. Les comparaisons ont permis de valider l'efficacité de la méthode volt ampèremètre et de confirmer la précision des modèles simulés, démontrant ainsi la fiabilité des simulations pour prédire les performances réelles des modules photovoltaïques.



# CHAPITRE III

## Défaillances des Panneaux Photovoltaïques



### III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons explorer les principaux défauts qui peuvent survenir dans un système photovoltaïque. Notre étude se concentre particulièrement sur les défauts affectant la puissance électrique du module photovoltaïque, avec une attention spéciale portée aux défauts d'ombrage et salissure. Nous analyserons l'impact des défauts d'ombrage et salissure sur les caractéristiques électriques  $I_{pv}(V_{pv})$  et  $P_{pv}(V_{pv})$ , ainsi que les résultats obtenus lors de la caractérisation de ces défauts à l'aide de la méthode VA sous Matlab/Simulink.

### III.2. Les défaillances des panneaux photovoltaïques :

Les défaillances des panneaux photovoltaïques (PV) constituent un enjeu majeur dans le secteur des énergies renouvelables. La fiabilité et la durabilité de ces panneaux sont essentielles pour garantir une production d'énergie stable et rentable. Divers facteurs, allant des défauts de fabrication aux conditions environnementales extrêmes, peuvent causer ces défaillances.

### III.3. Généralités sur les types de défaillances des panneaux PV :

#### III.3.1. Défaillances liées à la fabrication :

- **Microfissures** : Invisibles à l'œil nu, se forment lors de la production des cellules solaires et s'agrandissent sous l'effet des contraintes thermiques et mécaniques, réduisant l'efficacité et l'intégrité des panneaux solaires.

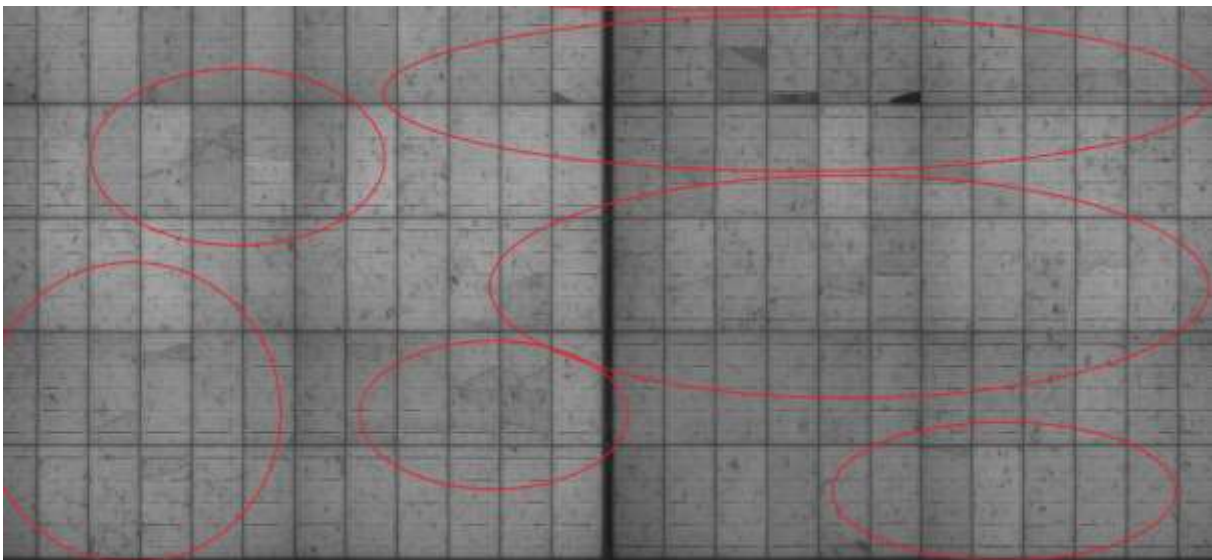


Figure (III-1) : Image EL microfissure d'un panneau PV.

- **Défauts de soudure** : Les défauts de soudure augmentent la résistance électrique des panneaux solaires, réduisant leur rendement et pouvant endommager les composants

internes, dus à de mauvaises techniques, des matériaux de qualité inférieure ou des conditions environnementales défavorables.

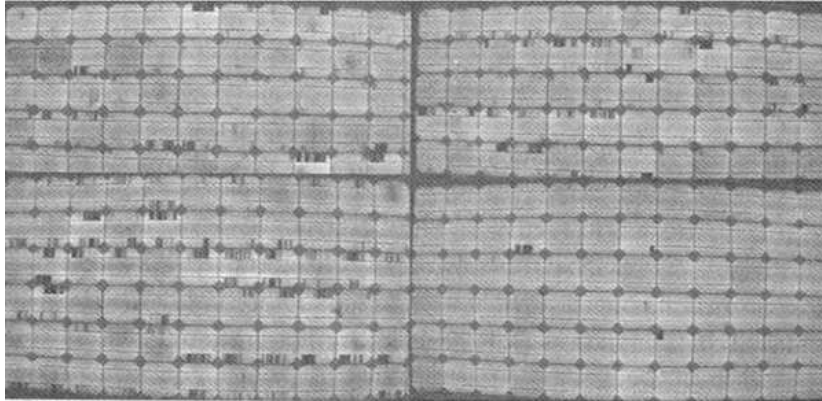


Figure (III-2) : Image EL du défaut de soudage du module PV.

- **Défauts de l'encapsulation** : Les défauts d'encapsulation des panneaux solaires permettent l'infiltration d'humidité, corrodant les composants internes et dégradant les cellules, réduisant ainsi la performance et la durée de vie du panneau.



Figure (III-3) : Illustre le résultat lorsqu'une cellule en silicium s'oxyde.

- **Délaminage** : Le délaminage des panneaux solaires, causé par une adhésion insuffisante ou des conditions climatiques extrêmes, réduit leur performance et durabilité, et peut rapidement mener à une défaillance complète.



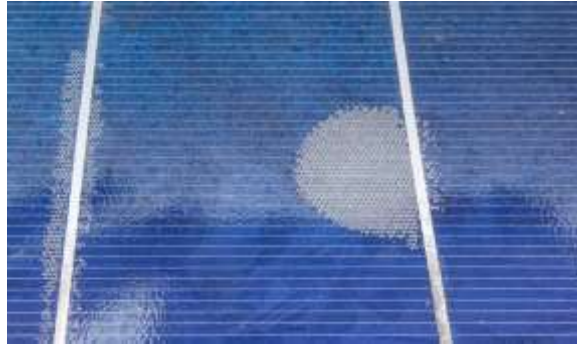


Figure (III-4) : Effet de délaminage de l'EVA (Ethylène Vinyl Acétate).

### III.3.2. Défaillances électroniques et de système :

- **Défaillance des onduleurs** : Les onduleurs convertissant le courant continu des panneaux solaires en courant alternatif peuvent défaillir à cause de problèmes électroniques, surtensions ou surchauffes, entraînant des pertes d'énergie, des interruptions de service et des coûts de maintenance accrus.



Figure (III-5) : Onduleur d'un panneau photovoltaïque.

- **Défaillance des boîtes de jonction** : Les boîtes de jonction des installations photovoltaïques, vulnérables aux erreurs de montage, corrosion et infiltration d'eau, peuvent causer des courts-circuits et pertes d'énergie, réduisant l'efficacité de transmission solaire.



Figure (III-6) : Défaillance de boîte a jonction et endommageassions des panneaux PV.

- **Défaillance des câbles et connecteurs** : La défaillance des câbles et connecteurs photovoltaïques, causée par l'usure, les mouvements ou les dommages, augmente la résistance et les pertes d'énergie, présentant aussi des risques d'incendie.



Figure (III-7) : Câbles endommagés.

### III.3.3. Défaillances liées à l'installation :

- **Mauvais raccordements électriques** : Les mauvais raccordements électriques dans les systèmes photovoltaïques augmentent la résistance, provoquant courts-circuits, pertes d'énergie, surchauffe et risques d'incendie, réduisant l'efficacité globale du système.



Figure (III-8) : Module PV prend feu.

- **Orientation et inclinaison incorrectes** : Une mauvaise orientation et inclinaison des panneaux solaires réduisent leur production d'énergie et prolongent le retour sur investissement. Ils doivent être orientés vers le sud dans l'hémisphère nord et vers le nord dans l'hémisphère sud, avec une inclinaison ajustée selon la latitude locale.

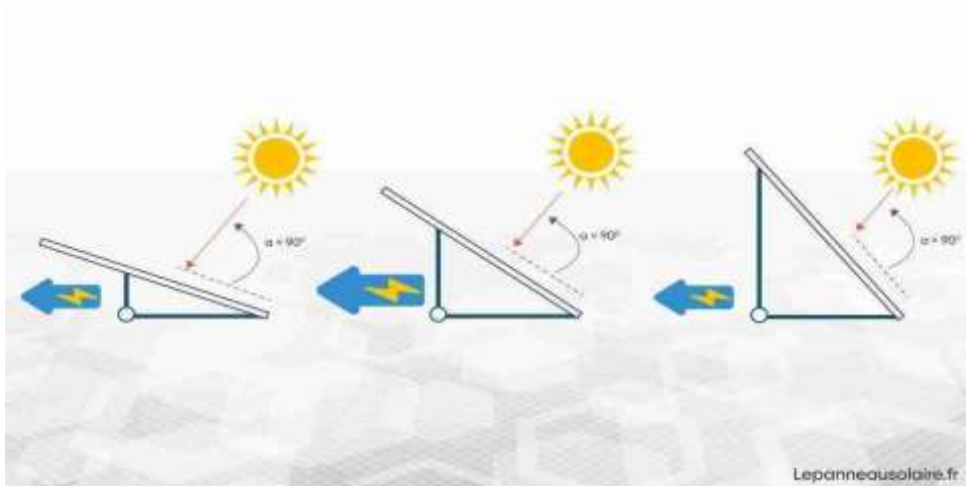


Figure (III-9) : Différentes inclinaison d'un module PV.

- **Ombres sur les panneaux :** Les ombres partielles sur les panneaux solaires causent des "hot spots" qui endommagent les cellules et réduisent leur efficacité, risquant une défaillance anticipée du panneau.



Figure (III-10) : Ombre d'arbre sur un panneau solaire.

### III.3.4. Défaillances dues aux conditions environnementales :

- **Températures extrêmes** : Les températures extrêmes réduisent l'efficacité des panneaux solaires : la chaleur diminue la conversion d'énergie et le froid réduit la conductivité, tandis que les cycles thermiques provoquent des microfissures.



Figure (III-11) : Caméra thermique spécialisée, qui met en évidence les disparités de température entre les différentes cellules.

- **Humidité et infiltration d'eau** : L'humidité excessive et l'infiltration d'eau corrodent les composants des panneaux solaires et dégradent les matériaux d'encapsulation, entraînant des dysfonctionnements électriques, une baisse d'efficacité, et un vieillissement accéléré des matériaux.



Figure (III-12) : Infiltration de l'humidité à l'intérieur des panneau PV.

- **Tempêtes et grêle** : Les conditions météorologiques extrêmes, comme les tempêtes et la grêle, peuvent endommager les panneaux solaires en fissurant le verre protecteur et en arrachant les panneaux de leurs montures, réduisant ainsi leur efficacité et exposant les composants internes.

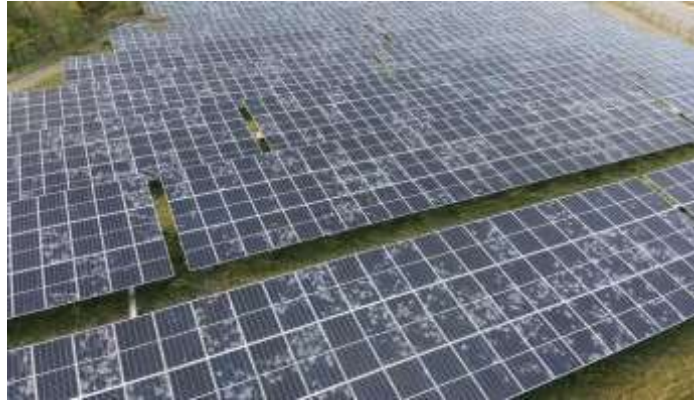


Figure (III-13) : Impacte de de grêle qui a endommagé un site des panneaux PV.

- **Pollution et saleté :** L'accumulation de poussière, de sable, de pollens ou de débris sur les panneaux solaires réduit leur efficacité en bloquant la lumière solaire essentielle à la production d'électricité, particulièrement dans les zones arides et agricoles.



Figure (III-14) : poussière du dessert sur des panneau PV.

**III.3.5. Dégradation induite par la lumière (LID) :** Affecte les panneaux solaires en silicium monocristallin lors de leur exposition initiale, réduisant l'efficacité de conversion de 1 à 3 % dans les premiers mois. Bien que stabilisée par la suite, la LID impacte durablement le rendement énergétique des installations photovoltaïques.

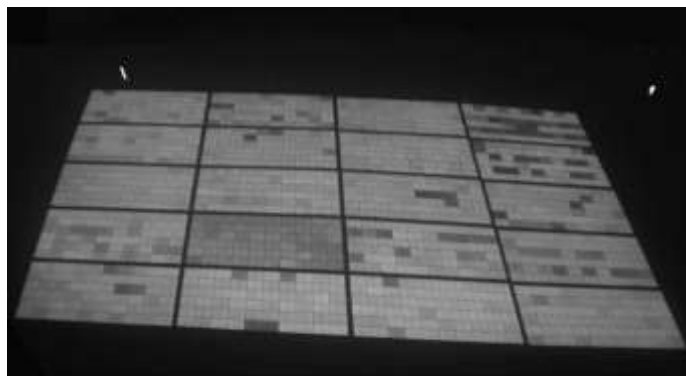


Figure (III-15) : Image EL d'une installation de modules mono PERC un mois après le début de l'exploitation : les points noirs répartis tout au long de l'installation sont probablement causés par le LID.



### III.3.6. Dégradation induite par la température (PID) :

Réduit le rendement des panneaux solaires sous des conditions chaudes et humides, provoquant une migration ionique qui endommage les cellules et entraîne des pertes de puissance significatives et irréversibles. Cela affecte sévèrement la performance des installations photovoltaïques.

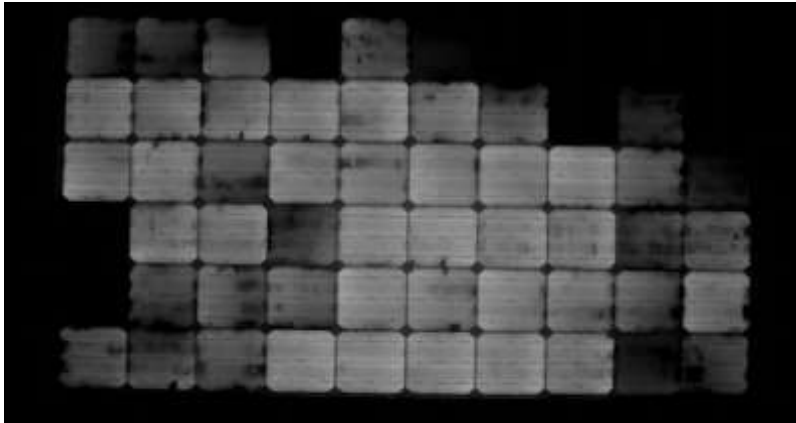


Figure (III-16) : l'Effet de Dégradation Potentielle Induite (PID).

### III.3.7. Défaillances liées à l'âge et à l'usure :

- **Vieillessement des matériaux :** Influencé par les conditions environnementales et la qualité des matériaux, altère leur performance progressive. L'encapsulation, telle que l'EVA, se détériore sous l'impact des UV et des cycles thermiques, affectant les cellules photovoltaïques par dégradation des jonctions P-N, tandis que les cadres métalliques se corrodent, réduisant la durabilité et l'efficacité globale des systèmes solaires.



Figure (III-17) : Décoloration des panneaux PV.

### III.4. Les types de défaillance utilisées dans les essais expérimentaux :

Dans le cadre de nos recherches sur les performances des panneaux photovoltaïques, nous avons entrepris une série d'essais expérimentaux utilisant la méthode volt ampèremètre avec l'application des différents types de défaillance :

#### L'ombrage :

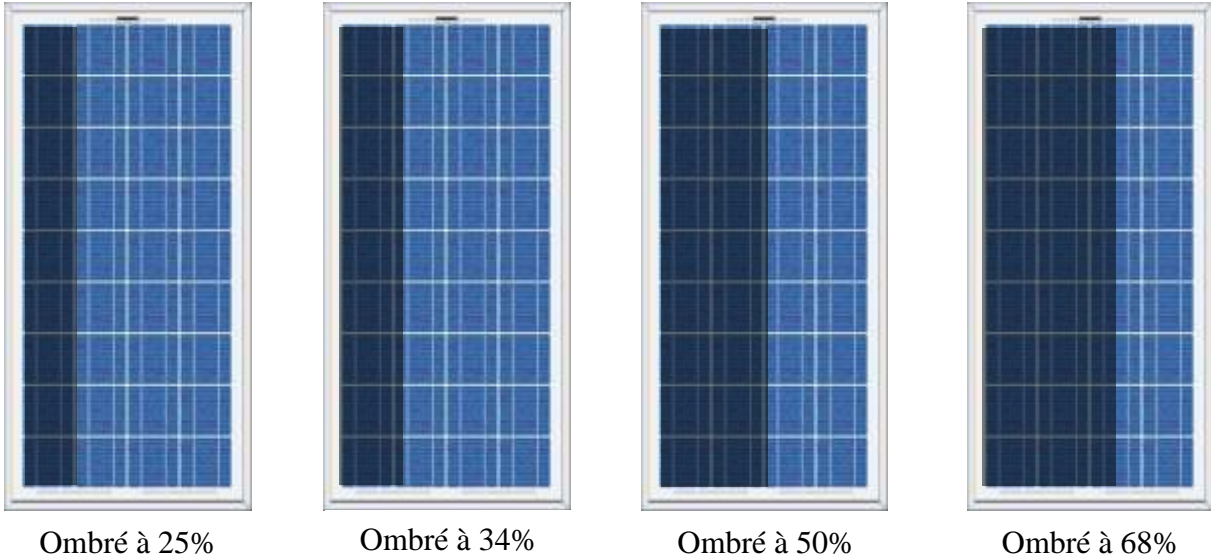


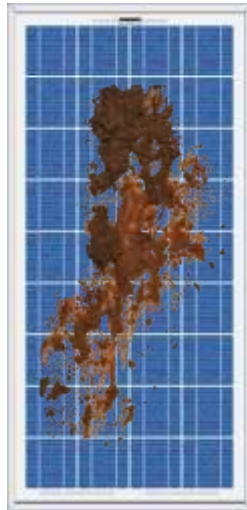
Figure (III-18) : les différents ombrages appliqués sur le module PV.

#### Les feuilles d'arbres :



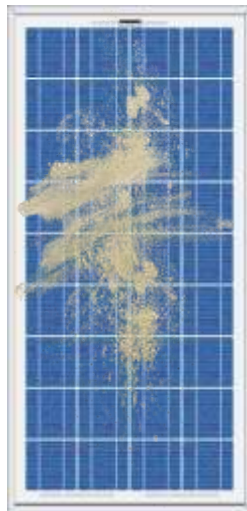
Figure (III-19) : Application de feuilles d'arbres sur le panneau PV.

**La terre (la boue) :**



**Figure (III-20) :** application de la boue sur un module PV.

**Le sable :**



**Figure (III-21) :** Application du sable sur un module PV.

### Chapitre III : Défaillances des panneaux photovoltaïques

Ces essais visaient à analyser l'impact de différents types de défaillances sur un panneau photovoltaïque et étudier sa caractéristique. Concrètement, nous avons appliqué des ombrages de 25%, 50%, 68% et des feuilles d'arbres, de la terre (la boue), et du sable sur le panneau et avons relevé plusieurs paramètres clés : le courant de court-circuit ( $I_{sc}$ ), la tension à circuit ouvert ( $V_{co}$ ), la température et l'ensoleillement. Parallèlement, nous avons fait varier la charge appliquée au panneau pour observer les variations de ces paramètres en fonction de la charge.

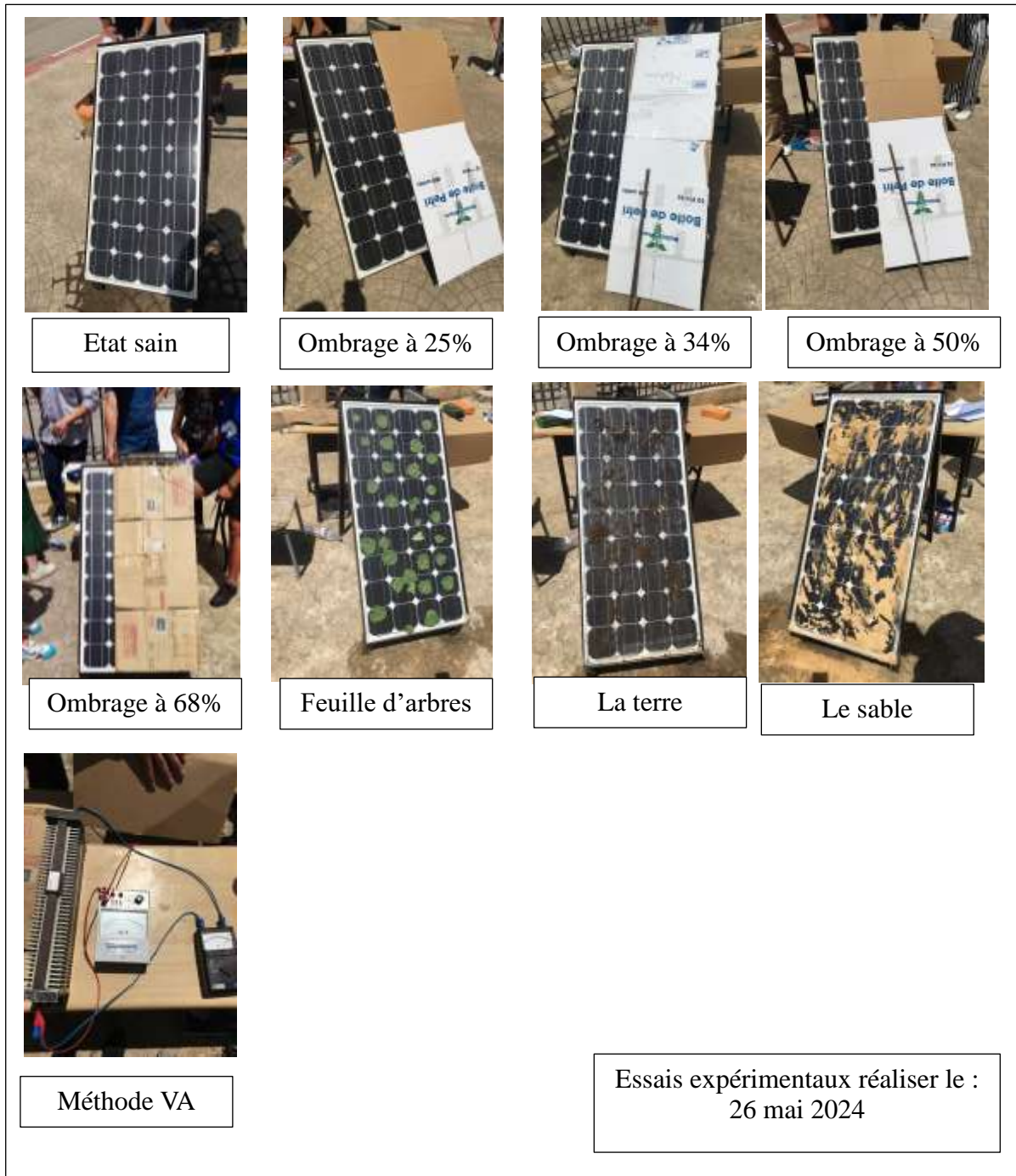


Figure (III-22) : les différentes images prises lors des essais expérimentaux sur un module PV.

### III.5. Bloc Simulink/Matlab pour ombrage :

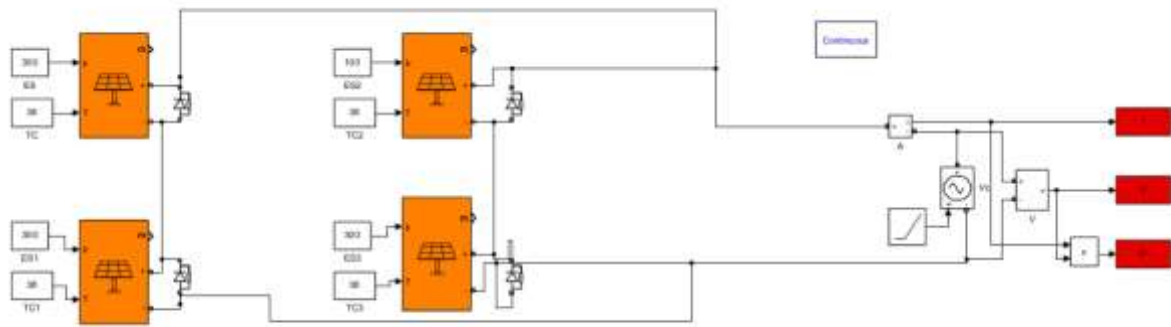


Figure (III-23) : Bloc Simulink/Matlab pour ombrage.

### III.5.1. Interprétations des résultats obtenus par les essais expérimentaux :

#### Ombrage à 25% :

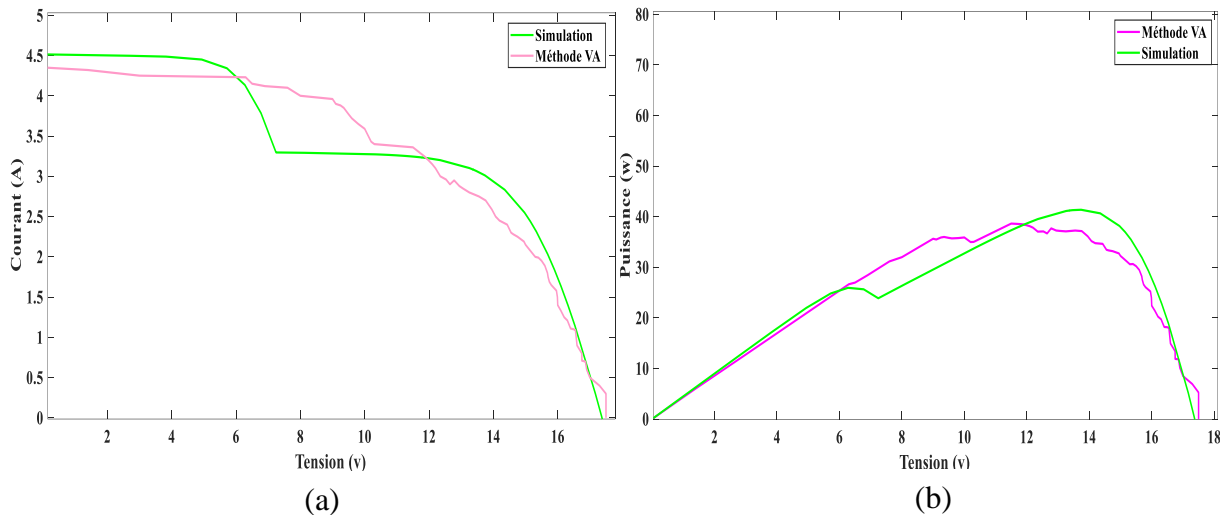


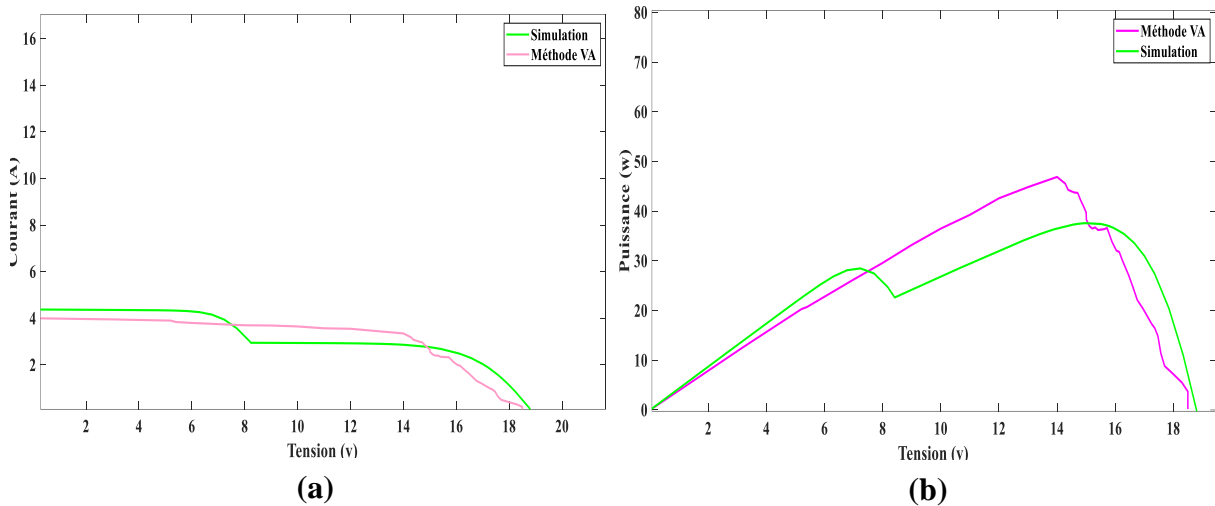
Figure (III-24) : Résultats des comparaisons entre la Simulation et la méthode VA pour un module ombré à 25%.

#### Figure (III-24.a) : Courant en fonction de la tension :

Dans cette figure, l'ombrage à 25% a un effet notable sur le courant produit par le panneau PV. Les courbes de la "simulation" et de la "méthode VA" montrent une diminution constante du courant à mesure que la tension augmente, avec une chute notable. Cela pourrait être le résultat d'une transition dans la configuration des cellules du panneau PV à cause de l'ombrage, qui rend une partie du panneau moins efficace à partir de cette tension.

#### Figure (III-24.b) : Puissance en fonction de la tension :

Correspondant aux observations de la figure (III-24.a), les courbes de la puissance en fonction de la tension pour la simulation et la méthode VA montrent une augmentation progressive jusqu'à un point de performance maximale (MPP). Après ce point, la puissance diminue, ce qui est conforme à la chute de courant observée dans la figure (III-24.a) pour ces tensions élevées. **Ombrages à 34% :**



**Figure (III-25) :** Résultats des comparaisons entre la Simulation et la méthode VA pour un module ombré à 34%.

#### **Figure (III-25.a) : Courant en fonction de la tension :**

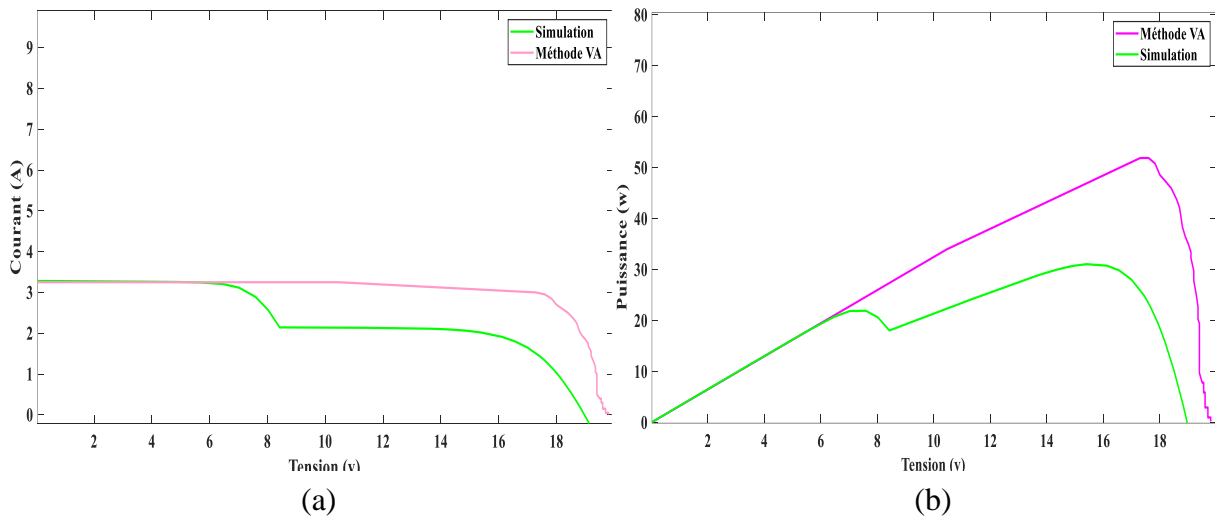
Dans cette figure, l'ombrage à 34% semble influencer le courant produit par le panneau PV. Les courbes de la "simulation" et de la "méthode VA" montrent une tendance similaire où le courant reste relativement stable. Après un point, le courant commence à chuter, signifiant qu'une partie du panneau PV a réduit sa capacité de production du courant en raison de l'ombrage.

#### **Figure (III-25.b) : Puissance en fonction de la tension :**

Les courbes de puissance en fonction de la tension pour la simulation et la méthode VA montrent une augmentation progressive jusqu'à un point de performance maximale (MPP). Après ce point, la puissance décline, conformément à la figure (III-25.a). La puissance maximale observée se situe entre 40 et 50 watts, ce qui représente la performance optimale du panneau sous ces conditions.

Un ombrage de 34% affecte les performances du panneau PV, bien qu'il soit moins drastique par rapport à l'ombrage de 50% et plus que 25%.

### Ombrage à 50% :



**Figure (III-26) :** Résultats des comparaisons entre la Simulation et la méthode VA pour un module ombré à 50%.

#### **Figure (III-26.a) : Courant en fonction de la tension :**

L'ombfrage à 50% a clairement un effet plus marqué sur le courant produit par le panneau PV. Les courbes de la "simulation" et de la "méthode VA" montrent que le courant reste relativement constant jusqu'à une tension de 17,8V. À ce stade, le courant chute nettement, indiquant que la moitié du panneau PV ne produit pas de courant à cette tension. Cette situation pourrait être causée par une transition entre différentes configurations de cellules dans le panneau PV en réponse à l'ombfrage.

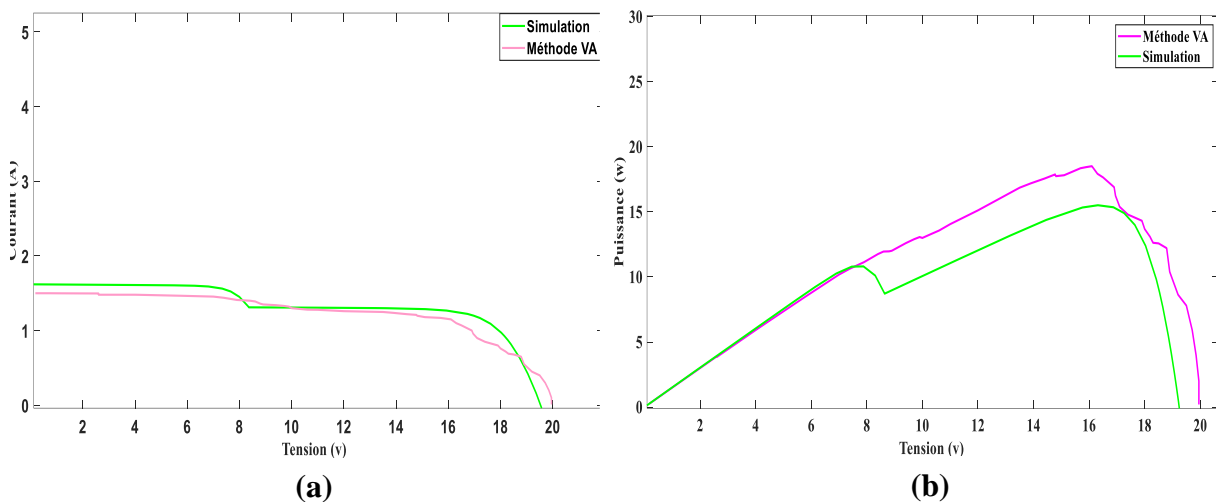
#### **Figure (III-26.b) : Puissance en fonction de la tension :**

Conformément à ce que nous avons observé dans la figure (III-26.a), les courbes de la puissance en fonction de la tension pour la simulation et la méthode VA montrent des croissances progressives jusqu'à ce qu'un pic soit atteint. Après ce point, la puissance chute drastiquement. Cette baisse de la puissance coïncide avec la chute du courant observée dans la figure (III-26.a).

Comparé à l'ombfrage de 25% et en l'absence d'ombfrage, les effets de l'ombfrage à 50% sont beaucoup plus importants. La production d'énergie du panneau PV est considérablement réduite, ce qui souligne l'importance de minimiser l'ombfrage sur les panneaux PV.



### Ombfrage à 68% :



**Figure (III-27) :** Résultats des comparaisons entre la Simulation et la méthode VA pour un module ombré à 68%.

#### **Figure (III-27.a) : Courant en fonction de la tension :**

Il est clair que les effets de l'ombfrage à 68% sur le panneau PV sont plus prononcés. Les courbes de simulation et de la méthode VA montrent un courant quasi constant, puis une chute drastique du courant. Cela peut suggérer l'apparition d'une zone à fort ombfrage dans le panneau où les cellules sont moins actives, d'où une chute du courant.

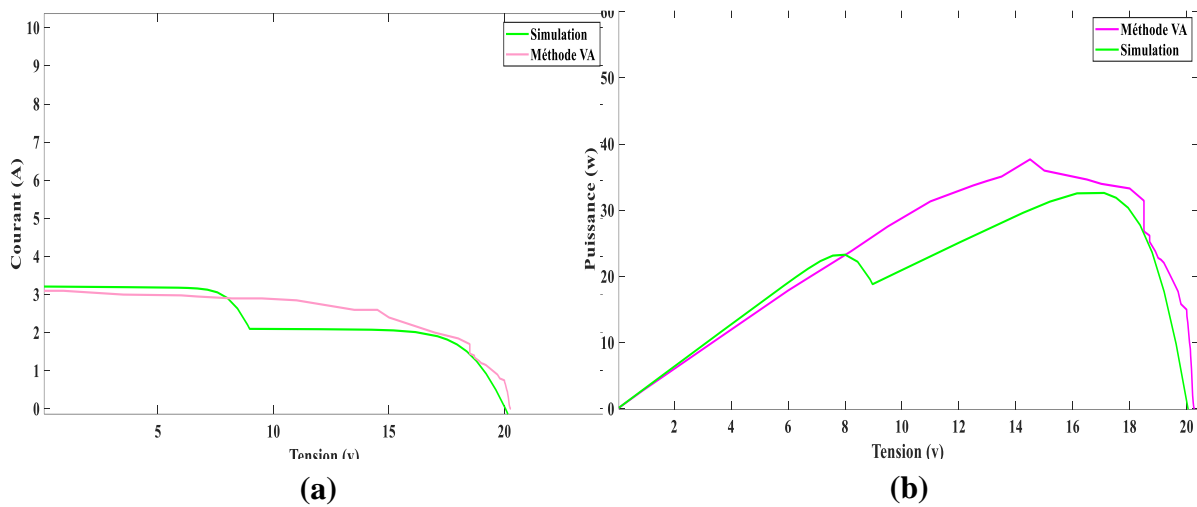
#### **Figure (III-27.b) : Puissance en fonction de la tension :**

Les courbes de la puissance en fonction de la tension pour la simulation et la méthode VA montrent également des augmentations progressives jusqu'à atteindre un pic, et décroissent ensuite avec l'augmentation de la tension. Le pic de puissance est atteint, puis la puissance chute significativement, correspondant à la chute de courant observée dans la figure (III-27.a).

Comparé aux graphiques d'ombfrage à 25% et 50%, l'effet de l'ombfrage à 68% est plus sévère, ce qui conduit à une réduction plus significative de la production d'énergie du panneau PV.



### Application Feuilles d'arbres :



**Figure (III-28) :** Résultats des comparaisons entre la Simulation et la méthode VA pour un module couvert avec des feuilles.

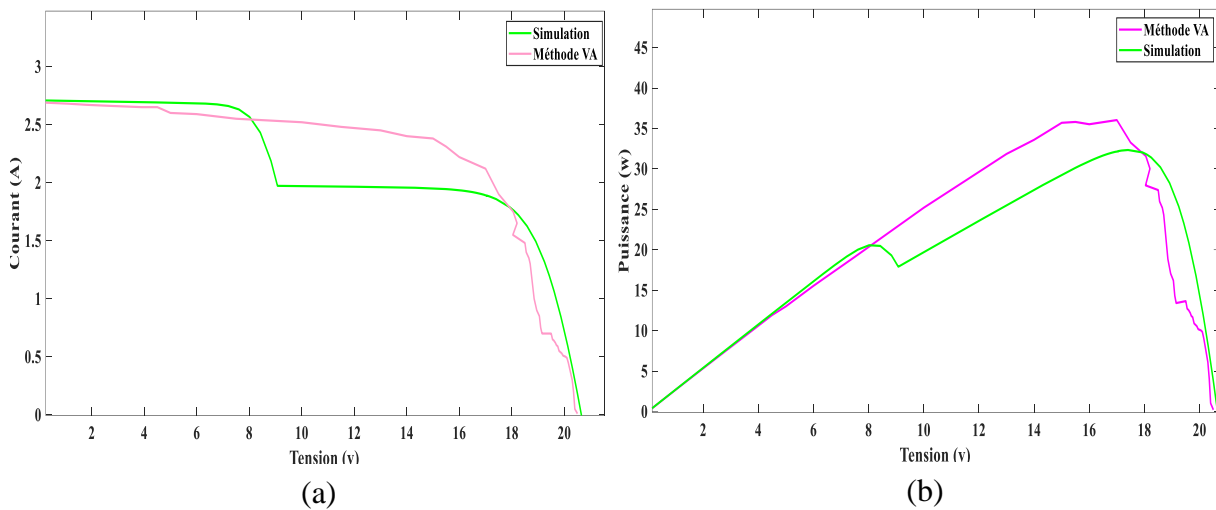
#### **Figure (III-28.a) : Courant en fonction de la tension :**

Cette figure montre l'ombrage dû aux feuilles d'arbre affectant le courant produit par le panneau PV. Les courbes de la "simulation" et de la "méthode VA" montrent que jusqu'à une tension le niveau de courant reste relativement stable. Passé ce seuil, le courant chute progressivement. Il est possible que les feuilles bloquent la lumière jusqu'à un certain niveau de tension à partir duquel le courant ne peut pas être généré efficacement, ce qui expliquerait cette chute.

#### **Figure (III-28.b) : Puissance en fonction de la tension :**

Cette figure montre que malgré l'ombrage dû aux feuilles d'arbres, le panneau PV peut encore produire une quantité décente de puissance, surtout à des tensions plus faibles. Comme pour la figure (III-28.a), les courbes de la "simulation" et de la "méthode VA" montrent une augmentation de la puissance jusqu'à une tension optimale. Après cette tension optimale, la production de puissance se stabilise puis commence à diminuer.

#### Salissure avec de La boue (la terre) :



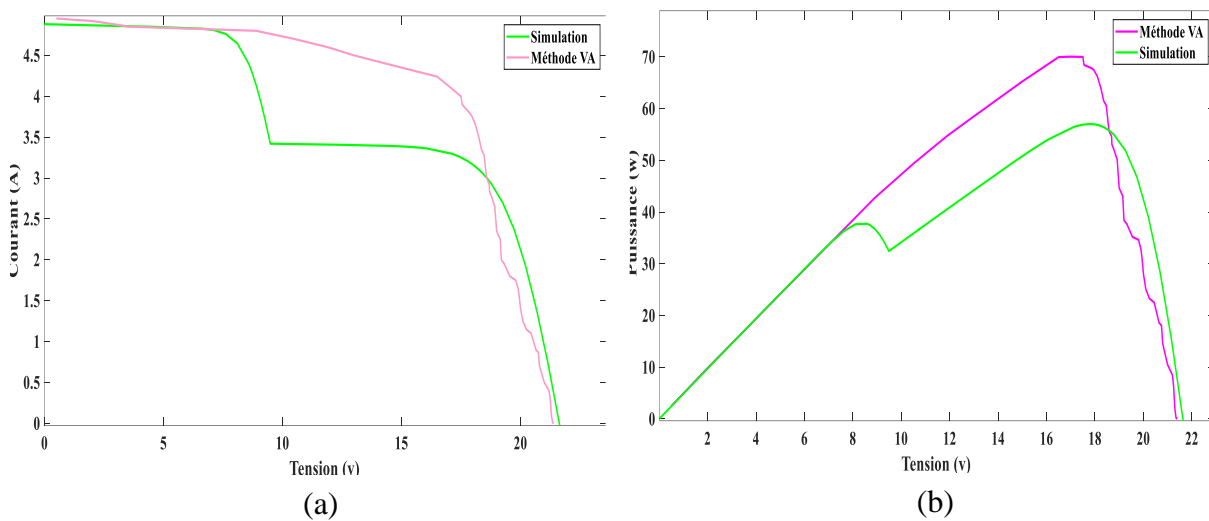
**Figure (III-29.a) :** Résultats des comparaisons entre la Simulation et la méthode VA pour un module couvert avec de la boue (la terre).

La figure (III-29.a) démontre que la présence de boue affecte le courant produit par le panneau PV. Les courbes "Simulation" et "Méthode VA" suggèrent qu'au fur et à mesure que la tension augmente, le courant diminue progressivement en présence de boue, ce qui est probablement dû à une réduction de la quantité de lumière atteignant le panneau.

#### **Figure (III-29.b) : Puissance en fonction de la Tension :**

De même, l'effet de la boue est visible dans la production d'énergie du panneau PV. Au fur et à mesure que la tension augmente à un certain point, la production de puissance atteint un pic puis commence à diminuer. Cela pourrait indiquer que la boue, en bloquant la lumière, réduit l'efficacité à laquelle le panneau photovoltaïque peut convertir l'énergie solaire en électricité.

### Salissure avec sable :



**Figure (III-30) :** Résultats des comparaisons entre la Simulation et la méthode VA pour un module couvert avec du sable.

#### **Figure (III-30.a): Courant en fonction de la tension :**

On observe le point de fonctionnement, c'est-à-dire le point où le produit du courant par la tension est maximal et où le panneau photovoltaïque délivre donc le maximum de puissance au circuit auquel il est connecté. On remarque que la présence du sable diminue le courant, ce qui entraîne une baisse de puissance et donc une diminution de l'efficacité du panneau.

#### **Figure (III-30.b): Puissance en fonction de la tension :**

On observe une baisse de la puissance maximale causée par l'accumulation de sable. Il s'agit là de la puissance à point de puissance maximale (MPP).

### **III.5.2. Interprétation de tous les essais**

Après avoir examiné les essais expérimentaux effectués sur le panneau photovoltaïque modèle STP080-12/Bb, il est clair que les différentes formes de défaillances, qu'il s'agisse d'ombrages divers (25%, 50%, 68%, 34%), de l'accumulation de feuilles d'arbres, de boue ou de sable, ont un impact significatif et généralement négatif sur la performance du panneau. Cela démontre l'importance cruciale de maintenir ces panneaux aussi propres et intacts que possible pour maximiser leur efficacité. En plus de cela, des moyens de protéger les panneaux contre ces facteurs environnementaux doivent être envisagés pour garantir une production d'énergie durable et efficace. Il est par conséquent recommandé que des mesures de gestion adéquates soient mises en place, et que des études plus approfondies soient menées pour minimiser l'impact de ces défaillances et accroître la durée de vie et la durabilité des panneaux photovoltaïques.

### III.5.3. Essais expérimentaux sur des panneaux PV pollués et sales

Dans le cadre de cette étude, nous avons réalisé des essais expérimentaux sur plusieurs modèles de panneaux photovoltaïques (PV) afin de mieux comprendre leur performance et leur comportement dans des conditions d'ensoleillement et de température variables, notamment à l'état défaillant (pollué). Les modèles étudiés comprennent le STP080-12/Bb de 80 watts, le SM110-24 de 110 watts, le NT-R5E3E de 175 watts, et le SF400M (9BB) (BF) de 400 watts. Pour mener ces essais, nous avons utilisé la méthode volt ampèremètre, permettant de varier la charge et de relever les courbes caractéristiques de chaque panneau. Plus précisément, nous avons mesuré le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) et la tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ) sous différentes conditions d'ensoleillement et de température. Les données obtenues ont ensuite été comparées aux graphes de simulation correspondants pour chaque modèle de panneau, afin de déterminer les écarts et d'analyser les performances réelles des panneaux photovoltaïques dans un environnement pollué.



**Figure (III-31) :** Modèles Suntech (STP080-12/Bb) de 80 watts pollués.



**Figure (III-32) :** Modèles Modèles Siemens (SM110-24) de 110 watts pollués.



Figure (III-33) : Modèles Sharp (NT-R5E3E) de 175 watts pollués.



Figure (III-34) : Modèles Peimar (SF400M (9BB) (BF)) de 400 watts pollués.

### III.5.4. Interprétation des résultats et analyse pour chaque panneau

#### Modèles Suntech (STP080-12/Bb) de 80 watts:

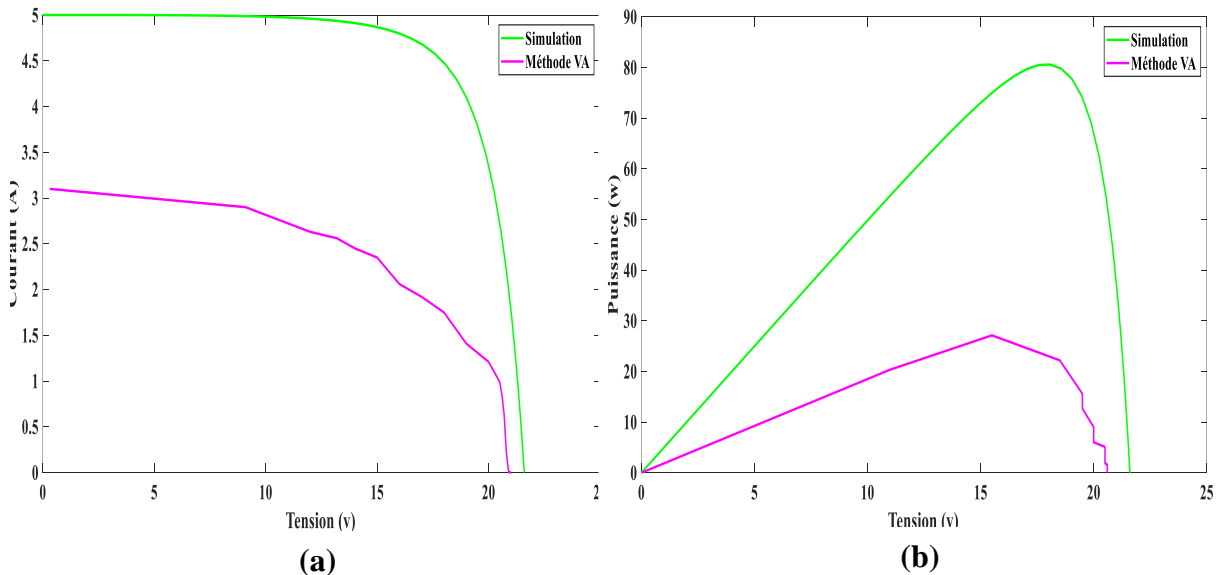


Figure (III-35) : Résultats des comparaisons entre la Simulation (sous STC) et la méthode VA en état pollué pour un module Modèles STP080-12/Bb de 80 watts.

**Courbe simulation (en vert) :** Représente la simulation Matlab sous les conditions STC ( $E_s=1000 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ ).

**Courbe méthode VA (en rose) :** Représente la méthode voltampèremètre en état pollué sous matlab.

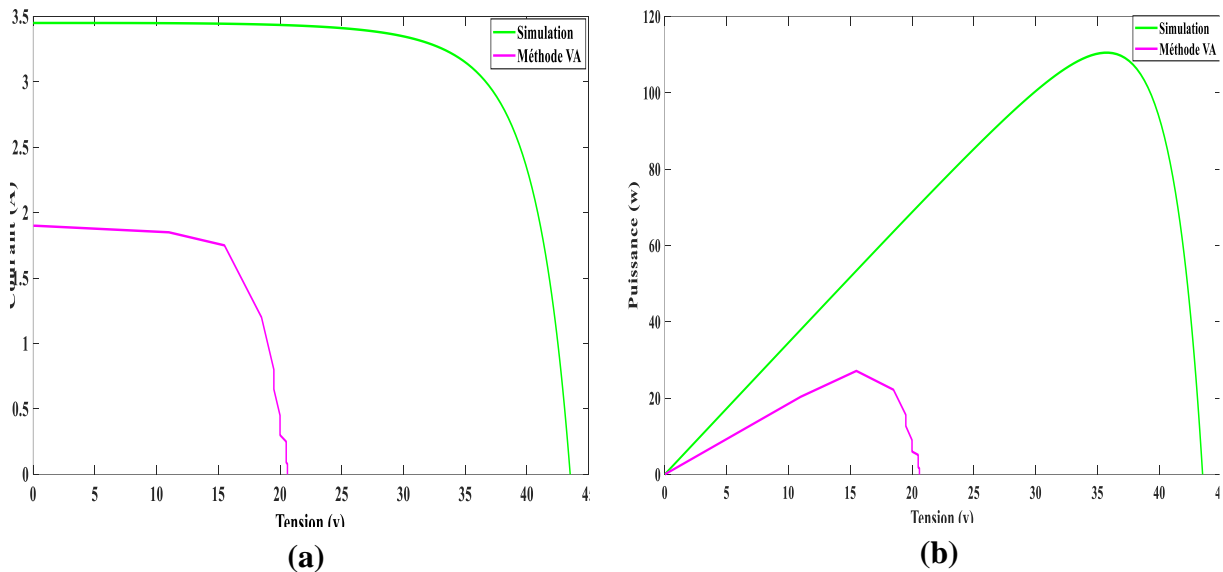
#### Figure (III-35.a) : Courant en fonction de la tension :

Elle représente la caractéristique courant-tension (I-V) du panneau photovoltaïque sale. On observe que le courant diminue progressivement avec l'augmentation de la tension. Dans ce contexte, la courbe Simulation (sous condition STC) est plus optimiste en termes de performances par rapport à la courbe obtenue par la "Méthode VA". Cela signifie que le panneau sale produit moins de courant que prévu en simulation à son état sain au condition STC.

#### Figure (III-35.b) : Puissance en fonction de la tension :

On observe ici les performances du panneau en termes de puissance en fonction de la tension. La courbe de la Méthode VA sous défaillance montre une production d'énergie bien moindre que celle prévue par la simulation sous condition STC, surtout autour de la tension maximale de puissance. La pollution et la saleté sur le panneau PV ont un impact significatif sur sa capacité à générer de l'énergie.

#### Modèles Siemens (SM110-24) de 110 watts :



**Figure (III-36) :** Résultats des comparaisons entre la Simulation (sous STC) et la méthode VA en état pollué pour un module Modèles SM110-24 de 110 watts pollués.

**Courbe simulation (en vert) :** Représente la simulation Matlab sous les conditions STC (ES=1000 W/m<sup>2</sup> et T= 25°C).

**Courbe méthode VA (en rose) :** Représente la méthode volt ampèremètre en état pollué sous Matlab.

#### Figure (III-36.a) : Courant en fonction de la tension :

La courbe de Simulation (sous STC) semble indiquer le comportement attendu dans des conditions idéales, tandis que la courbe obtenue par la Méthode VA pollué indique le comportement réel du panneau sous ses conditions actuelles de saleté et de pollution. Ce qui est notable, c'est que la performance réelle est significativement moindre que celle simulée, ce qui est probablement dû à l'effet de la saleté et de la pollution sur le panneau.

#### Figure (III-36.b) : Puissance en fonction de la tension :

Ce second graphique présente la relation entre la puissance et la tension pour le panneau photovoltaïque. La courbe de la Méthode VA sous défaillance montre une chute nette de la puissance dans la région de faible tension, ce qui affectées par les défauts, mettant en évidence la dégradation due à la pollution.

#### Modèles Sharp (NT-R5E3E) de 175 watts :

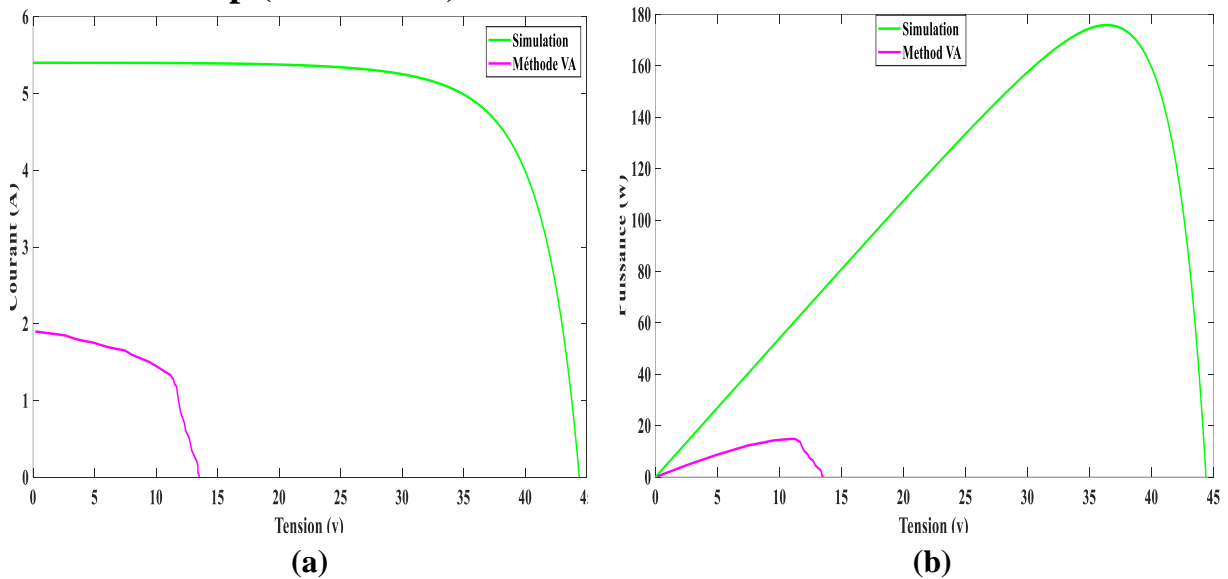


Figure (III-37) : Résultats des comparaisons entre la Simulation (sous STC) et la méthode VA en état pollué pour un module Modèles NT-R5E3E de 175 watts pollués.

**Courbe simulation (en vert) :** Représente la simulation Matlab sous les conditions STC ( $E_s=1000 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ ).

**Courbe méthode VA (en rose) :** Représente la méthode volt ampèremètre en état pollué sous Matlab.

#### Figure (III-37.a) : Courant en fonction de la tension :

Elle représente la caractéristique courant-tension (I-V) du panneau photovoltaïque sale. On observe que le courant diminue progressivement avec l'augmentation de la tension. Dans ce contexte, la courbe Simulation (sous condition STC) est plus optimiste en termes de

performances par rapport à la courbe obtenue par la "Méthode VA". Cela signifie que le panneau sale produit moins de courant que prévu en simulation à son état sain au condition STC.

#### Figure (III-37.b) : Puissance en fonction de la tension :

Ce graphique met en évidence la caractéristique puissance-tension du même panneau photovoltaïque. Et que la saleté et la pollution aient affecté l'efficacité du panneau, comme le montre la différence entre la courbe de Simulation sous condition STC et celle de la Méthode VA pollué en défaillance.

#### Modèles Peimar (SF400M (9BB) (BF)) de 400 watts :

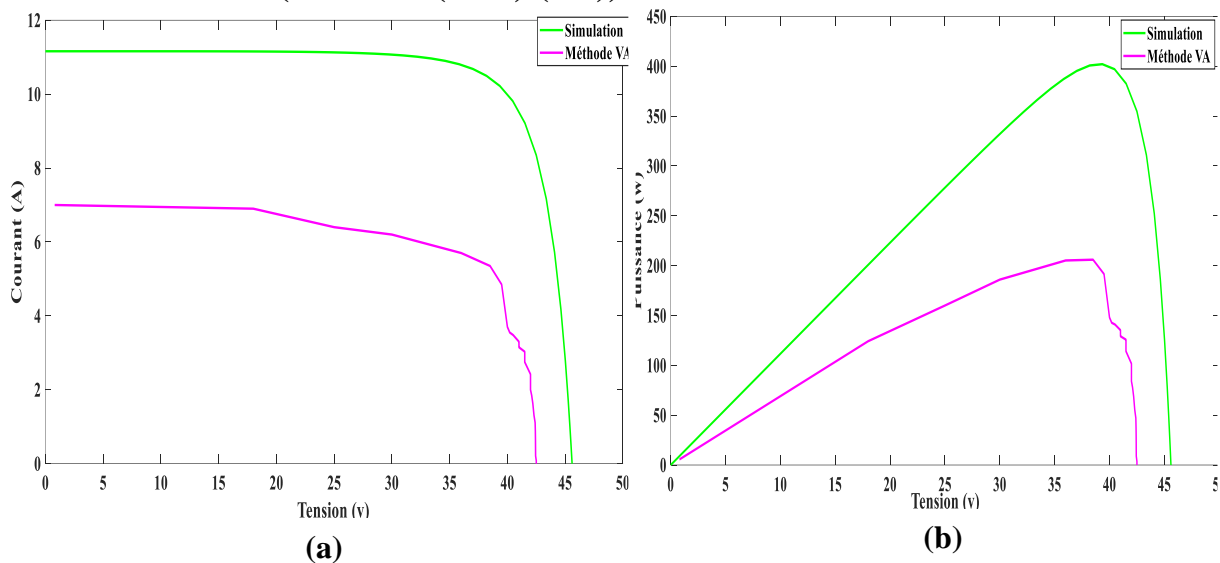


Figure (III-38) : Résultats des comparaisons entre la Simulation (sous STC) et la méthode VA en état pollué pour un module SF400M (9BB) (BF) de 400 watts pollués.

**Courbe simulation (en vert) :** Représente la simulation Matlab sous les conditions STC ( $E_s=1000 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ ).

**Courbe méthode VA (en rose) :** Représente la méthode volt ampèremètre en état pollué sous Matlab.

#### Figure (III-38.a) : Courant en fonction de la tension :

La courbe de Simulation (sous STC) semble indiquer le comportement attendu dans des conditions idéales, tandis que la courbe obtenue par la Méthode VA pollué indique le comportement réel du panneau sous ses conditions actuelles de saleté et de pollution. Ce qui est notable, c'est que la performance réelle est significativement moindre que celle simulée, ce qui est probablement dû à l'effet de la saleté et de la pollution sur le panneau.

#### Figure (III-38.b) : Puissance en fonction de la tension :



Ce second graphique présente la relation entre la puissance et la tension pour le panneau photovoltaïque. La courbe de la Méthode VA sous défaillance montre une chute nette de la puissance dans la région de faible tension, ce qui affectées par les défauts, mettant en évidence la dégradation due à la pollution.

### III.5.5. Interprétation de tous les essais

Ces graphiques montrent qu'un panneau solaire sale et pollué produira moins de courant et d'énergie que prévu. Ainsi, dans les environnements où la pollution et la saleté sont susceptibles d'affecter les panneaux solaires, un entretien régulier est essentiel pour maintenir une efficacité énergétique optimale. Un panneau propre recevra plus de rayonnement solaire et convertira plus efficacement ce rayonnement en électricité.

### III.6. Calculs des rendements, les facteurs de forme et l'indicateur d'erreurs

Dans cette étude, nous avons calculé les rendements, les facteurs de forme et les indicateurs d'erreurs pour chaque essai expérimental. Le tableau suivant résume ces résultats, offrant une vue d'ensemble des performances de chaque modèle de panneau photovoltaïque testé.

Pour les calculs des rendements, FF et l'erreur, nous avons utilisé les équations suivantes :

$$\eta = \frac{P_{\max}}{E \cdot S} \quad \text{(III-1)}$$

$$FF = \frac{P_{\max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad \text{(III-2)}$$

$$Ex = Ex \text{ mesuré} - Ex \text{ simulé} \quad \text{(III-3)}$$

La surface du module  $S = 0,646495\text{m}^2$ .

Type de module		Méthode VA			Matlab			Erreur		
		P <sub>MAX</sub>	FF	N <sub>%</sub>	P <sub>MAX</sub>	FF	N <sub>%</sub>	E <sub>P<sub>MAX</sub></sub>	E <sub>FF</sub>	E <sub>N<sub>%</sub></sub>
Module photovoltaïque de 80W	Etat Sain	53	59.83	8.19	80	74.07	12.37	27	14.24	4.18

### Chapitre III : Défaillances des panneaux photovoltaïques

Ombre 25%	38.64	49.07	5.98	41.3704	52.78	6.4	2.7304	3.71	0.42
Ombre 34%	46.9	63.38	7.25	37.5956	45.72	5.82	9.30	17.66	1.43
Ombre 50%	51.92	79.93	8.03	31.0728	50.11	4.80	20.85	29.82	3.23
Ombre 68%	18.51 5	61.87	2.86	15.5121	49.13	2.4	3.0029	12.74	0.46
Ombre Avec Feuilles D'arbre	37.7	60.06	5.83	32.6241	50.44	5.05	5.0759	9.62	0.78
Salissure Avec Sable	70	66.24	10.8 3	57.0248	53.85	8.82	12.975 2	12.39	2.01
Salissure Avec terre	36.04	65.35	5.57	32.336	57.75	5	3.704	7.6	0.57

**Tableau (III-1) :** Tableau résume les Calculs des rendements, les facteurs de forme et l'indicateur d'erreurs pour le module Pv Modèles Suntech (STP080-12/Bb) de 80 watts.

Les histogrammes suivants résument les résultats du tableau précédent :

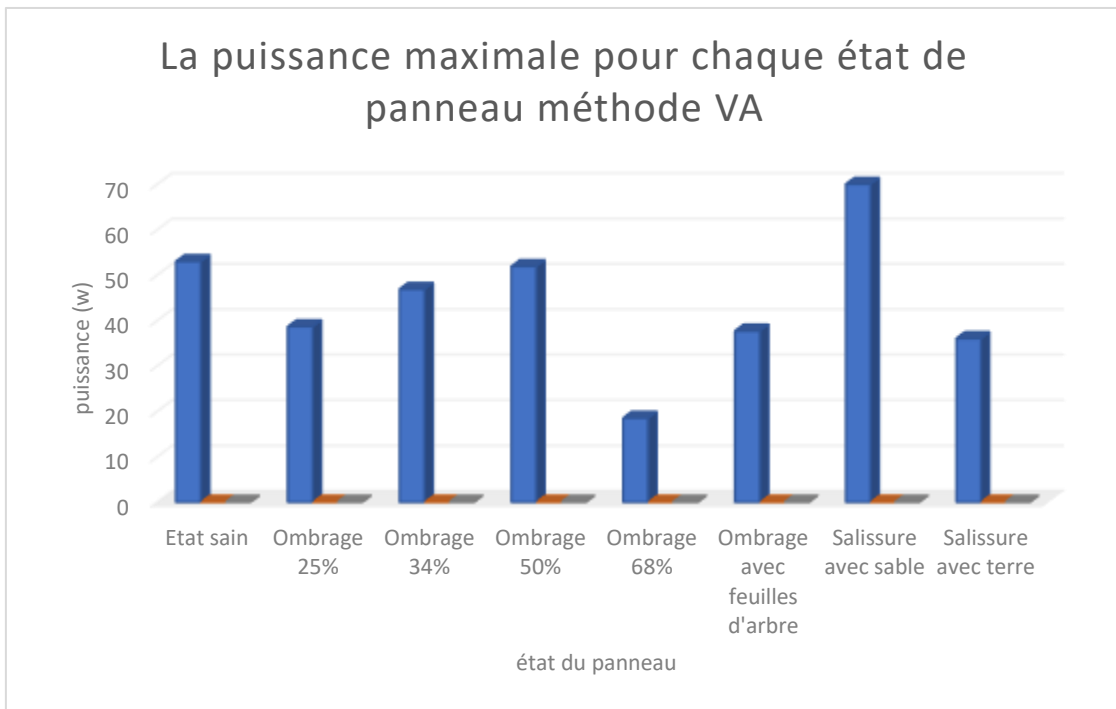


Figure (III-39) : La puissance maximale pour chaque état du panneau avec les résultats de la Méthode VA.

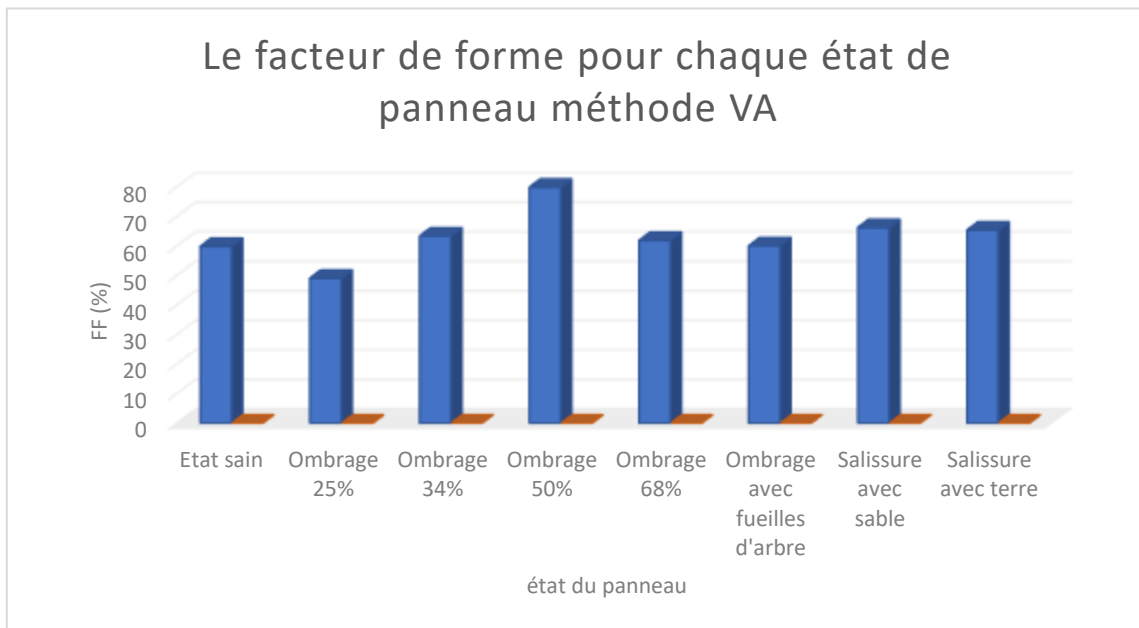


Figure (III-40) : Le facteur de forme pour chaque état du panneau de résultats de Méthode VA.

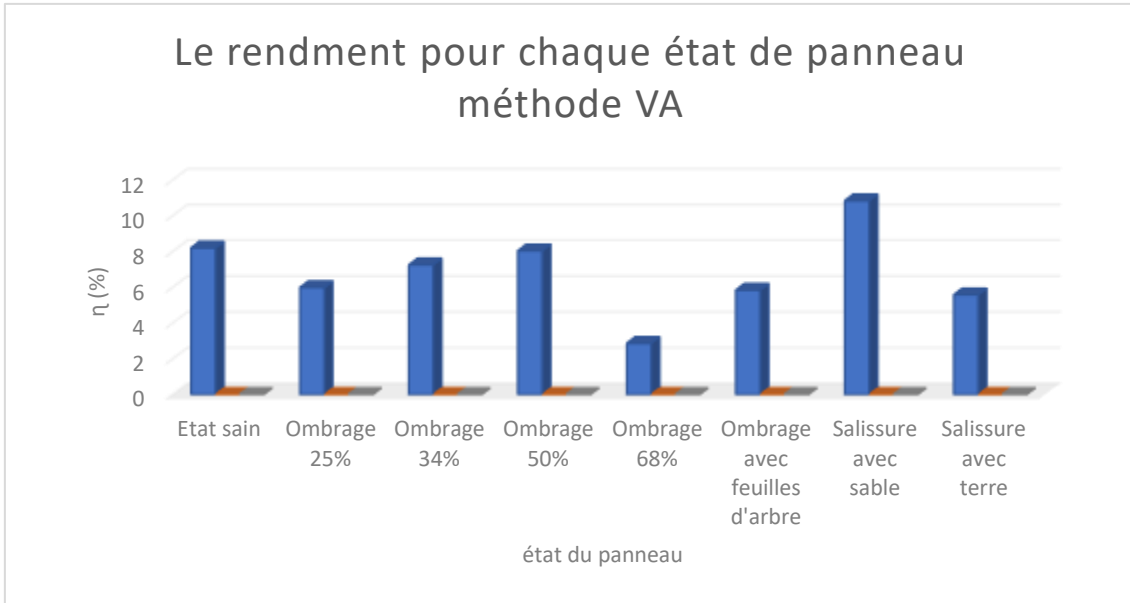


Figure (III-41) : Le rendement pour chaque état du panneau de résultats de Méthode va.

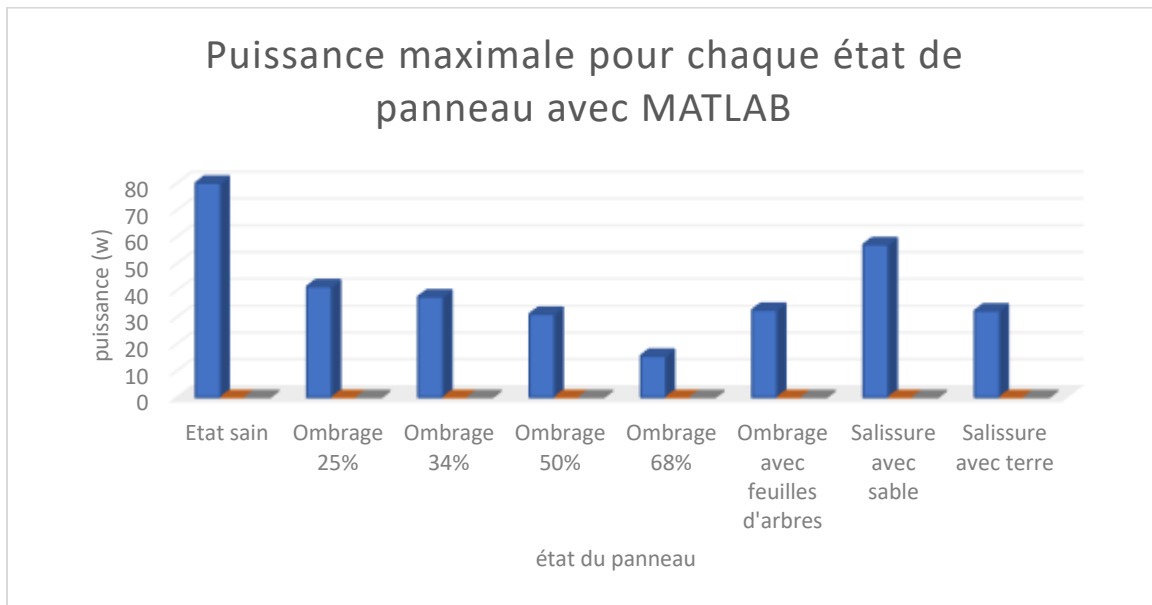


Figure (III-42) : La puissance maximale pour chaque état du panneau de résultats de MATLAB.

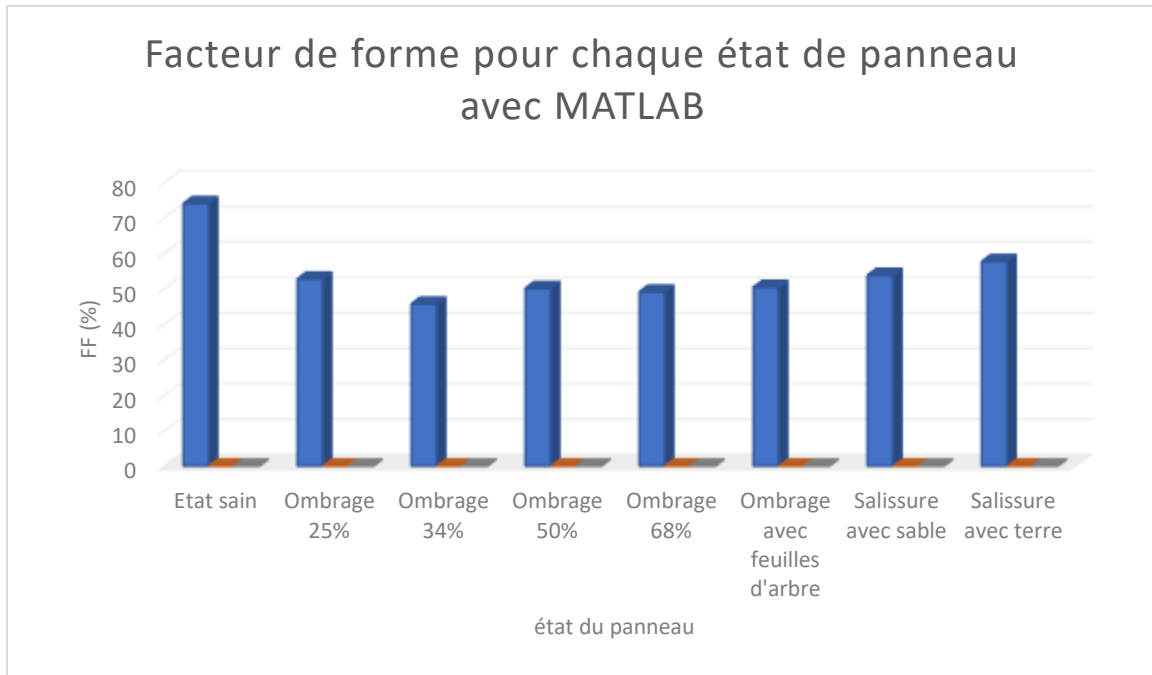


Figure (III-43): Le facteur de forme pour chaque état du panneau de résultats de MATLAB.

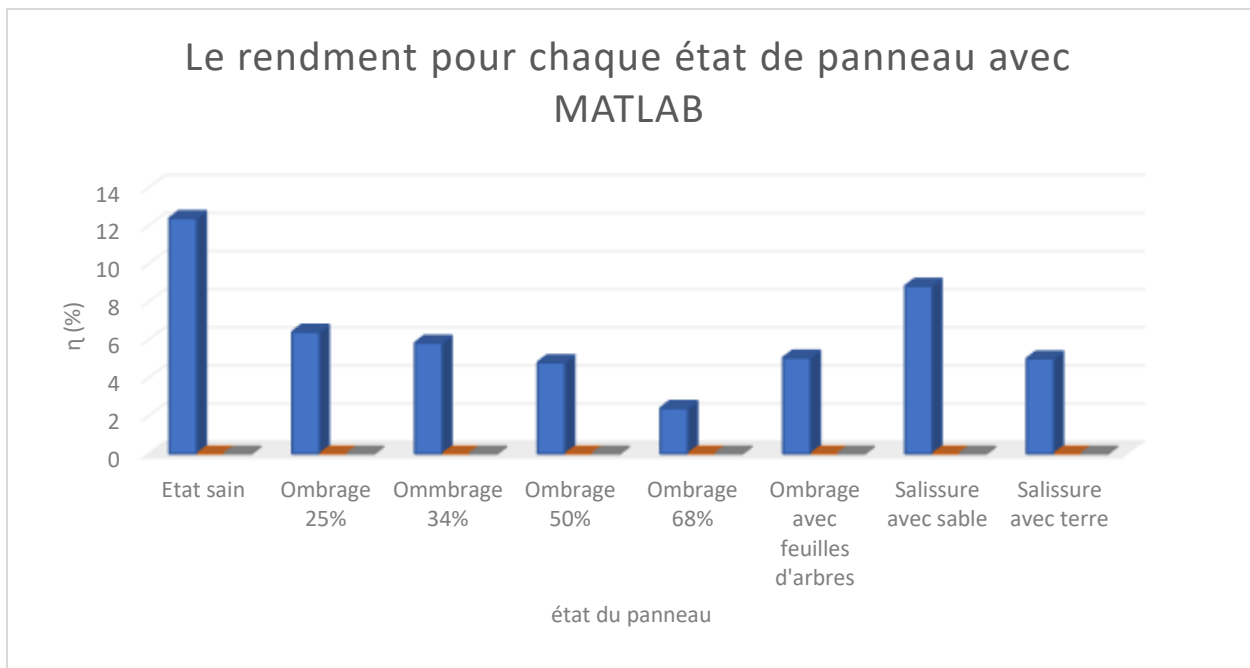


Figure (III-44) : Le rendement pour chaque état du panneau de résultats de MATLAB.

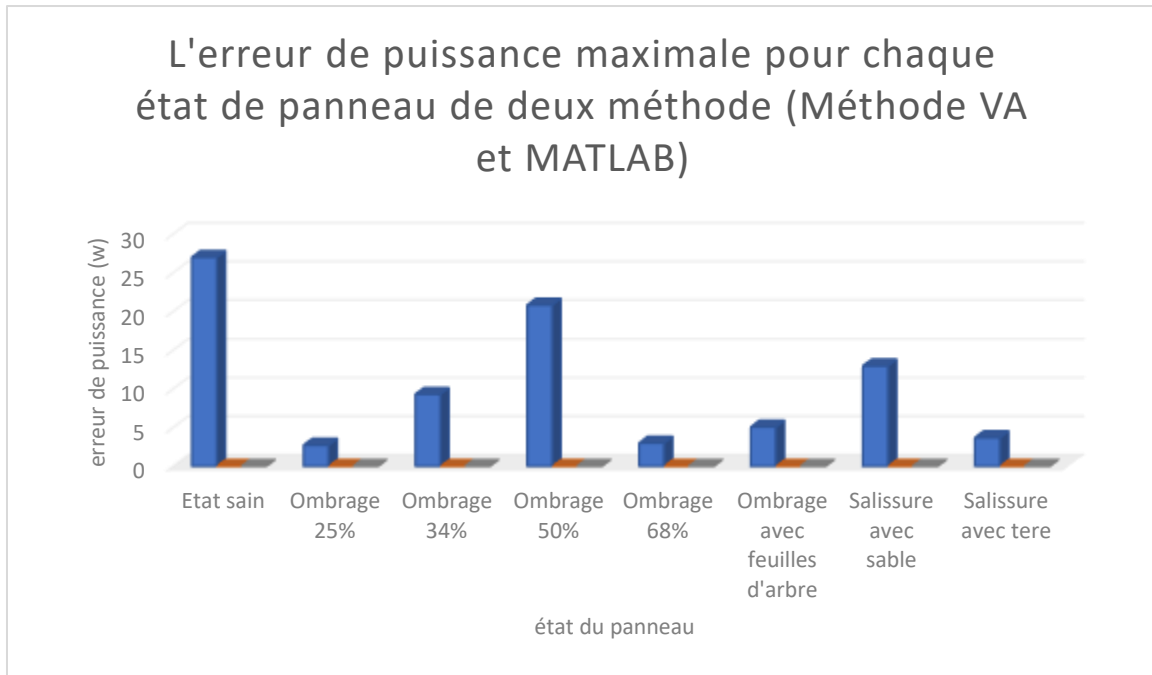


Figure (III-45): L'erreur de puissance maximale pour chaque état du panneau avec deux méthodes (Méthode VA et MATLAB).

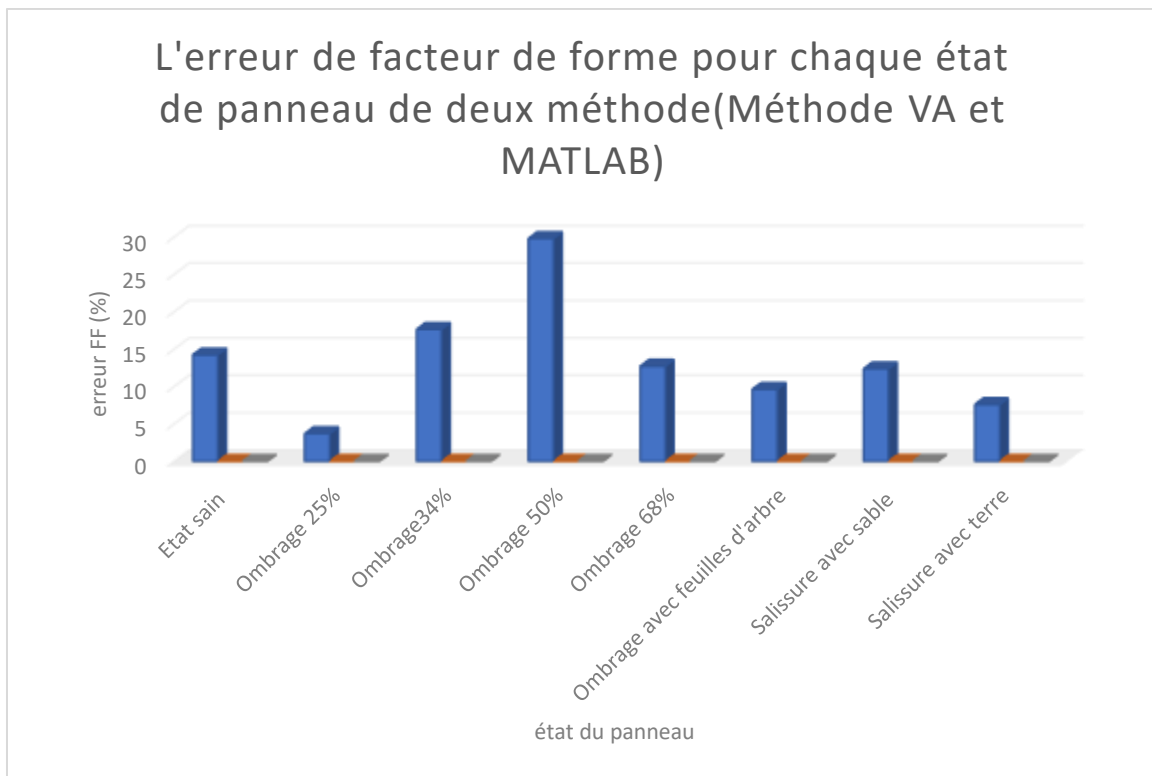
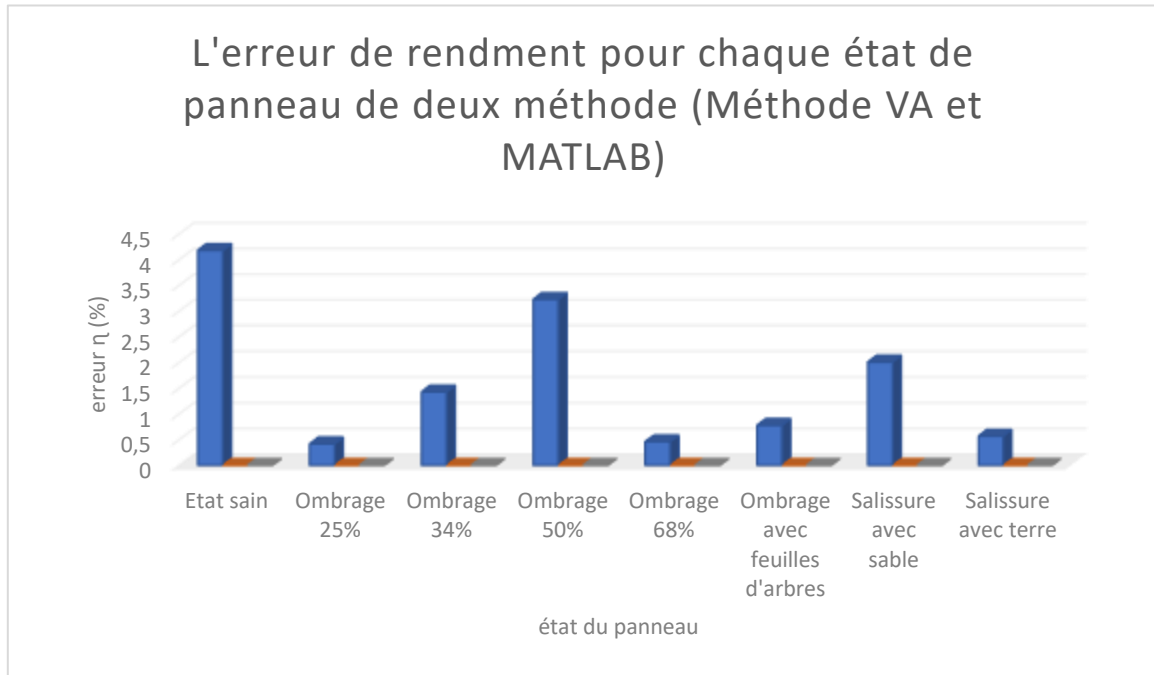


Figure (III-46): L'erreur de facteur de forme pour chaque état de panneau de deux méthodes (Méthode VA et MATLAB).



**Figure (III-47):** L'erreur de rendement pour chaque état de panneau de deux méthodes (Méthode VA et MATLAB).

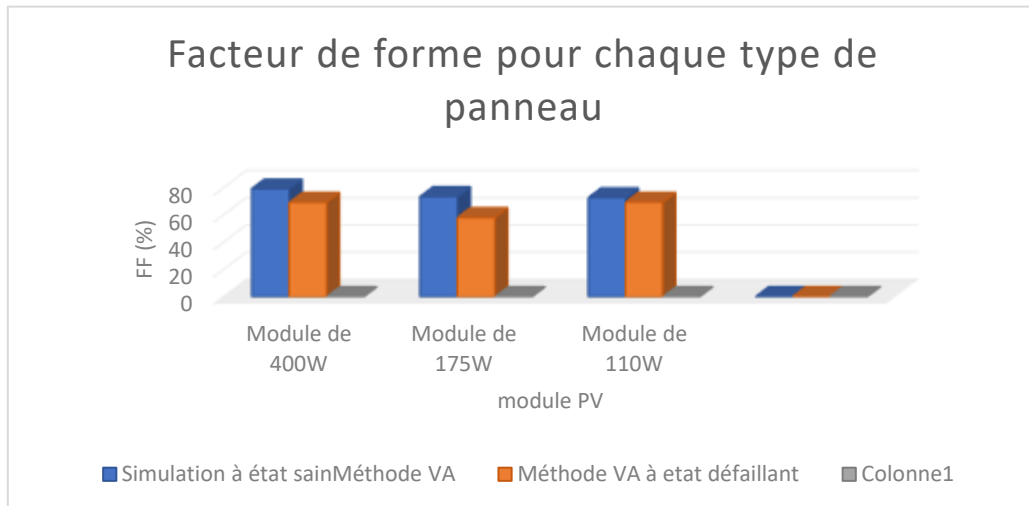
Ce tableau résume les Calculs des rendements, les facteurs de forme et l'indicateur d'erreurs pour différents modèles module PV et compare entre la simulation sous condition STC et méthode Voltampèremètre utilisé dans les essais expérimentaux défaillants (panneau polluée) :

Module	Type des Essaye	$P_{MAX}$	FF	$N\%$
Module De 400W	Simulation à Etat sain sous STC	402.121	79.03	20.19
	Méthode VA à Etat défaillant	205.975	69.23	10.34
Module De 175W	Simulation à Etat sain sous STC	175.909	73.39	13.52
	Méthode VA à Etat défaillant	14.896	58.07	1.15

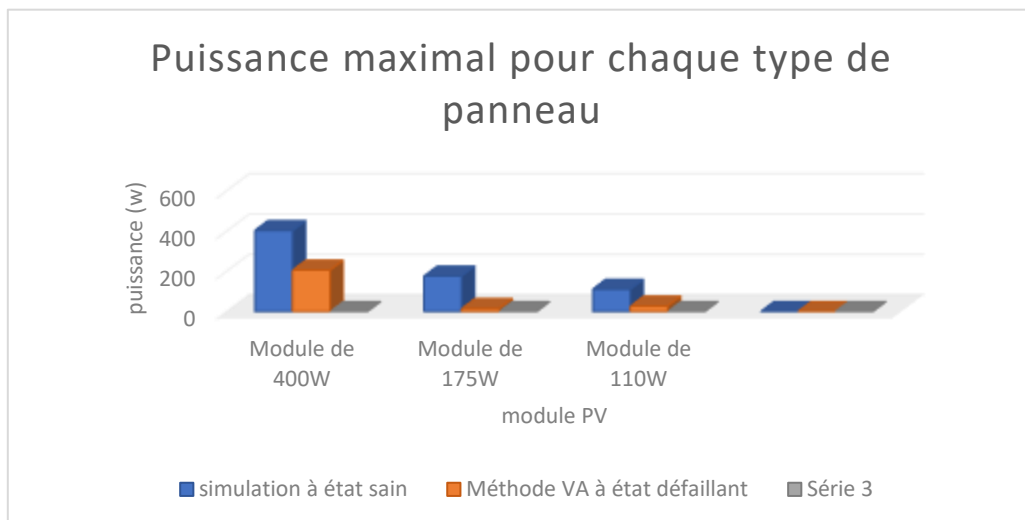
### Chapitre III : Défaillances des panneaux photovoltaïques

Module De 110W	Simulation à Etat sain sous STC	110.502	72.6	14.41
	Méthode VA à Etat défaillant	27.125	69.30	3.55

**Tableau (III-2) :** Tableau résume les Calculs des rendements, les facteurs de forme et l'indicateur d'erreurs pour différents modèles module PV.

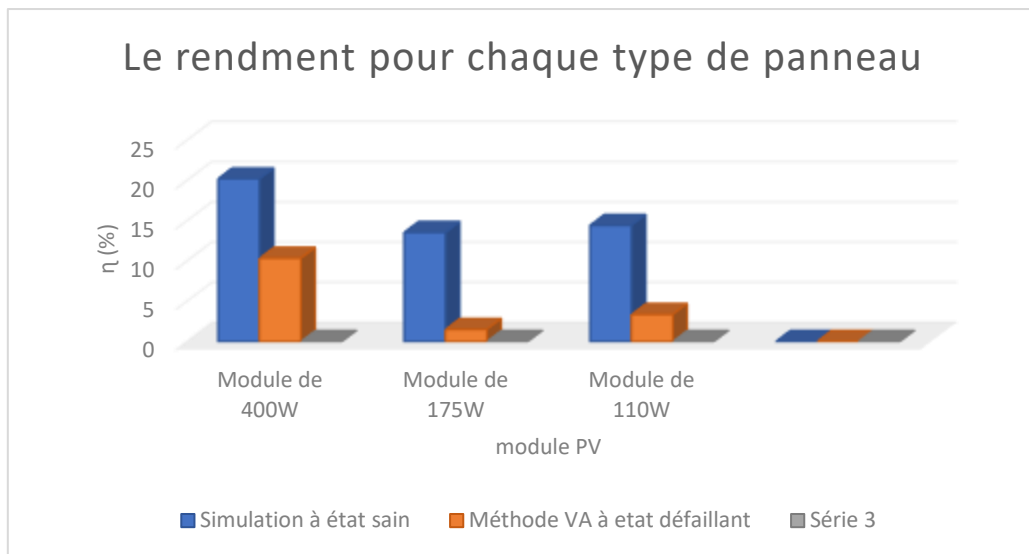


**Figure (III-48) :** Puissance maximal pour chaque type de panneau de deux méthodes (Simulation a état sain sous STC et Méthode va à état défaillant).



**Figure (III-49):** Facteur de forme pour chaque type de panneau de deux méthodes (Simulation a état sain et Méthode va à état défaillant).





**Figure (III-50) :** rendement pour chaque type de panneau de deux méthodes (Simulation à état sain et Méthode va à état défaillant).

### III.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la défaillance des panneaux photovoltaïques (PV), en commençant par une présentation des différents types de défaillances. Nous avons réalisé des essais sur des panneaux Suntech (STP080-12/Bb) de 80 watts, soumis à divers niveaux d'ombrage (25%, 50%, 68%, 34%) et à des salissures avec des feuilles, de la terre et du sable. Les caractéristiques électriques obtenues par volt ampèremètre ont été comparées aux simulations Matlab.

Nous avons ensuite étendu les essais à d'autres modèles de panneaux PV pollués, comparant également leurs performances à celles prévues par Matlab sous des conditions standards (STC). Les rendements, facteurs de forme et indicateurs d'erreurs ont été calculés pour chaque essai, permettant d'analyser l'impact des pollutions et ombrages sur les performances des panneaux.

Cette étude a montré comment différentes pollutions affectent les panneaux PV et a validé l'efficacité des simulations Matlab pour prévoir ces effets.

# *Conclusion générale*

## Conclusion générale

---

### Conclusion Générale :

L'objectif de ce mémoire de fin d'étude était de caractériser les panneaux photovoltaïques, en analysant leur fonctionnement, leurs performances et leurs défaillances potentielles. Pour atteindre cet objectif, nous avons structuré notre travail en trois chapitres distincts.

Dans le chapitre 1, nous avons présenté une vue d'ensemble des énergies renouvelables, avec un accent particulier sur l'énergie photovoltaïque. Nous avons discuté des avantages de l'énergie solaire, de son rôle crucial dans la transition énergétique mondiale, et des principes fondamentaux des panneaux photovoltaïques. Cette section a fourni les bases théoriques nécessaires à la compréhension des technologies PV et de leur importance dans le mix énergétique actuel.

Le chapitre 2 a été consacré à la modélisation des panneaux photovoltaïques. Nous avons exploré les modèles électriques des panneaux, détaillant les équations mathématiques et les paramètres qui les gouvernent. Une attention particulière a été accordée aux caractéristiques du panneau Suntech STP080S-12/Bp. Nous avons utilisé MATLAB Simulink pour simuler le comportement de ces panneaux, interpréter les graphes obtenus, et évaluer les performances sous diverses conditions de luminosité et de charge. Cette analyse a permis de valider la précision des modèles et de comprendre en profondeur les mécanismes de fonctionnement des panneaux PV.

Dans le chapitre 3, nous avons étudié les défaillances des panneaux photovoltaïques. Nous avons analysé les causes courantes de défaillance, les méthodes de détection et les impacts sur les performances des systèmes PV. Nous avons particulièrement caractérisé la méthode voltampèremètre, en comparant les résultats expérimentaux obtenus à l'état sain des modules PV avec les simulations effectuées précédemment. Cette comparaison a permis de confirmer la fiabilité des simulations pour prédire les performances réelles et identifier les signes de défaillance avant qu'ils ne compromettent le fonctionnement des systèmes photovoltaïques.

Ce travail nous a permis de caractériser de manière approfondie les panneaux photovoltaïques, d'identifier les paramètres critiques influençant leurs performances, et de comprendre les mécanismes de défaillance. La modélisation et les simulations réalisées ont fourni des outils précieux pour prédire et optimiser les performances des panneaux PV dans des conditions réelles. En conclusion, cette étude contribue à l'amélioration des technologies photovoltaïques

## Conclusion générale

---

et à leur intégration efficace dans les systèmes énergétiques renouvelables, renforçant ainsi leur rôle dans la transition vers une énergie plus durable et propre

## *Références bibliographiques*

### *Liste des références*

- [1] <https://www.ecologie.gouv.fr/energies-renouvelables>.
- [2] <https://observatoirenrs.com/2021/09/02/parc-solaire-chine-dubai-maktoum/>.
- [3] <https://www.aerem.fr/>.
- [4] <http://www.chine-ecologie.org/energies-renouvelables/effet-de-serre/561-le-plus-grand-parc-eolien-de-haute-altitude-inaugure-au-tibet>.
- [5] R. d'Amore-Domenech, T. Leo et B. Pollet, «Bulk power transmission at sea: Life cycle cost comparison of electricity and hydrogen as energy vectors,» *Applied Energy*, 2021.
- [6] <https://techniquesolaire.com/nos-solutions/hydrogene-vert/>.
- [7] <https://blogs.iadb.org/sostenibilidad/fr/demain-lindustrie-fonctionnera-sans-carbone-si-les-gouvernements-agissent-aujourd'hui/>.
- [8] <https://www.polytechnique-insights.com/tribunes/economie/pourquoi-lhydrogene-est-emetteur-de-co2/>.
- [9] <https://aosmithinternational.com/be-fr/l-hydrogene-le-gaz-de-l-avenir-ou-l-avenir-du-gaz/>.
- [10] <https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/5578-impact-climatique-de-l-hydrogene-bleu.html>.
- [11] <https://www.fiches-auto.fr/>.
- [12] <https://energy-cities.eu/fr/lhydrogene-et-ses-50-nuances-de-gris-vert-bleu/>.
- [13] <https://www.larousse.fr/encyclopedie/images/charbon/1313427>.
- [14] <https://www.h2-mobile.fr/actus/mini-reacteur-nucleaire-hydrogene-rose-faible-coute/>.
- [15] <https://www.choisir.com/energie/actualites/195436/nucleaire-et-hydrogene-rose-lespagne-met-en-garde-la-france>.
- [16] [https://modernhydrogen.com/wp-content/uploads/2023/11/Hydrogen-Production-via-Methane-Pyrolysis\\_-An-Overview-of-Turquoise-Hydrogen-Chemical-Engineering.pdf](https://modernhydrogen.com/wp-content/uploads/2023/11/Hydrogen-Production-via-Methane-Pyrolysis_-An-Overview-of-Turquoise-Hydrogen-Chemical-Engineering.pdf).
- [17] <https://innovation.engie.com/fr/news/actus/technologie-emergentes-durables/lhydrogene-turquoise/29011>.
- [18] <https://www.mobility-observatory.arval.fr/toutes-les-couleurs-de-lhydrogene>.
- [19] <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-renouvelables/tout-savoir-lhydrogene>.
- [20] <https://mincater-energy.com/lhydrogene-et-ses-multiples-couleurs/>.
- [21] <https://www.energy.gov/eere/water/history-hydropower>.
- [22] <https://www.adesol-groupe.com/blog/construction-barrage>.
- [23] <https://www.connaissancedesenergies.org/>.

## Liste des références

---

- [24] <https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/energie-renouvelable-utiliser-biomasse-produire-energie-1108/>.
- [25] <https://knowhow.distrelec.com/fr/energie-et-alimentation-electrique/energie-geothermique-une-source-denergie-renouvelable-sous-utilisee/>.
- [26] <https://www.bateaux.com/article/34568/passer-l-ecluse-du-barrage-sur-la-rance-entre-dinard-et-saint-malo>.
- [27] <https://www.be-atex.com/actualites/focus/les-centrales-biomasse-fonctionnement-avantages-et-inconvenients>.
- [28] <https://www.hydroquebec.com/comprendre/tout-savoir-energie/osmotique.html>
- [29] <https://www.edf.fr/groupe-edf/>.
- [30] <https://www.frasnes-lez-anvaing.be/a-la-une/la-biomethanisation-a-frasnes-lez-anvaing-1>.
- [31] <https://www.bretagne-energie.fr/energies-renouvelables/tout-savoir-sur-lenergie-du-biogaz/>.
- [32] <https://www.iea.org/energy-system/renewables>.
- [33] <https://www.thenationalnews.com/climate/road-to-net-zero/2023/11/09/masdar-launches-its-first-floating-solar-pv-project-in-indonesia/>.
- [34] [https://www.bfmtv.com/economie/entreprises/energie/edf-met-en-route-une-centrale-a-biomasse-aux-etats-unis\\_AN-201311220220.html](https://www.bfmtv.com/economie/entreprises/energie/edf-met-en-route-une-centrale-a-biomasse-aux-etats-unis_AN-201311220220.html).
- [35] <https://www.eib.org/fr/press/all/2021-225-germany-eib-and-parkwind-start-technologically-advanced-offshore-wind-farm-project>.
- [36] <https://www.getyourguide.com/foz-do-iguacu-1497/foz-do-iguacu-itaipu-hydroelectric-dam-panoramic-tour-t662806/>.
- [37] <https://energies-media.com/page/165/?taxonomy&term&album=10331>.
- [38] <https://reneweconomy.com.au/why-are-the-blades-not-spinning-at-australias-biggest-wind-farm-79852/>.
- [39] <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/algeria-renewable-energy-market>.
- [40] <https://www.energy.gov.dz/>.
- [41] <https://www.liberte-algerie.com/actualite/projet-dune-premiere-centrale-solaire-photovoltaique-a-bechar-370354>.
- [42] <https://www.flickr.com/photos/67523469@N06/>.
- [43] <https://aneree.bf/>.
- [44] <https://www.vattenfall.fr/le-mag-energie/avantages-inconvenients-des-energies-renouvelables>.

## Liste des références

---

- [45] J. Perlin, «From Space to Earth: The Story of Solar Electricity», Cambridge, MA: Harvard University Press, 1999.
- [46] J. P. Dunlop, Photovoltaic Systems.
- [47] J.-P. Kleider, 6. « Effet photovoltaïque : principes physiques», CNRS Éditions éd., R. e. J. C. (. L. à. d. Mosseri, Éd., CNRS Éditions, 2013, pp. 48-49.
- [48] Bonnet-Gonnet, «durable, L'évolution des cellules photovoltaïques : vers une énergie solaire,» Comptes rendus de l'Académie des sciences, Série Physique, vol. 12, n° %14, pp. 366-381, 2011.
- [49] <https://www.totalenergies.fr/>.
- [50] A. Mohammad Bagher, «Types of Solar Cells and Application» AJOP, vol. 3, p. 94–113, 2015.
- [51] F. ISE, «Photovoltaics Report,» Freiburg, 2022.
- [52] Green, «Solar cell efficiency tables (Version 60),» Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 30, p. 687–701, 2022.
- [53] <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>.
- [54] P. Würfel, «Physics of Solar Cells: From Basic Principles to Advanced Concepts», J. W. & Sons, Éd., 2017.
- [55] Gholami, «Electrical, thermal and optical modeling of photovoltaic systems: Step-by-step guide and comparative review study,» Sustainable Energy Technologies and Assessments, n° %149.
- [56] Patnaik, «Reconfiguration strategy for optimization of solar photovoltaic array under non-uniform illumination conditions,» Proceedings of the 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC '11), pp. 1859-1864, juin 2011.
- [57] <https://www.devis-photovoltaique.fr/types-de-systemes-photovoltaiques/>.
- [58] <https://biblus.accasoftware.com/fr/systeme-photovoltaique-connecte-au-reseau/>.
- [59] <https://quebecsolar.ca/fr/solutions-en-energie-solaire/kits-de-panneaux-solaires-systemes-solaires-complets-hors-reseau/>.
- [60] <https://www.libow.fr/batteries/quels-sont-les-differents-types-de-batteries-solaires-maison/>.
- [61] <https://www.edf-enr.com/particuliers/guides/tout-savoir-pour-proteger-son-installation-solaire>.
- [62] <https://www.rj-home-solar.fr/blog/panneau-solaire-photovoltaique-avantages-et-inconvenients/>.
- [63] M. Konrad, «Photovoltaics: fundamentals, technology and practice», Wiley, Éd.,



## Liste des références

---

Chichester, West Sussex, UK, 2014.

[64] Villalva, «Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays»  
IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, n° 15, pp. 1198-1208, 2009.

[65] <https://cruxial.com.sg/suntech/80/STP080-12Bb.pdf>

[66] Jordan, D. C., & Kurtz, S. R. (2013). «Photovoltaic Degradation Rate an Analytical  
Review». Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 21(1), 12-29.

# *Annexes*

## Installation des panneaux photovoltaïques au champ du laboratoire L.T.I.I de l'université

