

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique



MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Parcours : Master

Spécialité : Énergétique

Thème

ETUDE ET SIMULATION D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE

Préparé par :

BEZZAOUCHA Mohammed
BENYAHIA Ilias

Soutenu publiquement le : 14 / 07 / 2021, devant le jury composé de :

Mr. KARAS. A	Professeur (Univ. Ibn Khaldoun)	Président
Mr. AKERMI. N	Maître de Conférences " B"(Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
Mr. BOUZOUINI. M	Maître Assistant "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
Mr. BOUREGUIG. K	Maître Assistant "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadrant

Année universitaire : 2020 - 2021

Dédicace

A nos Très chers Parents

Nous dédions ce mémoire à nos parents, pour l'amour qu'ils nous ont toujours donné, leurs encouragements et toute l'aide qu'ils nous ont apportés durant nos études.

Aucun mot, aucune dédicace ne pourrait exprimer notre respect, notre considération, et notre amour pour les sacrifices qu'ils ont consentis pour notre instruction et notre bien-être.

Trouvez ici, chère mères et cher pères, dans ce modeste travail, le fruit de tant de dévouements et de sacrifices ainsi que l'expression de notre gratitude et de notre profond amour.

Puisse Dieu leur accorder santé, bonheur, prospérité et longue vie afin que nous puissions un jour combler de joie leurs vieux jours.

Remerciements

Nous remercions ALLAH le tout puissant d'avoir nous donner le courage, la volonté la patience de mener à terme le présent travail.

Nous tenons à remercier notre encadreur Mr. BOURQUIG KADA pour leur soutien, leur conseil judicieux et leur grand bien vaillance durant l'élaboration de ce travail.

Nos remerciements également aux :

Président de jury : Mr. KARAS.A ABDELKADER

Examineurs:

Mr. AKERMI NASREDDINE

Mr. BOUZOUINI MOHAMED

D'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail

Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I : Étude Générale sur les Systèmes Photovoltaïques

I.1. Introduction.....	4
I.2. Développement des énergies renouvelable en Algérie.....	4
I.3. Potentiel solaire en Algérie.....	5
I.4. Caractéristiques du rayonnement solaire.....	7
I.4.1. Spectre solaire.....	7
I.4.2. Masse d'air.....	7
I.4.3. Rayonnement extraterrestre.....	9
I.4.4. Constante solaire.....	10
I.4.5. Rayonnement solaire incident.....	10
I.4.5.1. Rayonnement direct.....	10
I.4.5.2. Rayonnement diffus.....	10
I.4.5. 3.Rayonnement réfléchi.....	10
I.5. Systèmes photovoltaïques.....	12
I.5.1. Que signifie photovoltaïque?.....	12
I.5.2. Effet photovoltaïque.....	12
I.5.3. Energie solaire photovoltaïque.....	12

I.5.4. Cellule photovoltaïque.....	13
I.5.5. Conversion photovoltaïque.....	13
I.5.6. Technologies des cellules photovoltaïques.....	13
I.5.7. Comment fonctionne une cellule solaire photovoltaïque?.....	14
I.5.8. Types d'assemblages électriques	16
I.5.8.1. Assemblage de panneaux photovoltaïques en série.....	16
I.5.8.2. Assemblage de panneaux photovoltaïques en parallèle.....	17
I.5.8.3. Assemblage mixte (série / parallèle).....	18
I.5.9. De quoi se compose un système photovoltaïque ?.....	19
I.5.10. Description des éléments du système photovoltaïque	20
I.5.10.1. Module photovoltaïque.....	20
I.5.10.2. Onduleur.....	20
I.5.10.3. Convertisseur.....	20
I.5.10.4. Batterie solaire.....	20
I.5.10.5. Régulateur ou contrôleur de charge.....	20
I.5.11. Différentes configurations des systèmes photovoltaïques.....	21
I.5.11.1. Systèmes photovoltaïques non raccordés au réseau.....	21
I.5.11.1.1. Systèmes photovoltaïques autonomes sans stockage.....	22
I.5.11.1.2. Systèmes photovoltaïques autonomes avec stockage.....	22
I.5.11.2. Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau.....	23
I.5.11.2.1. Systèmes PV raccordés au réseau avec injection totale.....	23
I.5.11.2.1.1. Injection totale sans stockage.....	23

I.5.11.2.1.2. Injection totale avec stockage.....	24
I.5.11.2.2. Systèmes PV raccordés au réseau avec autoconsommation.....	24
I.5.11.2.2.1. Autoconsommation sans stockage.....	25
I.5.11.2.2.2. Autoconsommation avec stockage.....	25
I.5.11.3. Systèmes photovoltaïques hybrides.....	26
I.5.11.3.1. Systèmes photovoltaïque hybrides avec stockage.....	26
I.5.11.3.2. Systèmes photovoltaïques hybrides sans stockage.....	27
I.5.12. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	28
I.5.12.1. Avantages.....	28
I.5.12.2. Inconvénients.....	28
I.6. Conclusion.....	29

Chapitre II : Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque

II.1. Introduction.....	31
II.2. Paramètres photovoltaïques d'une cellule solaire.....	31
II.3. Zones de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque.....	33
II.4. Modélisation d'un générateur photovoltaïque.....	34
II.5. Présentation du modèle à une diode.....	35
II.5.1. Modèle à trois paramètres.....	35
II.5.2. Modèle à cinq paramètres.....	37
II.6. Développement du modèle mathématique d'un GPV.....	38

II.7. Simulation du générateur photovoltaïque.....	39
II.7.1. Caractéristiques I(V) et P(V) d'un module.....	42
II.7.2. Effets climatiques sur le module PV.....	43
II.7.2.1. Influence de la température	43
II.7.2.2. Influence de l'éclairement.....	45
II.8. Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT).....	46
II.8.1. Algorithmes de commande MPPT	49
II.9. Principe de la commande Perturbation et Observation (P&O).....	49
II.10. Convertisseurs DC/DC (Les Hacheurs).....	51
II.10.1. Type de convertisseurs.....	51
II.11. Conclusion.....	51

Chapitre III : Comparatif des Technologies Photovoltaïque et leurs Influences sur le Rendement Energétique

III.1. Introduction.....	53
III.2. Semi-conducteurs.....	53
III.2.1. Semi conducteurs inorganiques	53
III.2.2. Semi conducteurs organiques.....	54
III.3. Rendements photovoltaïques.....	55
III.3.1. Rendement global.....	55
III.3.2. Rendement d'une cellule ou d'un module aux conditions STC	55
III.3.3. Rendement d'un système.....	56

III.4. Utilité des unités de mesure.....	57
III.5. Facteurs influençant le rendement photovoltaïque.....	57
III.6. Revue sur les matériaux des cellules solaires.....	58
III.7. Technologies de cellules PV.....	58
III.7.1. 1^{ère} génération.....	59
III.7.1.1. Source de silicium.....	60
III.7.1.1.1. De la silice au silicium photovoltaïque.....	60
III.7.1.2. Cellule solaire au silicium monocristallin.....	61
III.7.1.3. Cellule solaire au silicium polycristallin.....	62
III.7.1.4. Comparatif des cellules de 1^{ère} génération.....	63
III.7.2. 2^{ème} génération.....	64
III.7.2.1. Technologie du CIGS.....	65
III.7.2.1.1. Méthodes de réalisation de la couche CIGS	66
III.7.2.2. La technologie du CdTe.....	67
III.7.2.2.1. Méthode VTD.....	68
III.7.2.3. Comparatif des cellules de 2^{ème} génération.....	69
III.8. 3^{ème} génération.....	69
III.8.1. Les cellules à pigments photosensibles (à colorant).....	70
III.8.1.2. Le schéma général d'une cellule DSSC.....	71
III.7.3.1.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque de Grätzel	72
III.8.2. La technologie aux polymères.....	73

III.8.2.1. Fonctionnement de cellule aux polymères.....	74
III.8.3. Technologie aux nanocristaux.....	74
III.8.4. Cellules à pérovskite.....	75
III.8.5. Comparatif des cellules de 3^{ème} génération.....	77
III.9. Conclusion.....	79
Conclusion générale.....	81
Références bibliographiques.....	83

Annexes

Résumés

Nomenclature

PV	Photovoltaïque.
CSP	concentrated solar power
h	Constante de Planck [j.s].
ν	Frequence [Hz].
C	Vitesse de la lumiere [m/s].
λ	Longueur d'onde [m].
AM	Masse d'aire.
UV	Ultra violet.
IR	Infrarouge.
DC/DC	Courant Continu/Courant Continu.
DC/AC	Courant Continu/Courant Alternatif.
T	Température [K] , [°C].
Pc	Puissance de crête [W].
Voc	Tension a circuit ouvert [V].
Isc	Courant de court-circuit [A].
Pm	Puissance optimum [W].
η	Rendement.
S	Surface du module photovoltaïque [m ²].
FF	Facteur de forme.
Rsh	Résistance shunt [Ω].
Rs	Résistance série [Ω].
Ipv	Courant généré par la cellule photovoltaïque [A].
Iph	Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident) [A].
Ki	Courant de court-circuit divisé par le coefficient de température du panneau [A/K].

Tref	Température de référence [K].
G	Irradiation sur la surface de la cellule. [W/m^2].
Gref	Irradiation de référence. [W/m^2].
Id	Courant circulant dans la diode. [A].
Is	Courant de saturation inverse de la diode [A].
Vt	Tension thermique [V].
Irs	Courant de court-circuit de la cellule à la température de référence Tref et l'éclairement de référence [A].
A	Facteur d'idéalité de la jonction.
Eg	Energie de gap du semi-conducteur [eV].
K	Constant de Boltzmann [J/K].
q	Charge de l'électron [C].
Vpv	Tension de sortie [V].
Ish	Courant circulant dans la résistance Rsh [A].
Ns	Nombre de cellules connectées en série dans un module.
Np	Nombre de cellules connectées en parallèle dans un module.
GPV	Générateur photovoltaïque.
I-V	Courant-tension [A-V].
PPM	Point de puissance maximale.
MPPT	Maximum Power Point Tracking
P & O	Perturbation et observation.
Hi	Rayonnement global reçu sur 1m^2 pendant un an [$\text{kWh}/\text{m}^2/\text{an}$].
Eelec	Energie électrique produite par l'installation sur un an (kWh/an).
STC	Standard Test Condition.
CIGS	Cuivre, indium, gallium et sélénium.

CdTe	Tellurure de cadmium.
VTD	Vapor transport desposition.
DSSD	Dye sensized solair cell

Liste des figures

Chapitre I :	Etude générale sur les systèmes photovoltaïques
---------------------	--

Figure I.1 : 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.	5
Figure I.2 : Carte de l'Irradiation Globale Directe Annuelle Moyenne (Période 2002-2011).	6
Figure I.3 : Définition de la masse d'air.	7
Figure I.4 : Définition du nombre de la masse d'air AM.	8
Figure I.5 : Répartition spectrale de rayonnement solaire.	9
Figure I.6 : Composantes du rayonnement solaire au sol.	11
Figure I.7 : De la cellule solaire au système photovoltaïque.	13
Figure I.8 : Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.	15
Figure I.9 : Représentation des niveaux d'énergie au voisinage de la jonction.	16
Figure I.10 : Branchement de panneaux en série.	17
Figure I.11 : Branchement de panneaux en parallèle.	18
Figure I.12 : Branchement de panneaux mixte.	19
Figure I.13 : Fonction principale d'un système photovoltaïque.	19
Figure I.14 : Principe d'une installation solaire autonome.	21
Figure I.15 : Principe d'un système PV autonome sans stockage (pompage au fil du soleil).	22
Figure I.16 : Schéma de principe d'un système PV autonome avec stockage.	23
Figure I.17 : Exemple de système photovoltaïque à injection totale sans stockage.	24
Figure I.18 : Exemple de système photovoltaïque à injection totale avec stockage.	24

Figure I.19 : Exemple de système photovoltaïque avec autoconsommation sans stockage.	25
Figure I.20 : Exemple d'un système photovoltaïque avec autoconsommation avec stockage.	26
Figure I.21 : Exemple d'un système hybride avec stockage.	27
Figure I.22 : Exemple d'un système hybride	28

Chapitre II : Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque
--

Figure II.1 : Schéma d'une cellule éclairée raccordée à elle-même.	31
Figure II.2 : Schéma d'une cellule éclairée non raccordée.	32
Figure II.3 : Caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque.	32
Figure II.4 : Différentes zones de la caractéristique I (V) aux conditions STC.	33
Figure II.5 : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L3P.	35
Figure II.6 : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L5P.	37
Figure II.7 : Block SIMULINK du générateur photovoltaïque.	40
Figure II.8 : Générateur photovoltaïque (KC200GT).	41
Figure II.9 : Caractéristique I(V) du GPV donné par le fabricant (hiliosolaire) pour différentes températures.	41
Figure II.10 : Caractéristique I(V) du GPV donné par le fabricant (hiliosolaire) Pour différents éclairagements.	42
Figure II.11 : Caractéristique I (V) d'un GPV.	42
Figure II.12 : Caractéristique P (V) d'un GPV.	43
Figure II.13 : Caractéristique I(V) d'un GPV pour différentes températures.	44
Figure II.14 : Caractéristique P(V) d'un GPV pour différentes températures.	44
Figure II.15 : Caractéristique I (V) du GPV selon l'éclairement.	45
Figure II.16 : Caractéristique P (V) d'un GPV selon l'éclairement.	46

Figure II.17 : Système photovoltaïque avec une commande MPPT.	47
Figure II.18 : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale	48
Figure II.19 : Signe de ΔP et ΔV à différentes positions de la courbe caractéristique de puissance	50
Figure II.20 : Organigramme de la méthode P&O.	50

Chapitre III : Comparatif des Technologies Photovoltaïque et leurs Influences sur le Rendement Énergétique

Figure III.1 : Représentation des bandes d'énergie.	53
Figure III.2 : Classification des cellules solaire.	59
Figure III.3 : Sable de hollande.	60
Figure III.4 : Quartz - Mine de La Gardette.	60
Figure III.5 : Étapes de fabrication de la cellule solaire cristalline.	61
Figure III.6 : Cellule photovoltaïque en silicium monocristallin.	62
Figure III.7 : Cellule photovoltaïque en silicium polycristallin.	63
Figure III.8 : Cellule de 2 ^{ème} génération ultralégères et flexibles CIGS.	64
Figure III.9 : Composition couche par couche d'une cellule photovoltaïque au CIGS.	65
Figure III.10 : Structure d'une cellule photovoltaïque au CdTe.	67
Figure III.11 : Cellule solaire organique.	70
Figure III.12 : Michael Grätzel.	71
Figure III.13 : Type de cellule réalisé à l'EPFL par Grätzel et O'Regan.	72
Figure III.14 : Schéma de principe d'une cellule Grätzel.	73
Figure III.15 : Cellules solaires ultra fines en polymère.	73
Figure III.16 : Cellule solaire à nanocristaux à base d'encre.	75

Figure III.17 : Cellule solaire à pérovskite. 76

Figure III.18 : Diagramme montrant les différentes technologies et l'évolution des rendements des cellules au niveau de laboratoire. 78

Liste des tableaux

Chapitre I : Etude générale sur les systèmes photovoltaïques

- Tableau I.1:** Durée d'ensoleillement sur la quasi-totalité du territoire national. 6
- Tableau I.2:** Comparaison entre le rayonnement solaire extraterrestre et le rayonnement du corps noir. 10
- Tableau I.3:** Valeur du coefficient d'albédo moyen selon la nature du sol. 11

Chapitre II : Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque

- Tableau II.1:** Grandeurs électriques pour un GPV. 39
- Tableau II.2:** Caractéristiques électriques Du GPV (KC200GT). 40

Chapitre III : Comparatif des Technologies Photovoltaïque et leurs Influences sur le Rendement Energétique

- Tableau III.1:** Conductivités des matériaux. 54
- Tableau III.2:** Similarité entre les semi-conducteurs organiques et inorganiques. 54
- Tableau III.3:** Comparatif des cellules de 1^{ère} génération. 63
- Tableau III.4:** Comparatif des cellules de 2^{ème} génération. 69
- Tableau III.5:** Comparatif des cellules de 3^{ème} génération. 77

Introduction générale

Depuis plusieurs années l'humanité fait face à une demande en énergie croissante due à l'augmentation de la population et à la qualité de vie exigeante en matière de consommation d'énergie. Dans le monde entier nous sommes plus que jamais déterminés à décrypter et analyser tous les grands problèmes énergétiques qui agitent nos sociétés. À présent, les activités énergétiques humaines doivent faire face à un double défi.

D'un côté, les ressources énergétiques conventionnelles et en particulier celles qui sont assurées à partir de sources fossiles ne pourront répondre indéfiniment à la demande qui ne cesse d'augmenter. De plus le recours excessif au stock de ces ressources épuise les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse. Il est estimé que les réserves mondiales seront épuisées vers 2030 si la consommation n'est pas radicalement modifiée, et au maximum vers 2100 si des efforts sont produits sur la production et la consommation.

Les approvisionnements énergétiques sont devenus un problème de plus en plus préoccupant cela impose de nouvelles solutions permettant de répondre aux besoins énergétiques des sociétés industrialisées et des générations futures.

D'autre côté, les émissions de gaz à effet de serre causées par nos activités énergétiques et surtout la consommation des sources fossiles sont les responsables majeurs du changement climatique et de l'augmentation de la pollution, donc il s'avère nécessaire aussi de trouver une autre solution pour prendre le relais, la contrainte imposée est d'utiliser une source d'énergie économique et peu polluante car la protection de l'environnement est devenue un point très important.

La prise de conscience simultanée de l'épuisement des ressources conventionnelles et de l'impact de nos consommations d'énergie doit notamment nous amener au développement de nouveaux modes de production d'énergie ainsi qu'à une consommation plus rationnelle de nos ressources.

Pour remédier à cela, de nouvelles énergies dites « énergies renouvelables », ont été développées pour devenir des solutions prometteuses pour suppléer les sources d'énergie de masse telle que l'énergie nucléaire et fossile. À la différence de ces dernières, les énergies renouvelables sont des énergies inépuisables et facilement exploitables et leur conversion en énergie thermique, chimique ou électrique présente peu de dangers humains et écologiques. Ce type d'énergies regroupe un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue.

Par énergies renouvelables, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse, il est bien clair que la plus part de ces énergies

proviennent directement ou indirectement du soleil. Elles sont donc disponibles indéfiniment tant que celui-ci brille.

Par rapport à d'autres sources d'énergie, l'énergie solaire est une bonne option car elle est disponible pendant les périodes de pointe énergétique, contrairement du vent qui produit souvent plus d'énergie la nuit que le jour. La nuit, la demande d'énergie est deux fois moins importante que le jour.

Le type d'énergie renouvelable faisant l'objet du présent travail est l'énergie solaire photovoltaïque, pour cela on prend l'exemple du soleil, une surface de 145000km² (4% de la surface de déserts arides) de panneaux photovoltaïques suffirait à couvrir la totalité des besoins énergétiques mondiaux. Cette énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais des cellules dites photovoltaïques, basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque, qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule et en fonction de l'éclairement.

D'après tout cela on peut dire que la conception, l'optimisation et la réalisation des systèmes Photovoltaïques sont des problèmes d'actualité puisqu'ils conduisent sûrement à une meilleure exploitation de l'énergie solaire. Dans ce contexte, de nombreux chercheurs se sont attachés à inventer des systèmes permettant de récupérer toujours le maximum d'énergie.

Dans ce travail nous nous sommes intéressés à l'étude et la simulation du fonctionnement d'un système photovoltaïque. Pour décrire cela, ce mémoire est partagé en trois chapitres :

- ✓ premier chapitre aborde les généralités sur l'énergie solaire et décrit les différents systèmes photovoltaïques ;
- ✓ dans le deuxième chapitre nous allons modéliser et simuler un générateur photovoltaïque ;
- ✓ Le troisième chapitre concerne le développement des générations de cellules solaires et l'influence des matériaux sur le rendement énergétique.

Chapitre I

**Étude Générale sur les
systèmes photovoltaïques**

I.1. Introduction :

L'énergie solaire est la source d'énergie la plus encourageante (gratuite) et la plus puissante parmi les énergies renouvelables. L'électricité photovoltaïque est le résultat d'une transformation directe de la lumière du soleil en électricité par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV). La production d'électricité photovoltaïque connaît ces dernières années un accroissement d'intérêt et un développement technologique très important à l'échelle mondiale.

Ce chapitre est consacré aux généralités sur la filière photovoltaïque. Le rayonnement solaire et ses principales caractéristiques sont présentés dans un premier temps. Ensuite, nous montrerons ce qu'est une cellule solaire, en insistant sur les propriétés qui sont importantes dans le processus de conversion photovoltaïque. À la fin du chapitre, les différentes configurations des systèmes photovoltaïques seront décrites.

I.2. Développement des énergies renouvelable en Algérie :

L'Algérie s'est engagée sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile à travers le lancement d'un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique qui a été adopté par le Gouvernement en février 2011, révisée en mai 2015 et placée au rang de priorité nationale en février 2016, lors du Conseil Restreint Gouvernement. Ce programme des énergies renouvelables dans sa version actualisée, consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22 000 MW à l'horizon 2030 pour le marché national, avec le maintien de l'option de l'exportation comme objectif stratégique, si les conditions du marché le permettent [1].

A travers ce programme, l'Algérie compte se positionner comme un acteur majeur dans la production de l'électricité à partir des filières photovoltaïque et éolienne en intégrant la biomasse, la cogénération, la géothermie. Ces filières énergétiques seront les moteurs d'un développement économique durable à même d'impulser un nouveau modèle de croissance économique [2].

Le potentiel national en énergies renouvelables étant fortement dominé par le solaire, l'Algérie considère cette énergie comme une opportunité et un levier de développement économique et social, notamment à travers l'implantation d'industries créatrices de richesse et d'emplois [2].

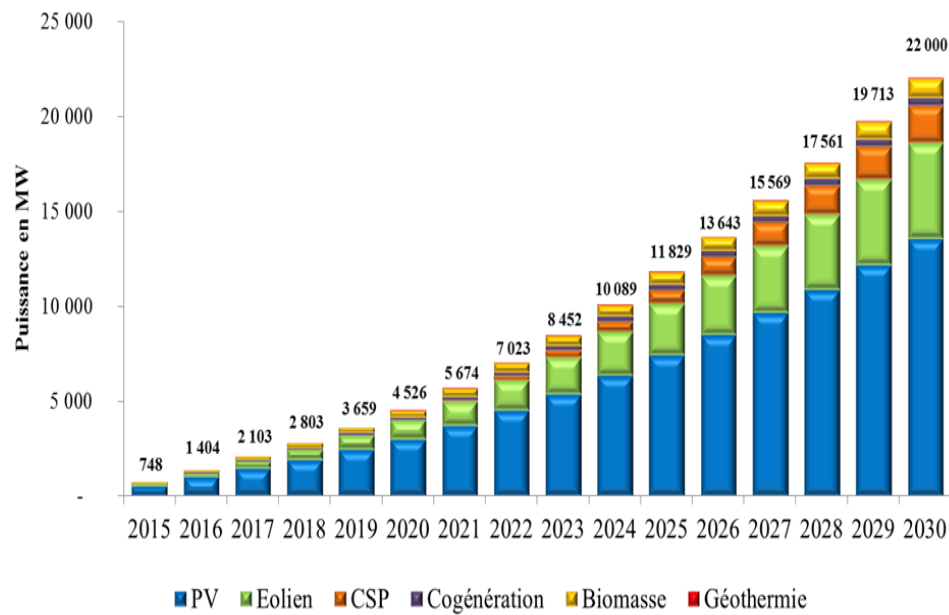


Figure I.1: La consistance du programme en énergie renouvelables à réaliser pour le marché national sur la période 2015-2030 est de 22 000 MW, répartie par filière [1].

I.3. Potentiel solaire en Algérie :

L'énergie solaire repose sur l'exploitation directe de la lumière solaire. Le fait que le soleil soit la principale source de production d'énergie peut être définie comme une masse très lourde, 333 000 fois plus lourde que la Terre. Il concentre 99,8 % de toute la masse du système solaire [3]. Les diverses études entreprises jusqu'à présent sur le potentiel énergétique solaire en Algérie font apparaître un potentiel considérable pour l'utilisation et l'exploitation de cette forme d'énergie. En effet, l'Algérie avec plus de deux millions de km² de superficie, reçoit l'équivalent de 300 milliards de Tep (tonne d'équivalent pétrole) par an en énergie solaire [4].

L'atout majeur de l'Algérie réside dans son fort taux d'ensoleillement. En effet, l'Algérie dispose d'un des gisements solaire les plus élevés au monde vue de sa localisation géographique. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara) [5].

Lors de la conférence-débat "Le potentiel, les opportunités et les défis de la mise en place des énergies renouvelables en Algérie" organisée à la fin de 2018 par le collectif de réflexion CARE, le consultant et chercheur dans le secteur des énergies renouvelables, M'hamed Hammoudi, a indiqué que le potentiel photovoltaïque de l'Algérie est estimé à près de 2,6 millions de

térawatts/heure (TW/h) par an, soit 105 fois la consommation mondiale d'électricité, ce consultant a fait savoir que logiquement, les wilayas du sud sont celles pouvant contribuer le plus dans la production des énergies renouvelables au vu de la surface disponible et du taux d'ensoleillement ; ces wilayas étant Tamanrasset avec un potentiel de contribution à la production photovoltaïque nationale de 28%, Adrar avec 21%, Illizi avec 14% puis Tindouf, Bechar et Ouargla avec 7,5% chacune [6].

Le tableau I.1 : Durée d'ensoleillement sur la quasi-totalité du territoire national [7].

Régions	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie en %	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement en heure/an	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue en KWh/m ² /an	1700	1900	2650

L'énergie reçue annuellement sur une surface horizontale de 1m² soit près de 3 KWh/m² au nord et dépasse 5,6 KWh/m² au Grand Sud [6].

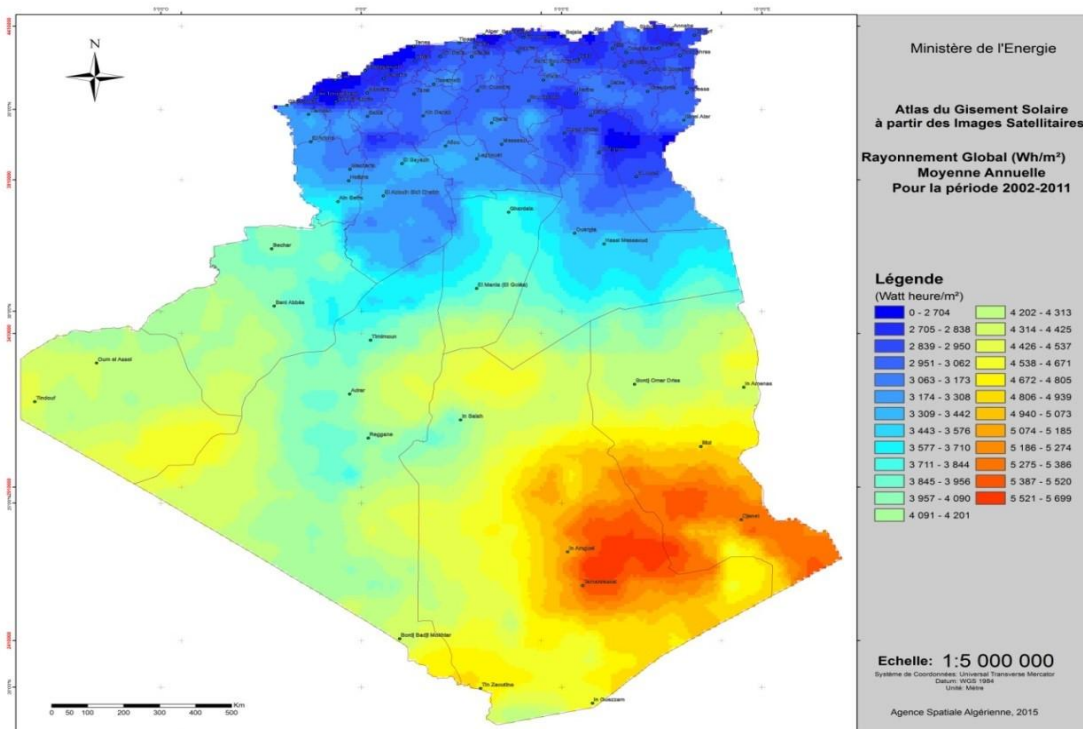


Figure I.2 : Carte de l'Irradiation Globale Directe Annuelle Moyenne (Période 2002-2011) [1].

Cette richesse d'énergies renouvelables, donne à notre pays une longévité de consommation énergétique propre, dont le solaire prend la part du lion.

I.4. Caractéristiques du rayonnement solaire :

I.4.1. Spectre solaire :

Le spectre du soleil c'est sa décomposition en longueurs d'onde ou « couleur ». En effet, la lumière solaire est composée de tous sorts de rayonnement de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde. Les photons (grains de lumière ce rayonnement électromagnétique) sont porteurs d'une énergie qui est reliée à leur longueur d'onde par la relation [8]:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

- ✓ h : la constante de Planck [j.s] ;
- ✓ ν : la fréquence [Hz] ;
- ✓ c : la vitesse de la lumière [m/s] ;
- ✓ λ : longueur d'onde [m].

C'est cette relation, mise à jour par Louis de Broglie en 1924 qui a confirmé la nature à la fois corpusculaire et andulaire de la lumière : présence de corpuscules (les photons) et propagation d'onde avec une fréquence de vibration et une longueur d'onde [8].

I.4.2. Masse d'air :

La masse d'air ou Air mass en anglais, correspond à la perte de l'énergie solaire par l'absorption atmosphérique. Elle est définie par le rapport entre l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu [8] [9].

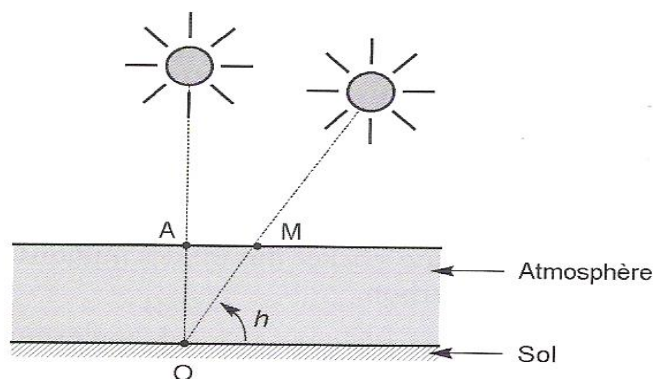


Figure I.3 : Définition de la masse d'air.

À l'aide des points O, A et M et cet angle h représentés à la figure (I.3), on écrit la longueur du trajet du soleil à travers l'atmosphère [8] [9]:

$$OM = \frac{OA}{\sin h} \quad (I.2)$$

Donc la masse d'air :

$$\frac{OM}{OA} = \frac{1}{\sin h} \quad (I.3)$$

Où l'angle h est l'élévation solaire, c'est-à-dire l'angle entre le rayonnement solaire et l'horizontal à la terre.

Dans l'expression AM x, le x désigne ce rapport ($\frac{OM}{OA}$)

Citons, à titre d'exemple [8] [9]:

AM1 : La masse d'air AM1 correspond à l'éclairement solaire arrivant à la surface de la terre en incidence normale (position du Soleil au zénith; $h=90^\circ$) ;

AM2 : L'éclairement solaire arrivant sur la terre avec un angle de 30° ;

AM1.5 : L'éclairement solaire arrivant sur la terre avec un angle de 48° est de 1000 W/m^2 (soit 100 mW/cm^2). Cette masse d'air sert de standard pour quantifier les performances de nouveaux dispositifs photovoltaïques ;

Et par convention, AM0 correspond à une masse d'air nulle pour un éclairement solaire au delà de l'atmosphère à incidence normale (spectre valable pour les applications spatiales).

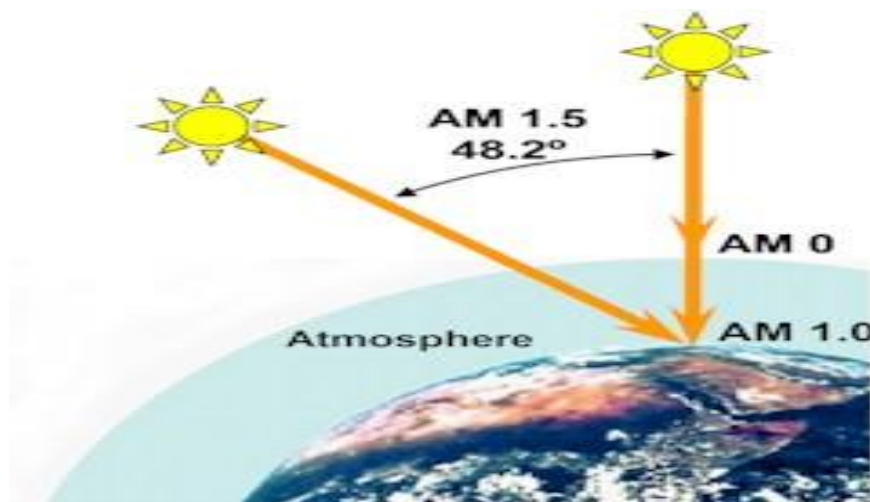


Figure I.4 : Définition du nombre de la masse d'air AM.

I.4.3. Rayonnement extraterrestre :

Le rayonnement solaire reçu à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre s'appelle le rayonnement solaire extraterrestre. La distribution spectrale du rayonnement solaire extraterrestre suit approximativement la distribution d'un corps noir à une température de 5760 K dont le maximum est situé dans le domaine visible (voir figure I.5), tandis que les valeurs de spectre de rayonnement solaire au niveau de la mer sont toujours inférieures, en raison de l'influence de l'atmosphère terrestre [10].

Une courbe standard de la répartition spectrale du rayonnement solaire extraterrestre, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom AM0, sa distribution en énergies est répartie comme suit [8] :

- ✓ 6,4 % dans la bande ultraviolette (UV) : $0,20 < \lambda \leq 0,38 \mu\text{m}$;
- ✓ 48 % dans la bande visible : $0,38 < \lambda \leq 0,78 \mu\text{m}$;
- ✓ 45,6 % dans la bande infrarouge (IR) : $0,78 < \lambda \leq 10\mu\text{m}$.

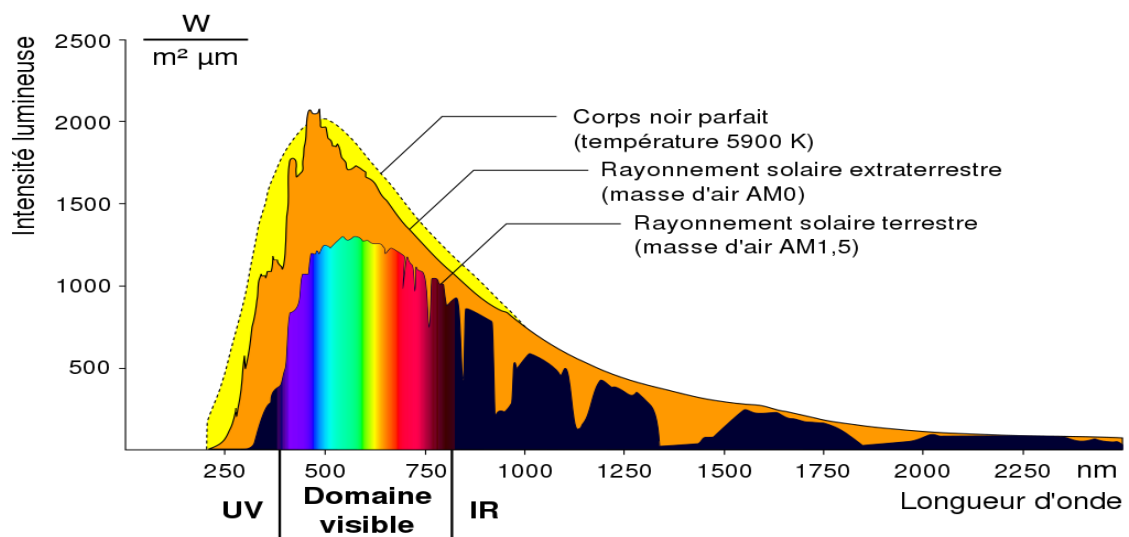


Figure I.5 : Répartition spectrale de rayonnement solaire.

Sur la figure (I.5) le spectre d'un corps noir dont la température serait de 5900K, très proche du spectre solaire AM0, le soleil donc souvent assimilé à ce corps noir, ce qui permet aux physiciens d'élaborer des modèles pour expliquer son comportement et ses émissions de rayonnement, tandis que le spectre noté AM1.5, sert de référence pour la mesure de cellules photovoltaïques, et les simulateurs servant à mesurer les modules tentent de le reproduire aussi fidèlement que possible [8].

Tableau I.2 : Comparaison entre le rayonnement solaire extraterrestre et le rayonnement du corps noir [8][11].

région spectrale en (μm)	pourcentage de rayonnement solaire extraterrestre %	pourcentage de rayonnement de corps noir %
Ultraviolette $0,20 < \lambda \leq 0,38$	6,4	9,9
visible $0,38 < \lambda \leq 0,78$	48	46,4
infrarouge $0,78 < \lambda \leq 10$	45,6	43,6

I.4.4. Constante solaire :

La densité moyenne d'énergie reçue par la terre, appelée constante solaire, est de 1367 W/m^2 . La valeur réelle du rayonnement extraterrestre varie de $\pm 3.3\%$ au cours de l'année du fait de l'ellipticité de l'orbite terrestre [12].

I.4.5. Rayonnement solaire incident :

Le rayonnement total reçu sur une surface, appelée rayonnement solaire incident (ou encore éclairement énergétique global), est défini par la somme de trois composantes (direct, diffus et albédo).

I.4.5.1. Rayonnement direct :

Provenant directement du Soleil en ligne droite (Ses rayons sont parallèles entre eux et sans diffusion par l'atmosphère). Cette composante s'annule si le Soleil est caché par des nuages ou par un obstacle. Il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs [12] [13].

I.4.5.2. Rayonnement diffus :

Correspondant au rayonnement reçu de la voûte céleste, hors rayonnement direct. Cette énergie diffusée par des composants atmosphériques, comme les nuages et des particules de poussière et dirigée vers la surface de la Terre, peut atteindre 50 % du rayonnement global reçu, lorsque le Soleil est bas sur l'horizon, et 100 % pour un ciel entièrement couvert [13].

I.4.5.3. Rayonnement réfléchi :

Correspondant au rayonnement réfléchi par l'environnement extérieur, en particulier le sol, dont le coefficient de réflexion est appelé "albédo" [13].

Une valeur d'albédo de 1,0 signifie que 100 % du rayonnement solaire est réfléchi, une valeur de zéro signifie que la réflexion est nulle [14].

Tableau I.3 : Valeur du coefficient d'albédo moyen selon la nature du sol [14].

Nature du sol	Coefficient d'albédo moyen
Neige immaculée	0,82
Neige sale	0,6
Sols rocheux	0,22
Sable	0,20
Zones forestières	0,07

En général, le rayonnement direct est le composant le plus important du rayonnement total, suivi du rayonnement diffus. Le rayonnement réfléchi ne constitue généralement qu'une proportion négligeable du rayonnement total, à l'exception des endroits proches de surfaces très réfléchissantes, par exemple une couverture de neige [15].

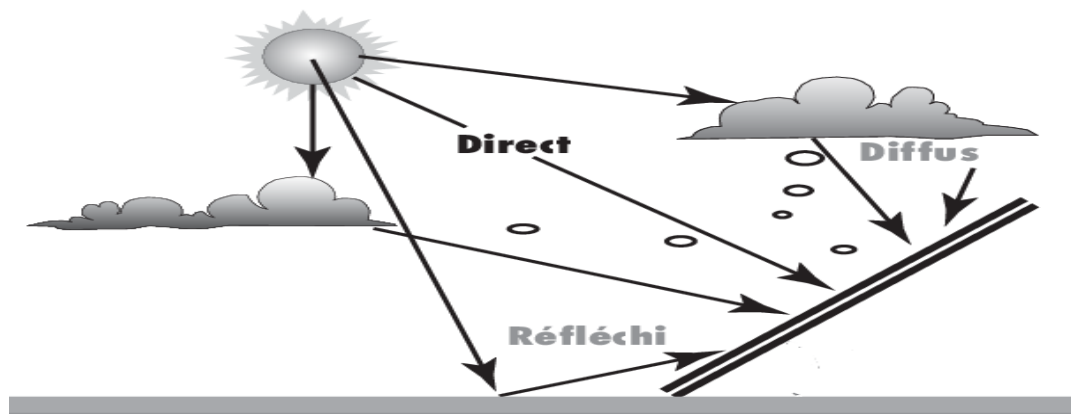


Figure I.6: Composantes du rayonnement solaire au sol.

Les rayonnements émis sont de type électromagnétique. Ils constituent un spectre continu allant des ultra-violets à l'infrarouge en passant par le visible ou il émet avec le maximum d'intensité. Les rayons solaire prennent 8.33 minutes pour arriver à la terre puisque ils se propagent à une vitesse de 3×10^5 (km/s) et la distance entre le terre et le soleil 150×10^6 (km) [9].

I.5. Systèmes photovoltaïques :**I.5.1. Que signifie photovoltaïque ?**

Le photovoltaïque est un adjectif pour identifier tout ce qui a à voir avec l'effet photovoltaïque et l'énergie photovoltaïque, plus précisément. Ce concept d'énergie solaire fait référence à la production d'électricité par le soleil. Le sens du photovoltaïque vient de la composition du photon et du volt [16].

Le photon est le quantum d'énergie associé aux ondes électromagnétiques. En théorie quantique des champs, le photon est la particule médiatrice de l'interaction électromagnétique. Autrement dit, lorsque deux particules chargées électriquement interagissent, cette interaction se traduit d'un point de vue quantique comme un échange de photons. Dans la conception actuelle de la lumière, les ondes électromagnétiques, des ondes radio aux rayons gamma en passant par la lumière visible, sont toutes constituées de photons [17] [18].

En revanche, un volt est l'unité de force électromotrice et de différence de potentiel. De cette façon, il est facile de déduire la relation entre la lumière visible ou le rayonnement solaire avec la génération d'énergie électrique ou d'électricité [16].

I.5.2. Effet photovoltaïque :

L'effet photoélectrique est un phénomène physique découvert par le physicien français Edmond Becquerel en 1839. Il se caractérise par la production d'électricité en convertissant l'énergie émise par le soleil sous forme de photons à l'aide d'un matériau semi-conducteur appelé cellule solaire.

Ce phénomène ne peut se produire que s'il existe une barrière de potentiel dans le semi-conducteur avant qu'il ne soit éclairé. Une telle barrière existe, par exemple, à l'interface entre deux volumes dopés différemment c'est à dire où l'on a introduit deux types différents d'impuretés à concentration différente, par exemple de type P-N. Si ce matériau est éclairé, les charges électriques, rendus mobiles par la lumière (l'effet photoélectrique), seront séparées par la barrière avec d'un côté les charges positives et de l'autre côté les charges négatives [19].

I.5.3. Energie solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique produite par une conversion directe de l'énergie solaire (l'énergie lumineuse) grâce à une cellule photovoltaïque qui est constitué par un semi-conducteur traité.

I.5.4. Cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque, ou encore appelé cellule solaire est un composant électronique (assimilable à une diode photosensible) réalisé à l'aide de matériaux semi-conducteurs traité, dont les propriétés optoélectronique permettent de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. Cette cellule est individuellement caractérisée par de faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt (0.5V à 0.6V) [20] [21].

Elle peut être utilisée seul ou assemblé à d'autres cellules solaires pour former un module (un panneau) photovoltaïque, dont le but est de produire plus d'énergie (puissance). Cette énergie électrique peut être soit [22] :

- ✓ Alimenter un besoin sur place en association avec un moyen de stockage (accumulateurs appelés batteries) ;
- ✓ Injectée, après transformation en courant alternatif, dans un réseau de distribution électrique (le stockage n'étant alors pas nécessaire).

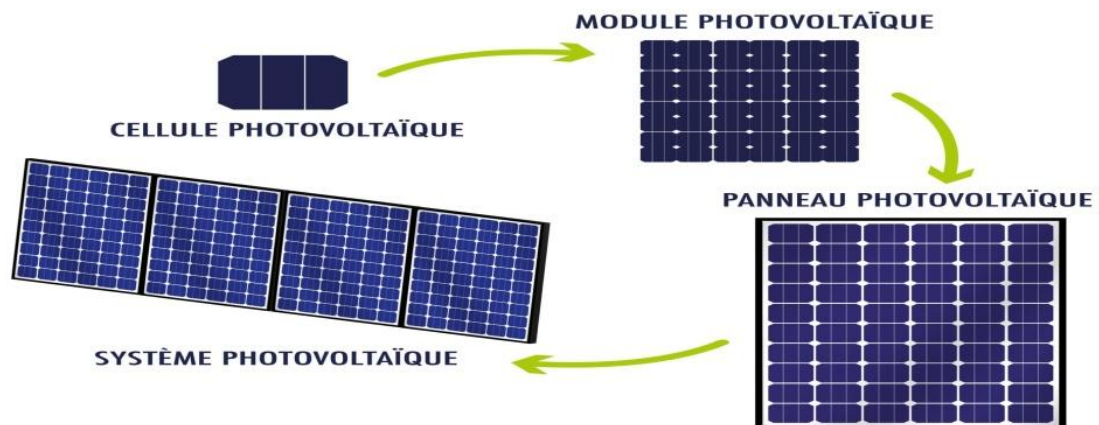


Figure I.7: De la cellule solaire au système photovoltaïque.

I.5.5. Conversion photovoltaïque :

La conversion photovoltaïque aujourd'hui largement utilisée peut être simplement définie comme la transformation de l'énergie des photons en énergie électrique grâce au processus d'absorption de la lumière par la matière [23].

I.5.6. Technologies des cellules photovoltaïques :

Les technologies cristallines à base de silicium (multi cristallin et mono cristallin) sont de loin les plus utilisées aujourd'hui, du fait de ses bonnes propriétés, et de son abondance naturelle, mais les technologies "couches minces", en particulier CIS et CdTe se développent de plus en plus sur le

marché. D'autres filières basées sur l'utilisation de colorants ou de matériaux organiques, encore à leur balbutiements, promettent un bel avenir à l'énergie photovoltaïque [24].

La caractéristique commune à toutes les technologies photovoltaïques est la mise en présence dans le matériau de la cellule d'un donneur et d'un accepteur d'électrons pour permettre ce déplacement de charges. Une fois transféré dans un circuit électrique extérieur, celui-ci prend la forme d'un courant électrique continu [24].

De manière générale, les cellules photovoltaïques peuvent être vues comme un empilement de matériaux [24]:

La couche active ou l'absorbeur : constituée d'un premier matériau accepteur d'électrons et d'un second matériau donneur d'électrons, formant une jonction donneur-accepteur ;

Les contacts métalliques avant et arrière : constituant les électrodes positive (+) et négative (-) chargées de collecter le courant généré ;

Des couches supplémentaires : comme un antireflet ou une couche plus fortement dopée permettant d'améliorer les performances de la cellule : meilleure absorption de la lumière, meilleure diffusion des porteurs de charges dans le matériau etc.

Ainsi, ce qui différencie une technologie solaire d'une autre, c'est principalement la nature de l'absorbeur. De ses propriétés physico-chimiques dépendent les procédés de dépôt utilisés, la nature et les caractéristiques des autres composants de la cellule (antireflet, électrodes...) ainsi que son **architecture globale** : type de substrat, épaisseur, positionnement des électrodes etc

I.5.7. Comment fonctionne une cellule solaire photovoltaïque?

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. Entre les deux zones se développe une jonction PN avec une barrière de potentiel [25].



Figure I.8 : Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

Lorsque ce matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont bombardés par les photons constituant la lumière ; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être arrachés/décrochés. Mais une partie de ces électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons décrochés créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : C'est l'effet photovoltaïque. La zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode (contact avant) et surtout de collecteurs d'électrons, tandis qu'une plaque métallique (contact arrière) recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode [25].

Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux électrons par collision. Si l'énergie transmise est supérieure à celle associée à la bande interdite du semi-conducteur, des paires électrons-trous sont alors créées dans cette zone de déplétion par arrachement des électrons. Sous l'effet d'un champ électrique E qui règne dans cette zone, ces porteurs libres sont drainés vers les contacts métalliques des régions P et N. Il en résulte alors un courant électrique dans la cellule PV et une différence de potentiel (de 0.6 à 0.8 Volt) supportée entre les électrodes métalliques de la cellule, communément nommée tension de circuit ouvert fortement dépendante de la température. Le courant maximal PV se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées. On parle alors de courant de court-circuit dépendant fortement du niveau d'éclairement [25].

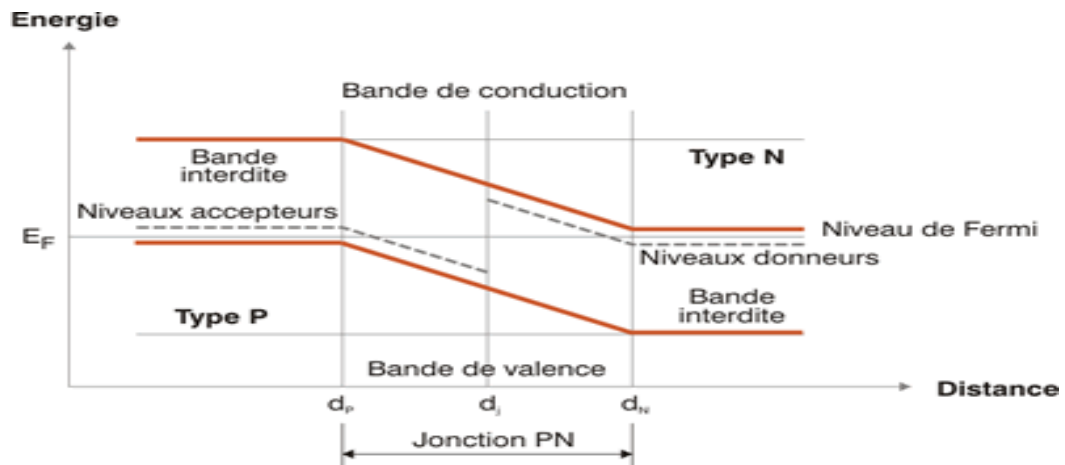


Figure I.9: Représentation des niveaux d'énergie au voisinage de la jonction.

I.5.8. Types d'assemblages électriques :

Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Un assemblage mixte (série/ parallèle) est possible pour augmenter les deux paramètres simultanément. Dans tous les cas, la puissance électrique sera proportionnelle à la surface du module, c'est-à-dire augmente avec le nombre de cellules qui sont généralement identiques pour faciliter les processus industriels et optimiser le rendement des capteurs.

I.5.8.1. Assemblage de panneaux photovoltaïques en série :

Le montage de panneaux photovoltaïques en série est l'option à retenir lorsque l'on souhaite additionner les voltages de chaque panneau en préservant un ampérage identique. On relie les pôles positifs d'un panneau aux pôles négatifs d'un autre panneau. Ce type de branchement s'effectue avec des panneaux de même ampérage. En effet si l'on relie deux panneaux d'ampérage différent, l'ensemble s'aligne sur l'ampérage le plus faible [26] [27].

Imaginons que sur ces 3 panneaux (voir figure I.10), l'un d'eux ait une intensité de 4 Ampères, l'Ampérage total serait de 4 Ampères même si les autres sont à 8 Ampères. Par contre si nous avons :

$$V = 24 + 12 + 10 = 46 V$$

Et comme la puissance maximum est obtenue en multipliant la tension maximum par le courant maximum, soit

$$P = V \times I \quad (\text{I.4})$$

On peut conclure que l'inconvénient de cette connexion en série est qu'il y a perte de puissance si l'un des panneaux est ombragé (arbre, bâtiment, etc.). Nous montrons un exemple très simple, en prenons toujours c'est 3 panneau solaire en plein soleil avec un ampérage de 8 A et un voltage de 72 V (voir figure I.10), alors la puissance sera calculer comme suit :

$$P = V \times I = 72 \times 8 = 576 \text{ W}$$

Maintenant, on suppose que l'un de ces 3 panneaux est ombragé et que l'ampérage descend à 4 A (Tous les panneaux seront à 4 A), alors la puissance sera :

$$P = V \times I = 72 \times 4 = 288 \text{ W (Perte de moitié).}$$

Cela nous amène à conclure qu'il faut bien étudier l'emplacement de ses panneaux solaire.

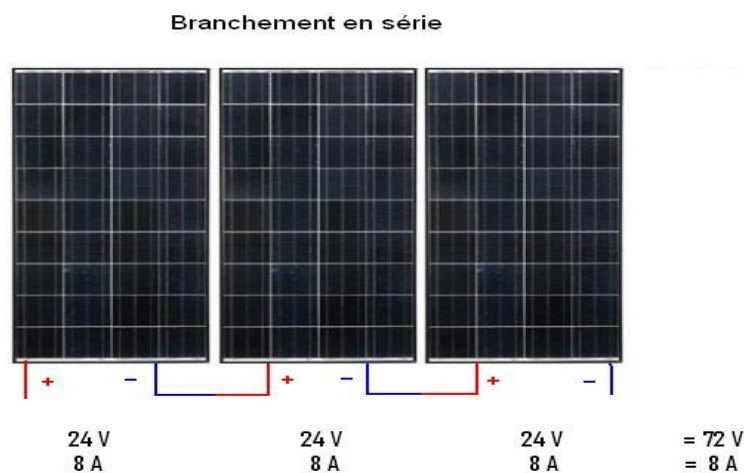


Figure I.10: Branchement de panneaux en série.

I.5.8.2. Assemblage de panneaux photovoltaïques en parallèle :

Le montage des panneaux photovoltaïques en parallèle additionne les intensités tandis que la tension reste identique. Ce type de raccordement influe donc sur l'ampérage et non sur le voltage (C'est le branchement idéal lorsque l'on a besoin d'une plus grosse intensité). Les bornes positives de chaque panneau sont reliées entre elles, de même que les bornes négatives. On choisit ce type de branchement lorsque l'on souhaite une forte intensité. Afin d'éviter les risques de surtension et de court-circuit, on relie entre eux des panneaux de même voltage. On peut par contre utiliser des panneaux d'intensité différente afin d'atteindre l'ampérage désiré [26] [27].

Imaginons que sur ces 3 panneaux (voir figure I.11), l'un d'eux ait une intensité de 5 Ampères, l'Ampérage total serait :

$$I = 5 + 8 + 8 = 21 \text{ A}$$

Contrairement à l'assemblage en série, c'est le bon choix lorsqu'il peut y avoir un ombrage sur les panneaux photovoltaïques, reprenons le même exemple précédent (voir l'assemblage en série) mais cette fois-ci avec une connexion en parallèle [26] [27] :

La puissance de trois panneaux en plein soleil sera :

$$P = V \times I = 72 \times 8 = 576 \text{ W} \text{ (Exactement comme le montage en série).}$$

Dans le cas où l'un de ces 3 panneaux est ombragé, l'intensité descend à 4 Ampères. Nous aurons toujours 24 V de tension et 8 A + 8 A + 4 A d'intensité puisque dans le montage en parallèle les intensités s'additionnent alors que dans le montage en série c'est la plus petite qui prime. La puissance sera donc :

$$P = V \times I = 24 \times 20 = 480 \text{ W} \text{ (Nous avions 288 W dans le montage en série).}$$

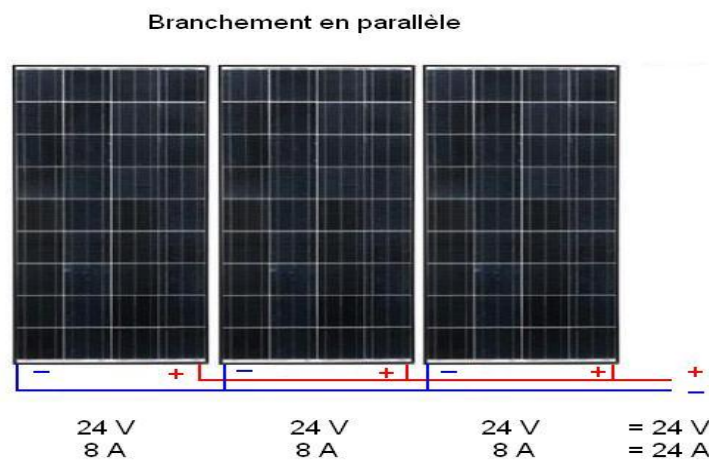


Figure I.11: Branchement de panneaux en parallèle.

I.5.8.3. Assemblage mixte (série / parallèle) :

C'est l'assemblage qui s'impose lorsque l'on a besoin d'une certaine puissance à une tension voulue, les règles du montage en série et celles du montage en parallèle s'appliquent dans le cas du montage mixte [27].

Il convient d'avoir des panneaux de même tension et de même intensité, c'est plus simple pour faire ses calculs et ça évite des problèmes [27].

Un ensemble monté en série s'appelle un string, il est possible d'ajouter des panneaux de mêmes tensions dans les strings pour augmenter la tension, par exemple un panneau de 24 V si vous avez besoin d'une tension de 96 V. Ou alors d'ajouter un ou plusieurs strings si vous avez besoin de plus d'intensité pour plus de puissance [27].

Si dans cet exemple (voir figure I.12) on ajoute un string nous allons obtenir:

$$P = V \times I = 72 (8 + 8 + 8) = 72 \times 24 = 1728 \text{ W}$$

Quelque soit le branchement, il faut systématiquement une mise à la terre.

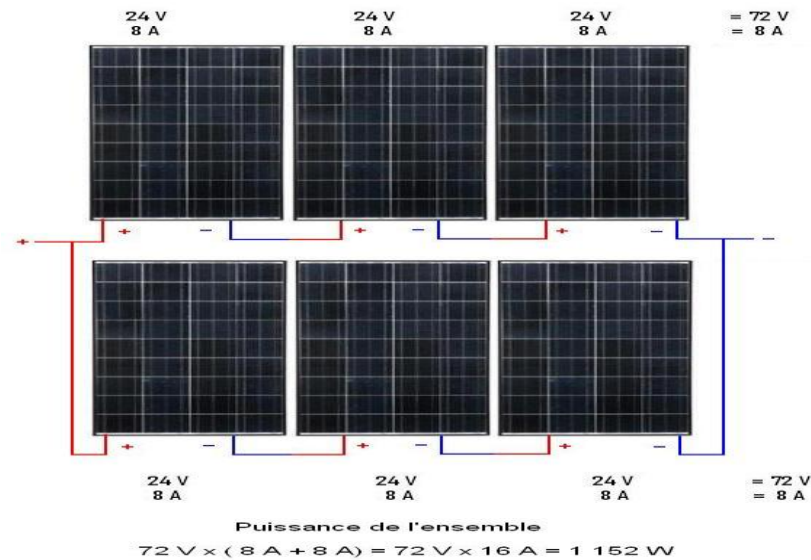


Figure I.12: Branchement de panneaux mixte.

I.5.9. De quoi se compose un système photovoltaïque ?

Un module photovoltaïque ne suffit généralement pas pour alimenter régulièrement une application. Tout comme l'éclairage, l'énergie qu'il fournit est très variable, et toujours en courant continu : il faut souvent la stocker et parfois la transformer .on appelle système photovoltaïque l'ensemble des composants nécessaires a l'alimentation d'une application en tout fiabilité. (voir figure I.13) montre quelles sont ses fonctions [8].

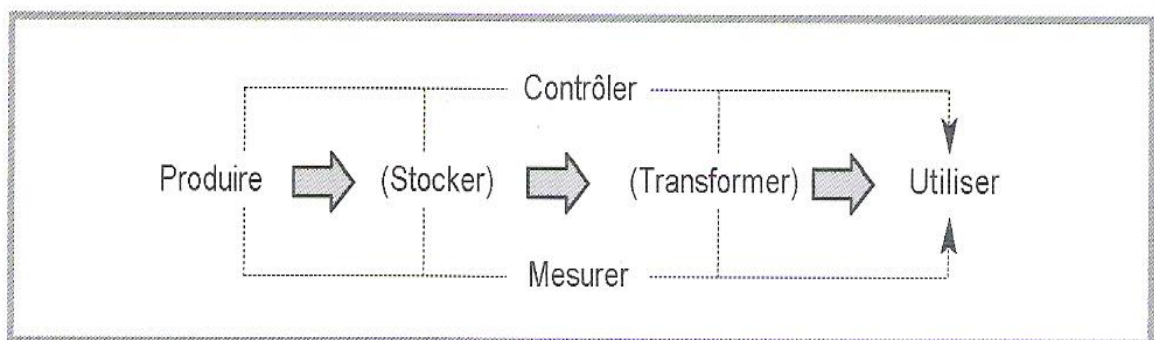


Figure I.13: Fonction principale d'un système photovoltaïque.

Les fonctions entre parenthèses ne sont pas toujours présentes, cela dépend du cas de figure. Quant à fonction « contrôler », elle est indispensable pour veiller à ce que les composants ne soient pas endommagés et durent le plus longtemps possible, surtout la batterie, qui a la durée de vie la plus faible. « Mesurer » est utile pour avoir des informations sur le fonctionnement de l'ensemble [7].

I.5.10. Description des éléments du système photovoltaïque :**I.5.10.1. Module photovoltaïque :**

Le module comprend plusieurs cellules photovoltaïques assemblées les unes aux autres grâce à un circuit électrique, le module photovoltaïque est l'élément central d'un système photovoltaïque. Pour éviter les endommagements causés par le retour du courant dans le module, une diode by-pass est installée sur chaque diode. La dimension des modules photovoltaïques varie d'un constructeur à un autre [28].

I.5.10.2. Onduleur :

L'onduleur a pour fonction de transformer le courant continu venant des panneaux en courant alternatif. L'utilisation d'un onduleur n'est pas indispensable pour les sites isolés.

I.5.10.3. Convertisseur :

Les convertisseurs permettent d'adapter la puissance engendrée afin de la rendre utile. On en a deux types de convertisseurs pour un panneau solaire : les DC/DC et les DC/AC. Les premiers procurent une tension DC différente de celle entrante et les autres permettent d'obtenir une tension alternative.

I.5.10.4. Batterie solaire :

La batterie a pour rôle de stocker l'énergie destinée à être utilisée lorsque les panneaux ne créent pas d'énergie comme la nuit. Les batteries solaires sont indispensables sur un site isolé. Les batteries sont chargées durant les périodes de jour afin de pouvoir alimenter le site la nuit ou les jours de très mauvais temps.

I.5.10.5. Régulateur ou contrôleur de charge :

Le régulateur permet de réguler l'énergie provenant des panneaux jusqu'à que la batterie arrête le chargement, lorsqu'elle est totalement chargée afin d'éviter une surcharge et une décharge, en contrôlant l'énergie sortante. Le régulateur évite que la batterie vieillisse prématurément et optimise la charge et la décharge. La plupart des appareils électriques de grande consommation fonctionnent en courant alternatif. Ces appareils nécessiteront un onduleur qui transformera le courant continu, produit par les panneaux, en courant alternatif.

On conclut que l'électricité produite en courant continu par les panneaux solaires est stockée dans des batteries, Un régulateur solaire protège les batteries des décharges trop profondes

et des surcharges. L'électricité est consommée dans les récepteurs, suivant les besoins de l'utilisateur :

- ✓ En courant continu (12V, 24V) directement depuis la batterie, pour les petits systèmes ;
- ✓ En courant alternatif 230V, via un onduleur, pour les systèmes plus gros.

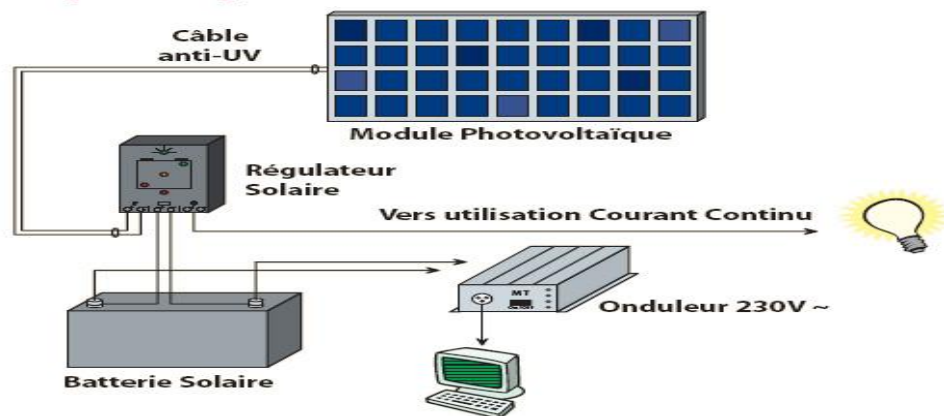


Figure I.14 : Principe d'une installation solaire autonome.

I.5.10.11. Différentes configurations des systèmes photovoltaïques :

On peut distinguer deux grandes applications du photovoltaïque selon que le système est raccordé au réseau public de distribution ou non. Les systèmes hybrides comportant d'autres sources d'énergie renouvelable que le photovoltaïque (éolien, micro hydraulique...) ne sont pas abordés, bien que la démarche de conception soit semblable.

I.5.11.1. Systèmes photovoltaïques non raccordés au réseau :

Parmi les systèmes photovoltaïques non raccordés au réseau, on peut distinguer les systèmes autonomes fonctionnant sans autre source d'énergie que le photovoltaïque et les systèmes hybrides faisant appel à une ou plusieurs sources d'énergie complémentaires, d'origine renouvelable ou non du type éolien, hydraulique, groupe électrogène ou autres. Ces systèmes non raccordés au réseau sont conçus pour apporter avant tout un service aux utilisateurs. C'est pour cela que la notion de système photovoltaïque évoque l'ensemble des composants : production, stockage, gestion, conversion, distribution et utilisation. On peut distinguer les systèmes fonctionnant sans stockage (au fil du soleil) et les systèmes avec stockage par accumulateurs [29].

I.5.11.1.1. Systèmes photovoltaïques autonomes sans stockage :

Ils fonctionnent de la façon suivante. En journée, le générateur photovoltaïque alimente l'utilisation directement ou via un convertisseur Courant Continu/Courant Continu (DC/DC) ou Courant Continu/Courant Alternatif (DC/AC). La puissance délivrée à l'utilisation est fonction de l'ensoleillement. Durant la nuit, l'utilisation n'est plus alimentée et donc est à l'arrêt. Les principales applications photovoltaïques fonctionnant au fil du soleil sont les suivantes : le pompage, la ventilation, la production de froid, le dessalement d'eau de mer, entre autres [29].

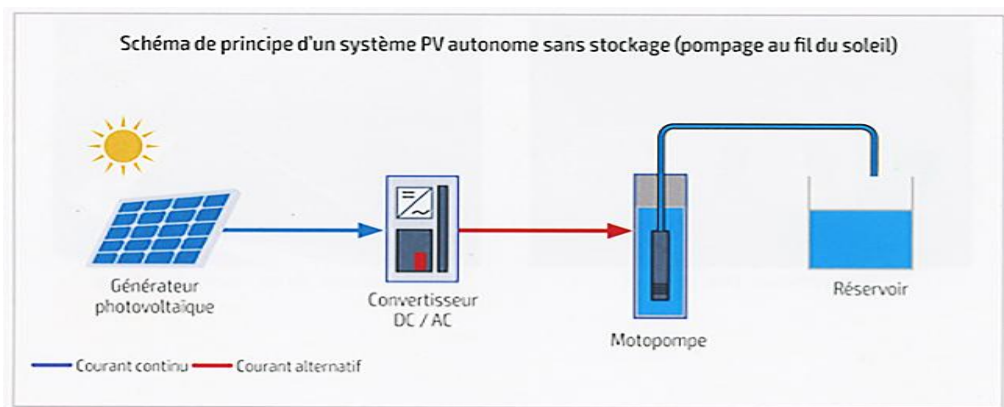


Figure I.15 : Principe d'un système PV autonome sans stockage (pompage au fil du soleil).

I.5.11.1.2. Systèmes photovoltaïques autonomes avec stockage :

Leur principe de fonctionnement est le suivant. En journée, le générateur photovoltaïque alimente les récepteurs courant continus en fonctionnement et charge la batterie de stockage. Un contrôleur de charge évite la surcharge de la batterie en cas de surproduction solaire. Durant la nuit et par mauvais temps, les récepteurs sont alimentés par la batterie. Un limiteur de décharge protège la batterie en cas de décharge profonde. En présence de récepteurs fonctionnant en alternatif, un onduleur autonome convertit la tension continue en tension alternative, permettant ainsi leur alimentation [29].

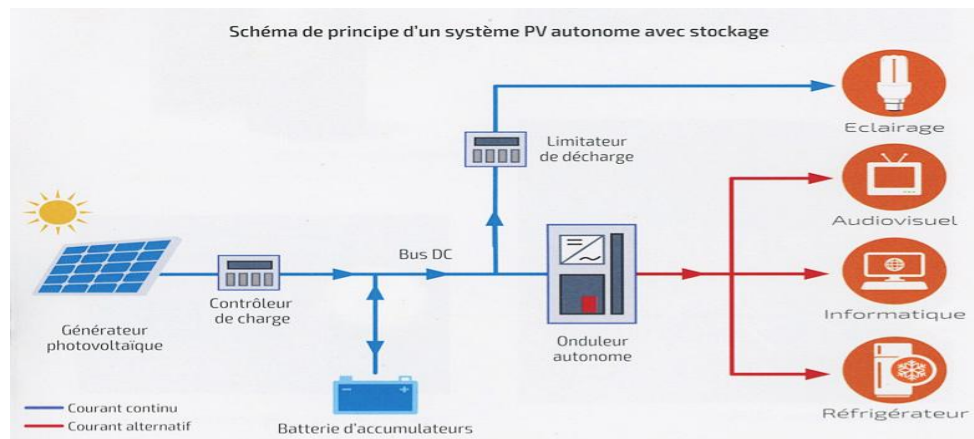


Figure I.16 : Schéma de principe d'un système PV autonome avec stockage.

I.5.11.2. Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau :

Les systèmes PV raccordés au réseau sont avant tout des équipements de production destinés à produire de l'énergie électrique d'origine photovoltaïque qui va être injectée sur un réseau électrique alimenté par d'autres sources de production, à partir de machines tournantes de puissance beaucoup plus importante. On peut considérer deux architectures électriques de raccordement, selon que l'énergie produite est consommée sur le site de production (autoconsommation) ou non (injection totale) [29].

I.5.11.2.1. Systèmes PV raccordés au réseau avec injection totale :

Ils peuvent être conçus sans ou avec stockage.

I.5.11.2.1.1. Injection totale sans stockage :

Le principe de fonctionnement de ces systèmes est le suivant. Un générateur photovoltaïque transforme directement le rayonnement solaire en électricité. Le courant continu produit par les modules photovoltaïques est transformé, via un onduleur PV, en courant alternatif compatible avec les caractéristiques électriques du réseau public de distribution. L'énergie produite est intégralement injectée sur le réseau public de distribution afin d'être valorisée dans les meilleures conditions économiques pour le producteur. En cas de défaillance du réseau électrique (perte de tension ou tension et fréquence hors tolérance), l'onduleur PV s'arrête de fonctionner [29].

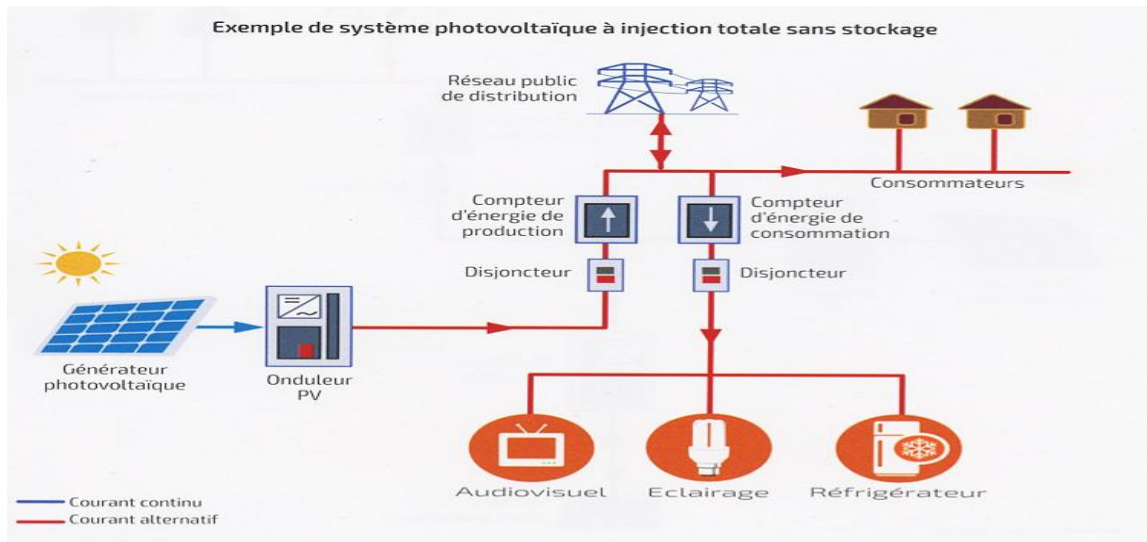


Figure I.17 : Exemple de système photovoltaïque à injection totale sans stockage.

I.5.11.2.1.2. Injection totale avec stockage :

Le principe de fonctionnement est le même que précédemment mais un stockage d'énergie par accumulateurs est intégré à la centrale de production. Toutefois, pour des raisons économiques, le stockage est très limité et a pour but de lisser la production et/ou de restituer l'énergie en fin de journée pour faire face à un pic de consommation sur le réseau électrique.

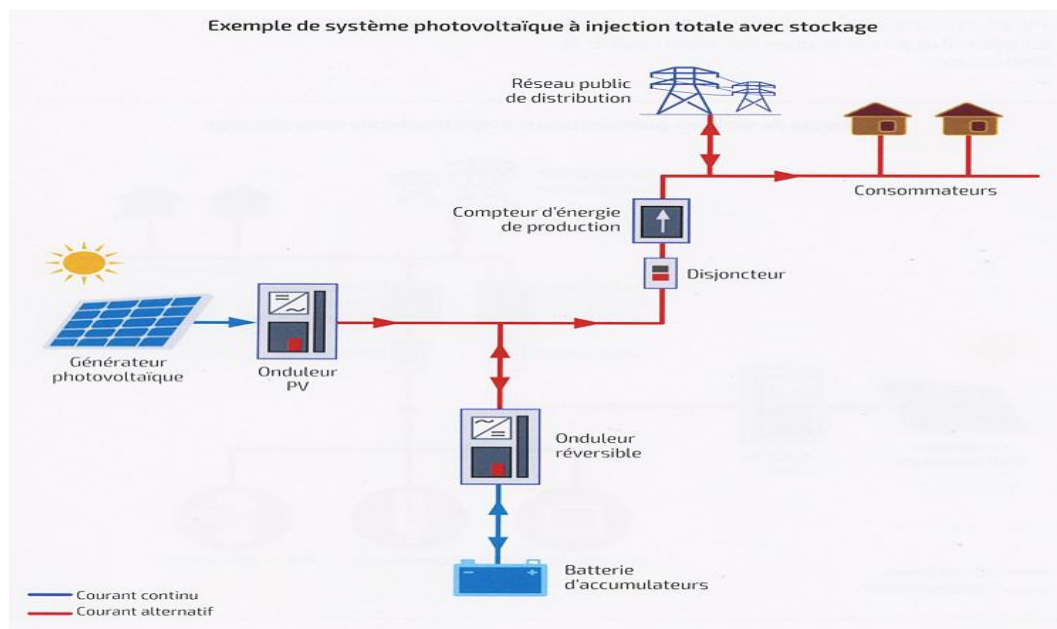


Figure I.18 : Exemple de système photovoltaïque à injection totale avec stockage

I.5.11.2.2. Systèmes PV raccordés au réseau avec autoconsommation :

En autoconsommation, deux configurations sont possibles.

I.5.11.2.2.1. Autoconsommation sans stockage :

Le système photovoltaïque fonctionne comme précédemment mais il est connecté directement sur l'installation électrique intérieure du site. L'électricité solaire est autoconsommée par les récepteurs en service. L'excédent éventuel d'électricité solaire produite est injecté dans le réseau public de distribution. En cas de défaillance du réseau électrique (perte de tension ou tension et fréquence hors tolérance), l'onduleur photovoltaïque s'arrête de fonctionner et les récepteurs ne sont plus alimentés [29].

L'intérêt d'un tel système est le suivant :

- ✓ pour le producteur/consommateur : réduction de sa facture d'électricité (surtout si le prix du kWh acheté au réseau est supérieur au coût de l'énergie photovoltaïque produite) et valorisation éventuelle du surplus d'énergie produite, si un tarif d'achat est institué ;
- ✓ pour le gestionnaire de réseau : réduction de la fourniture d'électricité (tout ce qui est fourni localement n'est pas à produire par les autres sources généralement d'origine fossiles) [29].

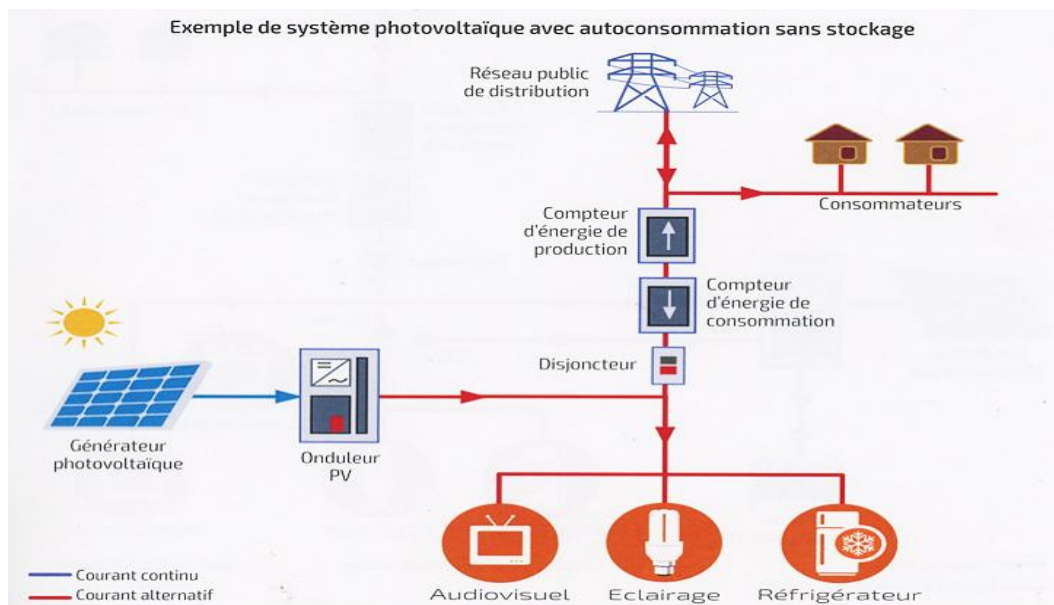


Figure I.19: Exemple de système photovoltaïque avec autoconsommation sans stockage

I.5.11.2.2.2. Autoconsommation avec stockage :

Le principe est le même que précédemment, mais un stockage d'énergie par accumulateurs est intégré au système, ce qui permet de stocker l'énergie produite par le générateur photovoltaïque en journée et de la restituer le soir pour la consommation locale. Cependant, pour des raisons

économiques, le stockage est limité à quelques heures de fonctionnement et ne permet pas de s'affranchir totalement du réseau électrique [29].

L'intérêt d'un tel système est identique au précédent, mais avec un taux d'autoconsommation supérieur. De plus, en cas de défaillance réseau, cette configuration donne souvent la possibilité d'alimenter d'une manière autonome les récepteurs prioritaires pendant quelques heures, et assure ainsi une fonction de secours. Toutefois, ce système présente l'inconvénient d'un stockage électrochimique entraînant un coût d'investissement, d'entretien, de renouvellement, de recyclage, entre autres [29].

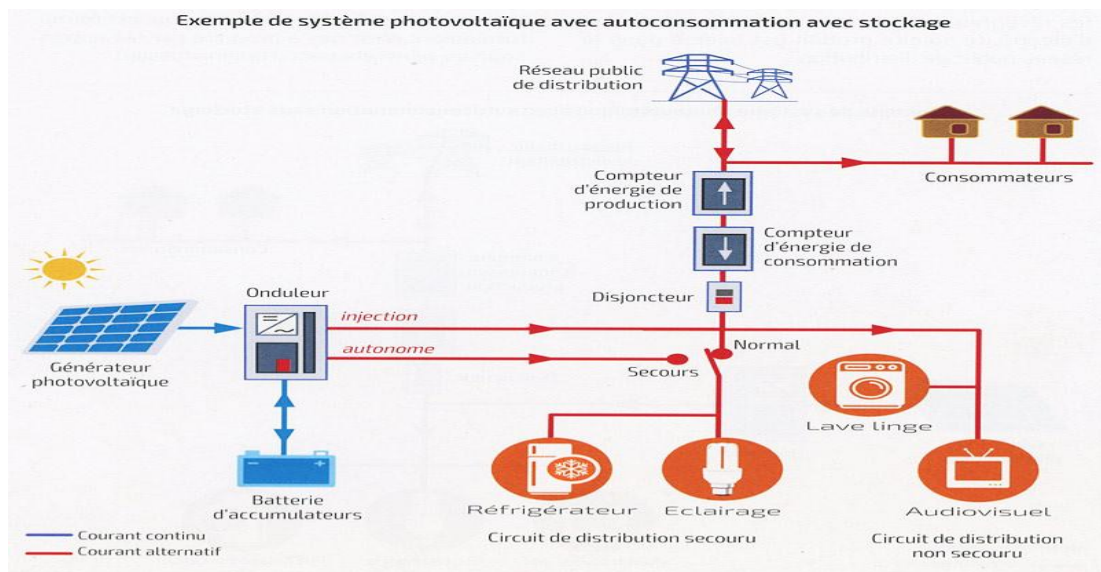


Figure I.20: Exemple d'un système photovoltaïque avec autoconsommation avec stockage.

I.5.11.3. Systèmes photovoltaïques hybrides :

On peut considérer deux architectures électriques de systèmes hybrides selon la présence ou non de stockage [29] :

- ✓ des systèmes photovoltaïques avec accumulateurs couplés avec une source d'énergie renouvelable (éolien, micro hydraulique...) et/ou un groupe électrogène,
- ✓ des systèmes photovoltaïques sans accumulateurs couplés avec des groupes électrogènes.

I.5.11.3.1. Systèmes photovoltaïque hybrides avec stockage :

En journée, le générateur photovoltaïque charge la batterie et alimente simultanément l'onduleur, qui convertit la tension continue en tension alternative et permet l'alimentation des récepteurs fonctionnant en alternatif. Un contrôleur de charge évite la surcharge de la batterie en

cas de surproduction solaire. Durant la nuit, l'onduleur est alimenté par la batterie de stockage. En cas d'insuffisance d'ensoleillement ou de plus forte consommation des récepteurs, un groupe électrogène de secours ou d'appoint permet l'alimentation directe des récepteurs et la recharge de la batterie pour assurer la continuité de service [29].

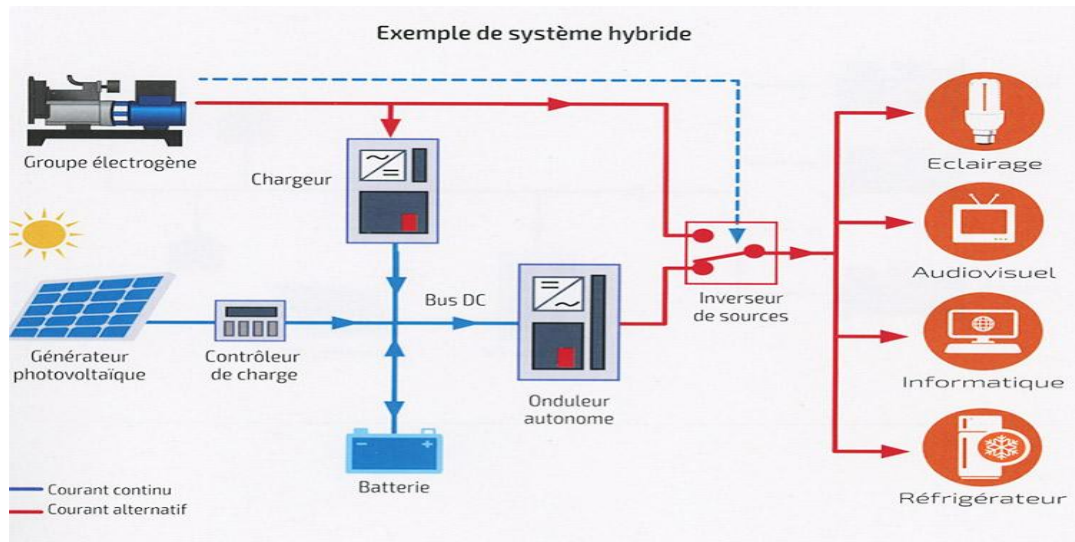


Figure I.21: Exemple d'un système hybride avec stockage.

I.5.11.3.2. Systèmes photovoltaïques hybrides sans stockage :

Les groupes électrogènes alimentent en permanence un réseau électrique de distribution. Le générateur PV injecte sur le réseau une puissance variable en fonction de l'ensoleillement. Toute l'énergie délivrée par le générateur PV n'est pas à fournir par les groupes électrogènes et réduit de fait la consommation de carburant et les coûts d'exploitation [29].

Les systèmes hybrides avec stockage (de quelques kW à quelques centaines de kW) sont très utilisés notamment pour l'alimentation d'habitations individuelles, de refuges de montagne, des relais de télécommunications de forte puissance, pour l'électrification villageoise. Les systèmes hybrides sans stockage (de quelques dizaines de kW à quelques MW) sont essentiellement utilisés pour l'électrification de gros villages et pour l'alimentation électrique de mines d'extraction de matières premières nécessitant une puissance élevée [29].

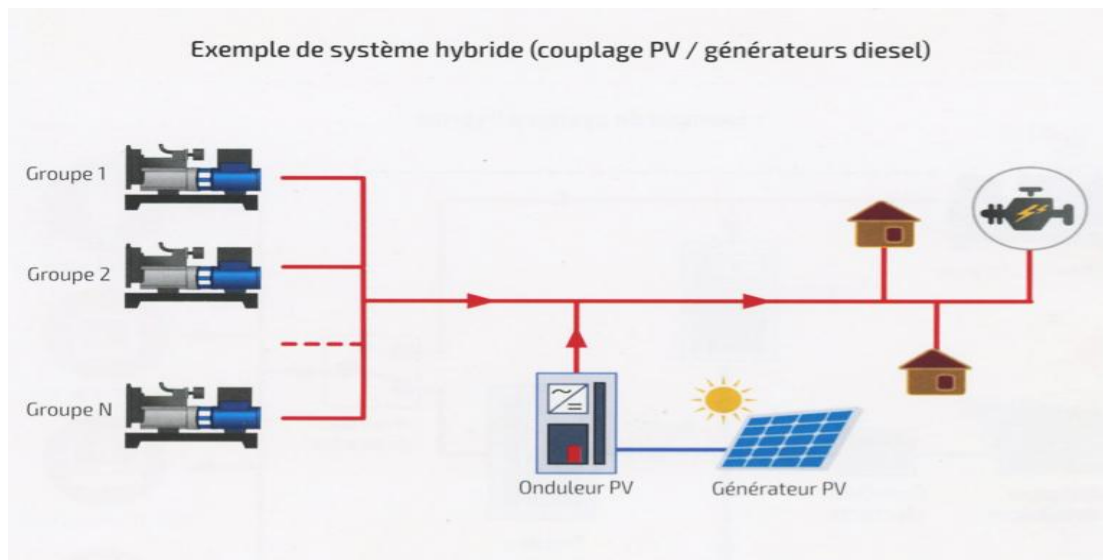


Figure I.22 : Exemple d'un système hybride.

I.5.12. Avantages et inconvénients de la technologie photovoltaïque :

Les avantages et les inconvénients de la technologie photovoltaïque les plus importants sont :

I.5.12.1. Avantages :

- ✓ Énergie indépendante, elle ne nécessite aucun combustible et aucun transport, en plus elle est gratuite et renouvelable ;
- ✓ Source d'énergie électrique silencieuse, propre et non-polluante (n'émettant aucun gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets) ;
- ✓ Réduit la vulnérabilité aux pannes d'électricité ;
- ✓ Un simple montage et les installations sont adaptable aux besoins de chaque projet (génère l'énergie requise) ;
- ✓ Permet de maîtriser l'augmentation des coûts énergétiques.

I.5.12.2. Inconvénients :

- ✓ La fabrication des panneaux photovoltaïques relève de la haute technologie demandant énormément de recherche et développement et donc des investissements coûteux ;
- ✓ Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles ;
- ✓ Nécessite un système d'accumulation (batteries) pour les installations domestiques ;
- ✓ Le coût des installations photovoltaïque est encore très élevé ;
- ✓ La production d'électricité n'est pas stable, elle dépend du niveau d'ensoleillement.

I.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions de base relatives au rayonnement solaire, tels que le spectre solaire et la masse d'air. Ensuite, nous avons décrit la cellule solaire, son principe de fonctionnement, ainsi que ses différents montages constituant le panneau solaire. Finalement, on a présenté les avantages et les inconvénients de la technologie photovoltaïque.

Chapitre II

Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque

II.1. Introduction :

Dans ce chapitre, on va présenter les caractéristiques fondamentales d'une cellule solaire et décrire son fonctionnement en utilisant le modèle standard à une diode établi par Shocky. Par la suite, on va modéliser et simuler par l'outil MATLAB/Simulink un générateur photovoltaïque (KC200GT) composé de 54 cellules en silicium polycristallin connectées en série, sous l'influence des conditions météorologiques (STC). À la fin, nous allons expliquer la méthode du suivi connue sous le nom MPPT et l'utilisation des convertisseurs DC-DC (Les Hacheurs).

II.2. Paramètres photovoltaïques d'une cellule solaire :

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser une cellule PV. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique $I(V)$. Les caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque varient en fonction de la température, de l'éclairement et, de façon générale, des conditions de fonctionnement lorsqu'il est connecté à une charge donnée.

Caractéristique $I=f(V)$: Sous un éclairement donné, un module photovoltaïque est caractérisé par une courbe courant-tension ($I-V$) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. Trois grandeurs physiques définissent cette courbe:

Courant de court-circuit noté I_{sc} : il s'agit du courant qui traverse la cellule photovoltaïque lorsque celle-ci est en court-circuit. Autrement dit, c'est le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même (le pôle + est relié au pôle -). La tension à ses bornes est alors nulle, et par conséquent la puissance fournie par le module ($P = V \times I$) est également nulle.

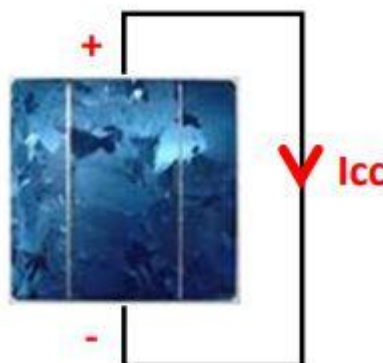


Figure II.1: Schéma d'une cellule éclairée raccordée à elle-même.

Tension de circuit ouvert notée V_{oc} : il s'agit de la tension aux bornes de la cellule lorsque celle-ci est en circuit ouvert. Autrement dit, c'est la tension maximale générée par une cellule éclairée non raccordée (le pôle + et le pôle - sont isolés électriquement de tout autre circuit électrique). Le courant la traversant est alors nul, ainsi la puissance fournie par la cellule est nulle.

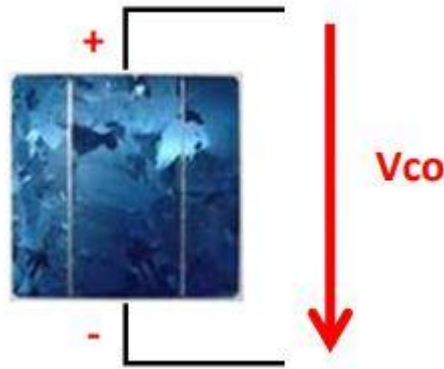


Figure II.2: Schéma d'une cellule éclairée non raccordée.

Point de puissance maximal MPP : (en anglais : maximal power point) obtenu pour une tension et un courant optimaux.

Puissance maximale P_{max} : est définie comme la puissance électrique maximale que peut fournir un module (ou un panneau) lorsqu'il est soumis aux conditions STC. Cette valeur est utilisée comme référence pour comparer les panneaux photovoltaïques entre eux [30].

$$P_{max} = V_{mpp} \times I_{mpp} \quad (\text{II.1})$$

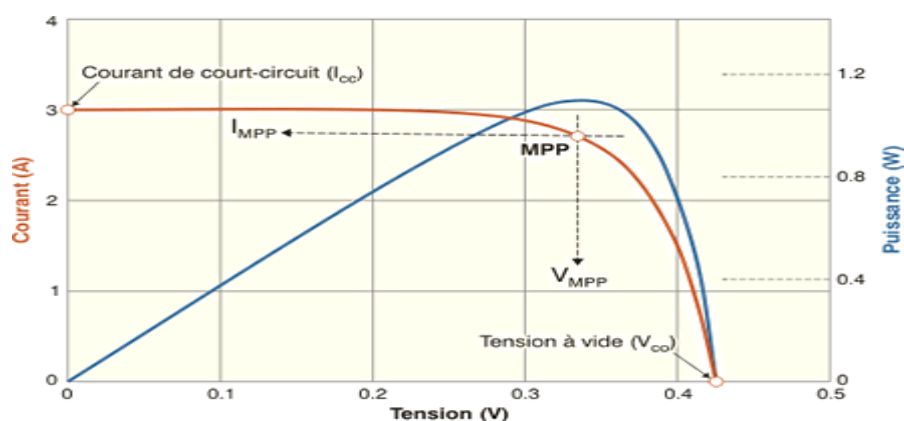


Figure II.3: Caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque.

Facteur de forme (FF) : Le facteur de forme est un paramètre sans dimension qui permet de juger de la qualité d'un module photovoltaïque. Il peut être également défini comme le rapport entre la

puissance maximale de sortie et le produit entre le courant de court-circuit et la tension en circuit-ouvert du module [23]. Ce rapport doit avoir une valeur la plus proche possible de 1 [31].

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (II.2)$$

$$FF = \frac{V_{mpp} \times I_{mpp}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (II.3)$$

Rendement photovoltaïque (η) : A partir de ces paramètres V_{OC} , I_{SC} et FF , il est possible de déterminer le rendement de la cellule. C'est le paramètre le plus important puisqu'il permet d'évaluer les performances de la cellule PV. C'est le rapport entre la puissance électrique optimale générée par la cellule et la puissance incidente du rayonnement lumineux éclairant la cellule. Il se calcule selon la formule suivante [31] :

$$\eta = \frac{P_{max}}{G \times S} \quad (II.4)$$

$$\eta = \frac{V_{mpp} \times I_{mpp}}{G \times S} \quad (II.5)$$

$$\eta = \frac{FF \times V_{oc} \times I_{sc}}{G \times S} \quad (II.6)$$

II.3. Zones de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque :

Le comportement d'un générateur photovoltaïque (GPV) dépend de la zone dans laquelle se trouve le point de fonctionnement [23]. La Figure (II.4) montre les trois principales zones de fonctionnement de la caractéristique I(V).

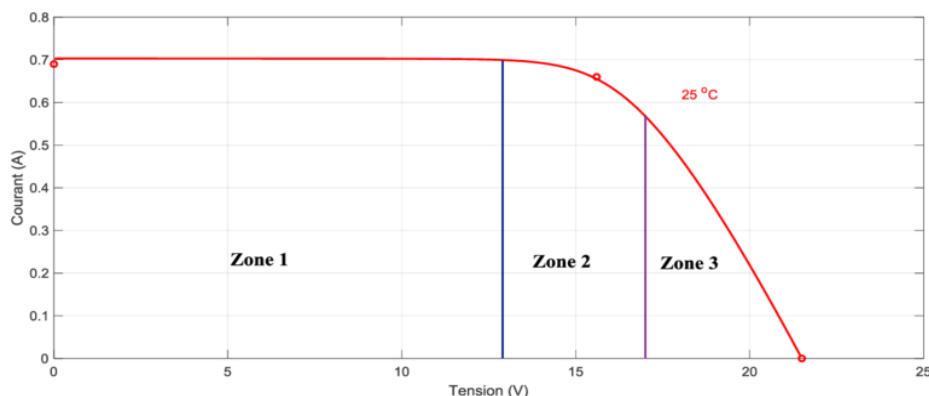


Figure II.4: Les différentes zones de la caractéristique I (V) aux conditions STC.

La caractéristique $I(V)$ d'un GPV constitué de plusieurs cellules a une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule (irradiation et température uniformes).

Nous pouvons décomposer la caractéristique $I(V)$ d'un GPV en 3 zones :

- ✓ **La zone 1 :** quant le point de fonctionnement appartient à cette zone, le courant reste constant quelle que soit la tension, le module photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant ;
- ✓ **La zone 2 :** correspond au coude de la caractéristique $I(V)$. Elle représente la meilleure région pour le fonctionnement du générateur photovoltaïque. Autrement dit, quand le point de fonctionnement appartient à cette zone l'exploitation d'énergie est maximale et la puissance délivrée est maximisée par rapport aux deux autres zones ;
- ✓ **La zone 3 :** quand le point de fonctionnement appartient à cette zone, la tension est presque constante malgré la variation du courant, dans ce cas le module photovoltaïque est assimilable à un générateur de tension [23].

II.4. Modélisation d'un générateur photovoltaïque :

Les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque. Un générateur PV est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel. Ainsi la caractéristique $I(V)$ du générateur PV est basée sur celle d'une cellule élémentaire modélisée par un circuit équivalent [32].

La modélisation des cellules photovoltaïques passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents. Pour cela il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément, en prenant plus ou moins de détails [33].

Plusieurs modèles sont développés pour représenter un comportement fortement non linéaire, résultant de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations. Ces modèles se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant du module photovoltaïque [33].

Parmi ces modèles, le modèle à une diode que nous allons utiliser pour notre simulation.

II.5. Présentation du modèle à une diode :

Le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque est décrit par le modèle « standard » à une diode établi par Shocky pour une seule cellule PV. Il est généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série ou en parallèle [34].

II.5.1. Modèle à trois paramètres :

C'est le modèle le plus simple utilisé pour représenter le cas idéal d'une cellule solaire. Il est connu sous le nom L3P (Lumped, 1 Mechanism model with 3 Parameters) [34]. Lorsqu'une cellule PV est sous illumination, des paires électrons-trous se créent et forment ainsi le courant photogénéré (I_{ph}). Sur le schéma équivalent, ce courant photogénéré est modélisé par l'ajout d'un générateur de courant en parallèle de la diode formée par la jonction P-N. Le schéma équivalent d'une cellule PV idéale est présenté sur la figure (II.5). La courbe courant-tension de la cellule photovoltaïque est donc la résultante du courant de polarisation du au déséquilibre des mouvements des porteurs au sein de la cellule et du courant photovoltaïque du à la création de porteurs sous éclairage. Cette courbe est décrite par l'équation (II.7). Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode ($V = V_d$) [31].

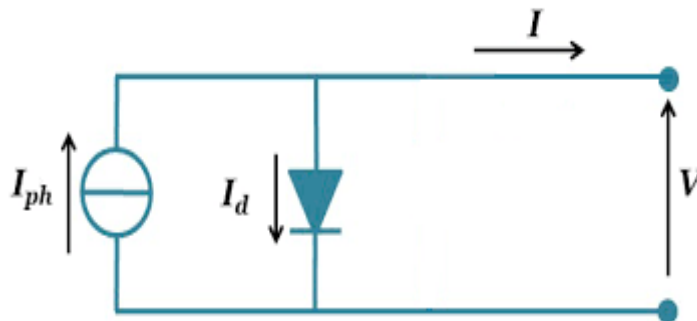


Figure II.5 : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L3P.

Dans le cas de cellules solaires au silicium monocristallin, on considère l'hypothèse d'une cellule idéale. Le facteur d'idéalité (A) est alors considéré comme égal à l'unité.

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

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (\text{II.7})$$

Avec :

I_{pv} : Courant généré par la cellule photovoltaïque.

I_{ph}: Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident)

I_d : Courant circulant dans la diode.

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

$$\mathbf{I_{ph}} = [\mathbf{I_{sc}} + \mathbf{K_i} (\mathbf{T_c} - \mathbf{T_{ref}})] \times \frac{\mathbf{G}}{\mathbf{G_{ref}}} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

I_{sc} : Courant de court-circuit du panneau (donné par le constructeur).

K_i : Courant de court-circuit divisé par le coefficient de température du panneau.

T_c : Température ambiante.

T_{ref} : Température de référence (298 K).

G : Irradiation sur la surface de la cellule.

G_{ref} : Irradiation de référence (1000 W/m²).

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I(V) est donnée par la relation :

$$\mathbf{I_d} = \mathbf{I_s} \left(e^{\frac{\mathbf{V_d}}{\mathbf{V_t}}} - 1 \right) \quad (\text{II.9})$$

Avec :

$$\mathbf{V_d} = \mathbf{V_{pv}} + \mathbf{R_s} \times \mathbf{I_{pv}} \quad (\text{II.10})$$

$$\mathbf{V_t} = \frac{\mathbf{AKT}}{\mathbf{q}} \quad (\text{II.11})$$

Dans le cas idéal $R_s = 0$ et R_{sh} infini.

I_s : Courant de saturation de la diode.

V_d : Tension aux bornes de la diode.

V_{pv} : Tension de sortie.

V_t : Tension thermique.

K : Constant de Boltzmann ($1,3805 \cdot 10^{-23}$ J/K).

q : Charge de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C).

II.5.2. Modèle à cinq paramètres :

C'est le modèle utilisé pour représenter le cas réel d'une cellule solaire. Il est connu sous le nom L5P (Lumped, 1 Mechanism model with 5 Parameters). Le schéma équivalent de la cellule PV réelle est constitué d'une diode (d) caractérisant la jonction P-N, une source de courant I_{ph} caractérisant le photo-courant, une résistance série R_s et une résistance (shunt) R_{sh} . Ce modèle fait donc intervenir les cinq paramètres inconnus suivants: A (le facteur d'idéalité de la jonction), I_{ph} , R_s , R_{sh} et I_s [34].

Ce modèle tient compte non seulement des pertes en tension exprimée par la résistance série R_s mais aussi des fuites de courants exprimées par une résistance parallèle R_p . C'est le modèle sur lequel s'appuient les constructeurs en donnant les caractéristiques techniques de leurs cellules solaires (data sheet). Il est aussi considéré satisfaisant et même une référence pour les constructeurs pour cataloguer typiquement les modules solaires [35].

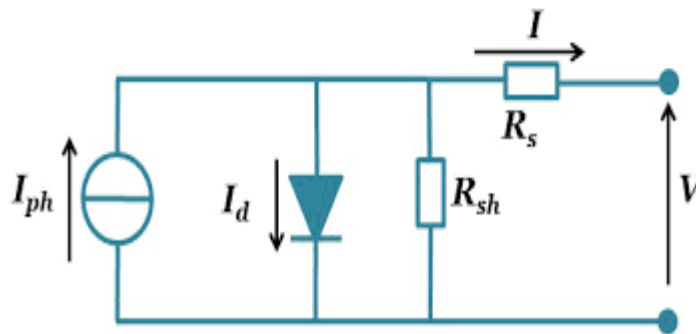


Figure II.6: Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L5P.

Le modèle à cinq paramètres offre un bon compromis entre simplicité et précision. L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff:

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{II.12})$$

Avec :

I_{sh} : Le courant circulant dans la résistance R_{sh} est calculé par l'équation suivante :

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + I_{pv} \times R_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.13})$$

$$I_d = I_s \left(e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) = I_s \left(e^{\frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{V_t}} - 1 \right) \quad (\text{II.14})$$

Le courant de saturation (I_s) de la diode pour une température donnée (T_c) est calculé par l'équation suivante :

$$I_s = I_{rs} \times \left(\frac{T_c}{T_{ref}} \right)^{\frac{3}{A}} e^{\left[\frac{E_g}{V_t} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_c} \right) \right]} \quad (\text{II.15})$$

Avec :

T_c : Température donnée.

T_{ref} : température de référence aux STC.

E_g : Énergie de gap du semi-conducteur.

A : Facteur d'idéalité de la diode compris entre 1 et 2.

I_{rs} : Courant de saturation inverse de référence de la diode.

R_s : Résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi-conducteur, ainsi les résistances ohmiques et de contact au niveau des connexions des cellules.

R_{sh} : Résistance shunt représente les fuites autour de la jonction p-n dues aux impuretés et sur les coins de cellule.

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante :

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \times R_s}{V_t} \right)} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + I_{pv} \times R_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.16})$$

II.6. Développement du modèle mathématique d'un GPV :

Le terme générateur photovoltaïque GPV est utilisé pour désigner, selon l'application considérée, un module ou un panneau PV. Toutefois, il peut faire allusion au système PV tout entier. Pour la suite de notre travail, on utilisera le terme GPV pour désigner un module composé de 54 cellules PV (panneau PV) [36]. Les GPV sont habituellement branchés en série-parallèle pour augmenter la tension et l'intensité du courant à la sortie du générateur. Les grandeurs électriques pour un GPV sont données sous la forme suivant :

Tableau (II.1) : Grandeurs électriques pour un GPV.

Paramètres pour une cellule PV	Paramètres pour un GPV
Isc	Np . Isc
Voc	Ns . Voc
Iph	Np . Iph
Ipv	Np . Ipv
Is	Ns . Is
Vpv	Ns . Vpv
Vt	Ns . Vt
Rs	$\frac{Ns}{NP} \cdot Rs$
Rsh	$\frac{Ns}{Np} \cdot Rsh$

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

$$I = Np \times Iph - Np \times Is \left(e^{\left(\frac{Ns \times Vpv + Np \times Ipv \times \frac{Ns}{NP} \times Rs}{Ns \times Vt} \right)} - 1 \right) - \frac{Ns \times Vpv + Np \times Ipv \times \frac{Ns}{NP} \times Rs}{\frac{Ns}{NP} \times Rsh} \quad (II.17)$$

En pratique, les paramètres de la cellule sont donnés (par le fabricant) dans des conditions de test standard (STC : Standard Test Conditions).

II.7. Simulation du générateur photovoltaïque :

Pour la réalisation de notre travail. La modélisation et la simulation ont été effectuées sous le logiciel MATLAB/Simulink (voir Annexe 1).

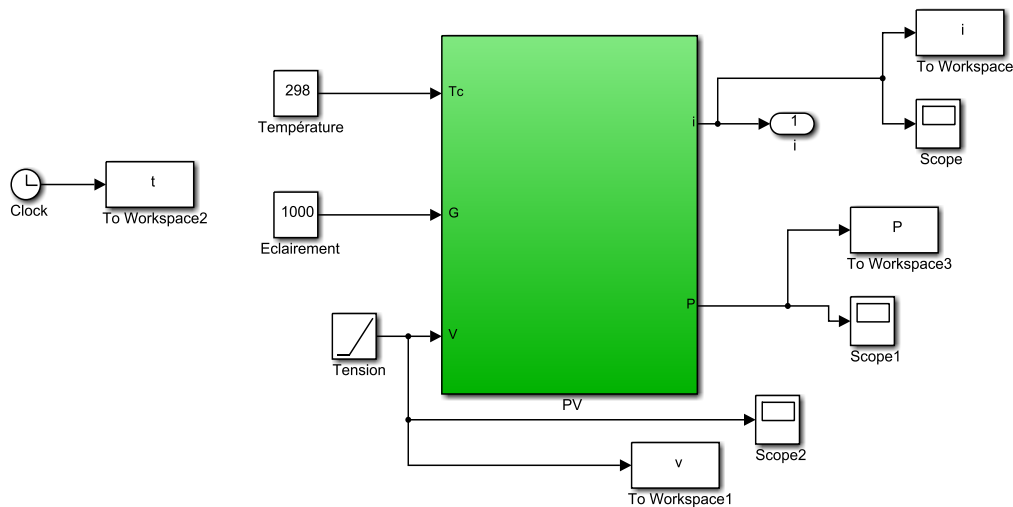


Figure II.7 : Block SIMULINK du générateur photovoltaïque.

Nous avons choisi Le **KC200GT** qui est un GPV en silicium polycristallin, composé de 54 cellules connectées en série. Ce GPV fournit une puissance optimale de l'ordre de 200 W (-5% /+ 10%) sous l'influence des conditions météorologiques spécifiques (STC).

Les paramètres caractéristiques électriques de GPV (voir Annexe 2) considéré dans les conditions standards $G = 1000W/m^2$, $T = 25^{\circ}C$ sont données dans le tableau (II.2) :

Tableau (II.2) : Caractéristiques électriques Du GPV (KC200GT)

Paramètres	Symboles	Valeurs
Nombre de cellule en série	Ns	54
Nombre de cellule en parallèle	Np	1
Energie de gap [eV]	Eg	1.2
Résistance shunt [Ω]	Rsh	415.405
Résistance série [Ω]	Rs	0.221
Courant de court-circuit divisé par le coefficient de température du panneau [A/K]	Ki	0.0032
Courant de court circuit [A]	Isc	8.21
Tension de circuit ouvert [V]	Voc	32.9
Facteur d'idéalité de la diode	A	1.3



Figure II.8 : Générateur photovoltaïque (KC200GT).

Les résultats de simulation de la caractéristique I(V) pour différentes températures et éclairements donnée par le fabricant (Kyocera) sont présentés sur les graphes ci-dessous :

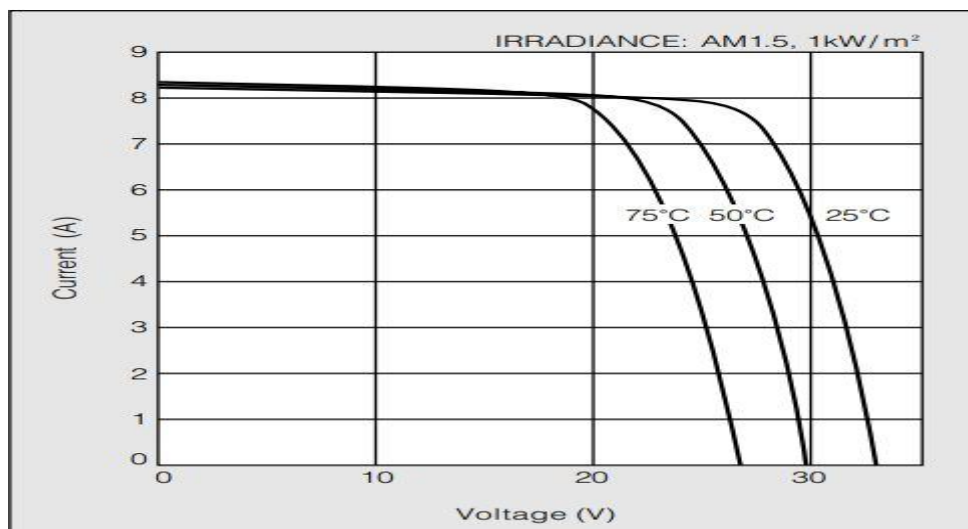


Figure (II.9) : Caractéristique I(V) du GPV donné par le fabricant (Kyocera) pour différentes températures.

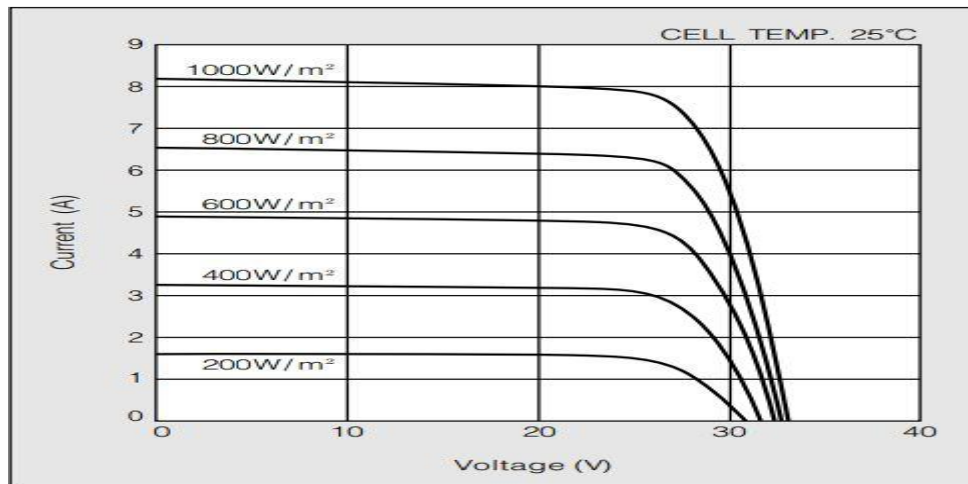


Figure II.10 : Caractéristique I(V) du GPV donné par le fabricant (Kyocera) Pour différents éclairements.

Les résultats de notre simulation sont présentés sur les graphes ci dessous.

II.7.1. Caractéristiques I(V) et P(V) du générateur PV :

Les courbes courant-tension I (V) et puissance-tension P (V) illustrées respectivement dans les figure (II.11) et (II.12) décrivent le comportement d'un module solaire (vis-à-vis des charges possibles) composé de 54 cellules sous l'influence des conditions météorologiques spécifiques, c'est-à-dire sous un niveau d'éclairement de 1000 W/m^2 et une température ambiante de $T=25^\circ\text{C}$.

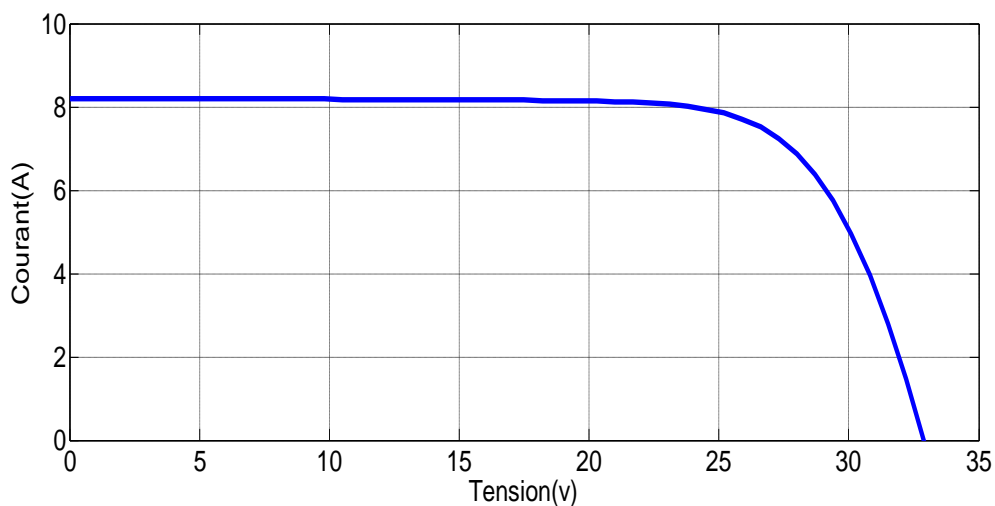


Figure (II.11): Caractéristique I (V) d'un GPV.

Sur la figure (II.11). Le courant de court-circuit I_{sc} est égal à 8.21A et la tension de circuit ouvert V_{oc} est 32.9 v.

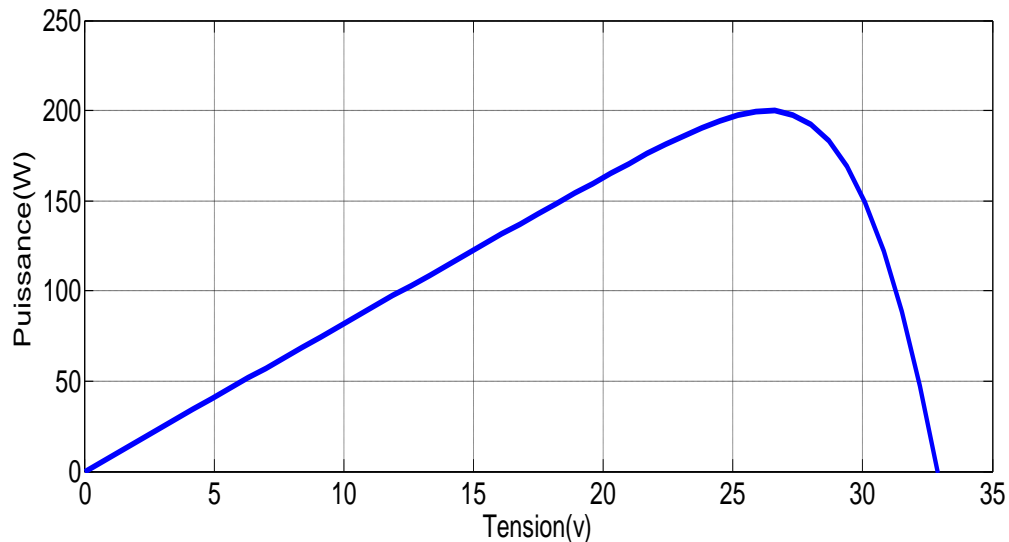


Figure (II.12) : Caractéristique P (V) d'un GPV.

La puissance maximale est de 200W. On remarque, un fort accroissement de la puissance à mesure que la tension augmente. Cette puissance atteint une valeur optimale ensuite elle décroît.

En effet, c'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque.

II.7.2. Effets climatiques sur le générateur PV :

La température et l'éclairement modifient la caractéristiques I (V) de la cellule PV, c'est-à-dire les valeurs I_{sc} , V_{oc} , I_{mpp} et V_{mpp} :

II.7.2.1. Influence de la température :

La température est un paramètre très important dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques parce que les propriétés électriques d'un semi-conducteur sont très sensibles à la température [23].

Pour voir l'influence de la température sur le module photovoltaïque, nous avons tracé des courbes I (V) et P (V) pour différentes températures de fonctionnement à une irradiation constante de 1000 W/m^2 . Voir Figures (II.13) et (II.14).

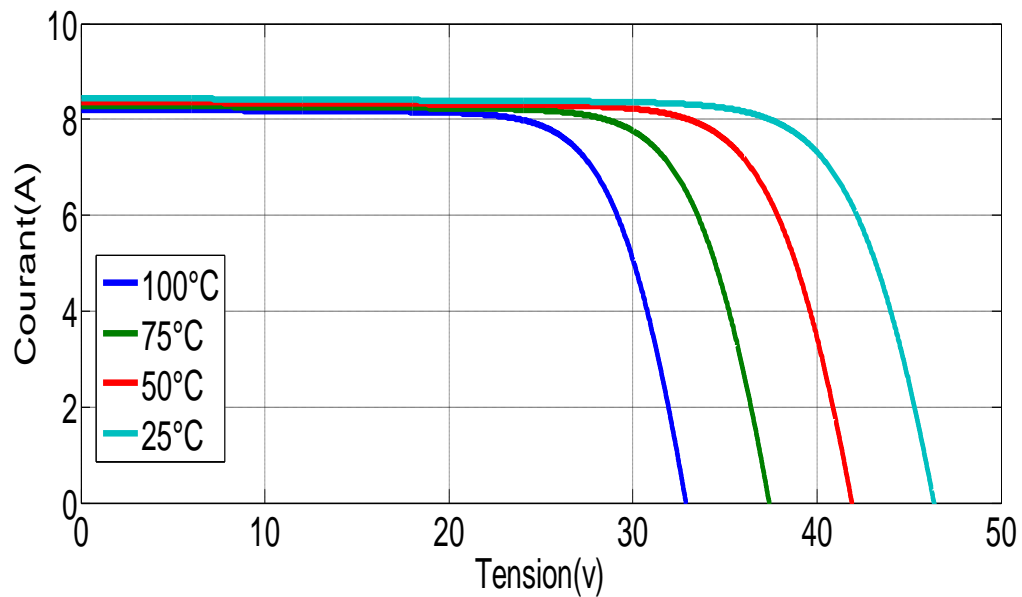


Figure (II.13) : Caractéristique I(V) d'un GPV pour différentes températures.

D'après la figure (II.13), Nous observons un léger accroissement du courant à mesure que la température augmente. Alors on peut dire que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. En même temps, on remarque que la température influence négativement sur la tension en circuit ouvert, car celle-ci baisse assez fortement lorsque la température augmente.

Par conséquent, la puissance maximale du module photovoltaïque va subir une diminution (ce qui est confirmé sur la figure II.14).

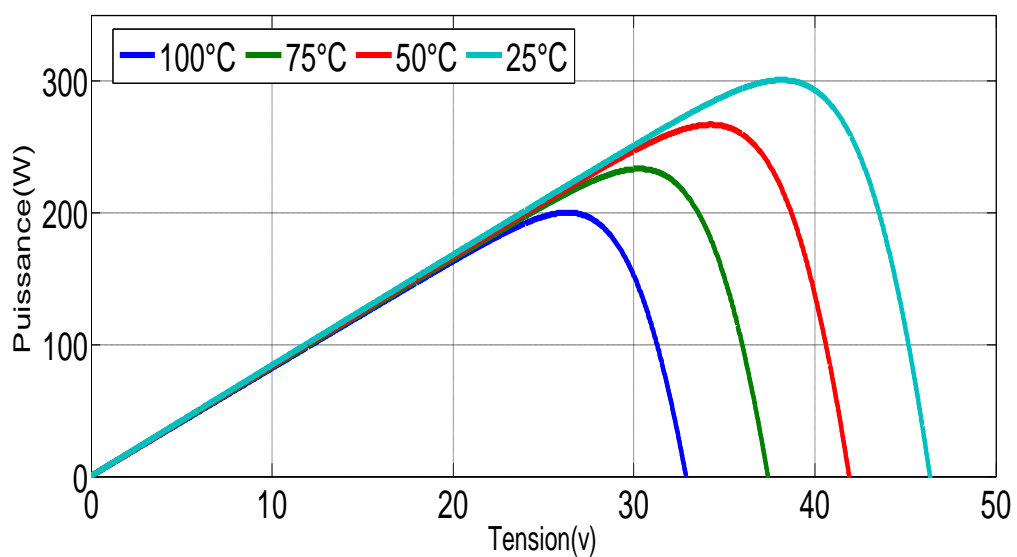


Figure (II.14) : Caractéristique P(V) d'un GPV pour différentes températures

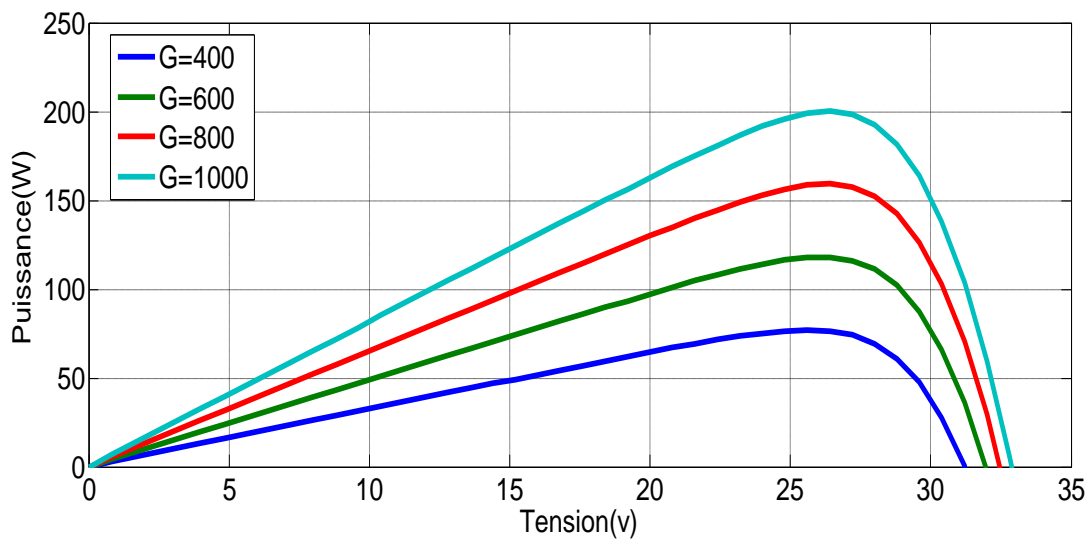
On peut remarquer sur la figure (II.14) que l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale (optimale) disponible, et la tension du point de puissance optimale diminue également.

Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue environ de 0,5% par chaque degré d'augmentation de la température de la cellule au dessus de 25 °C.

Globalement, la température a une influence considérable sur le comportement du module photovoltaïque et donc sur son rendement, car elle entraîne une perte non négligeable de la puissance.

II.7.2.2. Influence de l'éclairement :

Pour voir l'influence de l'éclairement sur le module photovoltaïque, nous avons tracé des courbes I (V) et P (V). En faisant varier l'éclairement entre 400 W/m² et 1000 W/m² avec un pas de 200, et sous une température de 25 °C pour différents niveaux d'éclairement solaire mais à une température constante de 25 °C. Voir Figures (II.15) et (II.16).

**Figure (II.15) :** Caractéristique I (V) du GPV selon l'éclairement

D'après la figure (II.15), on observe un déplacement de la caractéristique I (V) suivant l'axe des courants. Il est bien clair que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, mais reste quasiment identique même à faible éclairement. Autrement dit la tension en circuit ouvert est très faiblement influencée par l'éclairement.

Par conséquent :

- ✓ La puissance optimale de la cellule (P_{max}) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement. Voir figure (II.16).
- ✓ Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension.

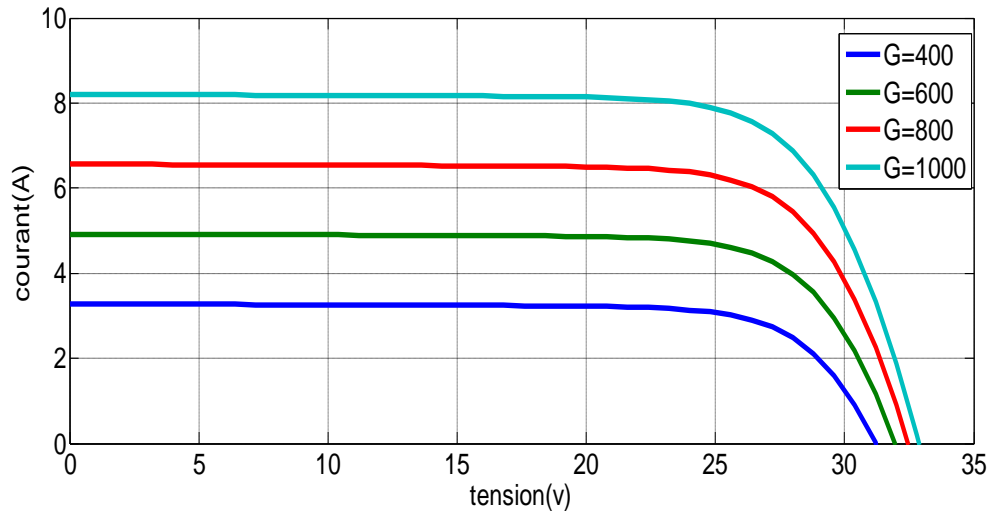


Figure (II.16) : Caractéristique P (V) d'un GPV selon l'éclairement.

On peut remarquer sur la figure (II.16) que la puissance augmente et chaque courbe a un point de puissance maximale PPM qui est le point de fonctionnement maximal.

Finalement. On peut dire que nos résultats obtenus par la simulation de ce modèle (KC200GT), confirment les résultats qui sont donnés par le fabricant (Kyocera).

II.8. Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT) :

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (température et l'éclairement), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{mpp} , I_{mpp}). L'adaptation d'impédance est souvent sous forme d'un convertisseur DC / DC comme représenté sur la figure (II.17) [37].

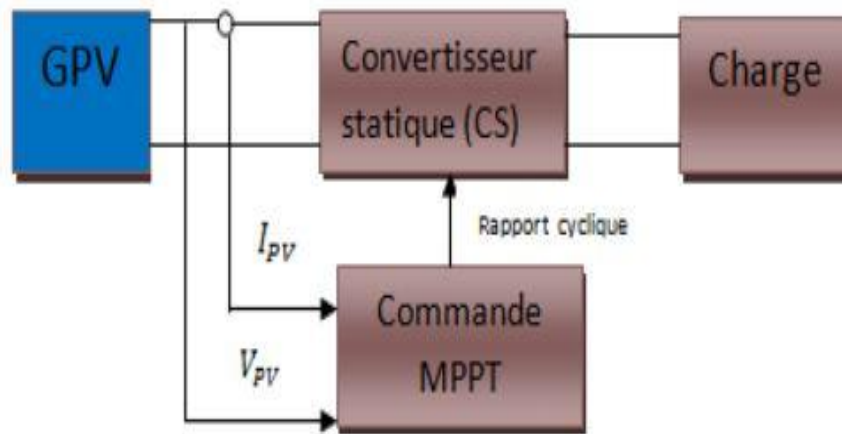


Figure (II.17) : Système photovoltaïque avec une commande MPPT

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique du hacheur de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement quels que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir à tout moment.

La figure (II.18) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.

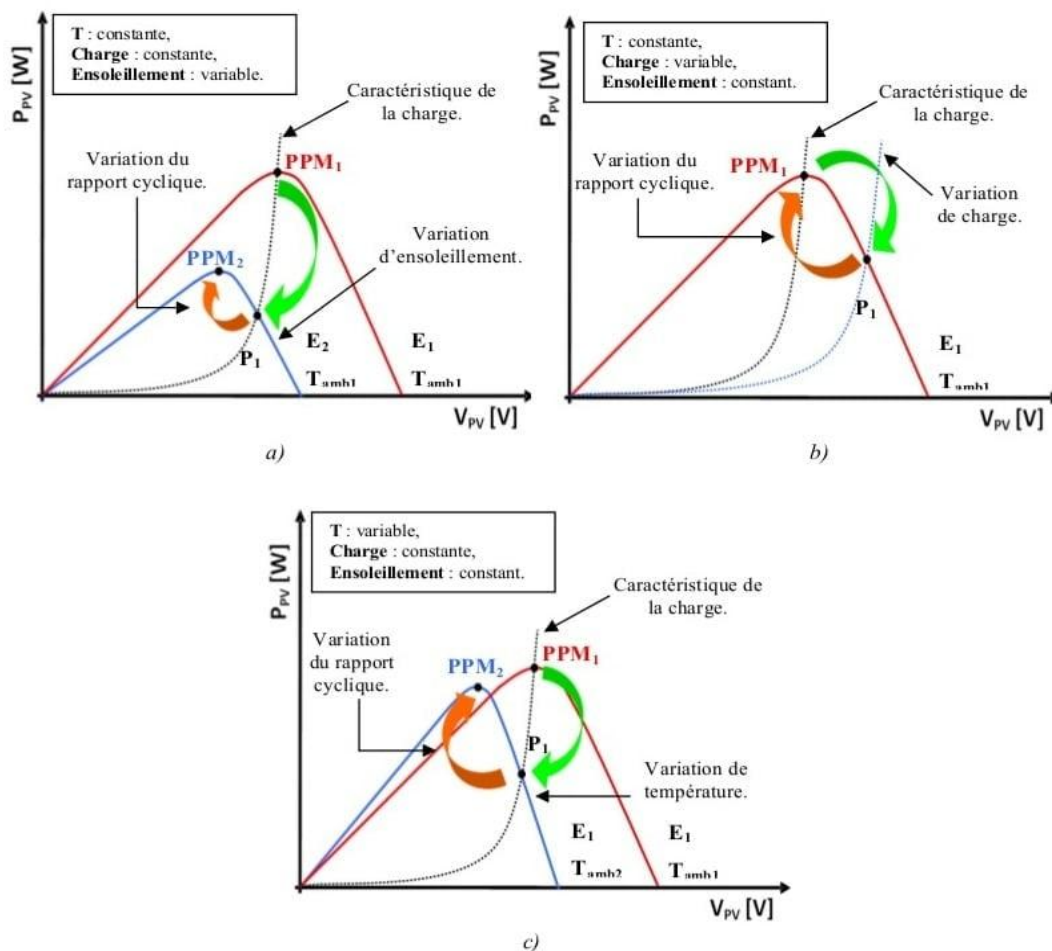


Figure (II.18) : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale

a) suite à une variation d'éclairement.

b) suite à une variation de charge.

c) suite à une variation de température.

- ✓ **Pour une variation d'insolation (cas a) :** il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM₂.
- ✓ **Pour une variation de charge (cas b) :** on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande.
- ✓ **Pour une variation de température de fonctionnement du GPV (cas c) :** il faut également agir au niveau de la commande, cette dernière n'a pas les mêmes contraintes temporelles que les deux cas précédents.

En résumé, le suivi du PPM est réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT qui agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher et atteindre le PPM du GPV [38].

II.8.1. Algorithmes de commande MPPT :

Dans la littérature, nous pouvons trouver différents types d'algorithmes effectuant la recherche du PPM. Les trois méthodes les plus couramment rencontrées sont communément appelées respectivement Hill Climbing, Perturb & Observ (P&O) et l'incrément de conductance (INC) [37].

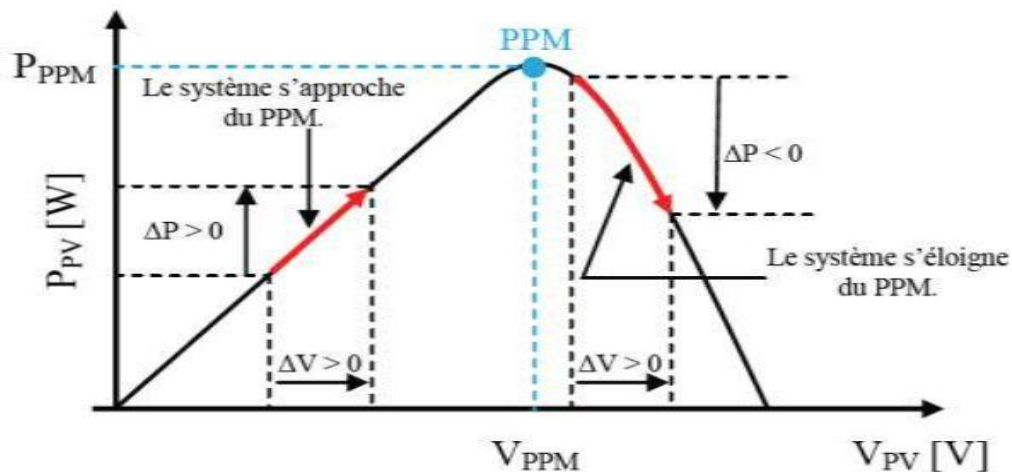
Dans ce chapitre on se limite à la méthode de perturbation et observation (P&O) qui est très simple à implanter et de bon rendement. Pour une meilleure compréhension de cette commande, nous rappelons brièvement son principe dans le paragraphe suivant.

II.9. Principe de la commande Perturbation et Observation (P&O) :

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode fonctionne en observant la variation de la puissance à la sortie du panneau photovoltaïque. Sur la figure (II.19) on voit que si la tension de fonctionnement varie dans une direction donnée ce qui implique que la puissance augmente ($\Delta P > 0$), la variation doit alors se déplacer vers le point de fonctionnement (PPM). L'algorithme P&O continuera à observer la variation de la tension dans la même direction [37].

Par contre, si la puissance diminue ($\Delta P < 0$), alors la variation est éloignée du point de fonctionnement du PPM. L'algorithme inversera alors la direction de la variation suivante [37].

Cet algorithme est résumé sur la figure (II.19) et l'organigramme descriptif est donné par la figure (II.19). Le processus est répété périodiquement jusqu'à ce que le PPM soit atteint. Le système oscille alors autour du PPM, ce qui provoque des pertes de puissance.



Figure(II.19): Signe de ΔP et ΔV à différentes positions de la courbe caractéristique de puissance.

L'oscillation peut être minimisée en diminuant la taille de la variation. Cependant, une taille de variation trop petite ralentit considérablement la poursuite du PPM. Il existe alors un compromis entre précision et rapidité [39].

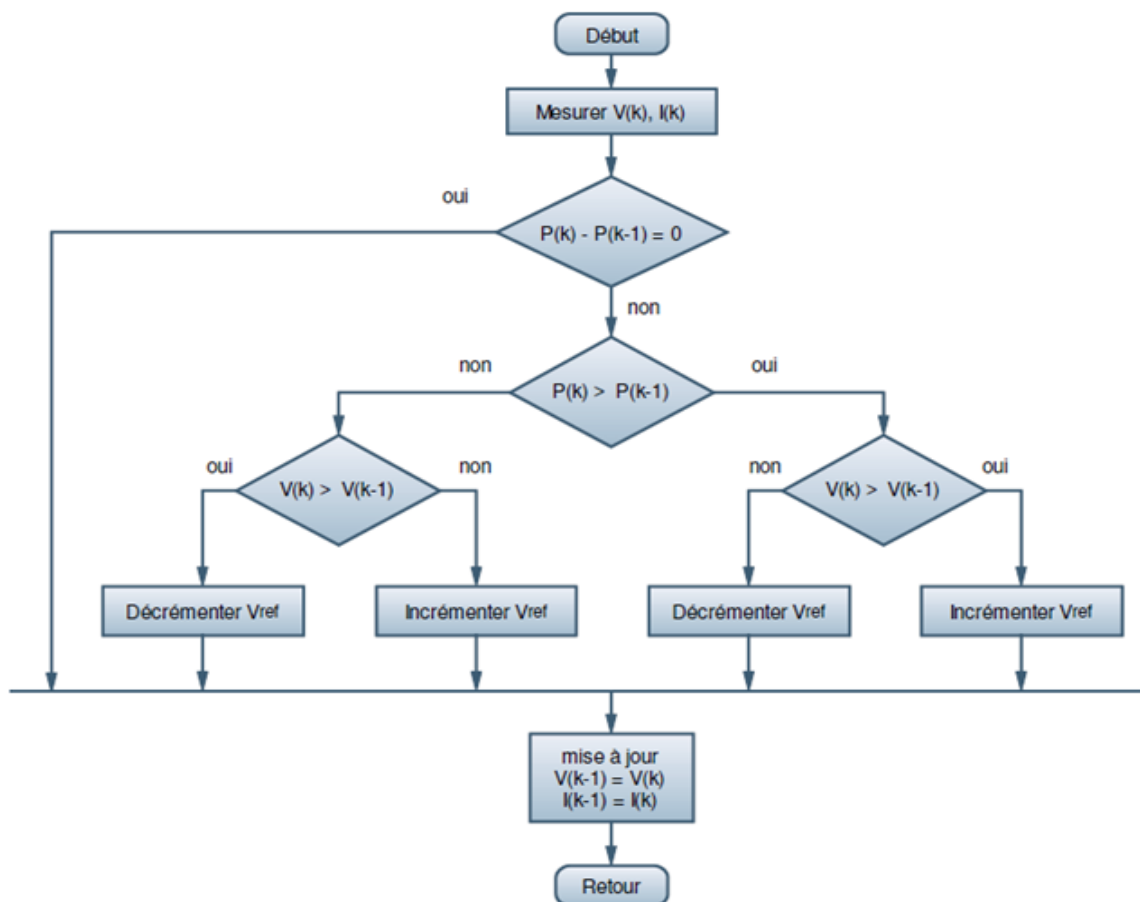


Figure (II.20) : Organigramme de la méthode P&O.

II.10. Convertisseurs DC/DC (Les Hacheurs) :

L'hacheur est un convertisseur continu/continu permettant de convertir une énergie à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue [40].

Ils sont souvent utilisés comme une interface d'adaptation qui assure la poursuite du point de puissance maximale PPM selon des stratégies de contrôle spécifiques.

II.10.1. Type de convertisseurs :

Il y a plusieurs topologies des convertisseurs DC/DC. Ils sont classés par catégorie selon que la topologie isolée ou non isolée. Les topologies isolées emploient un transformateur d'isolement fonctionnant à haute fréquence, elles sont très employées souvent dans les alimentations à découpage. Les topologies les plus connues dans la majorité des applications sont le Fly back, en demi pont et en pont complet. Dans les applications photovoltaïques (PV), les systèmes de couplage avec le réseau électrique emploient souvent ces types de topologies quand l'isolement électrique est préféré pour des raisons de sûreté [7].

Les topologies non isolées ne comportent pas de transformateurs d'isolement. Elles sont généralement utilisées dans l'entraînement des moteurs à courant continu [37]. Ces topologies sont encore classées en trois catégories :

- ✓ Abaisseurs (Buck) ;
- ✓ Elévateurs (Boost) ;
- ✓ Elévateurs - Abaisseurs (Buck-Boost).

II.11. Conclusion :

La performance d'un système PV dépend fortement des conditions météorologiques, telles que le rayonnement solaire, la température et la vitesse du vent. Mais les informations fournies par les constructeurs d'équipements photovoltaïques ne permettent que de dimensionner approximativement le système PV. Les méthodes d'optimisation du générateur PV sont d'une grande utilité pour les fabricants n'ayant pas des informations détaillées sur les futurs sites d'implémentation de leurs produits [34].

Finalement, on peut dire que la modélisation mathématique des cellules solaires est indispensable pour toute opération d'optimisation du rendement ou de diagnostic du générateur photovoltaïque.

Le module photovoltaïque est représenté généralement par un circuit équivalent dont les paramètres sont calculés expérimentalement en utilisant la caractéristique courant-tension.

Chapitre III

**Comparatif des Technologies
Photovoltaïque et leurs
Influences sur le Rendement
Énergétique**

III.1. Introduction :

Les technologies solaires photovoltaïques peinent à s'imposer dans le paysage énergétique [41].

Le coût élevé et l'efficacité de la conversion ont été les principaux freins au développement de l'énergie solaire à devenir une source d'énergie primaire. Aujourd'hui, L'industrie du photovoltaïque se tourne vers le développement de techniques qui utiliseront à terme beaucoup moins de matière ou des matériaux moins onéreux. Le solaire à concentration, les panneaux à couche fine et les matériaux organiques constituent aujourd'hui les principaux axes de recherche et d'innovation future.

Dans ce chapitre on va présenter les différents types de matériaux de cellules photovoltaïques, ces derniers sont l'un des paramètres les plus efficaces pour l'amélioration de performances des cellules et des systèmes photovoltaïques.

III.2. Semi-conducteurs :

III.2.1. Semi conducteurs inorganiques : [11]

Il y a deux groupes de matériaux solides les semi-conducteurs ou isolants et les conducteurs.

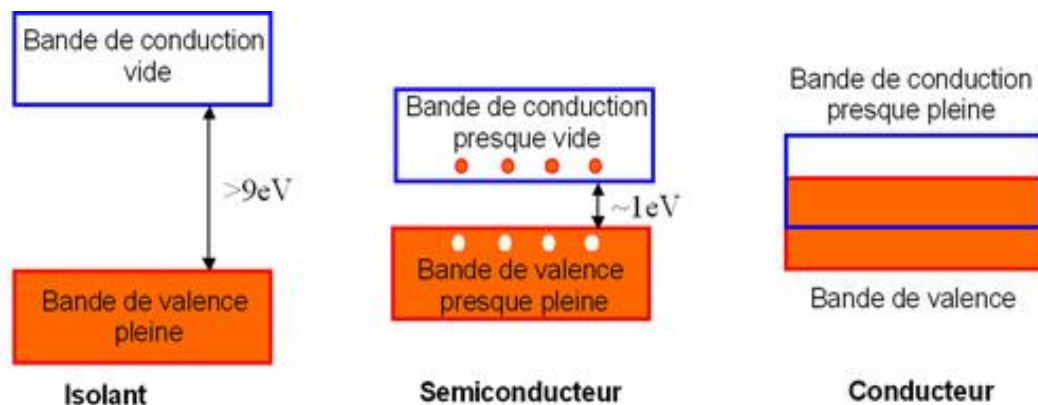


Figure III.1 : Représentation des bandes d'énergie.

Pour préciser la nature d'un matériau, il faut s'intéresser au remplissage des bandes de valences et de conduction et à la taille de la bande interdite, à l'état fondamental de la matière :

- ✓ Si la bande de conduction est partiellement remplie, des électrons au sein du matériau participent à la conduction électrique, on dit que le matériau est conducteur ;
- ✓ Si la bande de conduction est vide :

- ✓ Si l'écart de la bande interdite est grand (plusieurs électronvolts), aucun électron du matériau ne peut participer à la conduction : le matériau est isolant ;
- ✓ Si l'écart de la bande interdite est suffisamment petit (de l'ordre de l'électronvolt), le matériau est isolant au repos. Mais la moindre excitation, thermique ou électrique, permet à certains électrons de la bande de valence de franchir l'écart de la bande interdite et le matériau devient conducteur. On parle alors des matériaux semi-conducteurs.

Tableau III.1 : Conductivités des matériaux [11].

Type de matériau	Conductivité de matériau (S/cm)
Isolant	$\sigma < 10^{-8}$
Semi-conducteur	$10^{-8} < \sigma < 10^3$
Conducteur	$10^3 < \sigma$

S/cm : le siemens par centimètre ($1 \text{ S/m} = \text{A}^2 \cdot \text{s}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{kg}^{-1}$). C'est le rapport de la densité de courant par l'intensité du champ électrique.

On peut dire qu'un semi-conducteur est un isolant mais qui peut devenir un conducteur très facilement en excitant les électrons de valence : ce qui peut se faire en chauffant le matériau, ou en l'éclairant, ou en le soumettant à une tension électrique bien définie.

III.2.2. Semi conducteurs organiques :

Un semi-conducteur organique est un composé organique, sous la forme d'un cristal ou d'un polymère, qui montre des propriétés similaires aux semi-conducteurs inorganiques. Ses propriétés sont la conduction par les électrons et les trous, ainsi que la présence d'une bande interdite. Ces matériaux ont donné naissance à l'électronique organique, ou électronique des plastiques. Par organique, on entend que les molécules utilisées sont à base de carbone [42].

Tableau III.2 : La similarité entre les semi-conducteurs organiques et inorganiques [42].

Semi-conducteur inorganique	Semi-conducteur organique
Bande de valence	HOMO
Bande de conduction	LUMO
Bande interdite	Bande interdite

- ✓ **HOMO** : l'orbitale moléculaire la plus haute en énergie occupée par au moins un électron (Highest Occupied Molecular Orbital) ;
- ✓ **LUMO** : l'orbitale la plus basse en énergie non occupée par un électron (Lowest Unoccupied Molecular Orbital).

III.3. Rendements photovoltaïques :

III.3.1. Rendement global : [14].

Le rendement global $\eta(g)$ du système constitue un bon témoin de la qualité du fonctionnement de l'installation photovoltaïque. Il englobe le rendement photovoltaïque des modules dans les conditions standard (STC) et le rendement de tous les composants constituant le système (Onduleur, régulateur, câblage, etc.), il est donné par la relation suivante :

$$\eta(g) = \eta(\text{STC}) \times \eta(\text{SYST}) \quad (\text{III.1})$$

Avec :

$\eta(\text{STC})$: Rendement des modules en conditions standard (STC) ;

$\eta(\text{SYST})$: Rendement de tous les composants constituant le système photovoltaïque.

Le rendement global du système est une variable très influente sur la production électrique d'une installation photovoltaïque, comme le démontre la relation suivante :

$$E_{\text{elec}} = H_i \times S \times \eta(g) \quad (\text{III.2})$$

Et donc :

$$E_{\text{elec}} = H_i \times S \times \eta(\text{STC}) \times \eta(\text{SYST}) \quad (\text{III.3})$$

Avec :

E_{elec} : énergie électrique produite par l'installation sur un an (kWh/an) ;

H_i : rayonnement global reçu sur 1m² pendant un an ((kWh/m²) /an).

S : surface des modules photovoltaïques (m²).

III.3.2. Rendement d'une cellule ou d'un module aux conditions STC :

Le rendement énergétique d'une cellule solaire ou d'un module solaire (panneau solaire), est défini quant à lui comme le rapport entre la puissance maximale produite (l'énergie produite) et la puissance du rayonnement solaire (l'énergie lumineuse incidente) qui arrive sur la cellule ou le module solaire. En fait, ces deux derniers captent les rayons du soleil pour les transformer en électricité, mais cette conversion provoque quelques déperditions [8] [43].

Ce rendement est souvent mesurer dans les conditions de référence, c'est-à-dire sous l'ensoleillement de 1000 (W/m²), et à la température de 25°C et sous un spectre AM1.5. Ces conditions normalisées sont dite : « STC » (Standard Test Condition) [8].

Pour calculer le rendement d'un panneau solaire, il faut prendre en compte sa définition. La formule à utiliser est la suivante [14] :

$$\eta(\text{STC}) = \frac{P_{\max}}{G \times S} \quad (\text{III.4})$$

Avec:

$\eta(\text{STC})$: rendement énergétique (sans unité).

P_{\max} : puissance maximale (W_c). Mesurée dans les conditions de référence (STC) où $1W_c = 1W$.

G : éclairement (W/m²), qui est égal à 1 000 W/m² ou 1 kW/m² (STC).

S : surface active de cellule ou module (m²).

Exemple d'application :

Prenons un panneau en silicium polycristallin avec une intensité de 2,38 A, une tension de 17 V et d'une surface de 0,36 m² :

$$\eta(\text{STC}) = \frac{P_{\max}}{G \times S} \quad \text{Et} \quad P_{\max} = I_{\max} \times V_{\max}$$

$$\text{Donc :} \quad \eta(\text{STC}) = \frac{2,38 \times 17}{1000 \times 0,36} = \frac{40,46}{360} = 0,11$$

Ce panneau a un rendement de 11 %, cela veut dire que 11% de la lumière captée s'est réellement transformée en électricité.

Tous les autre rendements que nous allons voir dans la suite de notre chapitre ont été calculés sous des conditions normalisées (STC), loi des conditions d'utilisation des panneaux photovoltaïques. Les conditions réelles d'utilisation varient constamment au cours d'une journée et influent donc sur le rendement électrique des cellules. De plus, le rendement des modules est toujours inférieur au rendement des cellules en raison des pertes électriques internes et des surfaces non couvertes (espaces libres entre les cellules et sur le pourtour du module) [14].

Le rendement photovoltaïque dépend essentiellement de l'éclairement et de la température ce qu'on a déjà vu dans le chapitre précédent (chapitreII).

III.3.3. Rendement d'un système :

Le rendement du système, ou encore appelé : « ratio de performance », est un bon indicateur qui caractérise la performance d'une installation photovoltaïque, et qui permet de repérer ces défaillances sans prendre en compte la puissance-crête du système et l'irradiation [44].

À partir des deux relations (III.3), (III.4) et par une petite simplification on déduit :

$$\eta(\text{STC}) = \frac{E_{\text{elec}}}{H_i \times P_{\max}} \quad (\text{III.5})$$

On peut écrire aussi :

$$\eta(\text{STC}) = \frac{\text{la production réelle (kWh)}}{\text{la production théorique (kWh)}}$$

La production réelle Eelec : énergie électrique produite en sortie du système sur un an en kWh

La production théorique ($H_i \times P_{\text{max}}$) :

- ✓ H_i : rayonnement globale reçue dans le plan des modules sur 1m^2 pendant un an ;
- ✓ P_{max} : la puissance maximale du système en kWh (1KW_C correspond théoriquement à 10^3 kWh).

III.4. Utilité des unités de mesure [46]:

Lorsqu'on parle de panneaux solaires, plusieurs unités de mesure sont utilisées. On entend parler de watt (W), de watt-crête (W_c) et de watt heure (Wh). Quelle est la différence entre les trois, que mesurent-ils ?

- ✓ **watt-crête** : est l'unité de mesure de puissance d'un panneau solaire. Il s'agit, en fait, de la délivrance d'une puissance électrique de 1 Watt, sous de bonnes conditions d'ensoleillement (1000 watts par mètre carré et une température de 25°C) et d'orientation. Le watt-crête est utilisé sous la forme de kilowatt crête (kW_c) sert à comparer le rendement des matériaux photovoltaïques ainsi que de renseigner la taille d'un équipement solaire.
- ✓ **Le watt** : est l'unité de mesure de la puissance énergétique. Appliqué aux panneaux solaires, on l'utilise, le plus souvent sous la forme de kilowatts, pour indiquer la production d'énergie de ces derniers.
- ✓ **Le watt heure** est l'unité de mesure utilisée pour indiquer la quantité d'énergie produite par les panneaux en une heure (c'est le kilowattheure qui est utilisé la majorité du temps).

III.5. Facteurs influençant le rendement photovoltaïque [45]:

Plusieurs facteurs doivent être pris en compte pour obtenir un haut rendement de panneau solaire. En effet, le calcul du rendement d'un panneau solaire dépend de nombreux paramètres :

- ✓ La puissance des panneaux solaires ;
- ✓ L'orientation de l'installation ;
- ✓ L'inclinaison des panneaux solaires ;

- ✓ La zone géographique, car le niveau d'ensoleillement n'est pas le même partout. Cela ne veut cependant pas dire que seuls ceux qui vivent dans des régions ensoleillées peuvent obtenir un bon rendement ;
- ✓ La surface des panneaux ;
- ✓ Les ombrages éventuels (arbres, poteaux, bâtiments à proximité, etc.) ;
- ✓ Le rendement des autres composants du kit solaire (onduleur, câbles, etc.) ;
- ✓ la technologie des panneaux solaire.

Notre étude principale dans ce chapitre se concentre sur le dernier facteur. On parle de différentes technologies des panneaux solaires et leurs influences sur le rendement photovoltaïque.

III.6. Revue sur les matériaux des cellules solaires :

La première cellule solaire a converti moins de 1% de lumière incidente en énergie électrique et plus tard il a fallu plus d'un siècle pour augmenter l'efficacité d'une cellule solaire à 4% en utilisant du silicium, des diodes, des transistors.[46]. Après avoir reconnu l'importance de cela, des recherches ont été menées pour améliorer l'efficacité en utilisant le matériau approprié pour la fabrication de la cellule solaire. Selon la littérature scientifique. Les matériaux de cellules solaires plus économiques et plus efficaces ont évolué sur trois générations en croisant les étapes d'amélioration continue d'une génération à l'autre. Parmi elles les cellules solaires de première génération sont majoritairement constituées de monocristal de silicium avec un rendement modéré mais à un coût élevé. La recherche continue sur la réduction des coûts et l'amélioration de l'efficacité a ouvert la voie au développement de cellules solaires à couche mince de deuxième génération qui sont rentables et ont une meilleure efficacité cellulaire. Les cellules solaires à couche mince sont plus flexibles, faciles à manipuler et présentent de faibles pertes de courant en raison de la présence d'un plus grand nombre de couches. Les cellules solaires de troisième génération sont basées sur des matériaux polymères sensibilisés aux colorants, des nano cristaux et des matériaux nano poreux, ce qui produit le plus haut rendement. Cette section étudie le rôle des matériaux des cellules solaires sur l'efficacité du système PV.

III.7. Technologies des cellules PV :

Il existe plusieurs technologies de cellules qui ont toutes des propriétés différentes. Le but de ce chapitre est d'énoncer les principales caractéristiques de chaque génération pour pouvoir par la suite comprendre leur comportement dans différentes conditions d'utilisation.

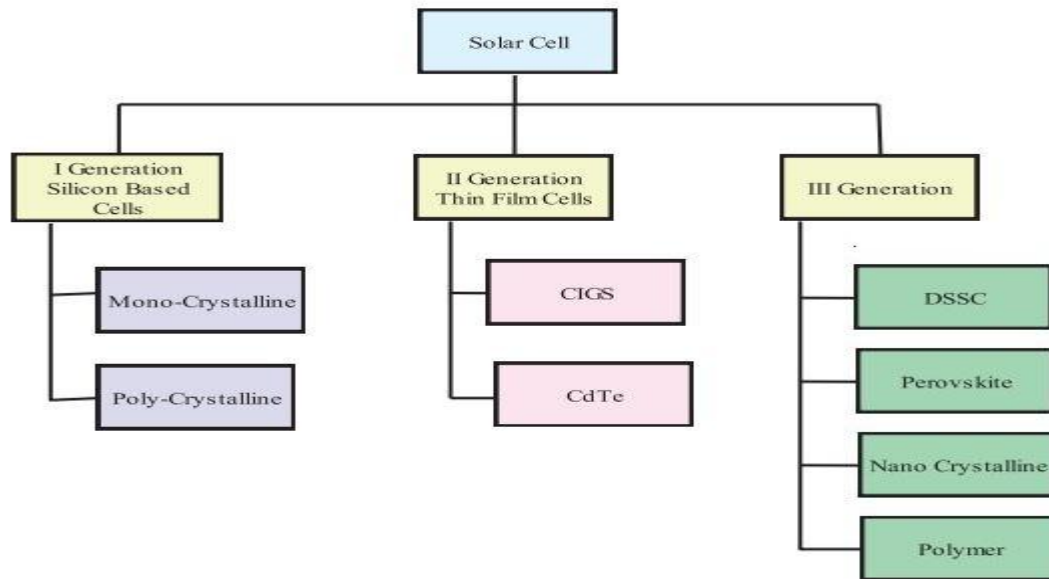


Figure III.2 : Classification des cellules solaire.

III.7.1. 1^{ère} génération :

La production de modules photovoltaïques s'est traditionnellement opérée à partir de silicium (Si), ce qui explique que cette filière représente encore l'essentiel de la production d'équipements solaires. Plus de 90 % des cellules solaires fabriquées dans le monde sont composées de Si en raison de son efficacité énergétique élevée [47].

La limite théorique de rendement de ce type de cellule est de $\pm 27\%$, les cellules les plus récentes s'approchent chaque année de plus en plus de cette limite, le rendement en laboratoire est de 25 % et celui obtenu en production industrielle est de 15 % environ [48] [49]. Le tableau (III.3) représente les rendements de différents types de cellules PV en silicium.

Cette génération de cellule repose sur les wafers (fines plaques) de silicium cristallin issues des technologies développées pour la microélectronique. Selon le type de structure, les cellules solaires à plaquettes de silicium sont regroupées en deux classes, à savoir : les cellules solaires en silicium monocristallin, et les cellules solaires en silicium polycristallin. Ces deux types de cellules proviennent de procédé de purification et de solidification différents.

III.7.1.1. Source de silicium:

Le silicium est, après l'oxygène, l'élément le plus répandu à la surface du globe : il représente près de 28 % de la croûte terrestre et par conséquent, il est disponible en quantité presque illimitée. Cependant il n'existe pas à l'état natif, mais sous forme d'oxydes « la silice » ou de silicates (des composés extrêmement stables) que l'on trouve notamment dans le sable (Figure III.3) et le quartz (Figure III.4) [50].



Figure III.3 : Sable de Hollande [51].



Figure III.4 : Quartz - Mine de La Gardette [52].

III.7.1.1.1. De la silice au silicium photovoltaïque :

La première étape du processus est la production de silicium dit « métallurgique », pur à 98 % seulement est obtenu par réduction de la silice (obtenue à partir de galets recelant du quartz ou d'un gisement filonien, le sable n'est jamais employé par l'industrie) par le carbone à haute température, dans des fours à arc. La réaction globale s'écrit : $\text{SiO}_2 + 2\text{C} \rightarrow \text{Si} + 2\text{CO}$. Le silicium de qualité photovoltaïque doit être purifié jusqu'à plus de 99,999 %, ce qui s'obtient en transformant le silicium en un composé chimique qui sera distillé puis retransformé en silicium. Cette technique de fabrication est très énergivore et donc très chère. Elle nécessite par ailleurs un silicium de grande pureté [50][53][54].

Le silicium est produit sous forme de lingots de section parfois ronde et plus fréquemment carrée. Ces lingots sont ensuite sciés en fines plaques, le cas échéant mises au carré, de 100 à 400 μm d'épaisseur, appelées « wafers ». Après un traitement visant à l'enrichir en éléments dopants (P, As, Sb ou B) et ainsi obtenir du silicium semi-conducteur de type P ou N, les wafers sont « métallisés » : des rubans de métal sont incrustés en surface et reliés à des contacts électriques. Une fois métallisés, les wafers deviennent des cellules photovoltaïques.

Une couche antireflet déposée à l'avant complète la fabrication de la cellule photovoltaïque. Il ne reste alors plus qu'à connecter les cellules entre elles dans l'ordonnement souhaité pour obtenir la puissance et la tension souhaitée, et à encapsuler le tout dans un vitrage étanche pour obtenir le produit final, le module photovoltaïque [53][55].

La production des cellules photovoltaïques nécessite de l'énergie, et on estime qu'un module photovoltaïque doit fonctionner environ deux à trois ans pour compenser l'énergie nécessaire à sa fabrication [53].

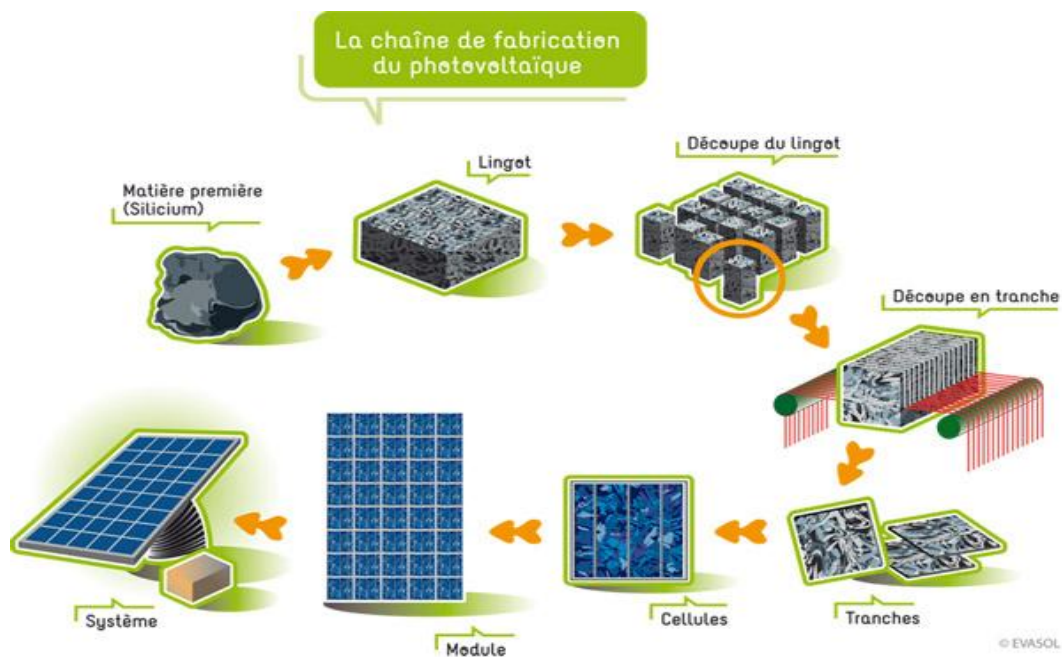


Figure III.5 : Les étapes de fabrication de la cellule solaire cristalline [56].

III.7.1.2. Cellule solaire au silicium monocristallin :

Pour l'utilisation industrielle, des lingots de silicium monocristallin de section ronde sont formés à partir de fonte de silicium ultra-pure. Dans un monocristal, le réseau cristallin complet est agencé de manière uniforme. Par la suite ces lingots de silicium sont découpés en fines tranches (wafers) de 200 à 300 μm d'épaisseur. Ces tranches formant la base de la cellule, sont disposées les unes à côté des autres pour constituer un module comprenant des espaces vides inutiles. Pour permettre un usage optimal de la surface du module solaire, les cellules rondes sont découpées en éléments plus ou moins carrés. D'habitude, les cellules présentent une longueur d'arête de 152 mm. La fabrication est conclue par le dopage, l'application des surfaces de contact (grills collectrices) et de la couche antireflet [55].

Ces cellules ont un aspect uniforme, de couleur gris bleuté, ou noir (généralement un bleu uniforme) [57].

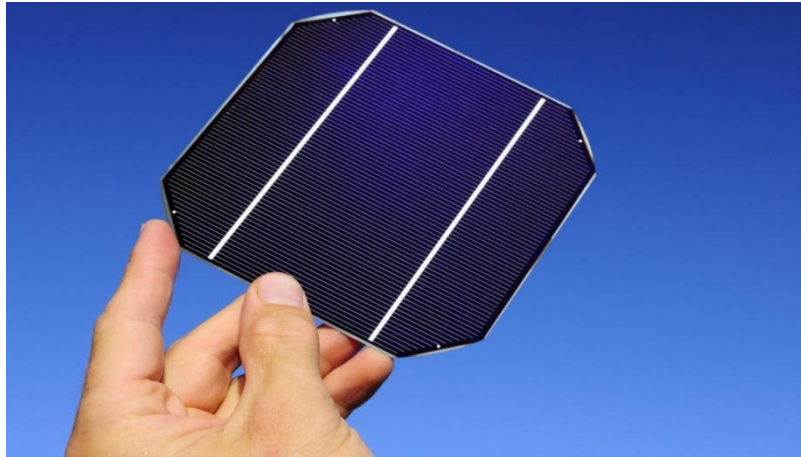


Figure III.6 : Cellule photovoltaïque en silicium monocristallin [58].

Les panneaux solaires monocristallins sont utilisés depuis longtemps en raison de leur longévité. Il utilise un seul cristal de silicium pur, ce qui le rend unique par rapport aux autres cellules.

Ces panneaux possédant un rendement variant entre 14 et 17,5 %, les cellules monocristallines fabriquées industriellement sont les cellules ayant actuellement le rendement le plus élevé. Cependant, leur fabrication requiert plus d'énergie et de temps que celle des cellules polycristallines [59].

Yin et al. ont développé un modèle utilisant du silicium monocristallin produisant un rendement de 19,2 % en combinant la technologie des cellules à émetteur sélectif (SE) et à enveloppe métallique (MWT) [60].

III.7.1.3. Cellule solaire au silicium polycristallin :

Le matériau de base est du silicium ultra-pur qui est porté à fusion. Mais pour la fabrication de cellules solaires polycristallines, on ne cultive pas de monocristaux, mais la fonte de silicium est refroidie de façon contrôlée dans un moule carré. Pendant le refroidissement, les cristaux s'orientent de manière irrégulière et forment un bloc complet avec une surface miroitante typique pour les cellules solaires polycristallines. Les blocs de silicium carrés appelé aussi lingots sont découpés en tranches fines de 200 à 300 μm d'épaisseur [55]. Les cellules polycristallines qui en résultent présentent alors, de jolis reflets correspondant aux nombreux cristaux.

La fabrication est conclue par le dopage, l'application des surfaces de contact et de la couche anti réflexion. Cette dernière offre à la cellule solaire sa surface bleue typique, car le bleu réfléchit le moins de lumière et en absorbe la plus grosse quantité [55].



Figure III.7 : Cellule photovoltaïque en silicium polycristallin [61].

Les cellules solaires polycristallines présentent un rendement entre 12 et 14 %, mais le coût de fabrication est plus réduit par rapport aux cellules monocristallines [59]. Actuellement, ces cellules offrent le meilleur rapport qualité/prix. Ces cellules ont une bonne durée de vie (plus de 35 ans), et en plus ils peuvent être fabriqués à partir de déchets de l'électronique. C'est la deuxième méthode, moins onéreuse, mais d'un rendement légèrement plus faible [62].

III.7.1.4. Comparatif des cellules de 1^{ère} génération :

Tableau III.3 : Comparatif des cellules de 1^{ère} génération [59].

Paramètre	Génération I	
	Monocristallin	Polycristallin
Efficacités	14% - 17.5%	12% - 14%
Dépendance à la température	Instable à plus haute Température	Instable à plus haute Température
Bande interdite énergétique	1.1 Ev	1.1 eV
Energie (TW/an)	~ 2.5	~ 2.5
Mérites	Disponibilité des matières premières en abondance, Respectueux de l'environnement, Bon en termes de fiabilité, stabilité, efficacité	Pas cher par rapport au silicium mono
Démérites	Processus de fabrication long et compliqué	L'efficacité est moindre
Coût	Coûteux	Coûteux

III.7.2. 2^{ème} génération :

Une deuxième génération fait appel à la technologie des couches minces (en anglais : thin films). Par cette technologie, une cellule solaire est fabriquée en déposant une ou plusieurs couches minces de matériau photovoltaïque (la plupart des matériaux utilisés sont des semi-conducteurs non organiques) sous forme de vapeur depuis une source cible sur un substrat souple et peu coûteux tel que le verre, l'acier inoxydable ou le plastique. Les couches minces déposées sont minuscules, c'est-à-dire leur zone d'absorption ne fait que quelques micromètres d'épaisseur, et donc une petite quantité de matière suffit par conséquent pour obtenir les épaisseurs voulues. La production de ce type de cellules est moins onéreuse que celle de 1^{ère} génération car elle consomme moins de matériaux semi-conducteurs et ne nécessite pas de passer par l'étape de transformation en « wafers » [63][64].

Grâce aux économies de matériaux réalisées, les cellules dites de deuxième génération sont plus légères et plus faciles à installer, et souples dans de nombreux cas, mais elles présentent des rendements légèrement inférieurs [65].

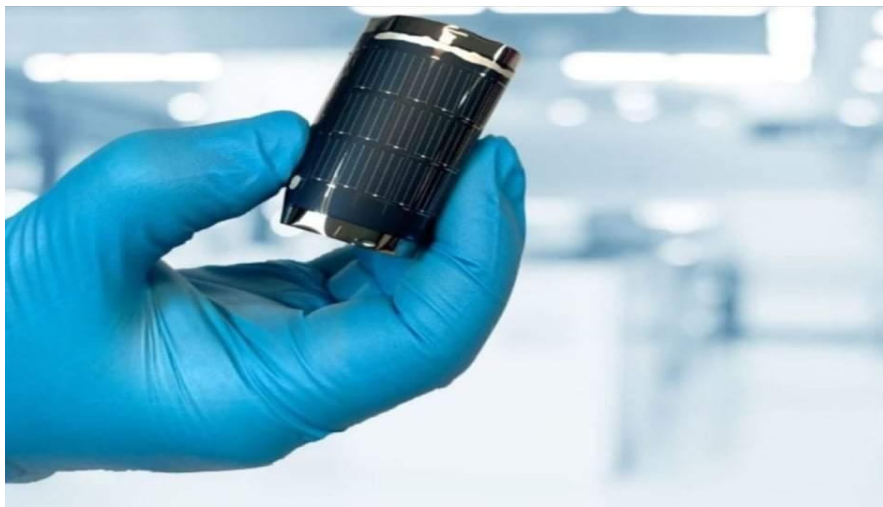


Figure III.8: Une cellule de 2^{ème} génération ultralégères et flexibles CIGS [66].

La part de marché pour l'ensemble de ces technologies est d'environ 10 % et reste relativement stable. Ces filières ont perdu l'avantage de leur moindre coût de production avec les investissements massifs consentis dans le silicium au début des années 2000 [59].

Les cellules solaires à couche mince sont utilisées commercialement dans plusieurs technologies, notamment le tellure de cadmium (CdTe), le diséléniure de cuivre-indium-gallium (CIGS).

III.7.2.1. Technologie du CIGS :

Le sigle **CIGS** (pour les éléments chimiques cuivre, indium, gallium et sélénium) désigne à la fois :

- ✓ une technique d'élaboration des cellules photovoltaïques (à couches minces et hautes performances) ;
- ✓ le matériau semi-conducteur fait d'un alliage permettant de réaliser ces cellules [67].

Les cellules photovoltaïques au CIGS sont prometteuses avec une efficacité de laboratoire supérieure à 20% et une part de 2% sur le marché photovoltaïque global [68]. En effet, le mélange de cuivre, de gallium, d'indium et de sélénium est un très bon absorbant (ce qui se traduit par des rendements élevés), dépourvu de toxicité pour l'environnement et la santé. Problème : l'indium, qui entre également dans la fabrication des écrans plats, pourrait venir à manquer.

Les cellules CIGS utilisent le principe de la jonction P-N, comme les cellules de la première génération issues du silicium. L'alliage CIGS entre principalement dans la fabrication d'une cellule photovoltaïque utilisée sous forme d'une couche mince polycristalline, cette couche de 1 à 2,5 μm d'épaisseur étant dopée p, elle doit être recouverte d'un matériau de type n, tels que l'oxyde de zinc (ZnO) et le sulfure de cadmium (CdS) sur une épaisseur de seulement 0,04 à 0,07 μm , autant dire qu'il est présent en infime quantité. Puisqu'il y a deux semi-conducteurs différents, les cellules CIGS sont elles aussi à hétérojonction [69] [70].

Les cellules CIGS résistent mieux à l'échauffement que les cellules au silicium cristallin, mais moins bien que les cellules au CdTe. En plus, elle capte un peu mieux la lumière en début et en fin de journée (quelques pour cent), comme toutes les couches minces [70].

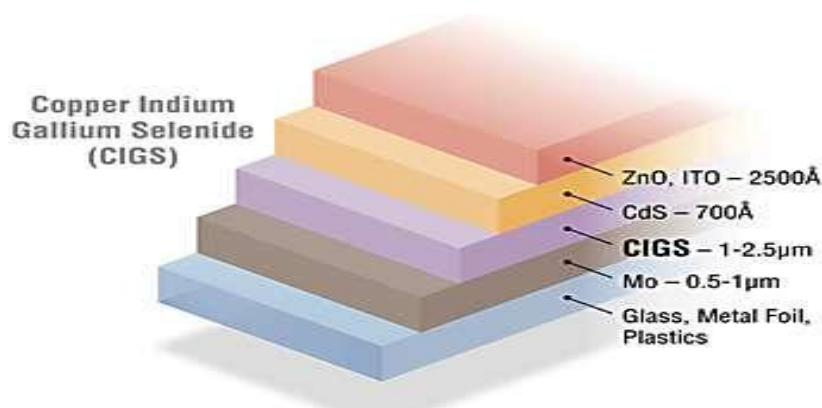


Figure III.9 : Composition couche par couche d'une cellule photovoltaïque au CIGS [71].

Les structures assemblées sur du verre (glass) sont rigides. À l'inverse, celles construites sur des feuilles métalliques (metal foil) ou sur du plastique (plastics) sont souples [70].

Une cellule au CIGS se compose souvent de :

- ✓ d'un verre de protection ;
- ✓ d'une couche conductrice transparente en oxyde de zinc (ZnO) intrinsèque de 450 nm d'épaisseur (elle est souvent précédée d'une couche de ZnO dopée à l'aluminium) ;
- ✓ d'une couche d'environ 50 nm de sulfure de cadmium (CdS), ou d'un composé mixte comprenant du zinc, de l'oxygène, du soufre et des hydroxydes [Zn (S, O, OH)] ;
- ✓ de la couche de CIGS (épaisseur : environ 2 μm) ;
- ✓ du collecteur de charges inférieur, constitué de molybdène ;
- ✓ du substrat préalablement évoqué.

Les entités cristallines requièrent 3,5 g de silicium pour afficher 1 watt-crête. Pour une puissance équivalente, les cellules CIGS ont seulement besoin de 0,08 g d'absorbant [70].

Les matières premières nécessaires à la fabrication de ces cellules sont plus faciles à se procurer que le silicium utilisé dans les cellules photovoltaïques classiques (bien que ce dernier soit déjà très abondant sur terre). De plus, leur efficacité de conversion énergétique d'environ 10 à 12 % est la plus élevée à ce jour pour des cellules photovoltaïques en couche mince [59] [72].

III.7.2.1.1. Méthodes de réalisation de la couche CIGS :

Plusieurs méthodes sont utilisées au niveau industriel pour assembler des cellules CIGS, citons :

- ✓ Le procédé le plus commun consiste à Co-évaporer (par voie physique), sous vide, du cuivre, du gallium et de l'indium en surpression de sélénium ;
- ✓ Un autre procédé, ne faisant pas appel à la technologie du vide, consiste à étaler des nanoparticules des matériaux précurseurs sur le substrat et de les fritter ou Co-fritter [69].

Le frittage est un procédé de fabrication de pièces consistant à chauffer une poudre sans la mener jusqu'à la fusion. Sous l'effet de la chaleur, les grains se soudent entre eux, ce qui forme la cohésion de la pièce [73].

La plupart de ces procédés impliquent l'utilisation répétée de hautes températures ou l'obligation de travailler sous une atmosphère protectrice à de faibles pressions (environ 10^{-8} mbar) [70].

III.7.2.2. Technologie du CdTe :

Les cellules au tellure de cadmium (CdTe) affichent des rendements intéressants, du fait de ses propriétés optiques optimales. Elle se caractérise par une bande interdite directe d'environ 1,5 eV parfaitement adaptée au spectre solaire, en outre son très grand coefficient absorption fait que la quasi-totalité du spectre est absorbé sur une profondeur de 2 μm . Elles renferment pourtant des éléments rares ou théoriquement toxiques pour l'homme et l'environnement. Ces cellules présentent les avantages liés à la technologie des couches minces : elles sont légères, robustes, et seront peut être un jour flexibles (de telles cellules existent déjà, mais uniquement en laboratoire). Elles ont pris un véritable essor ces dernières années, notamment grâce à leur commercialisation par l'entreprise américaine First Solar [74] [75].

Le tellure de cadmium (CdTe) est la technologie prédominante en couches minces. En 2010, les cellules au CdTe représentaient 6 % du marché mondial du photovoltaïque [74]. Elle représente plus de la moitié du marché des couches minces. L'efficacité de laboratoire de la cellule a également augmenté de manière significative ces dernières années et est comparable à celle des couches minces de CIGS et proche de celle du silicium polycristallin [68].

Le tellure de cadmium est employé en tant que semi-conducteur dopé p. Un autre matériau est donc requis pour réaliser la jonction P-N, à savoir du sulfure de cadmium dopé n (CdS). Une telle union entre deux semi-conducteurs différents est appelée hétérojonction. Une couche d'absorption en tellure de cadmium est ainsi placée sur un support de verre puis couverte par une autre plaque de verre qui scelle hermétiquement le panneau [76].

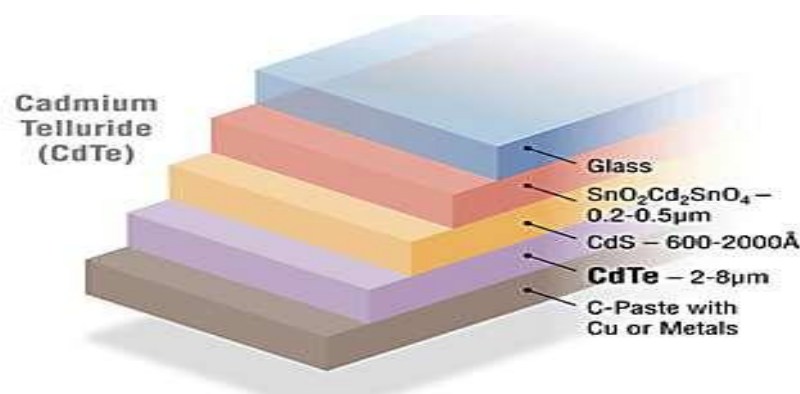


Figure III.10 : Structure d'une cellule photovoltaïque au CdTe [77].

Une cellule au CdTe se compose souvent de (de haut en bas) :

- ✓ d'une vitre protectrice ;
- ✓ d'une couche conductrice transparente, par exemple faite d'oxyde d'indium-étain (ITO) ou d'oxyde de zinc (ZnO). Elle récolte les charges négatives sur une épaisseur de 0,2 à 0,5 μm ;
- ✓ de sulfure de cadmium CdS dopé n (épaisseur de 0,06 à 0,2 μm) ;
- ✓ de tellure de cadmium dopé p (épaisseurs de 2 à 8 μm) ;
- ✓ de la couche conductrice inférieure métallique. Elle est parfois fabriquée à partir d'une pâte de carbone enrichie en cuivre ;
- ✓ du substrat, dont la nature peut varier selon les propriétés désirées (souple ou rigide).

L'emploi du tellure de cadmium procure plusieurs avantages aux cellules. Seuls 1 à 8 μm de CdTe suffisent pour absorber une grande quantité de lumière, y compris lorsqu'elle vient à manquer, comme à l'aube, au crépuscule ou par temps couvert. Les panneaux solaires rigides se comportent également mieux que les autres lorsque leur température monte, ce qui survient aux plus chaudes heures de la journée. Ils ne perdent que 3 % de leur puissance par tranche de 10 °C supplémentaires, contre 5 % pour les cellules cristallines (chiffres de First Solar) [74].

III.7.2.2.1. Méthode VTD :

Les cellules au CdTe sont produites de différentes manières. First Solar utilise par exemple la méthode VTD (vapor transport deposition), car elle permet de déposer de faibles épaisseurs de matériaux sur des substrats mobiles. Concrètement, du tellure et du cadmium sont chauffés indépendamment dans des chambres, puis des gaz inertes vont transporter les vapeurs générées. Elles sortent par des orifices situés à environ 1 cm des supports. La matière se dépose alors sur le substrat, qui est maintenu à une température inférieure à la température d'évaporation. Un panneau solaire complet peut être produit en deux heures et demie, avec des pertes de matière première estimées à seulement 2 % [75].

III.7.2.3 Comparatif des cellules de 2^{ème} génération :Tableau III.4 : Comparatif des cellules de 2^{ème} génération [59].

Paramètre	Génération II	
	CIGS	CdTe
Efficacité	10% - 12%	9% - 11%
Dépendance à la température	Bon en haute et en basse Température	Bon en haute et en basse Température
Bande interdite énergétique	$E_g > 1.2 \text{ eV}$	1.5 eV
Energie (TW/an)	0.02	0.02
Mérites	Flexible, durable, haute efficacité	Flexible, durable
Démérites	La capacité d'absorption est moindre	Toxique en raison de la présence de Cd
Coût	Ne nécessite que 50% des dépenses des cellules traditionnelles à base de silicium	Ne nécessite que 50% des dépenses des cellules traditionnelles à base de silicium

III.8. 3^{ème} génération :

Les cellules photovoltaïques de troisième génération sont des cellules solaires potentiellement capables de dépasser la limite de Shockley – Queisser de 31 à 41% d'efficacité énergétique pour les cellules solaires à simple bande interdite. Cela comprend une gamme d'alternatives aux cellules constituées de jonctions P-N semi-conductrices (première génération) et de cellules à couches minces (deuxième génération) [79].

Cette génération est encore au stade de la recherche. Cependant, leur développement est très actif et motivé par les applications spatiales vu qu'elles visent principalement à obtenir le plus haut rendement jamais obtenu auparavant, mais en plus à minimiser les inconvénients et les obstacles rencontrés dans les générations précédentes telles que le coût de fabrication qui est très élevé.

Cette génération de cellules qui est constituées de matériaux organiques présente un engouement très important, car elles présentent des propriétés très intéressantes notamment dans leur flexibilité et la possibilité d'être réalisées avec de grandes surfaces et aussi obtenues très simplement, à faible coût et avec un faible impact environnemental.

Cependant leur stabilité et leur rendement doivent être considérablement améliorés par rapport à leur état actuel.

Les chercheurs ont proposé plusieurs concepts pour la réalisation de ce type de cellules .on va présenter dans ce chapitre les plus intéressantes comme les cellules solaires à polymère, les cellules nanocristallines, les cellules à colorant et les cellules solaires Pérovskites.

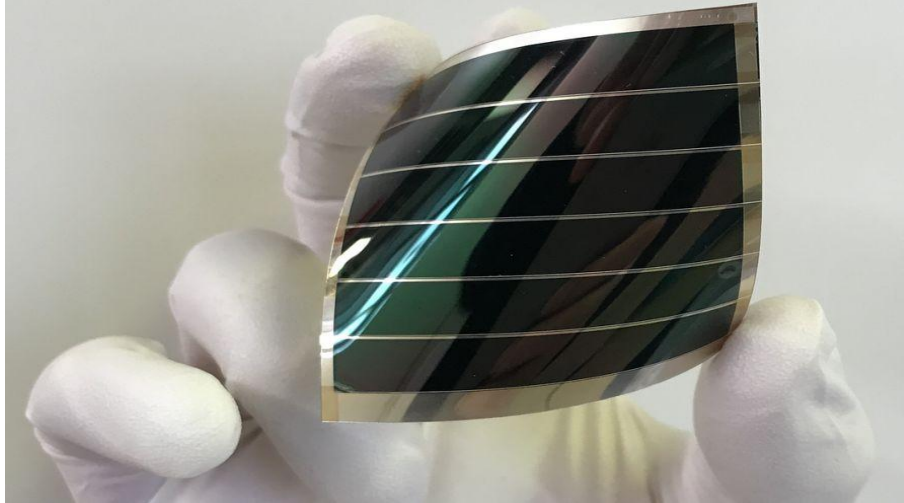


Figure III.11 : Cellule solaire organique [80].

III.8.1. Cellules à pigments photosensibles (à colorant):

La cellule à pigments photosensible est souvent désignée par l'acronyme dérivé de son appellation en anglais DSSC (Dye-Sensitized Solar Cell). Grâce aux travaux de Michael Grätzel, les cellules à pigments photosensibles ont vu le jour en 1991 à l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL). Elles s'inspirent directement de la photosynthèse pratiquée par les végétaux [81].

La cellule DSSC est basé sur un électrolyte donneur d'électron (analogue à l'eau dans la photosynthèse) sous l'effet d'un pigment excité par le rayonnement solaire (analogue à un pigment photosynthétique tel que la chlorophylle). La force électromotrice de ce système vient de la rapidité avec laquelle l'électrolyte compense l'électron perdu par le pigment excité avant que ce dernier ne se recombine : le pigment photosensible est imprégné dans un matériau semi-conducteur fixé à la paroi transparente et conductrice située face au soleil, de sorte que l'électron libéré par le pigment diffuse jusqu'à la paroi conductrice à travers le matériau semi-conducteur pour venir s'accumuler dans la paroi supérieure de la cellule et générer une différence de potentiel avec la paroi inférieure[82].

Actuellement, des rendements supérieurs à 11% (dans les conditions standards d'illumination AM1.5) ont été obtenus à partir de cellules utilisant des complexes de ruthénium comme colorant. A cause du coût élevé des complexes de ruthénium mais aussi de leur toxicité, certains groupes

travaillent au développement des cellules à colorant organique sans métaux. Ces cellules développent des rendements de 5 à 8% [55].

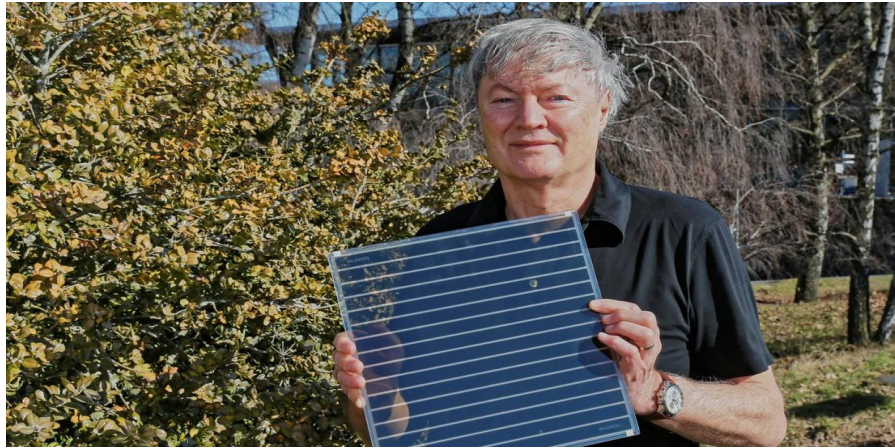


Figure III.12 : Cellule DSSC [83].

Les cellules DSSC sont déjà fabriquées à l'échelle de plusieurs mégawatts. Elles représentent ainsi une part importante du marché photovoltaïque qui fournit actuellement près de 3% de l'électricité mondiale et sont bien placées dans la course à la réduction des émissions de carbone [84].

III.8.1.1. Schéma général d'une cellule DSSC :

Il existe une énorme diversité de cellules Grätzel avec des composants variés, mais le schéma global reste approximativement le même :

Le cœur de la cellule est un semi-conducteur mésoporeux (porosité entre 50 et 60 %), typiquement constitué de nanoparticules (entre 10 et 30 nm de diamètre) de dioxyde de titane (TiO_2) agglomérées de façon à permettre la conductivité électrique. Sur l'importante surface de ce semi-conducteur est déposée une monocouche de pigments. Le semi-conducteur se présente en général comme un film d'environ 10 μm et est lui-même déposé sur une électrode transparente, typiquement du dioxyde d'étain (SnO_2) dopé au fluor. La contre-électrode (cathode) est en contact avec un électrolyte, fréquemment le couple redox Iodure/Tri iodure (I_3^-/I^-) qui baigne tout le système et permet de compléter le cycle électrique [85].

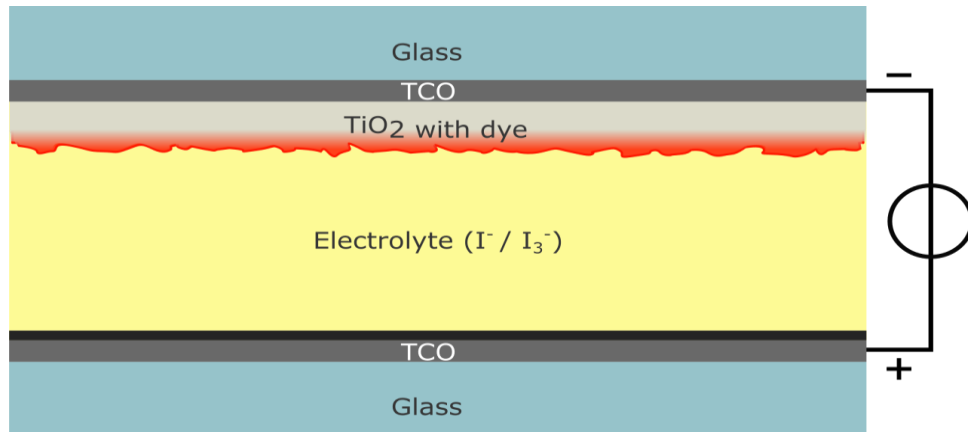


Figure III.13 : Type de cellule réalisé à l'EPFL par Grätzel et O'Regan [86].

III.8.1.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque de Grätzel : [87].

A la différence des cellules classiques à jonction P-N, l'absorption du photon et le transport des charges sont dissociés dans la cellule à colorant. Une cellule de Grätzel est constituée d'une cathode et d'une anode, en verre conducteur, sur laquelle se trouve une couche de semi-conducteur, ici le dioxyde de titane TiO_2 , où est adsorbée à sa surface un sensibilisateur ou colorant, entre les deux plaques se trouve une solution aqueuse : l'électrolyte.

Concrètement, le fonctionnement d'une cellule de Grätzel est un cycle régénératif (puisque aucune substance n'a été consommée ou produite durant le processus) :

Un photon incident traverse le verre et la couche de semi-conducteur jusqu'au colorant où il sera absorbé. Le colorant (appelé sensibilisateur S) perd un électron, et devient S^+ . Cet électron sera ensuite injecté dans la bande de conduction du semi-conducteur. Cette injection n'est possible que si l'énergie de l'électron produit par le colorant est élevée et correspond à celle de la bande de conduction du semi-conducteur. L'électron injecté traverse alors la couche de semi-conducteur jusqu'à l'anode et passe dans le circuit extérieur jusqu'à la cathode. A la cathode, cet électron qui a perdu de l'énergie durant son parcours se recombine au réducteur de l'électrolyte, l'ion tri-iodure, pour former l'ion iodure I^- . Finalement, I^- réagira avec le colorant oxydé et lui fournira un électron, ce qui fait revenir le système à son état initial. Tout ceci forme une boucle, ce qui permet d'avoir un circuit électrique. C'est la position des énergies dans le système qui permet d'avoir une tension entre les électrodes.

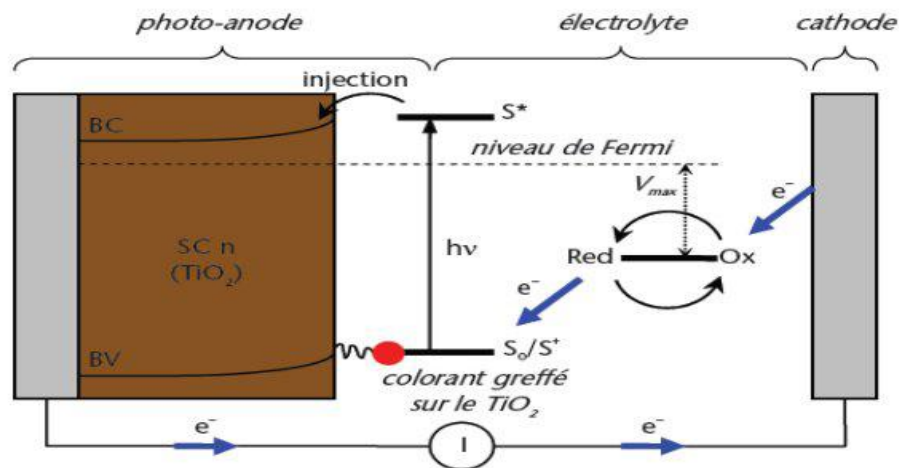


Figure III.14: Schéma de principe d'une cellule Grätzel.

III.8.2. Technologie aux polymères :

L'utilisation de matériaux polymères vise à remplacer les matériaux minéraux par des semi-conducteurs organiques, pour la fabrication de cellules photovoltaïques. Ceux-ci sont bon marché, ont des bonnes propriétés d'absorption et sont faciles à déposer. Leur coût de revient très faible se double de caractéristiques particulièrement attrayantes : plus légères et moins fragiles [89].

Les matériaux semi-conducteurs sont donc organiques. Ils se composent soit de petites molécules dont la masse volumique est inférieure à 1.000 g/mol (comme le PCBM incorporant un noyau de fullerène), soit de polymères plus volumineux (à l'image du P3HT), soit des deux à la fois. Le PCBM et le P3HT sont régulièrement associés au sein des cellules photovoltaïques organiques, car ils sont respectivement accepteur (type n) et donneur (type p) d'électrons. Ils peuvent donc former des hétérojonctions P-N [90].

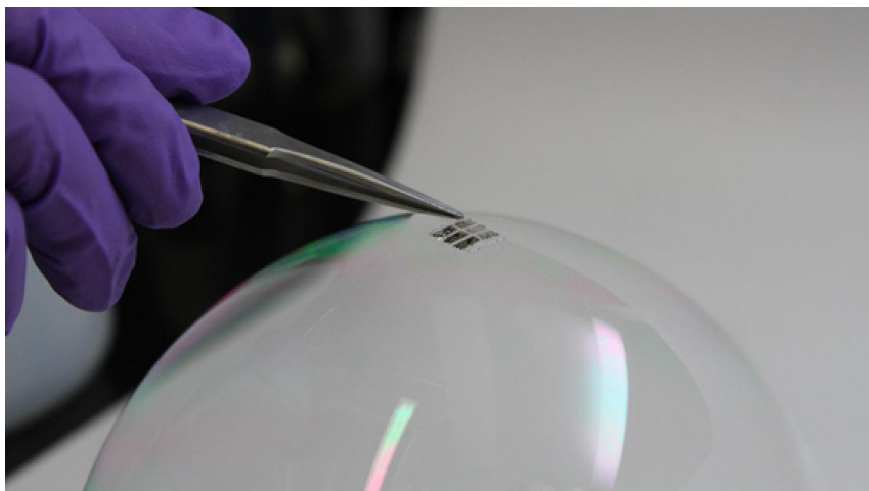


Figure III.15 : Cellules solaires ultra fines en polymère [91].

Le rendement des semi-conducteurs aux polymères organiques reste encore trop faible, aux alentours de 3 % [92].

III.8.2.1. Fonctionnement de cellule aux polymères :

Le principe de fonctionnement de ces cellules repose lui aussi sur l'effet photovoltaïque. L'impact d'un photon sur une molécule de type p peut ici aussi exciter un électron et donner naissance à une paire électron-trou (ou exciton). C'est précisément à ce moment qu'une importante différence apparaît, puisque la durée de vie des excitons est réduite. Les deux charges s'attirent fortement et tendent à se recombiner avant d'atteindre un site de dissociation, c'est-à-dire une jonction, et ce d'autant plus que leurs déplacements sont lents. Ainsi, les cellules organiques captent très bien la lumière, mais peu de charges sont collectées, ce qui se traduit par des rendements faibles.

Il a notamment été envisagé de réduire la distance séparant les sites de photogénération des lieux de dissociation des charges. L'une des solutions trouvées est simple : mélanger les molécules donnant et acceptant les électrons. Ainsi, des polymères de PCBM peuvent être séparés par des molécules de P3HT (qui ont une forme en bâtonnet) au sein d'un réseau interpénétré qui forme alors une seule couche absorbante. Une fois séparées, les charges sont collectées de manière conventionnelle grâce à des électrodes respectivement placées au-dessus et en dessous de la couche absorbante mixte [90].

III.8.3. Technologie aux nanocristaux :

Les cellules solaires à base de nanocristaux (NCx) sont développées en déposant une couche de nanocristaux sur un substrat (généralement du silicium ou divers matériaux organiques).

Les cellules aux nanocristaux semi-conducteurs (mesurant moins de 10 nm) appelé aussi cellule à boîtes quantiques, se composent d'une plaque de verre qui est recouverte par de l'oxyde d'étain dopé au fluor. Il sert de conducteur transparent. Un matériau semi-conducteur, comme le dioxyde de titane ou l'oxyde de zinc, est alors posé sur cette couche, avant d'être lui-même recouvert par les boîtes quantiques. Le tout est finalement fixé par un oxyde de molybdène, de l'or et de l'argent. L'épaisseur totale du dispositif est d'environ 1,5 μm [95].

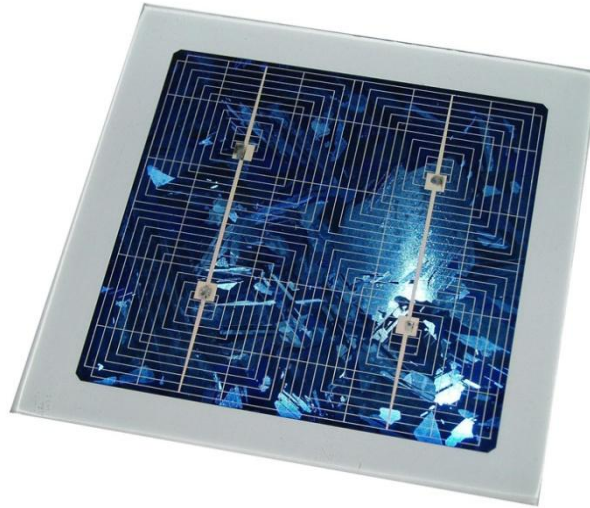


Figure III.16: Cellule solaire à nanocristaux à base d'encre [94].

Un rendement d'environ 7 % est actuellement détenu par des chercheurs de l'université de Toronto, au Canada. Cependant, il serait théoriquement possible d'atteindre des valeurs de 60 à 83% [92].

Les cellules à base de NCx constituent aujourd'hui un potentiel très intéressant pour trois raisons principales :

- ✓ Les NCx existent sous forme de solutions colloïdales offrant des possibilités de dépôt par voie liquide, techniques compatibles avec des procédés bas coûts. En effet, les NCx, dont la surface est entourée de ligands, se comportent comme des particules en suspension, et il est ainsi possible, par voie liquide, de les déposer sur une surface, après séchage du solvant ;
- ✓ l'idée de tirer avantage du confinement quantique, c'est à dire que le gap des NCx augmente avec la diminution de leur taille. Une utilisation en multi jonctions serait alors possible avec le même matériau en sélectionnant la plage d'absorption idéale pour chaque jonction par le contrôle de la taille de NCx;
- ✓ Ces matériaux s'auto-assemblent facilement lorsqu'ils sont déposés sur une surface, ce qui facilite leur mise en œuvre [95].

III.8.4. Cellules à pérovskite :

La pérovskite est l'une des technologies prometteuses pour le développement d'un système photovoltaïque. Les Cellules Pérovskites sont des cellules composées d'un élément hybride organique-inorganique, leur coût de production est faible. Ces cellules souffrent de problèmes de vieillissement et de stabilité structurale à l'échelle du module. Néanmoins bon nombre de

recherches prometteuses sont en cours et devraient finir de rendre ce type de cellules rapidement intéressantes.

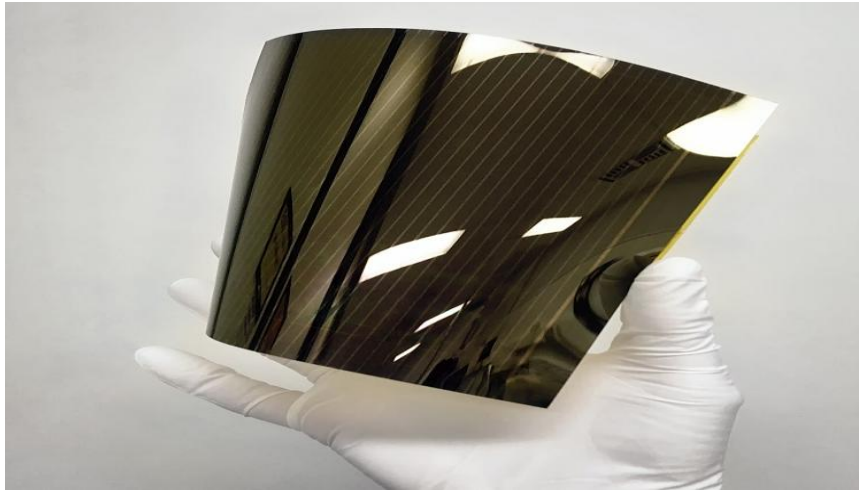


Figure III.17 : Cellule solaire à pérovskite [96].

Une cellule photovoltaïque à pérovskite est un type de cellule photovoltaïque dont la couche active est constituée d'un matériau de formule générale ABX_3 à structure pérovskite dans laquelle A est un cation, généralement de méthylammonium $CH_3NH_3^+$ (MA) de formamidinium $CH(NH_2)_2^+$ ou de césium Cs^+ , B est un cation d'étain Sn^{2+} ou de plomb Pb^{2+} , et X est un anion halogénure tel que chlorure Cl^- , bromure Br^- ou iodure I^- [97].

Le rendement des cellules photovoltaïques utilisant ces matériaux est en constante augmentation depuis la fin des années 2000. Elle est passée de 3,8 % en 2009 à 25,2 % en 2019, et 29.1 % pour le tandem de pérovskite et de silicium, soit une efficacité supérieure aux cellules photovoltaïques à jonction p-n en silicium. Les cellules à pérovskites sont donc à ce jour la technologie solaire ayant connu le développement le plus rapide de l'histoire [97] [98].

III.8.5. Comparatif des cellules de 3^{ème} génération :Tableau III.5 : Comparatif des cellules de 3^{ème} génération [59].

Paramètre	Génération III			
	Nanocristal	Colorant sensibilisé	Polymère	Pérovskite
Efficacité	7% - 8%	~10%	~3%– 10%	31%
Dépendance à la température	Thermiquement stable	Instable à haute température	Instable à haute température	Thermiquement stable
Bande interdite énergétique	~ 3Ev	~ 3Ev	~ 2Ev	~1 eV
Energie (TW/an)		~ 5	~ 0.01	
Mérites	Flexible, durable	Flexible, durable	Flexible, durable	Flexible, durable, haute efficacité
Démérites	L'exigence de durée et d'espace d'installation est élevée	L'exigence de durée et d'espace d'installation est élevée	L'exigence de durée et d'espace d'installation est élevée	L'exigence de durée et d'espace d'installation est élevée
Coût	Ne nécessite que 50% des dépenses des cellules traditionnelles à base de silicium	Ne nécessite que 50% des dépenses des cellules traditionnelles à base de silicium	Ne nécessite que 50% des dépenses des cellules traditionnelles à base de silicium	Ne nécessite que 50% des dépenses des cellules traditionnelles à base de silicium

Ces technologies coexistent sur le marché dans des proportions équivalentes depuis de nombreuses années malgré des prix et des rendements très différents. L'augmentation des rendements focalise particulièrement l'intérêt des chercheurs [34].

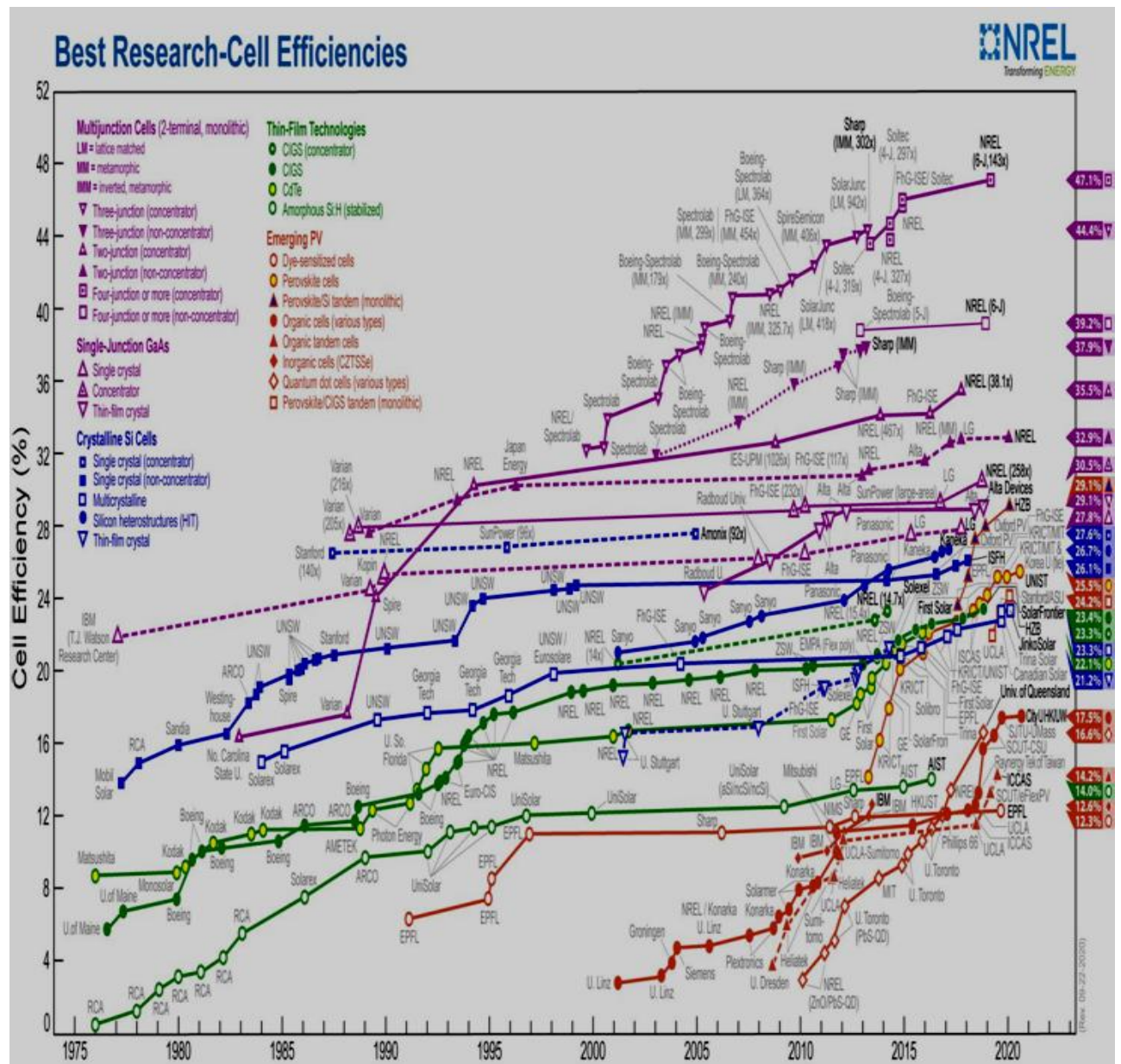


Figure III.18 : Diagramme montrant les différentes technologies et l'évolution des rendements des cellules au niveau de laboratoire [99].

Toutes les filières continuent de progresser de façon remarquablement continue depuis trente ans. Il n'y a pas eu de grandes ruptures dans cette progression et les nouvelles filières suivent sensiblement la même pente que les anciennes (Figure III-18). On a pu montrer que la limite théorique du rendement de la conversion énergétique se situe au-delà de 80% et n'est pas, a priori, hors d'atteinte [34].

III.9. Conclusion :

Ces technologies coexistent sur le marché dans des proportions équivalentes depuis de nombreuses années malgré des prix et des rendements très différents. L'augmentation des rendements focalise particulièrement l'intérêt des chercheurs.

L'industrie du photovoltaïque se tourne aujourd'hui vers le développement de techniques utiliseront à terme beaucoup moins de matière ou des matériaux moins onéreux.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne une application des plus actuelles des énergies renouvelables, celle de l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque. Une meilleure rentabilité de ce système à énergies renouvelables implique forcément un meilleur conditionnement, donc adaptation. Avant d'aborder la problématique de conversion, nous avons tout d'abord étudié le contexte et la problématique de l'énergie solaire photovoltaïque. Ceci s'avère nécessaire pour acquérir une connaissance approfondie du comportement d'un générateur photovoltaïque. Nous avons établi des programmes de calculs sous l'environnement Matlab permettant de tracer la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ pour différentes conditions météorologiques.

La production d'énergie électrique à l'aide de panneau photovoltaïque présente un point optimum de fonctionnement, c'est-à-dire, qu'il existe une tension aux bornes du générateur pour laquelle la puissance récoltée est maximale. Ce point optimum a une particularité de varier avec l'éclairement et la température. Finalement, on a présenté les différentes technologies photovoltaïques et leur efficacité énergétique.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie#515>
- [2] https://www.me.gov.dz/a/?page_id=2086&fbclid=IwAR1RGa4KcD43BOQZfd-dJiD5_EPsuBS9t8rZKa6JWmYApHYmzGrw7Ek0P2A
- [3] https://www.assistancescolaire.com/enseignant/elementaire/ressources/base-documentaire-en-sciences/soleil_bd?fbclid=IwAR1wCtb7gDSIU92s_pQJqLRX-0OJLv9dpKPZDnIX2I4KUy5q5ln_sAu5SVM
- [4] <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/21505314>
- [5] <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie#516>
- [6] <https://www.aps.dz/economie/82082-energie-photovoltaïque-un-potentiel-national-de-pres-de-2-6-millions-twh-an>
- [7] Zahar Soria & Makhlouf Cheymaa, « Etude et Simulation d'un Générateur Photovoltaïque muni d'un Convertisseur MPPT pour une meilleur Gestion Energétique », Mémoire de Master, Electronique, Université Mohamed Boudiaf M'sila, 2017.
- [8] Labouret, A & Viloz, M, « Energie Solaire Photovoltaïque », (2 e édition, vol 312), édition le moniteur, 2005.
- [9] Zouhair El Jouad, « Réalisation et Caractérisation des Cellules Photovoltaïques Organiques », Thèses de Doctorat, Physique, Université d'Angers, Français, 2016.
- [10] https://www.labri.fr/perso/billaud/travaux/Helios/Helios2/ressources/fr02/Chap_2_FR.pdf
- [11] http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M05_C02/co/Contenu_02.html
- [12] «Centrales photovoltaïques », Guide Pour le Dimensionnement et la Réalisation de Projets à l'usage des Bureaux.
- [13] <https://energieplus-lesite.be/theories/climat8/enseillement-d8/>
- [14] Bengati Ramzi, « Étude des Caractéristiques des Photovoltaïques en Fonction des Paramètres Climatique », Mémoire de Master, Mécanique Appliqué, Université Ben M'hidi d'oum el bouaghi, 2013.
- [15] <https://desktop.arcgis.com/fr/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/modeling-solar-radiation.htm>

- [16] <https://lenergie-solaire.net/blog/photovoltaique>
- [17] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Photon>
- [18] https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Photon.html?fbclid=IwAR2U2FipJ9Fweawqjnbbi_JaPAWEa2Q8QGgHHQPxYRbQJoyLSUH2TXXh5Jw
- [19] <https://123dok.net/document/eqo54k0y-lumiere-et-cellule-solaire.html>
- [20] Ibrahim NEYA, « Etude de l'influence de la Température sur les Paramètres Photovoltaïque dans les Conditions réelles de Fonctionnement », Mémoire de Master, Génie Electrique Energétique et Energie Renouvelable, Institut international d'ingénierie d'Ouagadougou, Burkina Faso, 2015.
- [21] <https://www.ecosources.org/types-de-cellules-photovoltaiques>
- [22] <https://mickaelsavary.fr/energie-solaire.php>
- [23] Ababacar Ndiaye, « Etude de la Dégradation et de la Fiabilité des Modules Photovoltaïques Impact de la poussière sur les Caractéristiques Electriques de Performance », Thèse de Doctorat, Université Cheikh Anta Diop Dakar, 2013.
- [24] <https://www.photovoltaique.info/fr/realiser-une-installation/choix-du-materiel/caracteristiques-des-panneaux-photovoltaiques/technologies-de-cellules-solaires-photovoltaiques/>
- [25] Semassou Clarence, « Aide a la Décision pour le Choix de Sites et Systèmes Energétiques adaptes aux Besoins du Bénin », Thèse de Doctorat, Mécanique, Ecole Doctorale de l'Université Bordeaux 1 ED 209, 2011.
- [26] <https://mypower.engie.fr/energie-solaire/conseils/schema-panneau-photovoltaique.html>
- [27] https://photovoltaique-solaires.blogspot.com/2012/07/branchement-des-panneaux-solaire-en_19.html?m=1&fbclid=IwAR17Ojw2iuz6PI2-TCOr_z3bO6KA8-UGQEtDmBw9XCx1MyNoAXDwMIPdt9U
- [28] http://newewa-sn.com/images/telechargements/systeme_solaire.pdf
- [29] <https://www.encyclopedie-energie.org/lenergie-solaire-photovoltaique-pv-une-filiere-competitive-en-site-isole/>

- [29] Moine, G, « L'électrification Solaire Photovoltaïque », (Vol 648), éditions Observ'ER, 2016.
- [30] <https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaïque6/rendement-et-puissance-crete-des-cellules-photovoltaïques/>
- [31] Vincent Foncrose. « Nanocristaux, films et cellules photovoltaïques de $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{SSe})_4$ par impression d'encre », Thèse de Doctorat, Université Toulouse 3 Paul Sabatier, 2011.
- [32] <https://www.dissertationsenligne.com/Biographies/Photovoltaïque/41571.html>
- [33] Khezzar, R & Zereg, M & Khezzar, A « Comparaison entre les Différents Modèles Electriques et Détermination des Paramètres de la Caractéristique I-V d'un Module Photovoltaïque », Revue des Energie Renouvelables, (Vol.13 N° 3, pp 379-388), 2010.
- [34] Helali Kamelia, « Modélisation d'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative », Mémoire de Magister, Electrotechnique, Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012.
- [35] Messaoudene Hichem, « Détermination Intelligente de la Puissance Maximale des Modules Photovoltaïques ». Mémoire de Magister, Electronique. Université El hadj Lakhdar Batna, 2014.
- [36] Benhaddouche Nesrine Fatima, « La Commande d'un Système Photovoltaïque d'un Satellite », Mémoire de Master, automatique, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 2013.
- [37] Zenakhi Asma. « Etude par simulation du fonctionnement d'un système photovoltaïque menu d'une commande MPPT ». Mémoire de Master, Electrotechnique, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 2016.
- [38] Trishan, E & Patrick, L, « Comparison of Photovoltaic array Maximum Power Point Tracking Techniques », IEEE transactions on energy conversion, 2006.
- [39] Merahi. R, « Modélisation d'un Dispositif MPPT pour l'Etude de l'Augmentation de la Puissance Produite par les Générateurs Photovoltaïques », Mémoire de Magister, Université de Badji mokhtar ,2010.
- [40] Chaabene, M, « Cour Gestion Energétique des Panneaux Photovoltaïque », Université de Sfax, 2008.
- [41] <https://www.futura-sciences.com/planete/videos/sont-principaux-obstacles-developpement-energie-photovoltaïque-4272/>
- [42] https://fr.wikipedia.org/wiki/Semi-conducteur_organique

- [43] <https://selectra.info/energie/guides/environnement/solaire/rendement-panneaux>
- [44] <https://www.photovoltaique.info/fr/realiser-une-installation/choix-du-materiel/architecture-electrique-dune-installation-photovoltaique/rendement-dun-systeme-photovoltaique/>
- [45] https://selectra.info/energie/guides/environnement/solaire/rendement-panneaux?fbclid=IwAR368jtf4V9SE0icgxIH3Tu_COiRwa8LTTJqXetm4MFRQpPmmofroj0kvQM
- [46] https://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule_photovolta%C3%AFque
- [47] Płaczek-Popko LE. Top PV market solar cells 2016. Opto-electronics review. Opto-Electron Revue, 25(2):55–64, 2017.
- [48] <https://energieplus-lesite.be/techniques/photovoltaique3/types-de-cellules/>
- [49] Bernard, F, « La Production Photovoltaïque d'Electricité : Quelles Perspectives pour le Pays Provence Verte? ». Juillet 2009.
- [50] <https://www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/pdf/2007/03/refdp20075p13.pdf>
- [51] https://www.encyclopedie-energie.org/wp-content/uploads/2017/05/art141_figure2_sable-hollandais.jpg
- [52] https://www.encyclopedie-energie.org/wp-content/uploads/2017/05/art141_figure3_quartz-la-gardette.jpg
- [53] https://www.wikiwand.com/fr/Cellule_photovolta%C3%AFque
- [54] <https://www.ef4.be/fr/pv/composants-dun-systeme/cellules-photovoltaiques.html>
- [55] Ketfi Mohammed el Amin. « Etude et Adaptation des Cellules Biologiques Photosensibles à des Microsystèmes Optoélectroniques », Mémoire de Magister, Electronique, Université de l'UST ORAN, 2011.
- [56] https://www.encyclopedie-energie.org/wp-content/uploads/2017/05/art141_figure1_fabrication-modules-photovoltaiques.jpg
- [57] Thomas Mambrini. « Caractérisation de Panneaux Solaires Photovoltaïques en Conditions Réelles d'implantation et en fonction des Différentes Technologies », Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud, 2014.
- [58] <https://blog.bluesol.com.br/celula-fotovoltaiica-guia-completo/>

- [59] Venkateswari, R & Sreejith, S, Renewable and Sustainable Energy Reviews 101, pp 376–394, 2019.
- [60] Yin Weiwei, Wang Xusheng, Zhang Feng, Zhang Lingjun. 19.6% Cast Mono-MWT Solar Cells and 268 W Modules, IEEE J Photovolt 2013, 3(2):697–701.
- [61] https://img.archiexpo.fr/images_ae/photo-mg/157636-12016416.webp
- [62] Kabouche Azouz. « Architecture et Efficacité Energétique des Panneaux Solaires », Mémoire de Magistère, Architecture Bioclimatique, Université Mentouri de Constantine, 2012.
- [63] <https://cordis.europa.eu/article/id/91463-thinfilm-solar-cells-poised-for-big-growth/fr>
- [64] <https://www.energreen.be/faq/photovoltaique/comprendre-photovoltaique/deux-generations-de-technologies>
- [65] <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/developpement-durable-cellules-photovoltaiques-coeur-panneaux-solaires-1688/page/8/>
- [66] <https://www.laliberte.ch/news-agence/detail/empa-efficacite-record-pour-des-cellules-solaires-flexibles/524980>
- [67] Kevin Bullis, « Advanced Solar Panels Coming to Market », Technology Review, 17 September 2009.
- [68] <https://www.hisour.com/fr/thin-film-solar-cell-39519/>
- [69] https://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule_CIGS
- [70] <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/developpement-durable-cellules-photovoltaiques-coeur-panneaux-solaires-1688/page/11/>
- [71] https://cdn.futura-sciences.com/buildsv6/images/mediumoriginal/b/2/4/b2420b6978_36346_12436-graphic-cigs-cell-nrel.jpg
- [72] <https://www.ecosources.org/types-de-cellules-photovoltaiques>
- [73] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Frittage>
- [74] <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.150.728>

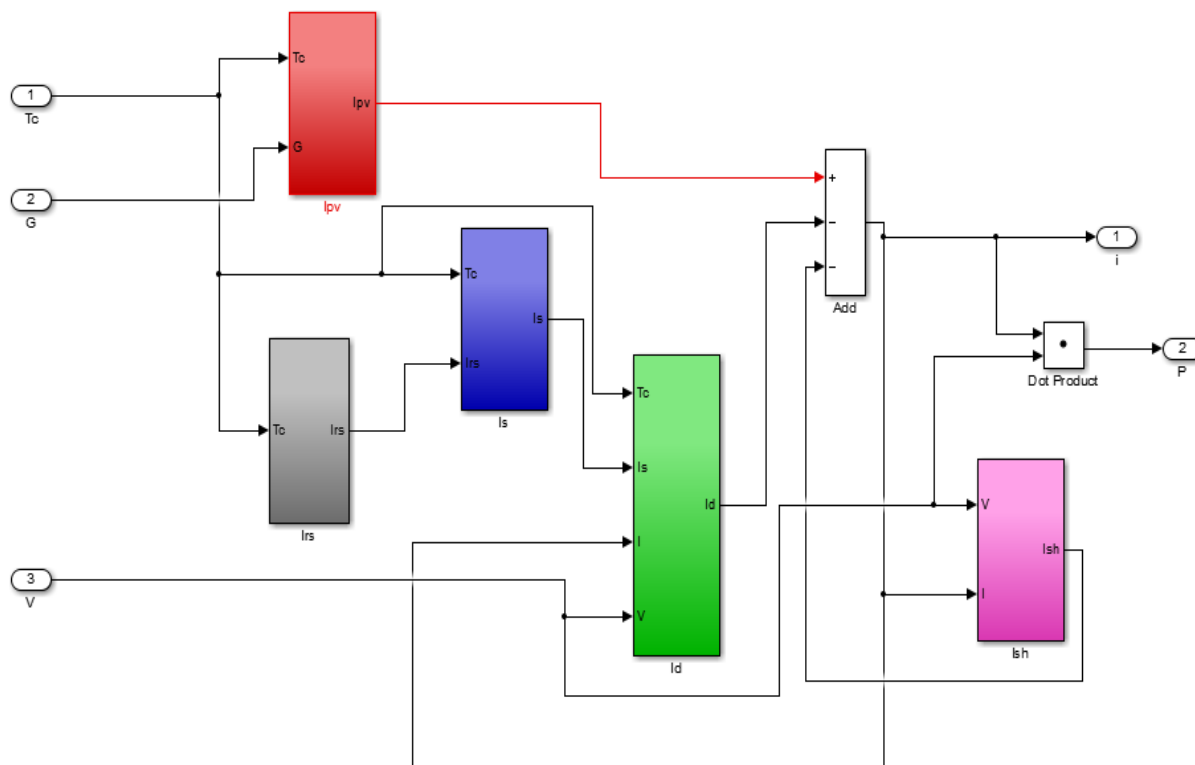
- [75] <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/developpement-durable-cellules-photovoltaiques-coeur-panneaux-solaires-1688/page/10/>
- [76] https://fr.wikipedia.org/wiki/Tellurure_de_cadmium
- [77] https://cdn.futura-sciences.com/buildsv6/images/mediumoriginal/3/1/5/31577311e2_36339_12434-graphic-cdte-cell-nrel.jpg
- [78] <https://www.hisour.com/fr/third-generation-photovoltaic-cell-39628/>
- [79] https://www.usinenouvelle.com/mediatheque/6/2/9/000856926_896x598_c.jpg
- [80] <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/developpement-durable-cellules-photovoltaiques-coeur-panneaux-solaires-1688/page/14/>
- [81] https://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule_solaire_%C3%A0_pigment_photosensible#cite_note-p6599-4
- [82] <https://actu.epfl.ch/image/82313/1108x622.jpg>
- [83] <https://actu.epfl.ch/news/un-nouveau-colorant-revolutionne-les-cellules-grat/>
- [84] Anders Hagfeldt, Gerrit Boschloo, Licheng Sun, Lars Kloo et Henrik Pettersson, « Dye-Sensitized Solar Cells », *Chemical Reviews*, vol. 110, n° 11, p 6599–6602, 2010.
- [85] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Operating_diagram_of_DSC.svg?uselang=fr
- [86] Abdellah Benyoucef, « Développement de Surfaces à Base de Dioxyde de Titane par PVD pour une Application aux Cellules Solaires ». Université de Franche Comté, 2008.
- [87] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaique>
- [88] <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/developpement-durable-cellules-photovoltaiques-coeur-panneaux-solaires-1688/page/13/>
- [89] <https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/recherche-bientot-cellules-solaires-plastique-10703/>
- [90] <https://plastic-lemag.com/Cellules-solaires-ultra-fines-en-polymere>
- [91] <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/developpement-durable-cellules-photovoltaiques-coeur-panneaux-solaires-1688/page/14/>

- [92] <https://www.extremetech.com/extreme/103477-cheap-ink-based-printable-nanocrystal-solar-cells-become-a-reality>
- [93] Antoine de Kergommeaux. « Synthèse de Nouveaux Types de Nanocristaux Semi-conducteurs pour Application en Cellules Solaires », Thèse de Doctorat, Chimie des Matériaux. Université de Grenoble, 2012.
- [94] <https://www.lechodusolaire.fr/wp-content/uploads/2017/11/Solliance-221117.jpg>
- [95] https://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule_photovolta%C3%AFque_%C3%A0_p%C3%A9rovskite
- [96] Akihiro Kojima, Kenjiro Teshima, Yasuo Shirai & Tsutomu Miyasaka, « Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells », J. Am. Chem. Soc., American Chemical Society (ACS), vol. 131, n° 17, p. 6050-6051, 6 mai 2009.
- [97] <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/best-research-cell-efficiencies.20200406.pdf>

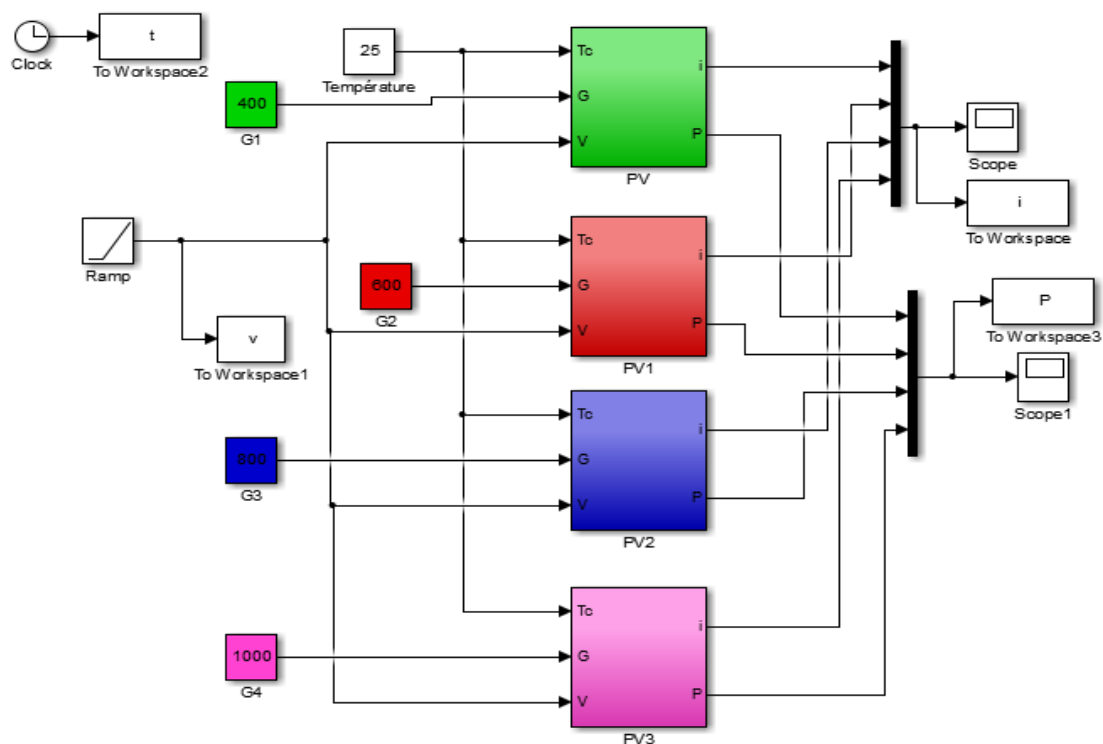
Annexes

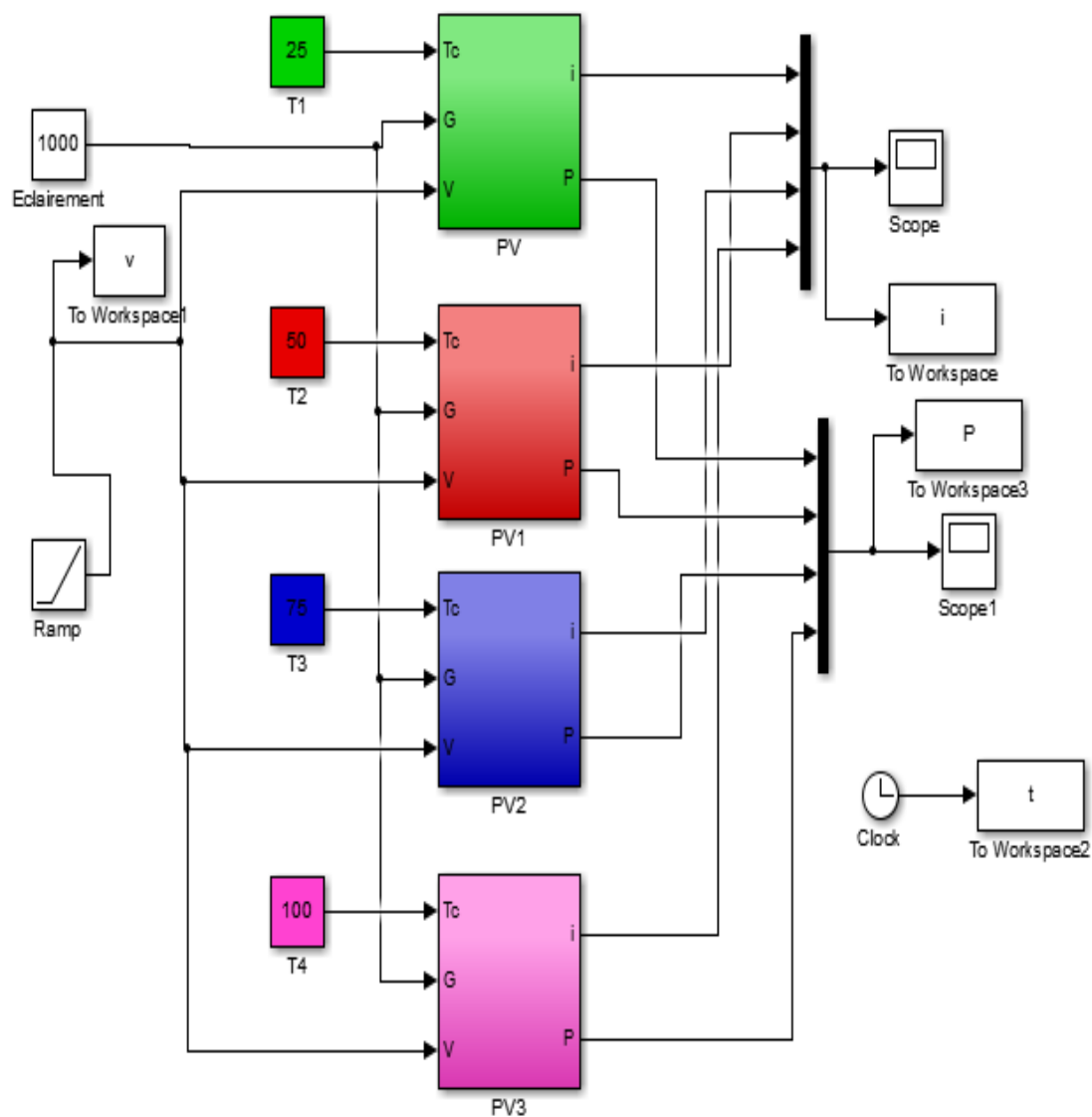
Annexe 1 :

Block Simulink Sur Matlab Des Courants Dans Les STC.



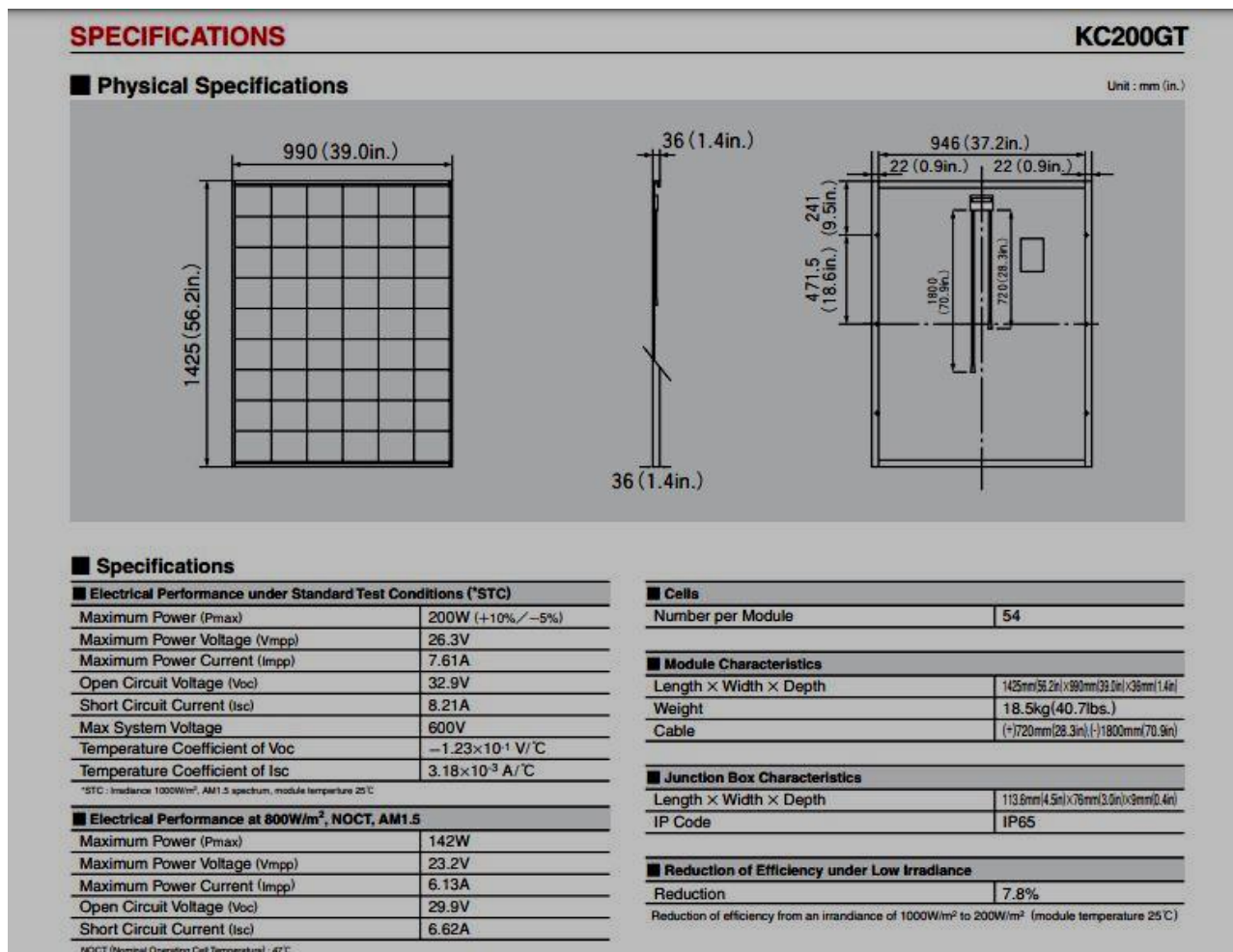
Block Simulink Des Modules PV Pour Différentes Valeurs D'éclairements A Une Température Constante.



Block Simulink Des Modules PV Pour Différentes Valeurs De Températures A Un Eclairement Constant.

Annexe 2 :

Module Photovoltaïque KYOCERA KC200GT



Résumé

Le travail développé dans ce mémoire concerne l'étude de l'effet de la température et de l'éclairage sur les performances des modules photovoltaïques (PV) à base de silicium polycristallin.

En effet, le rendement de conversion des modules PV est différent du rendement dans les conditions standard, et dépend principalement des matériaux, de l'éclairage et de la température. Ces deux derniers sont des paramètres variables au cours de l'année et de la journée. L'étude du fonctionnement de ces modules, en conditions réelles d'utilisation, est donc une nécessité.

Pour cela, les méthodes d'optimisation des module PV sont d'une grande utilité pour les fabricants n'ayant pas des informations détaillées sur les futurs sites d'implémentation de leurs produits.

Mots clés : Modules photovoltaïques (PV), Température, Eclairage, Rendement.

ملخص

يتعلق العمل الذي تم تطويره في هذه الرسالة بدراسة تأثير درجة الحرارة والإضاءة على أداء الوحدات على متعدد السيلكون الكهروضوئية المعتمدة.

وذلك لأن كفاءة التحويل للوحدات الكهروضوئية تختلف عن الكفاءة في ظل الظروف القياسية ، وتعتمد بشكل أساسي على المواد والإضاءة ودرجة الحرارة. هذان الأخيران عبارة عن معلمات متغيرة على مدار العام واليوم. لذا فإن دراسة تشغيل هذه الوحدات، في ظروف الاستخدام الحقيقية، أمر ضروري.

لهذا الغرض ، تعد طرق تحسين الوحدة الكهروضوئية مساعدة كبيرة للمصنعين الذين ليس لديهم معلومات مفصلة عن المواقع المستقبلية لتنفيذ منتجاتهم.

الكلمات المفتاحية : الوحدات الكهروضوئية، درجة الحرارة، الإضاءة، كفاءة التحويل.

Abstract

The work developed in this dissertation concerns the study of the effect of temperature and illumination on the performance of Photovoltaics (PV) modules based on silicon polycrystallin.

This is because the conversion efficiency of PV modules is different from the efficiency under standard conditions, and depends mainly on materials, illumination and temperature. These last two parameters are variable throughout the year and the day. The study of the operation of these modules, in real conditions of use, is therefore a necessity.

For this, PV module optimization methods are of great help to manufacturers who do not have detailed information on future sites for their product implementation.

Keywords: Photovoltaic modules (PV), Temperature, Illumination, Efficiency.