



République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد بوقرة - بومرداس - Université M'hamed Bougara de Boumerdès

Faculté des hydrocarbures et de la chimie

Département : Automatisation et électrification des procédés industriels

Spécialité : Commande Automatique

Mémoire de projet de fin d'études En vue de l'obtention du diplôme de

Master

Présenté et soutenu par :

encadré par :

- **Benchacha Abdelghani**
- **Mekkaoui Mohamed Akrame**

Mr Chaib.A

Thème :

Étude de système photovoltaïque

Devant le jury d'examen :

Mr. A.BENHALLA

Examineur

Mr. M.KESRAOUI

Examineur

Promotion

2019/ 2020

Remerciements

Nous remercions, en premier lieu, notre Dieu qui a bien voulu nous donner la force pour effectuer le présent travail.

Nous tenons aussi à exprimer nos sincères remerciements à notre encadrant Monsieur « CHAIB. A » pour avoir accepté de diriger notre travail ; sa clairvoyance et ses compétences nous ont été d'une aide inestimable.

Comme nous tenons enfin à remercier tous nos enseignants durant notre formation théorique au niveau de la faculté

Nombreuses sont les personnes qui m'ont soutenu, ma famille, mes amies, je ne peux tous les citer, qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Je dédie ce modeste travail

❖ *premièrement à mes chers parents ma mère et mon père.*

❖ *A mes sœurs*

❖ *A mes frères.*

❖ *A toute ma famille.*

❖ *A tous mes amies.*

❖ *A tous mes collègues de promo 2015.*

Akrame & Abdelghani

Sommaire

Introduction Générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I : Généralité sur L'énergie solaire

I. Introduction	4
I.1.Soleil	5
I.2.Pouvoir énergétique du soleil	7
I.3.Rayonnement solaire	9
I.3.1. Unités utilisées	12
I.3.2. Instruments de mesure	13
I.4.L'énergie solaire en l'Algérie	14
I.5.Conclusion	15

Chapitre II : Étude de la cellule solaire à conversion photovoltaïque

II. Introduction	17
II.1. photovoltaïque	17
II.1.1. Qu'est-ce que l'énergie solaire photovoltaïque ?	17
II.1.2. Le principe de l'effet photovoltaïque	18
II.2. La cellule photovoltaïque	18
II.2.1. Définition d'une cellule solaire	18
II.2.2. Le principe de fonctionnement d'une cellule PV	19
II.2.3. Schéma électrique d'une cellule PV	20
II.2.4. Caractéristiques d'une cellule PV	23
II.3. Structure des cellules solaires	29
II.4. Les filières technologiques d'une cellule PV	30
II.4.1. Le silicium	31
II.4.2. Les couches minces	33
II.4.3. Les cellules solaires organiques	35
II.5. Le module photovoltaïque	37
II.5.1. Définition	37
II.5.2. Caractéristiques d'un module photovoltaïque	37
II.5.3. La constitution d'un module photovoltaïque	38
II.5.4. Regroupement des cellules	39

II.5.4.1.	Regroupement des cellules en série	39
II.5.4.2.	Regroupement de cellules en parallèle ...	41
II.5.4.3.	Regroupement des cellules (série et parallèle)	42
II.6.	Conclusion	44

Chapitre III : Les centrales photovoltaïques

III.	Introduction	46
III.1.	Les centrales solaires	46
III.2.	Les composants d'une centrale photovoltaïque	46
III.2.1.	Les panneaux solaires	47
III.2.1.1.	Les types de panneaux	49
III.2.2.	Système de stockage	49
III.2.2.1.	Les Caractéristiques principales d'une batterie	50
III.2.2.2.	Types d'accumulateurs	52
III.2.3.	Système de régulation	57
III.2.3.1.	Technique de régulation	58
III.2.4.	Système de protection	62
III.2.5.	Système de conversion	64
III.2.6.	La Charge	68
III.3.	Les différents types de systèmes photovoltaïques	69
III.3.1.	Système autonome	69
III.3.2.	Système hybride	71
III.3.3.	Systèmes raccordés au réseau	72
III.4.	Comparaison des systèmes photovoltaïques	73
III.5.	Les critères de choix d'une centrale photovoltaïque	77
III.6.	Avantages et inconvénients d'une installation PV	77
III.7.	Conclusion	79

Chapitre IV : Modélisation et simulation d'un panneau photovoltaïque

IV.	Introduction	81
IV.1.	Modélisation du panneau photovoltaïque	81
IV.1.1.	Description du modèle utilisé	81

IV.2.	Création du modèle du panneau photovoltaïque	
	sous Matlab /Simulink	83
IV.2.1.	Création de la « boîte noire »	83
IV.2.2.	Paramétrage du modèle	88
IV.2.3.	Création d'un script contenant les valeurs des paramètres du modèle	90
IV.2.4.	Simulation du modèle	90
IV.3.	Influence de température et l'irradiation sur un panneau PV	94
IV.4.	Conclusion	97
	Conclusion Générale	98
	Liste des figures	100
	Liste des tableaux	103
	Annexe	104

Introduction Générale

Chaque jour, la terre reçoit sous forme d'énergie solaire l'équivalent de la consommation électrique de 5.9 milliards de personnes pendant 27 ans. La technologie photovoltaïque permet de transformer une partie de cette énergie en électricité. Cette transformation s'effectue sans bruit, sans émission de gaz : elle est donc par nature totalement propre. Par ailleurs, l'absence de mise en mouvement de pièces mécaniques lui confère un niveau de fiabilité inégalable (durée de vie moyenne d'un module estimée à plus de 30 ans). D'autre part comme les sources d'énergie conventionnelle se réduisent vite et le coût de l'énergie augmente avec le développement industriel, le problème de la diminution d'énergie s'aggrave de plus en plus. La gravité des problèmes de l'environnement résultant fait que l'utilisation des systèmes à énergie renouvelable devient un objectif majeur pour l'humanité.

L'énergie photovoltaïque est une source d'énergie propre et renouvelable, qui est un moyen intéressant de réduire les coûts de distribution de l'électricité dans certaines régions. Particulièrement disponible dans la plupart des pays situés entre l'équateur et les 45° parallèles. C'est une source d'énergie d'une fiabilité remarquable qui présente un bilan énergétique et environnemental tout à fait favorable. On peut utiliser cette énergie pour l'alimentation des régions isolées ou désertes soit pour l'éclairage, pour le pompage d'eau, pour la charge d'une batterie ou pour la connexion sur le réseau public électrique. Notre intérêt porte sur cette dernière utilisation qui nécessite le recours d'un convertisseur pour transférer l'énergie électrique au réseau public. Toutefois, l'énergie solaire est caractérisée par sa fluctuation selon la saison et les heures de la journée.

L'énergie fournie par les panneaux solaires dépend de l'intensité de l'éclairement, de la température et de la tension aux bornes du panneau, ce qui engendre une utilisation intermittente et irrégulière. Dans ce sens la puissance délivrée au réseau peut ne pas être maximale ce qui peut réduire l'efficacité du système photovoltaïque. Il est donc nécessaire de poursuivre la puissance maximale du panneau solaire (MPPT) .

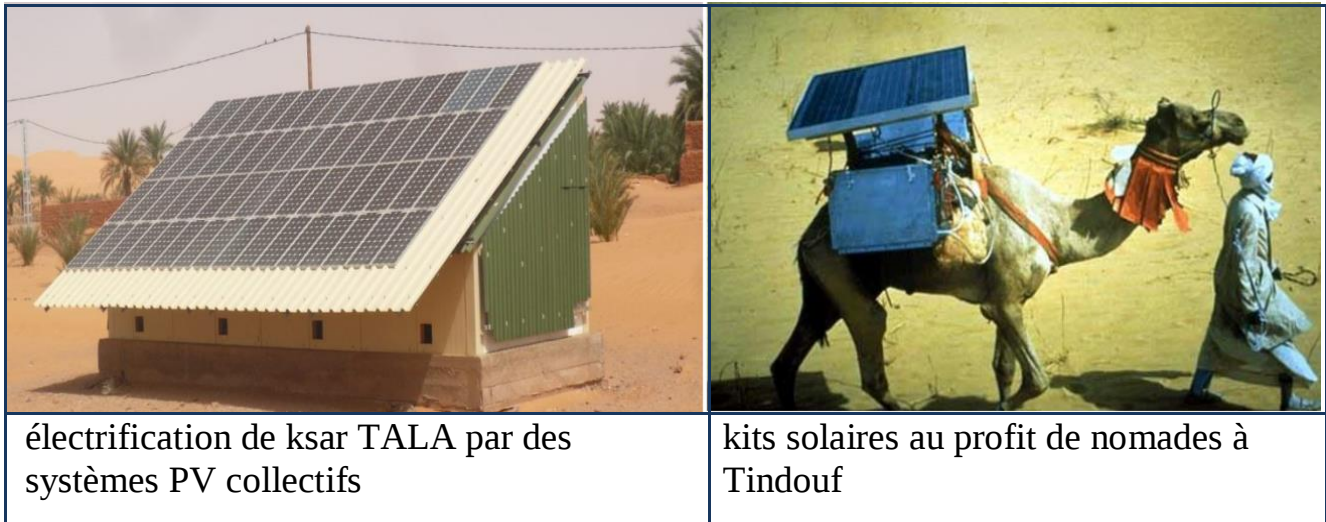


Figure A : exemples d'électrification par des systèmes PV .

Le travail, présenté dans ce mémoire, est l'étude de principe de fonctionnement et mesures des caractéristiques d'une cellule photovoltaïque et l'étude des systèmes photovoltaïque Pour ce faire nous avons présenté ce manuscrit de la façon suivante :

Dans **le premier chapitre**, nous avons décrit des généralités sur la source de l'énergie solaire (le soleil) et les types de l'énergie solaire, le pouvoir énergétique du soleil et son rayonnement.

Le second chapitre, est une revue bibliographique sur les cellules et les modules photovoltaïques. Les différentes technologies utilisées sont également détaillées.

Dans **le troisième chapitre**, une étude descriptive générale des systèmes photovoltaïques est présentée. Cette étude comprend : la conception des systèmes photovoltaïques, leurs types, leurs problèmes produits, leurs compositions et les critères de choix d'un système photovoltaïque.

Le **quatrième chapitre**, pour la simulation de cellule photovoltaïque, représentation sa caractéristique, à l'aide du logiciel **MATLAB**.

Enfin, **une conclusion générale** couronne ce mémoire pour récapituler nos analyses, nos résultats et nos commentaires.

Chapitre I :

Généralité sur L'énergie solaire

I. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons des généralités sur la source de l'énergie solaire (le soleil) et des notions fondamentales sur l'élément clé dans la conversion photovoltaïque (La cellule solaire) .

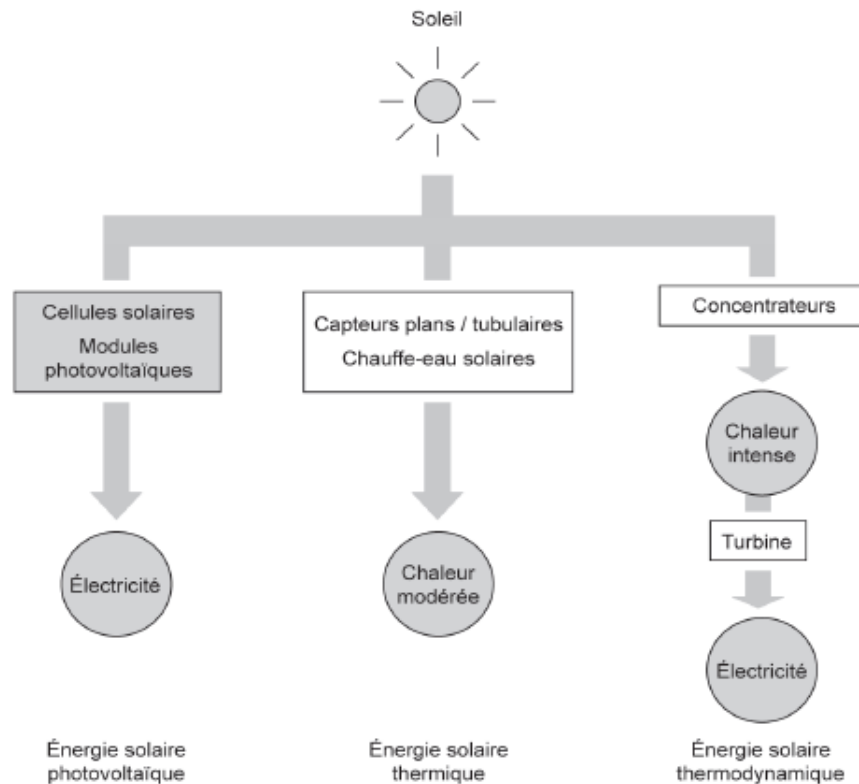


Figure I.1 : Types d'énergie solaire.

L'énergie solaire photovoltaïque convertit directement le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en électricité. Elle utilise pour ce faire des modules photovoltaïques composés de cellules solaires ou de photopiles qui réalisent cette transformation d'énergie.

Elle est radicalement différente de l'énergie solaire thermique qui, quant à elle, produit la chaleur à partir du rayonnement solaire infrarouge afin de chauffer de l'eau ou de l'air. On utilise dans ce cas des capteurs thermiques qui relèvent d'une toute autre technologie. Dans le langage courant, ce sont des (chauffe- eau solaire) ou des capteurs à air chaud.

Il y a aussi ce qu'on appelle l'énergie solaire thermodynamique, qui fonctionne sur un principe de concentration des rayons solaire au moyen de miroirs, en un foyer placé sur une tour qui emmagasine les calories pour les restituer ensuite sous forme mécanique à l'air de turbine à vapeur.

Ces aspects de l'énergie solaire ne sont pas notre objectif dans ce mémoire, qui est strictement dédié à l'énergie photovoltaïque. On évitera le terme {capteur solaire} car il maintient l'ambiguïté entre les différentes techniques.

Remarque : Seuls ces capteurs thermiques sont intéressants pour les applications de chauffage solaire. Il serait aberrant de chauffer avec l'électricité issue de modules photovoltaïques. Cette solution aurait un très mauvais rendement global et serait beaucoup plus onéreuse [1].

I.1. Soleil :

Sur le plan cosmogonique, le soleil est une étoile quelconque dont ni les propriétés physiques ni la position ne la distinguent des milliards d'autres étoiles formant la Galaxie. Sur le plan humain cette étoile a une importance primordiale puisque sans elle la vie n'existerait pas sur terre. Le tableau suivant montre quelques caractéristiques principales du soleil [2] :

Caractéristique	Valeur
Masse	$1,989 \times 10^{30} kg$
Diamètre	$1,392 \times 10^9 m$
Masse volumique moyenne	$1410 Kg.m^{-3}$
Puissance rayonnée	$3,83 \times 10^{26} W$
Température superficielle	$5770 K$

Tableau I.1 : Caractéristiques principales du soleil.

La structure du soleil est schématisée sur la figure (1). On distingue quatre zones particulières : le noyau, la photosphère, la chromosphère et la couronne [2] :

Le noyau : c'est le coeur du soleil, sa température est très élevée ($15 \times 10^6 \text{ K}$) ainsi que sa pression ($2 \times 10^{11} \text{ bars}$) et sa densité ($\sim 10^5 \text{ Kg.m}^{-3}$), on note que cette dernière diminue avec l'éloignement au centre.

L'énergie produite au sein du noyau se propage par diffusion radiative puis par convection turbulente jusqu'à la photosphère d'où elle s'échappe sous forme de rayonnement électromagnétique vers l'espace.

La photosphère : est une couche d'environ **300 Km** d'épaisseur avec une température de **5770 K**. Elle donne l'image visible du soleil.

La chromosphère : est l'atmosphère du soleil. Elle a une épaisseur d'environ **8 000 Km** et une température de **20 000 K** environ [2].

La couronne : est le prolongement de la photosphère. Sans limite précise, elle est formée de gaz peu denses et ionisés. Invisible depuis la terre, car son éclat (brillance) se confond avec celui du ciel bleu. Elle ne peut être observée que pendant une éclipse solaire. Sa température est très élevée puisqu'elle dépasse le million de degrés.

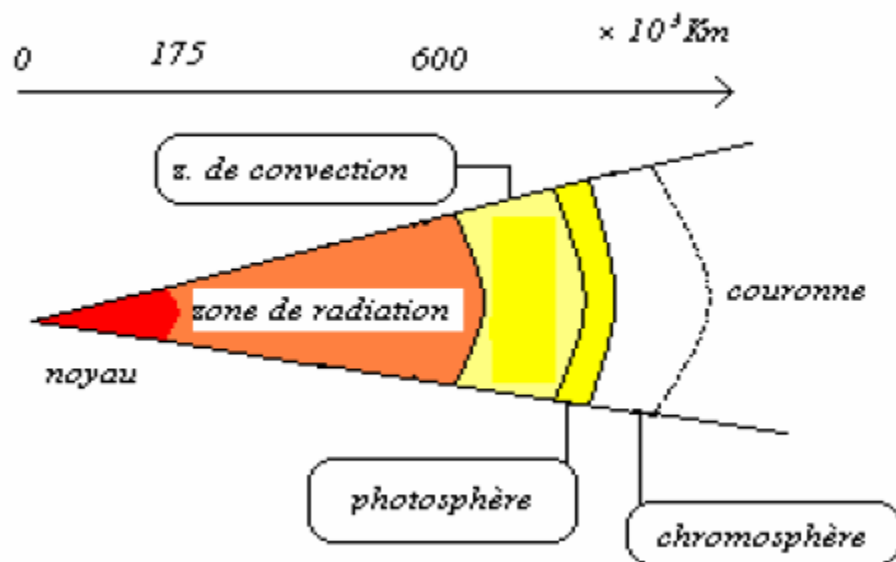


Figure I.2 : Coupe schématique du soleil.

Le soleil est composé chimiquement [18] de **70 %** d'hydrogène et d'environ **28 %** d'hélium et le **2 %** restant étant mélange de plus de **100**

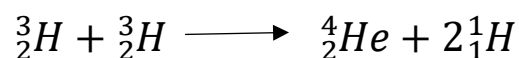
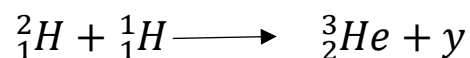
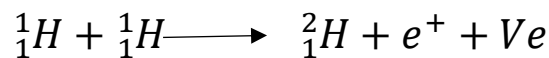
éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connues. La distance terre-soleil est égale en moyenne et approximativement à [2] **$150 \times 10^6 \text{ Km}$** ; cette distance est si grande que sa lumière nous parvient **8** minutes après avoir été émise.

I.2. Pouvoir énergétique du soleil :

Le soleil est à l'origine de la vie sur la terre et la perpétue par son apport incessant d'énergie ; cette énergie est vraiment considérable (tableau I.1). Elle nous arrive sous forme d'un rayonnement électromagnétique à travers l'espace et qui nous éclaire, nous réchauffe et fait croître les plantes.

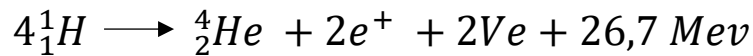
L'énergie solaire est produite par les réactions de fusion thermonucléaire d'hydrogène en hélium au sein du noyau du soleil ; ce processus engendre un défaut de masse (Δm) qui se transforme en énergie (ΔE) selon la célèbre relation d'Einstein ($\Delta E = \Delta m \times C^2$) où C est la vitesse de la lumière dans le vide ($C = 2.99792 \times 10^8 \text{ m/s}$). Deux cycles ont été imaginés par les astrophysiciens pour décrire les étapes conduisant à cette fusion [2] :

Le cycle proton-proton : fournit **90 %** de l'énergie solaire. Les réactions nucléaires régissant ce cycle sont données, dans **91 %** des cas (dans **9 %** des cas, les réactions sont plus complexes et font intervenir des noyaux de béryllium **7** et **8**, de lithium **7** et de bore **8** [2]), par les équations (I.1) ci-dessous. La notation 1H représente le noyau de l'atome d'hydrogène **1**, c'est-à-dire un proton. Il y a émission de positrons e^- (rayonnement bêta plus « β^+ »), de neutrinos νe et de photons γ .



Le cycle du carbone : fournit **10 %** restants. Ce cycle peut être schématisé par le diagramme ci-dessous (figure I.3).

On peut résumer ces deux cycles par l'équation globale suivante (en omettant le rayonnement γ) :



Quatre protons fusionnent pour donner naissance à un noyau d'hélium avec émission de deux positons e^+ , de deux neutrinos ν_e et accompagnes d'une énergie égale à **26,7 MeV [4]**.

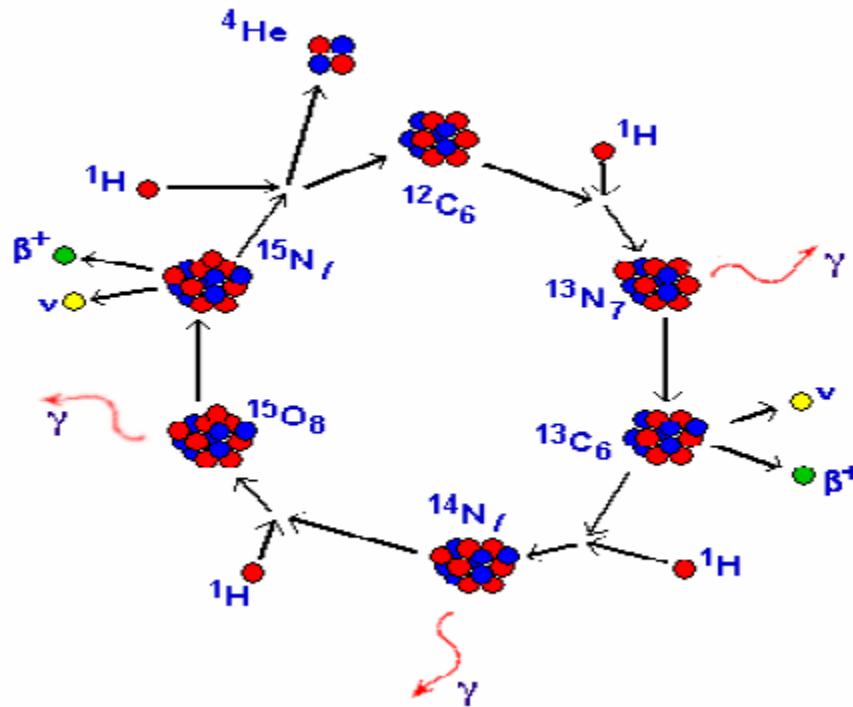


Figure I.3 : Cycle du carbone ; 4 noyaux d'hydrogène se transforment en un noyau d'hélium avec émission de 3 photons γ , de 2 positons e^+ et de 2 neutrinos ν_e .

L'énergie solaire est la source d'énergie renouvelable la plus disponible et la plus importante. Cependant, l'énergie solaire reçue par la Terre représente par an près de **15 000** fois la totalité de la consommation énergétique mondiale actuelle [31] deux utilisations de l'énergie solaire sont offertes : la première étant de générer de la chaleur (le solaire thermique), la seconde étant de produire de l'électricité (le solaire photovoltaïque).

I.3. Rayonnement solaire :

La répartition spectrale du rayonnement solaire [31] est déterminée par la température de sa surface, à savoir **5900° K**. La figure (I-4) donne l'allure de la répartition spectrale du rayonnement solaire réel hors atmosphère (l'éclairement spectral est définie comme une puissance reçue par une surface pour une longueur d'onde donnée ; il s'exprime **en $W/m^2.nm$** [20]) comparé à celle du corps noir¹ à **5900 K**, on constate que le soleil se comporte approximativement comme un corps noir. Ces spectres montrent que le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur variant de **0.2 μm** (ultraviolet) à **10 μm** (infrarouge). Ce rayonnement solaire se décompose en bandes comme suit [8] :

- ❖ **6.4 %** dans la bande ultraviolette (**UV**) : **$0,2 < \lambda \leq 0,38\mu m$** .
- ❖ **48,0 %** dans la bande visible : **$0,38 < \lambda \leq 0,78\mu m$** .
- ❖ **45,6 %** dans la bande infrarouge (**IR**) : **$0,78 < \lambda \leq 10\mu m$** .

La figure (I.4), montre aussi, l'atténuation observée après le passage à travers une épaisseur d'atmosphère correspondant à une masse d'air **1,5** (on la définit ci-dessous), soit l'équivalent d'une hauteur du soleil **de 41.8° « $h=41.8^\circ$ »** au niveau de la mer (altitude nulle) [21].

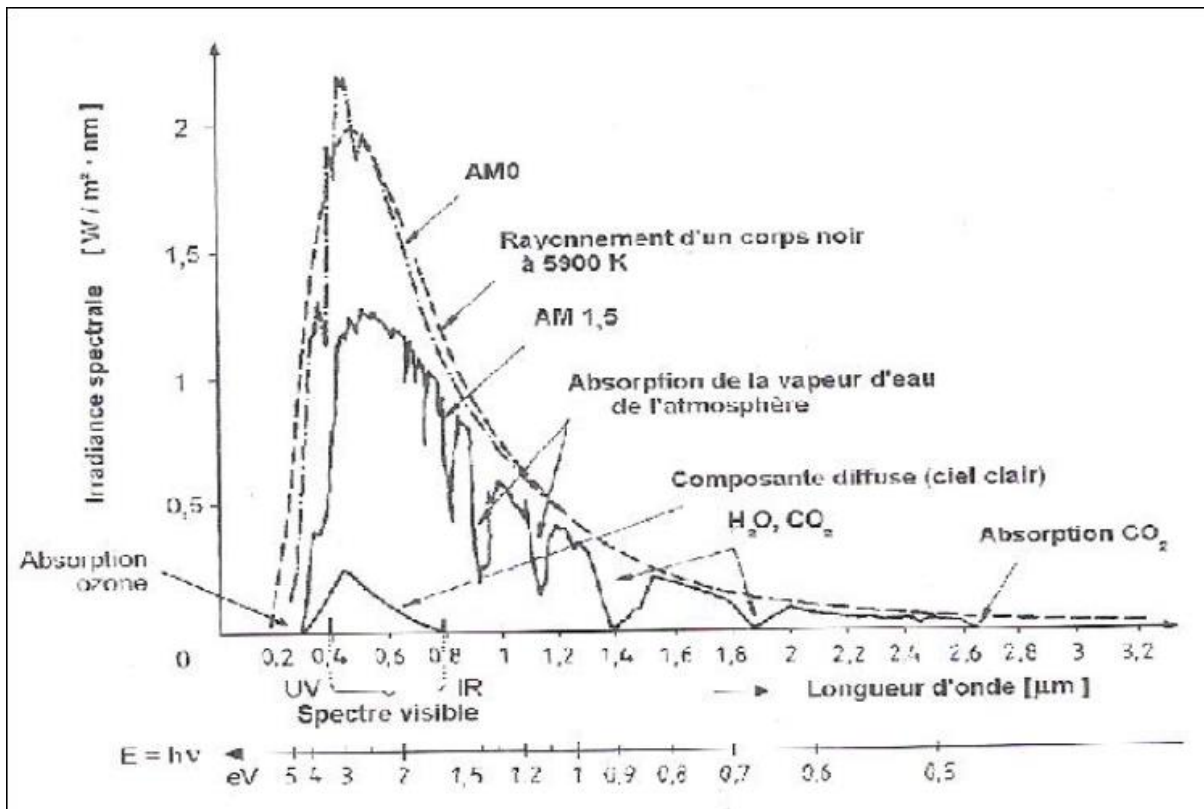


Figure I.4 : Répartition spectrale du rayonnement solaire : a) Hors atmosphère (AM0) .b) A l'incidence 41.8° (AM1,5).

Le rayonnement reçu par l'atmosphère terrestre en incidence normal est constant et voisin de **1353 W/m²** [2]. Le rayonnement solaire reçu au sol traversant les différentes couches atmosphériques ; l'atmosphère modifie ce spectre énergétique du rayonnement solaire à travers trois mécanismes principaux : [32]

- l'absorption par les différents molécules gazeuses entrant dans sa composition [10] : **78 %** d'azote (**N₂**), **21 %** d'oxygène (**O₂**), **0.9 %** d'argon (**Ar**), **0.03 %** de dioxyde de carbone (**CO₂**) et d'autres gaz ainsi que la vapeur d'eau (**H₂O**) «très variable de **0** à **4 %**» et une couche mince d'ozone (**O₃**) dont le rôle est si important dans l'absorption des rayons ultraviolets les plus puissants.
- la diffusion moléculaire de Rayleigh : c'est la diffusion due aux molécules de gaz constituant l'atmosphère et dont la taille est très inférieure à la longueur d'onde de la lumière [32].
- la diffusion due aux particules qu'elle contient : aérosols, poussière et les nuages. D'où le flux énergétique solaire optimal reçu au sol

se réduit alors à **1000 W/m²** avec un spectre décalé vers le rouge par rapport au spectre hors atmosphère [24]. Le spectre diffère donc entre l'espace et la surface du globe ; il diffère également à la surface de la terre en fonction du lieu. On le caractérise de façon globale par le nombre de masse d'air.

On appelle masse d'air ou Air Mass en anglais [21], 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 (figure I-4). Cela dépend surtout de la hauteur angulaire du soleil ***h***. A l'aide des points ***O***, ***A*** et ***M*** et cet angle ***h*** représentés à la figure (I-5), on écrit la longueur du trajet du Soleil à travers l'atmosphère :

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

Donc l'Air Mass (***AM***) est :

$$\frac{OM}{OA} = \frac{1}{\sin h} \quad \dots \textbf{(I.4)}$$

La notation conventionnelle de ce concept est donnée par un nombre sans dimension ***AM_x***, ***x*** étant [9]:

Citons, à titre d'exemple :

- ❖ ***AM1*** : position du Soleil au zénith; ***h=90°***, (au niveau de la mer).
- ❖ ***AM2*** : le Soleil à ***30°***.
- ❖ ***AM1,5*** : le Soleil à ***41.8°***.

Et par convention, ***AM0*** désigne le rayonnement solaire hors atmosphère (spectre valable pour les applications spatiales).

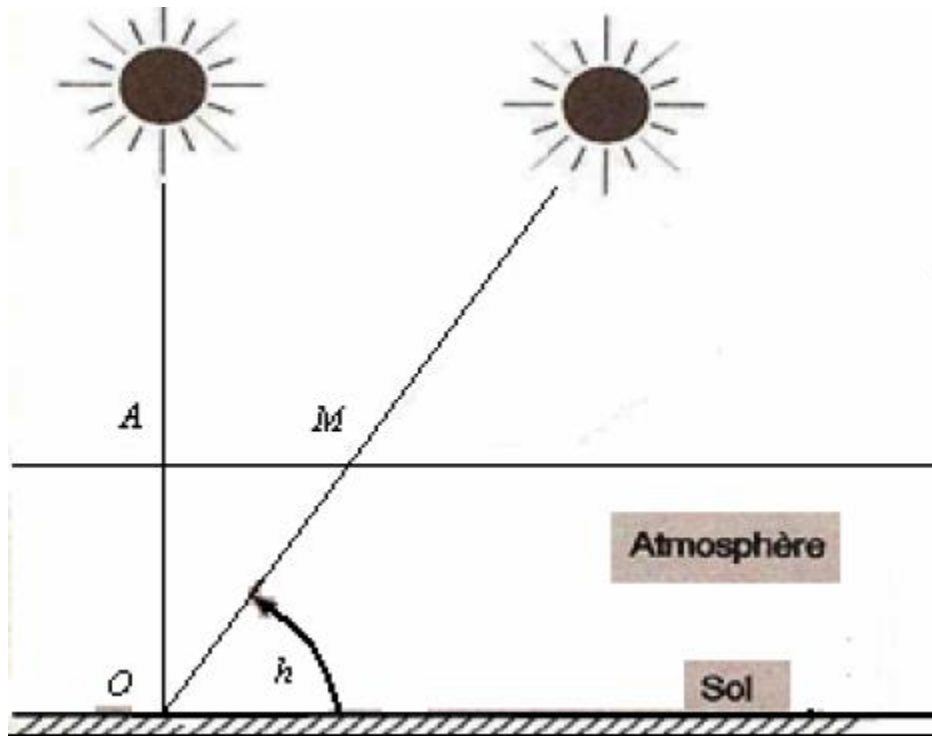


Figure I.5 : Représentation de l'air mass AM_x [9].

I.3.1. Unités utilisées

a) L'éclairement (ou irradiance) est défini comme une puissance reçue par une surface. Il s'exprime en $[W/m^2]$. Le S.I. recommande d'utiliser E (ou E_s) comme symbole, G est le plus communément utilisé dans la littérature ;

b) L'irradiation (ou rayonnement) est l'énergie reçue par une surface. Elle s'exprime en $[J.m^{-2}]$. L'ISES (International Solar Energy Society) recommande le symbole H . D'autres unités plus courantes sont le $[Wh/m^2]$ bien que ce dernier ne doive pas être utilisé puisque n'appartenant pas au système SI.

I.3.2. Instruments de mesure

En ce qui relève de la mesure du rayonnement ; Les capteurs des appareils de mesure du rayonnement peuvent être classés comme :

- Des capteurs thermiques : ils absorbent les radiations qu'ils reçoivent et les dégradent en énergie thermique qui sera convertie sous une forme qui permet sa mesure.
- Des capteurs quantiques qui utilisent les quantas d'énergie radiative qu'ils absorbent, pour libérer des électrons qui produisent un courant électrique. Au niveau des détecteurs, cet effet pouvant se traduire par l'apparition d'une tension (détecteur photovoltaïque), une variation du

taux d'émission des électrons par une surface (détecteur photoémetteur) ou par le changement de conductivité du détecteur (détecteur photoconducteur).

On distingue entre autres :

a) L'héliographe : qui est l'instrument dont l'origine est la plus ancienne. Il donne la durée d'insolation ou plus exactement la période du jour pendant laquelle le rayonnement solaire a dépassé un certain seuil. C'est sur un papier qui se déplace que le rayonnement solaire, concentré à l'aide de dispositif optique, laisse son empreinte en le brûlant sur une longueur qui donne la durée du jour. Cet appareil n'est pas très intéressant pour le photovoltaïque, car ne renseigne pas sur l'intensité du rayonnement.

b) Le pyranomètre : est l'appareil le plus utile puisqu'il évalue, à l'aide d'une thermopile, l'ensemble du rayonnement solaire (direct +diffus) sur une surface donnée et sur un large spectre de 0.3 à 3 [μm] de longueur d'onde. Son globe de verre lui confère une grande acceptance angulaire, proche de la demi-sphère (il collecte les rayons venant de toutes les directions, même les rayons rasants).

Il peut également mesurer que la part diffuse du rayonnement, on masque alors le rayonnement direct avec un cache en forme d'arceau qui suit la trajectoire du soleil pour éliminer la contribution directe du rayonnement.

c) Le pyréliomètre , quant à lui, ne mesure que le rayonnement direct. Egalement équipé par un système suiveur du soleil, il est muni d'un tube de visée à faible ouverture avec un détecteur placé au fond.

Grâce aux appareils décrits ci-dessus placés dans différentes orientations, les stations météo élaborent des statistiques de rayonnement solaire à partir des milliards de données collectées. Des bases de données sont ainsi constituées, avec d'autres informations fortes utiles telles que les températures minimales et maximales, et le taux d'humidité.



Pyranomètre : mesure l'énergie solaire totale (W/m^2) -Skyes –
– Spectre : 400 à 1100 [nm]
– Sensibilité : 1 [mV] par 100 [W/m^2]

Figure I.6 : Pyranomètre doté de ses caractéristiques.

I.4. L'énergie solaire en l'Algérie :

Le programme des énergies renouvelables de l'Algérie comprend 22000 MW, dont 12 000 MW pour la consommation domestique et 10000 MW pour l'exportation. Le programme est distribué pour atteindre 13575 MW d'énergie solaire photovoltaïque ...

✓ Centrales solaire dans L'Algérie :

- Hassi R'mel (150 MW)
- Bachar (26 MW)
- Ouargla (30 MW)
- Tesimsilt (26 MW)
-

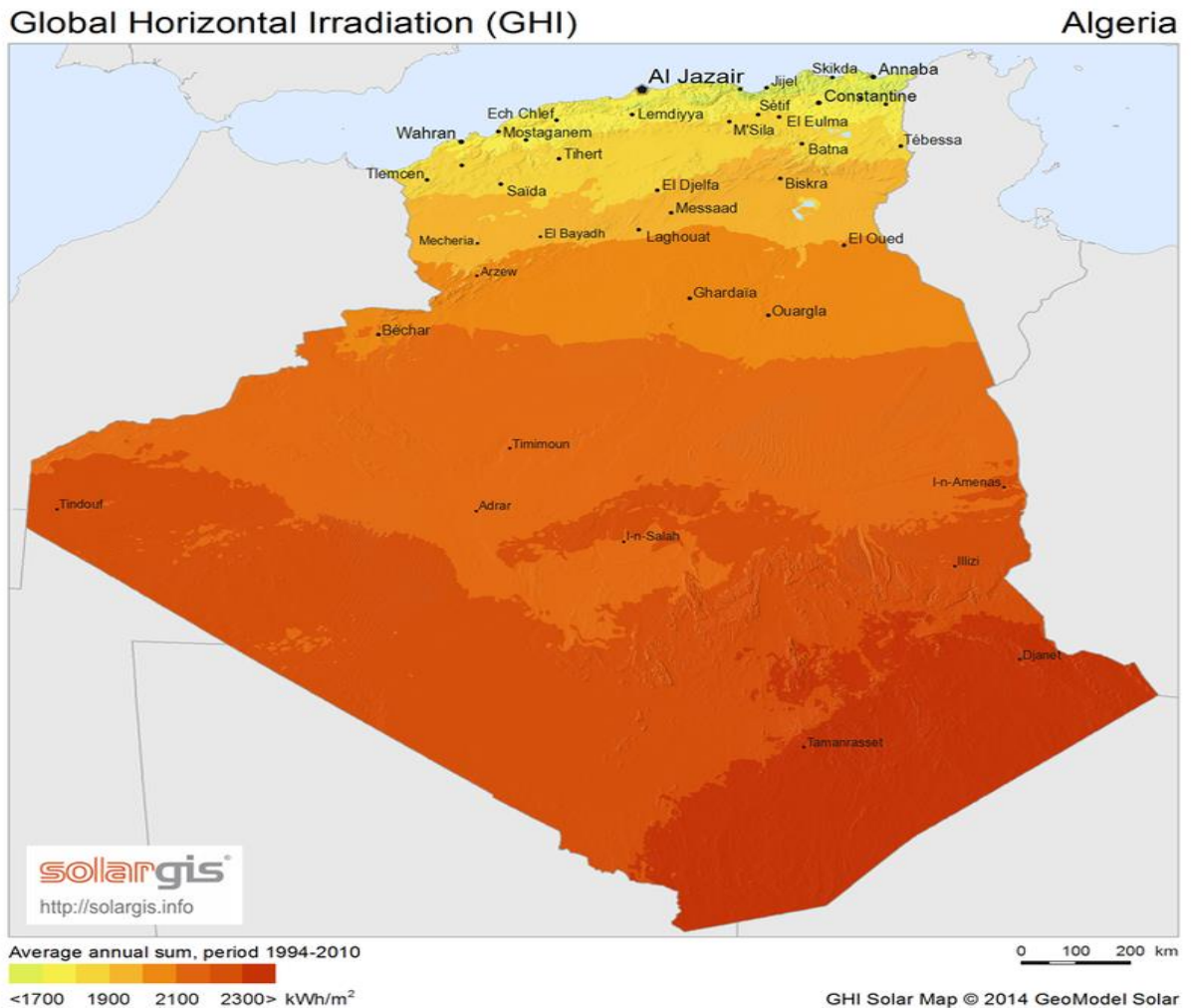


Figure I.7 : Taux de rayonnement solaire en l'Algérie [26]

I.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions sur le soleil, son pouvoir énergétique et les propriétés de son rayonnement, Dans le chapitre suivant, nous étudierons la cellule photovoltaïque et ses caractéristiques générales.

Chapitre II :

Étude de la cellule solaire à conversion photovoltaïque

II. Introduction

Dans ce chapitre nous décrivons en premier lieu le principe de fonctionnement des cellules solaires ainsi que leurs caractéristiques principales. Dans la deuxième partie nous étudions les différentes technologies des cellules solaires ainsi que la mise en œuvre des modules photovoltaïques.

II.1. photovoltaïque

Le nom Photovoltaïque vient du Grec, il est composé de deux parties :

- **Photos** : Lumière.
- **Volt** : Unité de tension électrique, du nom Alessandro Volta.

Le terme « photovoltaïque » peut désigner le phénomène physique (l'effet photovoltaïque découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839) ou la technologie associée .

Son utilisation industrielle n'est apparue qu'au début des années soixante, principalement pour les applications spatiales. Depuis, d'autres applications ont vu le jour pour répondre dans un premier temps aux besoins des professionnels et dans un second temps à ceux des particuliers.

L'aube du 21⁰ siècle, les deux segments de marchés qui présentent

le potentiel le plus important sont :

- la connexion au réseau public.
- la connexion au réseau OC (le chargement des batteries)

II.1.1. Qu'est-ce que l'énergie solaire photovoltaïque ?

l'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire au moyen d'une cellule photovoltaïque .

Schématiquement, un photon de lumière incidente permet sous certaines circonstances de mettre en mouvement un électron, produisant ainsi un courant électrique.

II.1.2. Le principe de l'effet photovoltaïque

C'est un phénomène physique qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et de vieillissement de la cellule.

II.2. La cellule photovoltaïque

II.2.1. Définition d'une cellule solaire

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériau semi-conducteur et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possède une bande interdite, qui joue le rôle de la barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.
- D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.
- Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.



Figure II.1 : Cellule photovoltaïque .

II.2.2. Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire

Le principe d'une cellule photovoltaïque est de transformer des photons Absorbes par un semi-conducteur en porteurs de charges électriques (électrons et trous). Cette création de charges va entraîner la création d'une différence de potentiel aux bornes d'électrodes et d'un courant électrique dans un circuit connecte aux électrodes .

- la cellule contient des charges électrique : négatives dans le type **n** (excès **e-** électrons) , positives dans le type **p** (défaut **e-** électrons) . Ces charges créent un champ électrique au niveau de la jonction.
- Les photons de la lumière solaire arrachent des électrons aux atomes de silicium et créent des charges positives et négatives.
- Les charges sont mises on mouvement par le champ électrique crée par la jonction , ce qui produit un courant électrique .

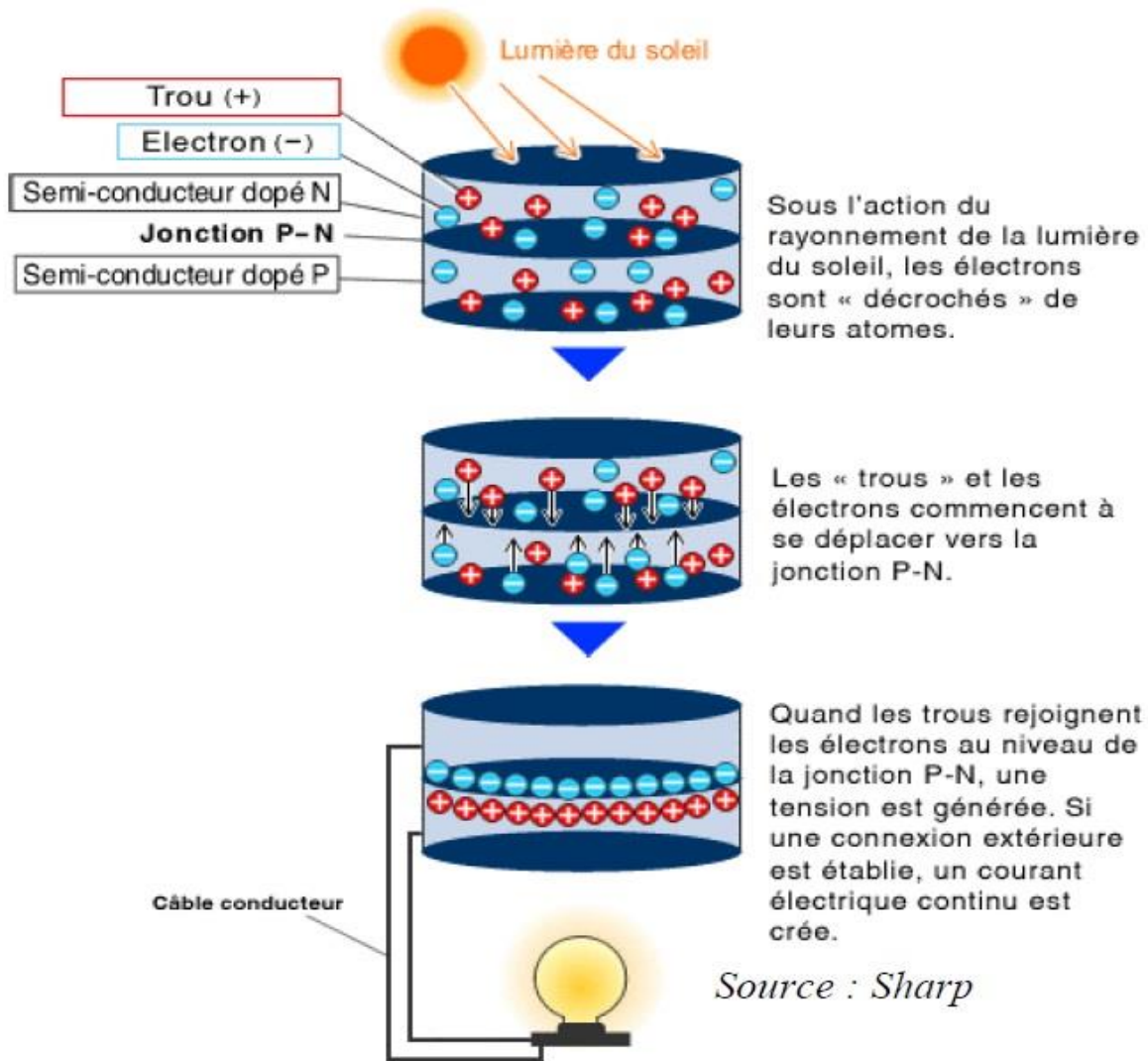


Figure II.2 : Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque .

II.2.3. Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque

a. Cas d'une cellule idéale

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connectée à une charge peut être schématisée par un générateur de courant I_{ph} en parallèle avec une diode délivrant un courant selon **la figure II.3**, qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale .

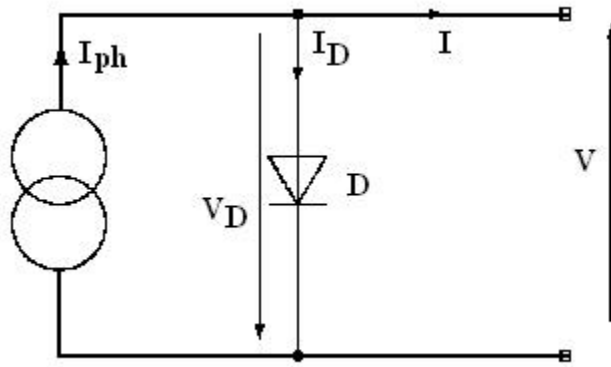


Figure II.3 : Schéma équivalent d'une cellule idéale.

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

$$I_d = I_s(\exp(V_d/V_T) - 1)$$

Avec :

I_s : courant de saturation inverse de la diode.

V_T : tension thermique.

V_d : tension aux bornes de la diode.

Et $V_T = nKT/q$ avec : n : Facteur d'idéalité de la photopile

K : Constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$) ;

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

T : la température de la cellule en kelvin.

Ce modèle reste théorique et ne rend pas compte du comportement d'une cellule photovoltaïque dans des conditions réelles. Toutefois, il reste valable sous certaines hypothèses (non prise en compte de la perte de tension, courant de fuite...). Il existe d'autres modèles, certes théoriques, mais qui rendent plus fidèlement compte du comportement de la cellule photovoltaïque.

b. Cas d'une cellule réelle

Le modèle photovoltaïque précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite.

On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série R_s et les courants de fuite par une résistance en parallèle R_p .

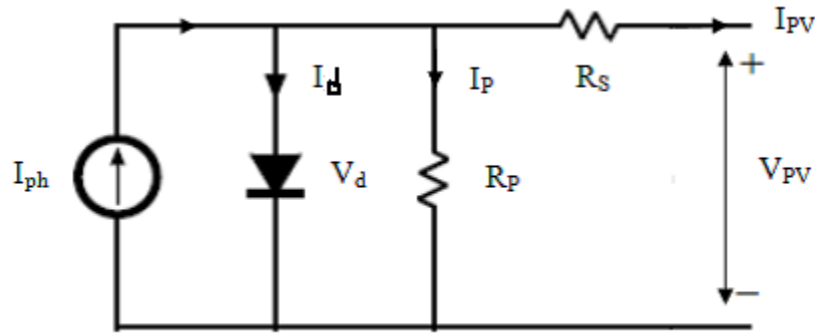


Figure II.4 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.

▪ **La résistance série**

En pratique, la cellule PV, contient des résistances dans le matériel qui constitue des semi-conducteurs, et contacts, et autobus courant de rassemblement. L'ensemble des pertes dépend, de la résistance série (R_s). Son effet devient très remarquable en module composé de Plusieurs cellules connectées en série, la valeur de cette résistance est multipliée par le nombre de cellules [3].

▪ **Résistance parallèle**

Également, la résistance shunt, représente une partie des pertes liées à une petite fuite de courant par un chemin résistif parallèlement au dispositif intrinsèque. Ceci peut être représenté par une résistance parallèle (R_p). Son effet est beaucoup moins remarquable dans Un module photovoltaïque comparé à la résistance série. Qui devient seulement apparent quand un certain nombre de cellules sont reliées en parallèle pour créer un générateur Photovoltaïque.

D'après **la figure II.4** : l'équation mathématique (courant-tension) du circuit électrique équivalent de la cellule photovoltaïque est écrite comme suit :

$$\text{On a : } I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_p$$

$$I_d = I_s (\exp(V_d/V_T) - 1)$$

$$V_d = V_{pv} + R_s I_{pv}$$

$$I_p = \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p}$$

$$\text{Donc : } I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_t}\right) - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p} \dots\dots (A)$$

Avec :

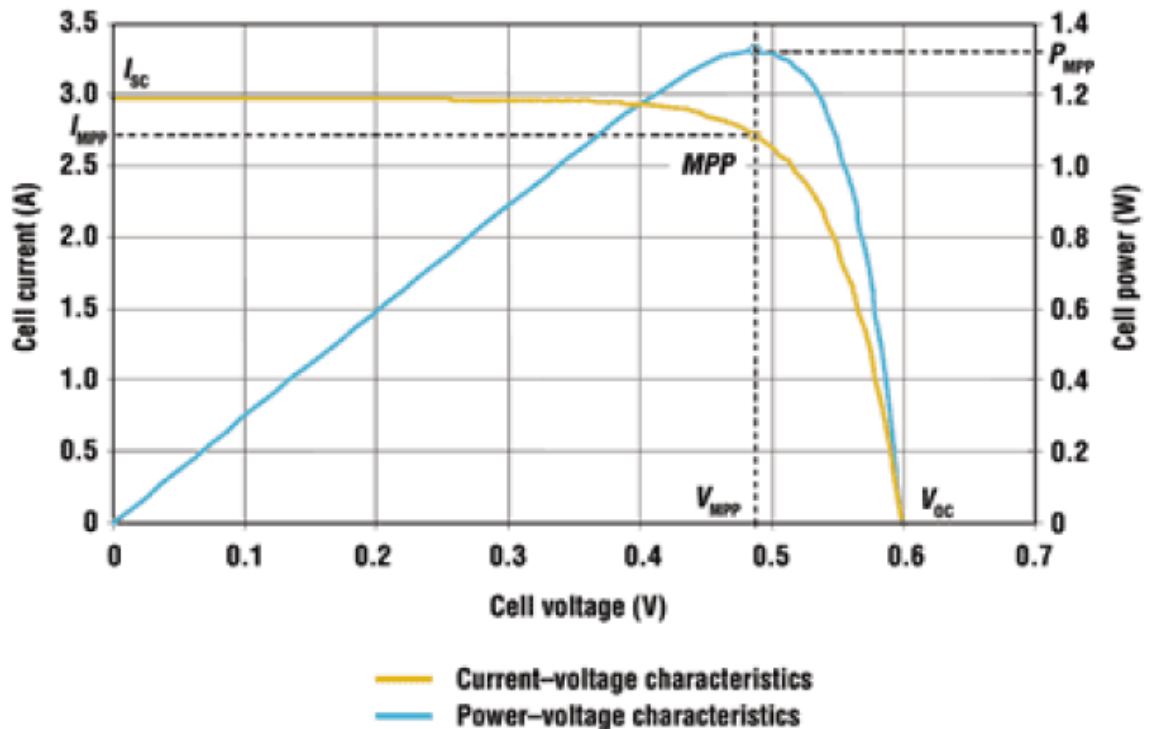
I_{pv} : Courant générer par la cellule photovoltaïque.

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

I_d : Le courant circulant dans la diode.

I_p : Le courant circulant dans la résistance R_p .

II.2.4. Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque



P_{MPP} : point de puissance maximale.

I_{sc} : Le courant de court-circuit (I_{cc})

V_{oc} : Tension du circuit-ouvert (V_{co})

$V_{MPP} \approx 0,4875 V$

Figure II.5 : Caractéristiques $I=f(U)$ et $P=f(U)$ d'une cellule photovoltaïque .

Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à un module photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant-tension. Par conséquent, le module photovoltaïque est considéré comme une source de puissance avec un point P_m .

Il est important de noter que certains régulateurs solaires réalisent une adaptation d'impédance afin qu'à chaque instant on se trouve proche de

ce point P où la puissance se trouve être maximale. Il est donc intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée P_m .

Cette caractéristique est décalée vers le bas d'un courant I_{cc} (courant de court-circuit). De même, elle coupe l'axe des abscisses en V_{co} (tension maximale de circuit ouvert).

On peut regrouper trois zones essentielles :

La zone 1 : où le courant reste constant quelle que soit la tension. Pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.

La zone 2 : correspondant au coude de la caractéristique. La région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

La zone 3 : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante. Dans ce cas, le générateur est assimilable à un générateur de tension [24] .

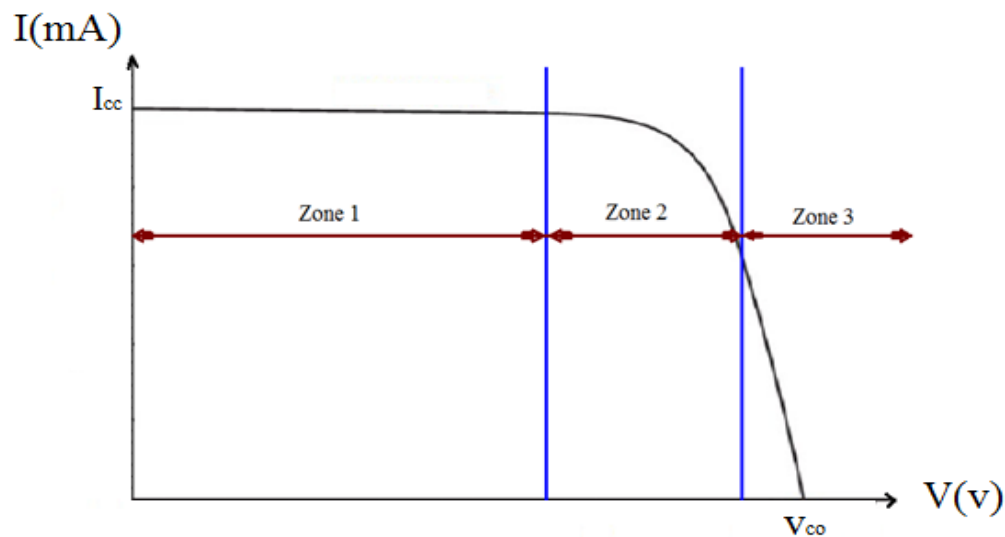


Figure II.6 : les différentes zones de caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule PV.

a. Le courant de court-circuit (I_{cc})

Il s'agit du courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul.

C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Celui-ci est en fonction de la température, de la longueur d'onde du rayonnement, de la

surface activé de la cellule, de la mobilité des porteurs. Ce courant est linéairement dépend de l'intensité lumineuse reçue [9].

En court-circuit $V=0$: D'où $I_{cc} = I_{ph}$

b. Tension du circuit-ouvert (V_{co})

Comme son nom indique, c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie. Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN, jonction Schottky), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts de la couche active-électrode. Elle dépend de plus de l'éclairement de la cellule [38] .

$$V_{co} = V_T \log(1 + I_{ph}/I_s)$$

$V_T = \frac{KT_c}{q}$ Représentant la potentielle thermique.

K : la constante de Boltzmann ($1,381.10^{-23}$ Joules/Kelvin).

q: la charge d'un électron.

Tc : la température absolue.

Is : le courant de saturation.

I_{ph} : le courant photonique .

Deux régimes peuvent être observés suivant le degré d'éclairement
figure II.7

❖ Régime des faibles flux lumineux : dans ce cas, $I_{ph} \ll I_s$, ce qui permet d'écrire :

$$\log(1 + \frac{I_{ph}}{I_s}) = \frac{I_{ph}}{I_s}$$

D'où $V_{co} = \frac{KT_c}{q} \times \frac{I_{ph}}{I_s}$

C'est la zone de comportement linéaire de la cellule. la formule précédente peut s'écrire aussi [9] :

$$V_{co} = R_0 \cdot I_{ph} \text{ et } R_0 = \frac{KT_c}{q \cdot I_s}$$

R_0 : est la résistance interne de la diode en polarisation externe nulle (circuit ouvert) est sous faible flux lumineux.

❖ Régime des flux lumineux suffisamment intenses pour que $I_{ph} \gg I_s$,
soit [9] : $I_{ph} \gg I_s$

D'où :

$$V_{co} = \frac{KT_c}{q} (\log \frac{I_{ph}}{I_s} + 1)$$

C'est le domaine du **comportement logarithmique**.

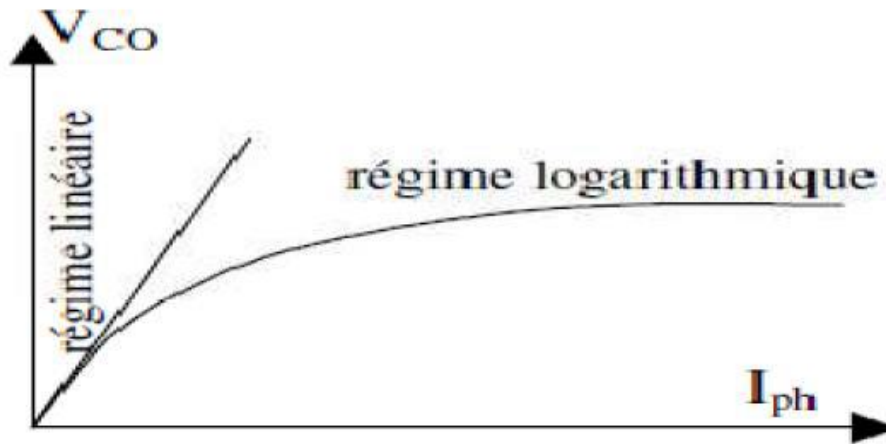


Figure II.7 : différents régimes selon la puissance d'éclairement.

Il est important de remarquer que cette tension augmente avec le log d' I_{ph} , donc avec le log de l'illumination. En revanche, elle décroît avec la température, malgré le terme KT_c/q .

en effet, le courant de saturation, I_s dépend de la surface de la diode (donc de la cellule) et des caractéristiques de la jonction : il varie exponentiellement avec la température et cette dépendance en température compense largement le terme KT_c/q donc la tension de circuit ouvert V_{co} baisse avec la température, ce qui est important dans le dimensionnement des systèmes.

c. Point de puissance maximale

La puissance maximale d'une cellule photovoltaïque éclairée est la grandeur essentielle pour évaluer sa performance ; elle est donnée par la relation : $P_m = V_m * I_m$. Elle traduit sur la caractéristique I-V le point du fonctionnement P_m (V_m , I_m) qui est situé au coude de la caractéristique I-V et dit point de puissance maximale où les valeurs de tension V_m et du courant I_m appelées également tension et courant maximums respectivement.

d. Le Facteur de forme

Un paramètre important souvent utilisé à partir de la caractéristique I(V) pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de remplissage ou « fill factor (FF) ». Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée

P_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} \cdot V_{co}$. Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable ne le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales [38]. Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \dots\dots II.10$$

A partir de cette définition, pour une cellule dont la caractéristique I-V est rectangulaire (source de courant), le facteur de forme sera donc unitaire. Le facteur de forme d'une bonne cellule photovoltaïque devra être compris entre 0,75 et 0,85.

e. Le rendement

$$\eta = \frac{P_m}{P_{inc} \cdot S_{cellule}}$$

P_m : la puissance maximale produite par la cellule $P_{max} = FF \cdot V_{co} \cdot I_{cc}$

P_{inc} : Puissance solaire incidente .

$S_{cellule}$: La surface de la cellule [m²].

Ce rendement dépend plusieurs facteurs :

- Réflexion à la surface.
- Température de jonction des cellules.
- Type de matériau utilisé et technique de fabrication.
- La résistance série et parallèle responsables des pertes par effet Joule.
- Absorption incomplète et excès d'énergie des photons absorbés.

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre essentiel. En effet, la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule.

Technologie de cellules	Rendement en laboratoire	Rendement production
Silicium amorphe (a-Si)	13%	5-9%
Silicium polycristallin (p-Si)	19,8%	11 à 15 %
Silicium monocristallin (m-Si)	24,7%	12 à 18%

Tableau II.1 : Rendement de différents types des cellules .

f. Effet de la variation d'éclairement et de la température sur la caractéristique tension-courant

Les conditions d'éclairement et la température de la cellule modifient cette caractéristique, et ainsi que les termes V_{oc} , I_{cc} , V_{max} et I_{max} précédemment définis. Ces paramètres ne sont en Particulier pas fournis par les fabricants de cellules qui se limitent généralement à donner une Caractéristique I-V pour un éclairement de 1000W/m^2 à 25°C .

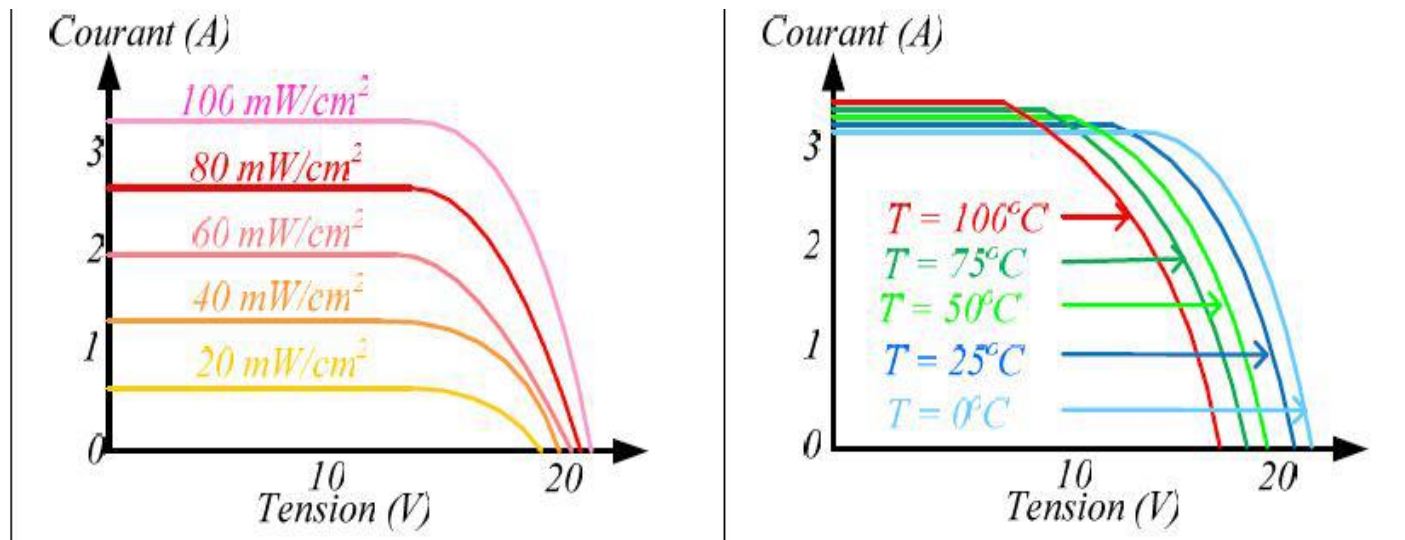


Figure II.8 : Évolution de la caractéristique I-V en fonction de l'éclairement (à gauche) et de la température (à droite).

On observe que l'augmentation de **la température** provoque une augmentation du courant du court-circuit (I_{cc}), en même temps on assiste à une diminution nette de la tension en circuit ouvert (V_{co}). L'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension (V_m) et un léger accroissement du courant (I_m) et par la suite une baisse relative de la puissance maximale (P_m).

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

II.3. Structure des cellules solaires

Une cellule photovoltaïque, en présence de lumière, ou plus exactement de photons, est capable d'orienter les électrons de façon à créer une différence de potentiel et ainsi de générer une tension électrique (énergie voltaïque). La couche supérieure de la cellule photovoltaïque est composée de silicium (figure II.9). Elle contient une quantité Particulièrement importante d'électrons libres, donnant une charge négative. La couche inférieure, elle aussi composée de silicium, contient une quantité d'électrons libres inférieure à la normale, donnant ainsi une charge positive. C'est lorsque les deux couches entrent en contact qu'une zone de charge se crée et génère un champ électrique. Les cellules Photovoltaïques sont composées d'un ou plusieurs matériaux semi-conducteurs et permettent la conversion directe de l'énergie solaire en énergie électrique.

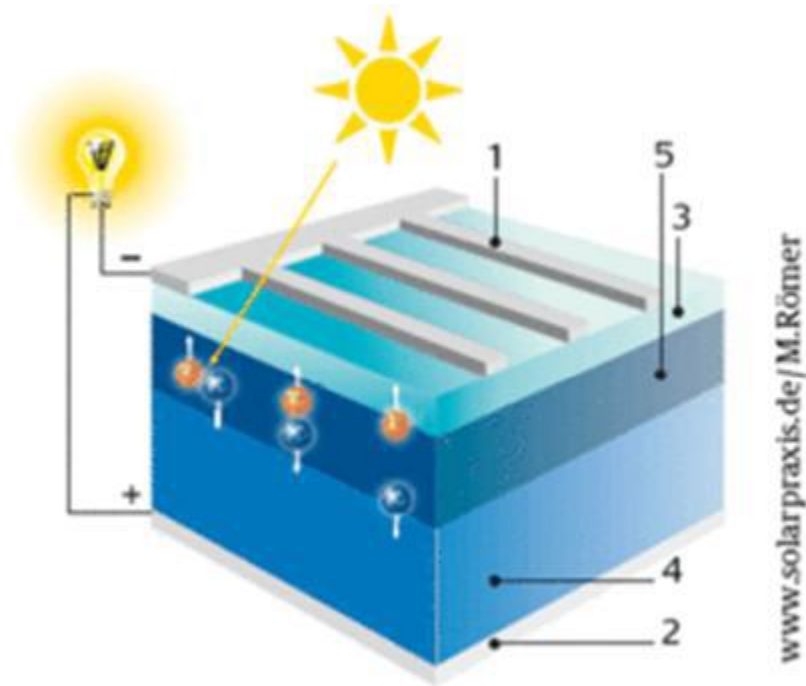


Figure II.9 : Structure d'une cellule photovoltaïque .

- 1) Electrode négative.
- 2) Electrode positive.
- 3) silicium dopé N.
- 4) Silicium dopé P.
- 5) Couche limite.

Pour provoquer cet effet photoélectrique, le matériau semi-conducteur doit être «dopé». Du fait de l'apport d'éléments chimiques, deux couches se forment, une couche conductrice p avec un excédent de porteurs de charge positifs et une couche conductrice n avec un excédent de porteurs de charge négatifs. Du fait de ce déséquilibre, un champ électrique interne se forme et provoque une séparation de charge en cas d'incidence de la lumière. Les porteurs de charge ainsi libérés peuvent être évacués par des contacts métalliques et utilisés directement comme courant continu (DC) par un appareil électrique ou être alimentés dans le réseau comme courant alternatif (AC) via un convertisseur intercalé. Pour les capacités plus élevées, les cellules photovoltaïques sont la plupart du temps interconnectées au module. Pour la fabrication de cellules photovoltaïques, on utilise actuellement avant tout du silicium, car c'est le second élément le plus courant sur terre et donc bon marché à valoriser. En plus du silicium, d'autres éléments, comme le cuivre, le gallium ou le cadmium, trouvent leur utilisation dans le photovoltaïque.

II.4. Les filières technologiques d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque peut être réalisée avec de nombreux semi-conducteurs. En réalité, il existe aujourd'hui deux principales filières technologiques : le silicium cristallin, les couches minces. Ces filières se partagent inégalement le marché comme le montre **la figure II.10**.

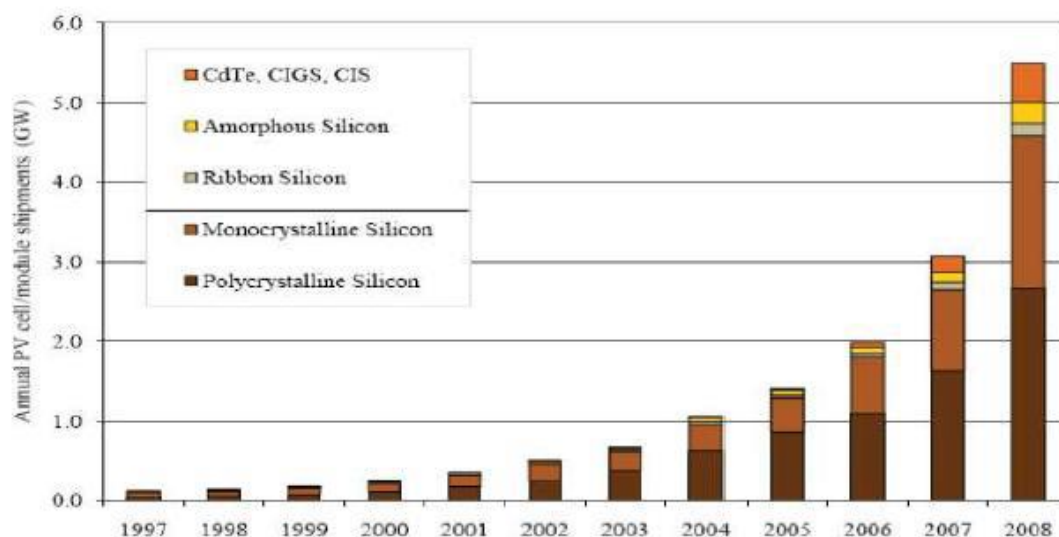


Figure II.10 : Évolution de la production mondiale des différentes technologies de C.PV

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.

Les matériaux les plus utilisés sont à base de **silicium** à cause de sa disponibilité et son faible coût de production. Les cellules PV au silicium cristallin (mono ou multi) représentent la majorité de la production mondiale (respectivement 29 % et 51% de la production mondiale).

II.4.1. Le silicium

La filière silicium représente aujourd'hui l'essentiel de la production mondiale des panneaux photovoltaïques. Il s'agit d'un matériau extrêmement abondant, stable et non toxique. Cette filière est elle-même subdivisée en plusieurs technologies distinctes de part la nature du silicium employé et /ou sa méthode de fabrication. Cette filière comporte trois technologies : le silicium monocristallin et le silicium multicristallin, silicium amorphe [11].

i. Silicium monocristallin

Lors du refroidissement, le silicium se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme, intense et brillant. Elles sont utilisées, mais ne sont pas majoritaires sur le marché de l'énergie photovoltaïque. Le rendement du silicium monocristallin est plus élevé, il est compris entre 12 et 20% [9] pour les cellules industrielles. Son coût élevé est aujourd'hui un handicap et le silicium monocristallin perd du terrain devant le silicium multicristallin.

ii. Le silicium multicristallin

Le silicium multicristallin (polycristallin) est devenu aujourd'hui la technologie la plus utilisée. A elle seule elle représente près de 50% du marché [9]. Ces cellules sont obtenues par couplage de cristaux de silicium, ce qui rend sa structure hétérogène, son Rendement est légèrement inférieur au silicium monocristallin, il est compris entre 10 et

14% selon les fabricants. En revanche sa fabrication est beaucoup plus simple, les coûts de production sont donc plus faibles.



(a)



(b)

Figure II.11 : Photos de cellules monocristallin(a) et multicristallin (b).

iii. Le silicium amorphe

Le silicium intégré dans les cellules a-Si n'a pas fait l'objet d'une cristallisation. Ses atomes sont donc agencés sans réelle organisation, ce qui leur permet de mieux capter la lumière (par rapport au silicium cristallin). Problème : les charges générées ont plus de difficultés pour se déplacer à cause de la désorganisation de la matière, ce qui se traduit par un mauvais coefficient de conversion. Par conséquent, leur rendement est faible. La désorganisation atomique a d'autres conséquences : les électrons de valence des atomes de Si ne forment pas toujours des liaisons covalentes au sein du semi-conducteur. Il apparaît alors des liaisons pendantes qui peuvent agir sur les propriétés électroniques du matériau. Pour limiter ce phénomène, les couches de silicium sont régulièrement passivées avec de l'hydrogène (a-Si:H). Des atomes d'hydrogène établissent des liaisons avec les électrons restés libres, et réduisent ainsi le nombre de liaisons pendantes.

II.4.2. Les couches minces

Le principal frein au développement du photovoltaïque à très grande échelle reste encore aujourd'hui. Malgré la baisse de ces dernières années, le prix trop élevé du kilo Watt crête KWc. Le kilo Watt crête (KWc) est l'unité qui définit la puissance d'un générateur PV aux conditions de test standards (1000W.m^{-2} et 25°C).

La majorité du prix d'un générateur photovoltaïque provient du silicium et du procédé de purification. Plusieurs types de cellules photovoltaïques visant à diminuer la quantité de matière nécessaire à leur fabrication sont aujourd'hui développés et commencent à être industrialisés. Ces technologies appelées couches minces font appel à des procédés de fabrication (dépôt sur ruban) visant la diminution de l'épaisseur des cellules. La technologie à couche mince dont la plus mûre est celle du silicium amorphe (a-Si) représentait en 2008 plus de 7% du marché mondial [9] .

L'avantage de cette technique est l'utilisation des substrats à bas coûts. Le silicium est déposé à basse température sur un substrat en verre. De plus, il est possible de déposer ces cellules sur des substrats souples (figure II.12) et fabriquer des cellules souples. Son prix est plus faible que celui des cellules cristallines, il est d'environ 7% [9] .

L'utilisation de ce type de cellules nécessite l'utilisation d'une isolation galvanique entre les modules et le réseau. Sans cette isolation galvanique les cellules amorphes se dégradent très rapidement. La raison physique de ce phénomène reste encore obscure. Les cellules amorphes captent très bien le rayonnement diffus et sont donc moins sensibles aux variations de rayonnement direct. Par conséquent, ces cellules sont une très bonne alternative aux cellules cristallines sur des sites soumis à des ombrages sévères.

D'autres matériaux sont également utilisés dans les filières à couches minces comme le Tellure de Cadmium (CdTe), le diséléniure de cuivre et d'indium (CIS) et de gallium (CIGS). Ces technologies possèdent de bons rendements, pouvant aller jusqu'à 19% [9] . Malgré les potentialités de ces trois technologies, les problèmes de toxicité sur l'environnement et l'approvisionnement en matières premières qu'elles soulèvent les cloisonneront au laboratoire ou à des applications très spécifiques.



Module souple Unisolar (68Wc, 1,12 m²).



Module rigide Sharp (115Wc, 1,42 m²).

Figure II.12 : Deux exemples de modules utilisant Sia (silicium amorphe).

Les cellules au Tellure de Cadmium (CdTe)

Le coût de fabrication d'une cellule au tellure de cadmium serait deux à trois fois moins important que celui d'une structure cristalline (figure II.13), notamment grâce à l'optimisation du procédé de fabrication, à la faible main-d'œuvre requise et aux économies d'échelle (baisse du coût à la suite de l'augmentation de la productivité).

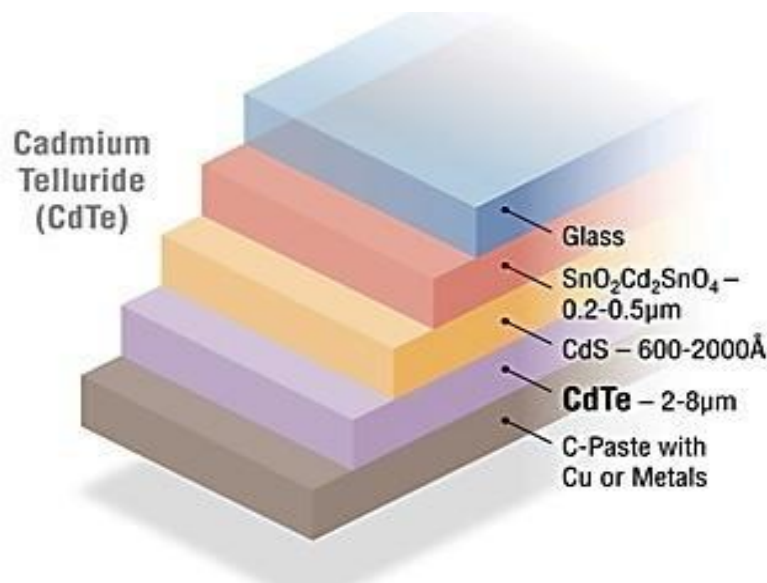


Figure II.13 : Structure d'une cellule photovoltaïque au CdTe. La couche d'absorbant dopé p (en mauve) repose sous un autre semi-conducteur dopé n (CdS). Ces deux couches forment une hétérojonction [10].

Une cellule au CdTe se compose, de haut en bas [37] :

- 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 tellurure 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).

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 [10] . 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 demi, avec des pertes de matière première estimées à seulement 2 % .

II.4.3. Les cellules solaires organiques

Le solaire organique est considéré comme une nouvelle technologie basée sur les colorants et leurs propriétés physiques et en particulier optiques.

Type	Rendement	Durée de vie	caractéristique	Principales utilisations
Silicium Mono cristallin	12 à 18 % (24,7 % en laboratoire)	20 à 30 ans	-Très performant. -Stabilité de production d'énergie. -Méthode de production Couteuse et laborieuse. - Durée de vie importante.	Aérospatiale, Modules pour toits, façades ...
Silicium Poly cristallin	11 à 15 % (19,8 % en laboratoire)	20 à 30 ans	-Adapté à la production à grand échelle. -stabilité de production d'énergie (plus de 50 % de production mondiale). - Rendement faible sous un faible éclairement. :	Modules pour toits , Façades , Générateur ...
Amorphe	5 à 8 % (13 % en laboratoire)	Durée de vie courte (+/- 10 ans)	-peut fonctionner sous la lumière fluorescente. -fonctionnement si faible luminosité - fonctionnement par temps couvert. - fonctionnement si ombrage partiel. -la puissance de sortie varie dans le temps. en début de vie, La puissance délivrée est de 15 à20% Supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois. .	Appareils électronique (montres, calculatrices..) , intégration dans les bâtiments ...
Composite MonoCristallin (GaAS)	18 à 20 % (27,5 % en laboratoire)		-Lourd, fissure facilement.	Systèmes de concentrateurs aérospatiaux (satellites) .
Composite Poly cristallin (cdTe , cds , GulunGase2	8 % (16 % en laboratoire)		-Nécessite peu de matériaux mais certain contiennent des substances polluantes.	Appareils électronique (montres, calculatrices..) , intégration dans les bâtiments ...

Tableau II.2 : Classification de différents types de cellules photovoltaïques [34] .

II.5. Le module photovoltaïque

II.5.1. Définition

Un générateur photovoltaïque ou module est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et /ou parallèle

afin d'obtenir des caractéristiques électrique désirées tels que la puissance, le courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert [5].

II.5.2. Caractéristiques d'un module photovoltaïque

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. Nous rappelons brièvement dans ce paragraphe le comportement du générateur soumis à déverses contraintes. Ces notions sont en effet nécessaires pour comprendre le comportement d'un générateur PV et ensuite effectuer des optimisations de fonctionnement (figure II.14).

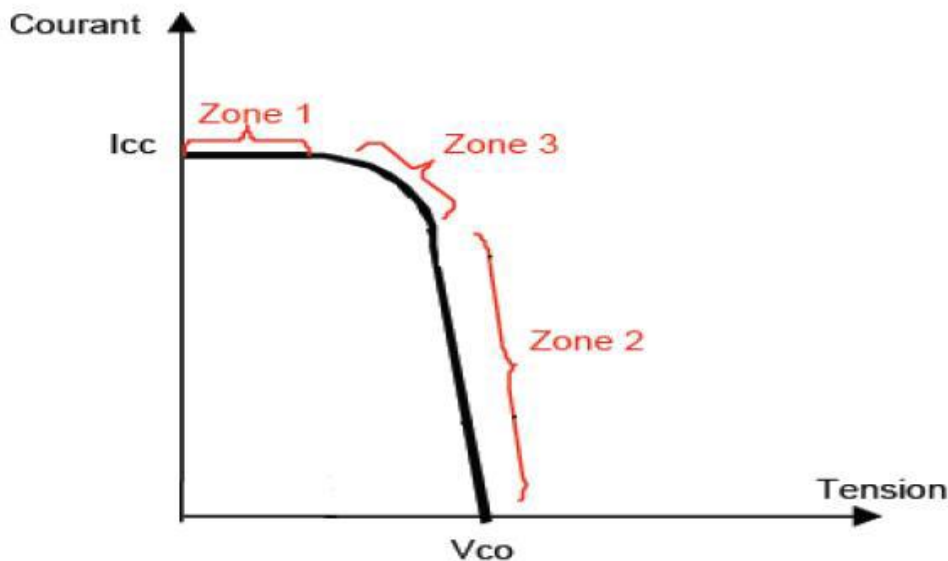


Figure II.14 : Les différentes zones de la caractéristique $I(V)$.

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

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

- Une zone assimilable à un générateur de courant I_{cc} proportionnel à l'irradiation, d'admittance interne pouvant être modélisée par $1/R_{sh}$ (zone 1).
- Une zone assimilable à un générateur de tension V_{co} d'impédance interne équivalente à la résistance série R_s (zone 2).

- Une zone où l'impédance interne du générateur varie très fortement de R_s à R_{sh} (zone 3). C'est dans la zone 3 qu'est situé le point de fonctionnement pour lequel la puissance fournie par le générateur est maximale. ce point est appelé point de puissance optimale, caractérisé par le couple I_{max} , V_{max} et seule une charge dont la caractéristique passe par ce point, permet d'extraire la puissance disponible dans les conditions considérées [7] .

II.5.3. La constitution d'un module photovoltaïque

Câble des cellules photovoltaïques : les cellules sont connectées entre elles par un fin ruban métallique (cuivre étamé), du contact en face avant (-) au contact en face arrière (+) (figure II.15).

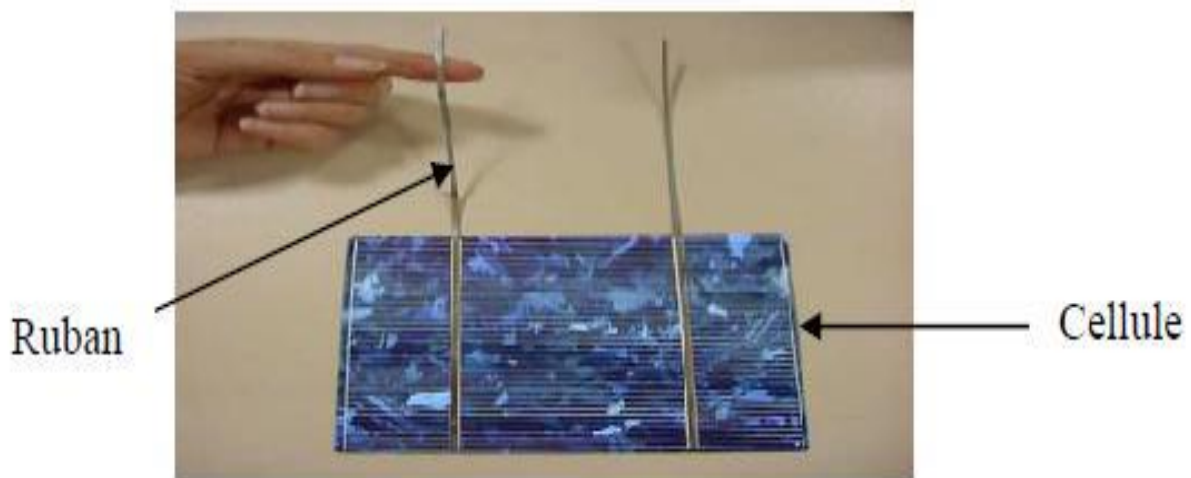


Figure II.15 : ruban métallique d'une cellule.

Les cellules sont encapsulées sous vide entre deux films thermoplastiques transparents (EVA: Éthylène Acétate de Vinyle). Le plus souvent, il y a présence d'un cadre en aluminium avec joint périphérique pour permettre la dilatation. Un verre trempé en face avant protège les cellules sur le plan mécanique tout en laissant passer la lumière. La face arrière est constituée d'un verre ou d'une feuille TEDLER.

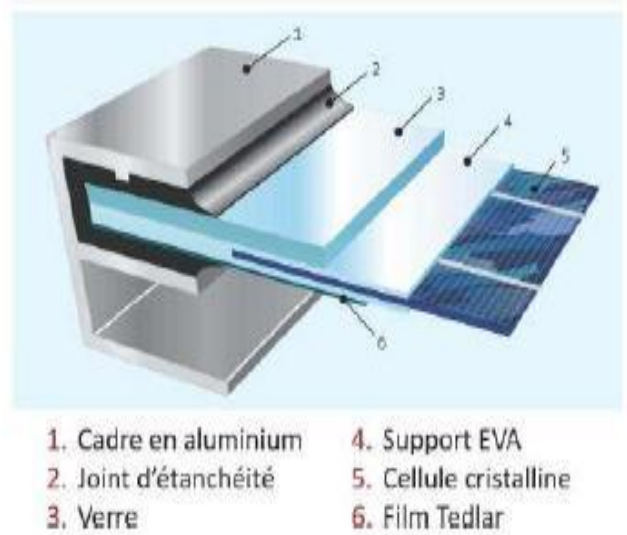
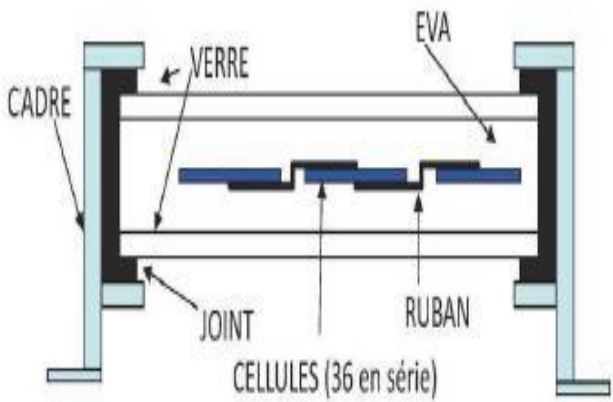


Figure II.16 : Encapsulation des cellules.

La boîte de connexion étanche regroupe les bornes de raccordement, les diodes by-pass. Les deux câbles unipolaires sont raccordés.

En associant les cellules PV en série (somme des tensions de chaque cellule), ou en parallèle (somme des intensités de chaque cellule), on peut constituer un générateur selon les besoins des applications visées. Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaités. Ainsi, pour N_s cellules en série, constituant des branches elles même N_p en parallèles, la puissance disponible en série du générateur PV est donnée par :

$$P_{PV} = N_S \cdot V_{PV} \cdot N_P \cdot I_{PV} \quad \text{..... (I.11)}$$

Avec:

P_{PV} : la puissance disponible en sortie du GPV.

V_{PV} : la tension à la sortie du GPV.

I_{PV} : le courant de sortie du GPV.

II.5.4. Regroupement des cellules

II.5.4.1. Regroupement des cellules en série

Une association de (N_s) cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV) . Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultante de groupement série

est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, un tel regroupement est représenté par la figure II.17.

L'équation (I.12) résume les caractéristiques électriques d'une association série de (N_s) Cellules [6] .

$$V_{CO_{N_s}} = N_s \times V_{CO} ; I_{CC} = I_{CC_{N_s}} \dots\dots (I.12)$$

$V_{CO_{N_s}}$: la somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série.

$I_{CC_{N_s}}$: courant de court-circuit de N_s cellules en série.

Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce.

Comme la surface de cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible . L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble.

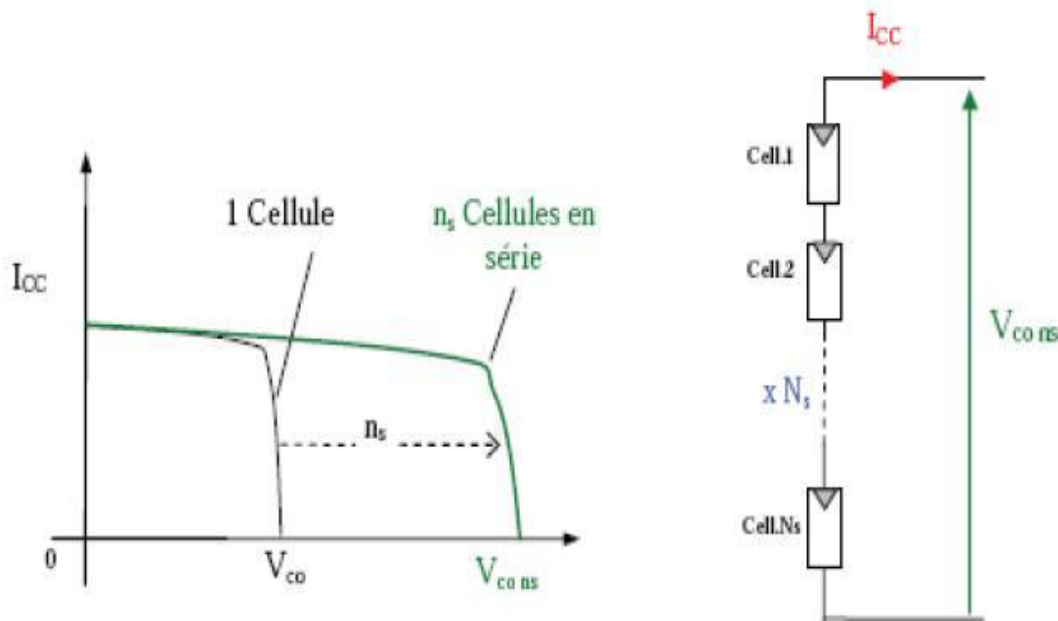


Figure II.17 : caractéristiques résultantes d'un groupement de (N_s) cellules en séries.

II.5.4.2. Regroupement de cellules en parallèle

Une association parallèle de (N_p) cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créée. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants.

L'équation (I.13) et la figure II.18 résument les caractéristiques électriques d'une association parallèle de (N_p) cellules [6] .

$$I_{CC_{N_p}} = N_p \times I_{CC} ; V_{CO} = V_{CO_{N_p}} \dots\dots (I.13)$$

$I_{CC_{N_p}}$: la somme des courants de court-circuit de (N_p) cellules en parallèle.

$V_{CO_{N_p}}$: la tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle.

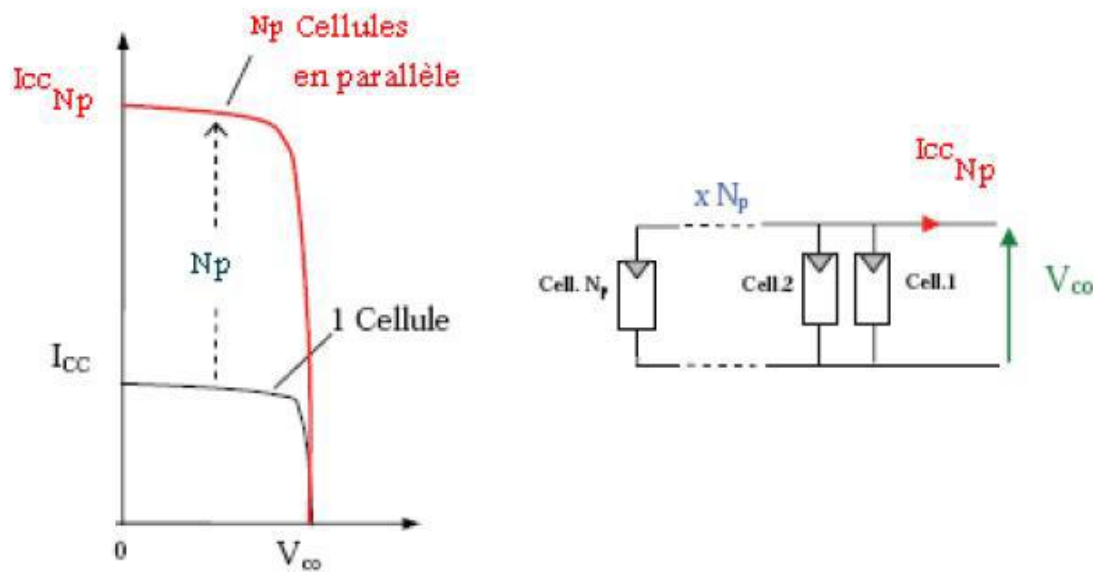


Figure II.18 : caractéristiques d'un groupement de (N_p) cellules en parallèle .

II.5.4.3. Regroupement des cellules (série et parallèle)

La caractéristique ($I_{pv} - V_p$) d'un générateur solaire peut être considérée comme le fruit d'une association d'un réseau de ($N_s * N_p$) cellules en série /parallèle. La caractéristique globale peut en outre, varier en fonction de l'éclairement, température, du vieillissement des cellules et les effets d'ombrage ou d'inhomogénéité de l'éclairement.

De plus, il suffit d'une occultation ou d'une dégradation d'une des cellules mises en série pour provoquer une forte diminution du courant produit par le module photovoltaïque.

Lorsque le courant débité est supérieur au courant produit par la cellule faiblement éclairée, la tension de celle-ci devient négative et devient un élément récepteur. Celle-ci se trouve à dissiper une quantité trop importante de puissance électrique qui pourrait aboutir à sa destruction si le défaut persiste trop longtemps. C'est le phénomène du point chaud. Pour remédier à ce phénomène, on équipe donc les panneaux photovoltaïques des diodes by-pass qui ont pour rôle de protéger les cellules qui deviennent passives figure (I.19-a). Des mesures réalisées sur un module photovoltaïque commercial de (85Wc) sur lequel on occulte volontairement (à différents niveaux d'ombrage) une des (36) cellules qui composent le générateur sont consignées en figure II.19.

On observe bien la déformation de la courbe ($I_{pv}-V_p$) liée à un effet d'ombrage partiel du module PV. La diode by-pass lorsqu'elle se met à fonctionner, court-circuite alors une partie du panneau comme indiqué en figure (II.19-b), évitant ainsi la circulation du courant inverse au sein des cellules défectueuses. Par contre, cette solution efficace réduit d'autant la puissance délivrée ainsi que la tension aux bornes du panneau. La dégradation d'une seule cellule condamne donc le groupe de cellules associées à la cellule défectueuse, elle est protégée par la diode (by-pass) à ne pas produire de puissance. Ce phénomène de perte parallèle de puissance est à comparer à la perte totale d'un panneau entier en cas de problème sur une cellule avec un panneau fonctionnant sans protection. Un tel regroupement des cellules (série et parallèle) avec diode de protection sont représentés par la figure qui suit.

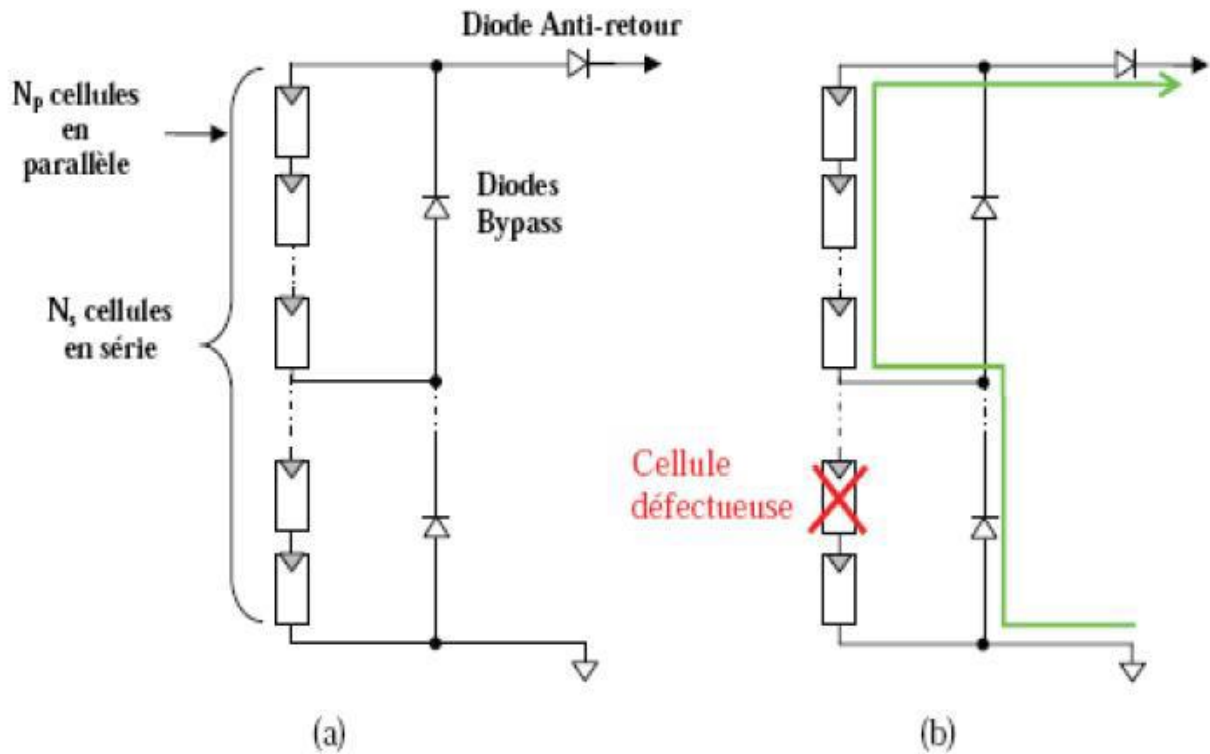


Figure II.19 : (a) architecture classique d'un panneau solaire photovoltaïque avec diodes de protections. (b) défaillance d'une des cellules du module PV et activation de diode de circulation I_{pv} .

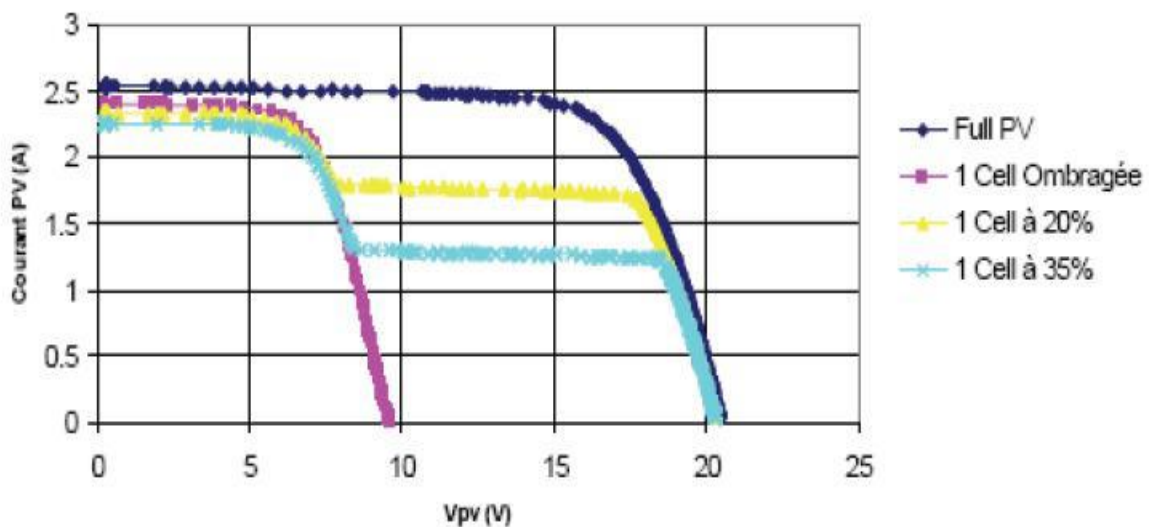


Figure II.20 : caractéristique (I_{pv} - V_{pv}) d'un panneau photovoltaïque (BP585) et effet d'une des (36) cellules qui composent le module PV [6].

On s'aperçoit donc que la maîtrise de cette énergie photovoltaïque n'est pas aussi simple qu'il n'y paraît. La production de courant dans un module photovoltaïque du commerce est donc limitée par la cellule la plus faible de l'ensemble. Généralement, lors de l'assemblage des cellules, il est nécessaire de les trier en fonction de leurs caractéristiques électriques afin d'obtenir une association homogène et ainsi éviter de limiter la puissance fournie par le panneau à cause d'une dispersion des cellules. De plus, le vieillissement des cellules peut produire une dispersion des caractéristiques. Les conditions météorologiques auxquelles les modules sont soumis (ensoleillement inhomogène, température, salissures, neige, pluie, dépôt de feuilles mortes..) fait de l'énergie photovoltaïque une ressource difficilement maîtrisable [6].

II.6. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes notions de cellule photovoltaïque et sa caractéristique.

Chapitre III :

Les centrales photovoltaïques

III. Introduction

Dans ce chapitre, une étude descriptive générale des systèmes photovoltaïques est présentée. Cette étude comprend : la conception des systèmes photovoltaïques, leurs types, leurs problèmes produits, leurs compositions et les critères de choix d'un système photovoltaïque.

III.1. Les centrales solaires

Les centrales solaires utilisent le rayonnement solaire pour produire de l'électricité.

Une centrale solaire photovoltaïque est composée de plusieurs champs de panneaux solaires comportant un grand nombre de cellules photovoltaïques convertissant directement l'énergie lumineuse en électricité.

L'inconvénient des centrales solaires est qu'elles ne peuvent pas produire d'électricité la nuit. Pour pallier à ce problème, on a deux solutions :

- soit on stocke durant le jour une partie de la chaleur apportée par le fluide non Vaporisable dans un accumulateur (cette chaleur sera libérée durant la nuit et exploitée pour produire de l'électricité) ;
- Soit on utilise des carburants fossiles comme le gaz par exemple pour chauffer le Liquide non vaporisable. Pour cela, on installe dans la centrale une chaudière à gaz qui Prend le relais des miroirs la nuit et qui s'arrête au matin.

III.2. Les composants d'une centrale photovoltaïque

L'ensemble de cellules photovoltaïques reliées entre elles, constitue le module photovoltaïque. Plusieurs modules sont groupés pour former un système (ou une centrale) photovoltaïque qui comprend d'autres composants comme le régulateur, l'onduleur et la batterie pour un site isolé (autonome).

Afin de bien comprendre le fonctionnement d'un système photovoltaïque, il est utile d'en analyser les principaux composants (**Figure III.1**) . Les informations présentées ne se veulent pas exhaustives mais doivent permettre de comprendre le rôle et l'utilité de chacun des composants, ainsi que de leur emplacement respectif.

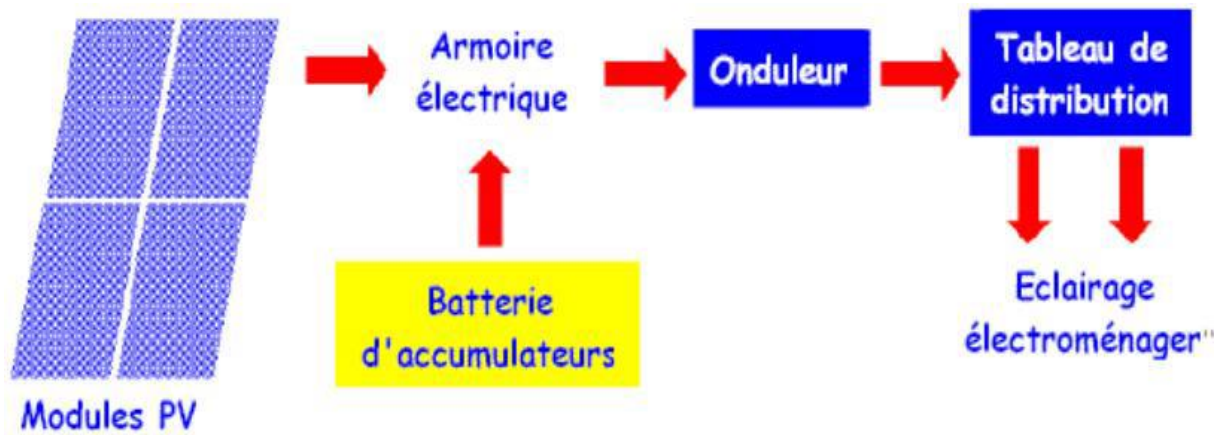


Figure III.1 : Schéma général d'une installation photovoltaïque.

III.2.1. Les panneaux solaires

Le champ solaire se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise (**Figure III.2**). Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique.



Figure III.2 : Panneau solaire.

Pour chaque champ on peut avoir autant de sorties que de modules, ce que fait qu'on aura besoin de boîte de dérivation qui regroupe le tous, comme l'illustre la figure III.3, Alors cette boîte de dérivation fixée sur une structure du montage a comme rôle d'effectuer les connections entre les modules pour obtenir une puissance optimale en sortie.



Figure III.3 : Boite de dérivation [13].

La boite de dérivation est composée également d'un circuit imprimé sur lequel se trouvent :

- Des diodes Schottky série, placées sur un radiateur, sur chaque entrée, qui empêche aux batteries de se décharger dans les panneaux
- Des fusibles de protections qui empêcheront aux batteries de se décharger dans les modules en cas de destruction des diodes antiparallèles.
- Des diodes lumineuses, en parallèle sur chaque fusible de protection. Ces diodes permettant de contrôler individuellement chaque branche de modules. Par exemple une boite à 4 entrées de 24 Volts sera constituée de deux branches de deux modules, il y aura donc deux diodes qui permettront de constater le fonctionnement de chaque branche.
- Une protection parafoudre (Transil ou VDR) en sortie de la boîte. Le câblage de ces boites permet d'avoir une sortie en 12, 24 ou 48 volts selon les modules, elles sont équipées de deux a douze entrées, selon les tensions de sortie. La quantité d'électricité dans l'ensemble des Composants des panneaux PV dépend :
- des besoins en électricité ;
- la taille du panneau ;
- L'ensoleillement du lieu d'utilisation ;
- La saison d'utilisation.

La puissance délivrée par un panneau est importante dans les heures d'ensoleillement maximales, ce qui nécessite un élément de stockage.

III.2.1.1. Les types de panneaux [40]

i. *Panneaux photovoltaïques orientables*

Avec des panneaux orientables, on peut modifier l'inclinaison tous les mois, mais par facilité, on peut également choisir une inclinaison pour l'été, une autre pour l'hiver. On utilise généralement ce genre de structure pour des applications au sol ou sur des toits plats. Pour ces systèmes à inclinaison variable, il existe un angle d'inclinaison des panneaux par rapport à l'horizontale, qui permet de maximiser la production d'électricité mensuelle.

ii. *Panneaux photovoltaïques fixes*

Les panneaux fixes sont installés dans une position fixe tout au long de l'année (azimut et inclinaison). Le rendement optimum est obtenu pour une orientation sud avec une inclinaison de 35° . Dans cette position, **un système d'une puissance d'1 kWc produit environ 900 kWh par an**. Si on s'écarte de cette position, le rendement diminue. Cette diminution du rendement peut être calculée en multipliant le rendement obtenu en position optimale par le facteur de correction pour l'orientation et l'inclinaison choisie (ce qu'on appelle le Facteur de transposition qui tient compte de l'orientation et de l'inclinaison FT).

iii. *Panneaux photovoltaïques mobiles ou suiveur solaire*

L'objectif du système de panneaux mobiles est de pouvoir suivre le soleil tout au long de la journée. Pour cela, la structure possède deux degrés de liberté : une rotation horizontale pour régler l'azimut et une rotation verticale pour l'inclinaison. Ce système permet aux panneaux photovoltaïques de suivre continuellement la position du soleil pour assurer une production électrique maximum. Ce type de structure permet d'augmenter la production d'électricité par rapport aux panneaux fixes, d'environ 25%.

III.2.2. Système de stockage

Dans une installation PV, le stockage correspond à la conservation de l'énergie produite par le générateur PV, en attente pour une utilisation ultérieure. La gestion de l'énergie solaire nécessite

d'envisager des stockages suivant les conductions météorologiques et qui vont répondre à deux fonctions principales [14] :

- Fournir à l'installation de l'électricité lorsque le générateur PV n'en produit pas (la nuit ou par mauvais temps par exemple)
- Fournir à l'installation des puissances plus importantes que celles fournies par le générateur PV.

III.2.2.1. Les Caractéristiques principales d'une batterie

Capacité en Ampère heure :

Les Ampères heure d'une batterie sont simplement le nombre d'Ampères qu'elle fournit multiplié par le nombre d'heures pendant lesquelles circule ce courant. Théoriquement, par exemple, une batterie de 200 Ah peut fournir 200 A pendant une heure, ou 50 A pendant 4 heures, ou 4 A pendant 50 heures. Il existe des facteurs qui peuvent faire varier la capacité d'une batterie tels que : [14]

a. Rapports de chargement et déchargement :

Si la batterie est chargée ou déchargée à un rythme différent que celui spécifié, la capacité disponible peut augmenter ou diminuer. Généralement, si la batterie est déchargée à un rythme plus lent, sa capacité augmentera légèrement. Si le rythme est plus rapide, la Capacité sera réduite.

b. Température :

Un autre facteur qui influence la capacité est la température de la batterie et celle de son atmosphère. Le comportement d'une batterie est spécifié à une température de 27 degrés. Des températures plus faibles réduisent leur capacité significativement. Des températures plus hautes produisent une légère augmentation de leur capacité, mais ceci peut augmenter la perte d'eau et diminuer la durée de vie de la batterie [14].

c. La charge :

Pendant la charge, l'accumulateur est un récepteur (environ 2,2 V) ; en fin de charge (point M), on note un accroissement rapide de la tension, les plaques complètement polarisées, la fin de charge est atteinte à 2,6 ou 2,7 V [28] (Figure III.4).

d. La décharge :

Durant une assez longue durée d'utilisation, la tension reste remarquablement constante à la valeur de 2 V environ. A partir du point N, elle diminue brusquement à 1,8 V, il faut alors recharger l'accumulateur [28] (figure III.4).

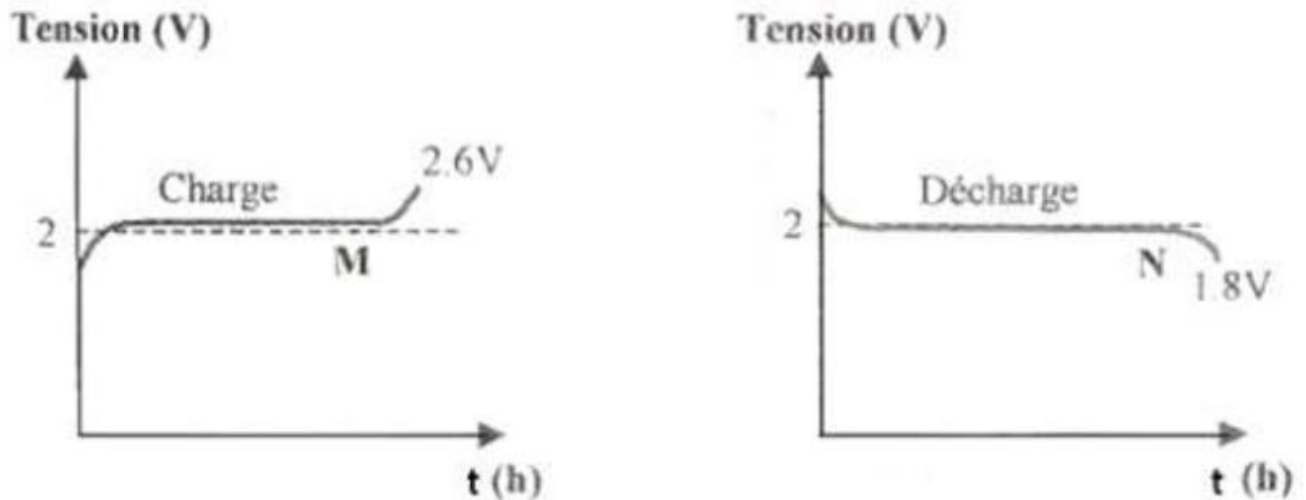


Figure III.4 : Caractéristique charge et décharge d'une batterie [22]

e. Profondeur de décharge :

La profondeur de décharge est le pourcentage de la capacité totale de la batterie qui est utilisée pendant un cycle de charge/décharge. Les batteries de "cycle peu profond" sont conçues pour des décharges de 10 à 25% de leur capacité totale dans chaque cycle. La majorité des batteries de "cycle profond" fabriquées pour les applications photovoltaïques sont conçues pour des décharges jusqu'à 80% de leur capacité, sans les endommager. Les fabricants de batteries de nickel-Cadmium assurent qu'elles peuvent totalement être déchargées sans aucun dommage. Cependant, même les batteries de cycle profond sont affectées. Plus la décharge est grande plus la durée de vie de la batterie est réduite.

f. La durée de vie :

Un accumulateur peut être chargé puis déchargé complètement en un certain nombre de fois avant que ces caractéristiques ne se détériorent. Par ailleurs, quel que soit le mode d'utilisation de l'accumulateur, il y a une durée de vie totale exprimée en année (ou en nombre de cycles) [15].

g. La tension d'utilisation :

C'est la tension à laquelle l'énergie stockée est restituée normalement à la charge.

h. Le rendement :

C'est le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie fournie à l'accumulateur.

i. Le taux d'autodécharge :

L'autodécharge est la perte de capacité en laissant l'accumulateur au repos (sans charge) pendant un temps donné. La plupart des batteries modernes sont à faible autodécharge, c'est à dire qu'elles perdent moins de 3% de capacité par mois à 20°C [3].

III.2.2.2. Types d'accumulateurs

Il existe plusieurs types de stockage dans le système PV, les puissances rencontrées sont inférieures au MW, le seul stockage d'énergie électrique possible est le stockage électrochimique. Les deux principaux types d'accumulateurs utilisés actuellement dans le Système photovoltaïque sont [12] :

a. Les Accumulateurs au plomb-acide :

La batterie au plomb acide est la forme de stockage de l'énergie électrique la plus courante, en raison de son coût qui est relativement faible et d'une large disponibilité. Par contre, les batteries nickel-cadmium sont plus chères, elles sont utilisées dans les applications où la fiabilité est vitale [16].

• *Composition d'une batterie solaire plomb-acide [17] :*

Ces batteries sont composées de plusieurs plaques de plomb dans une solution d'acide sulfurique. La plaque consiste en une grille d'alliage de Plomb avec une pâte d'oxyde de plomb marquée sur la grille (Figure III.5). La solution acide sulfurique et l'eau est appelée électrolyte.

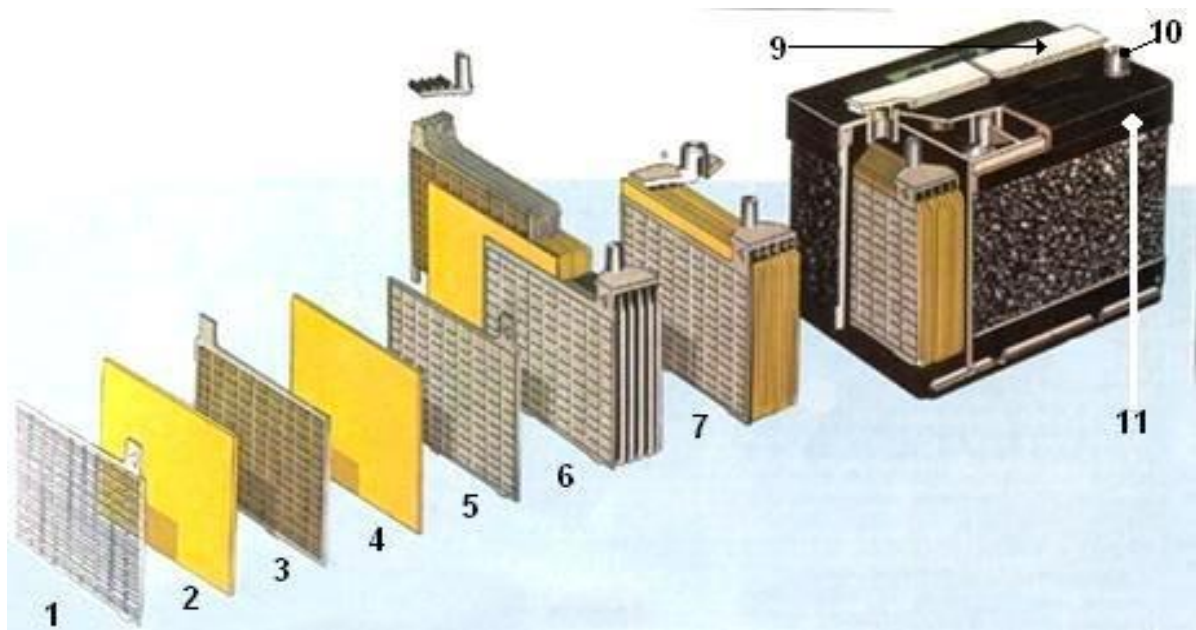


Figure III.5 : Construction d'une batterie monobloc [17]

- | | |
|-----------------------|------------------------|
| 1 : Grille. | 7 : Élément complet |
| 2 : Séparateur. | 8 : Pont |
| 3 : Plaque positive. | 9 : Rampe de bouchons. |
| 4 : Plaque négative. | 10 : Borne. |
| 5 : Barrette. | 11 : Bac. |
| 6 : Faisceau négatif. | |

Le matériel de la grille est un alliage de plomb parce que le plomb pur est un matériel physiquement faible, et pourrait se casser pendant le transport et le service de la batterie [17].

Peut-être l'alliage est en plomb avec 2-6% d'Antimoine. Moins la contenance en Antimoine sera grande, moins résistante sera la batterie pendant le processus de charge. Une petite quantité d'Antimoine réduit la production d'hydrogène et d'oxygène pendant la charge, et par conséquent la consommation d'eau. D'autre part, une plus grande proportion d'Antimoine permet des décharges plus profondes sans endommager les plaques, ce qui implique une plus grande durée de vie des batteries. Ces batteries plomb-antimoine sont de type de "cycle profond".

Le Cadmium et le Strontium sont utilisés à la place de l'Antimoine pour fortifier la grille. Ceux-ci offrent les mêmes avantages et inconvénients que l'Antimoine, mais réduisent en outre le pourcentage d'autodécharge quand la batterie n'est pas en utilisation. Le Calcium

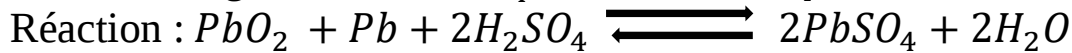
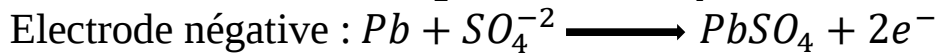
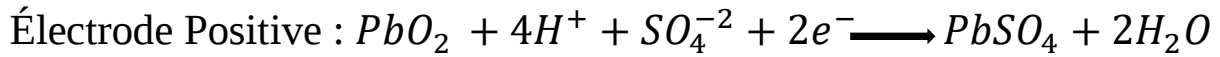
fortifie aussi la grille et réduit l'autodécharge. Toutefois, le Calcium réduit la profondeur de décharge recommandée dans non plus de 25%. D'autre part, les batteries de plomb- calcium sont de type "cycle peu profond". Les plaques sont alternées dans la batterie, avec des séparateurs entre elles, qui sont fabriqués d'un matériel poreux qui permet le flux de l'électrolyte. Ils sont électriquement non conducteurs, ils peuvent être des mélanges de silice et de matières plastiques ou gommées. Les séparateurs peuvent être des feuilles individuelles ou des "enveloppes". Les enveloppes sont des manchons, ouverts par en haut, qui sont uniquement placés sur les plaques positives.

Un groupe de plaques positives et négatives, avec des séparateurs, constituent un "élément". Un élément dans un container plongé dans un électrolyte constitue une "cellule" de batterie. Des plaques plus grandes, ou en plus grand nombre, entraînent une plus grande quantité d'ampères heure que la batterie peut fournir. Indépendamment de la taille des plaques, une cellule fournira une tension varie entre 1,7 et 2 volts suivant l'état de charge en conduction nominales de fonctionnement, et un rendement énergétique de l'ordre de 70% à 85% (pour plomb-acide) Une batterie est constituée par plusieurs cellules ou des éléments reliés en série, interne ou externe, pour augmenter le voltage à des valeurs normales aux applications électriques. Pour cette raison, une batterie de 6 V est composée de trois cellules, et une de 12 V de 6. Les plaques positives d'une part, et les négatives de l'autre, sont interconnectées au moyen de bornes externes dans la partie supérieure de la batterie. Les éléments des batteries sont souvent montés dans des bacs isolés du sol pour éviter le refroidissement de l'électrolyte par l'intermédiaire de support de bois, ces bacs sont réalisés en plastique transparent afin de bien visualiser le repérage de niveau de l'électrolyte. Les liaisons entre les éléments doivent être dimensionnées de manière à avoir une chute de tension très faible quel que soit le régime [14].

- ***Principe de fonctionnement :***

Une réaction chimique intervient lorsque la batterie alimente une charge connectée à ces deux électrodes. Pendant la décharge, il y a une oxydation à la plaque négative qui se traduit par une perte d'électrons et réduction à la plaque positive ou gain d'électrons.

L'électrolyte en présence dans la batterie facilite le déplacement des charges électrochimiques sous forme d'ions. Le processus inverse se produit quand la batterie se recharge on voit apparaître immédiatement une force électromotrice entre les deux électrodes. Les équations des réactions suivantes décrivent la réaction principale [38] :



b. Les Accumulateurs au Nickel- cadmium [17] :

Les batteries de nickel- cadmium ont une structure physique semblable à celles du plomb- acide. Au lieu du Plomb, elles utilisent de l'hydroxyde de Nickel pour les plaques positives et de l'oxyde de Cadmium pour les plaques négatives. L'électrolyte est de l'hydroxyde de Potassium. La tension de ce type d'accumulateur varie entre 1,15 et 1,17 Volts, par élément suivant l'état de charge. Le rendement énergétique est de l'ordre de 70%.

En dépit d'un prix encore prohibitif, ce type d'accumulateur présente beaucoup d'avantages :

- Très bonne résistance mécanique.
- Possibilité de supporter des décharges profondes.
- Pas d'émanations toxiques à partir de l'électrolyte.
- Ne craint pas de gel.

Il existe **d'autres** différentes technologies de batteries :

- Nickel-Fer, Nickel-Zinc.
- Nickel-Hydrure métallique.
- Lithium-Ion ...

Le tableau III.1 et III.2 compare les différents types de batteries et Caractéristiques moyennes des différentes technologies de batterie

Technologie	Avantages	Inconvénients
Plomb	- Economique - Recharge facile - Stockage de longue durée (autodécharge faible) - Recyclage simple	- Sensible aux décharges trop profondes - Capacité massique faible - Risque de sulfatation irréversible - Durée de vie faible - Pollution par le plomb en cas de destruction
Lithium-Ion	- Pas d'effet mémoire - Faible autodécharge (1 % par mois, quelques pourcents par an) - Ne nécessite pas de maintenance - Possède une haute densité d'énergie pour un poids faible. - Accepte une charge rapide - Peu de pollution et recyclable	- Coût élevé de production - Problèmes de densité thermique - Sensible aux chocs - Recharge sous haute surveillance, risque d'explosion - Recyclage très technique
Nickel-Cadmium	- Charge simple et rapide même après une longue période de stockage - Recharge facile même à basse température - Grande durée de vie - Bonnes performances à basse température - Résistance interne très faible et faible coût	- Faible densité énergétique. - Autodécharge assez rapide (15% par mois) - Sensibilité à l'effet mémoire - Assez polluant à cause du cadmium
Nickel-Hydrure métallique	- Contient beaucoup plus d'énergie que le Nickel-Cadmium - Peu d'effet mémoire - Simple à stocker et à transporter - Ne pollue pas comme le Ni-Cd	- Ne supporte pas le dépassement de charge - Détection de fin de charge difficile - Durée de vie plus faible que le Ni-Cd en nombre de cycles - Coût élevé - Tension faible

Tableau III.1 : Comparaison entre les différentes technologies de batteries [35].

	Plomb	Nickel-Cadmium	Nickel-Métal hydrure	Lithium-Ion
Tension cellule	2,0V	1,2 V	1,2 V	3,6 à 3,7V
Energie spécifique	25-50 Wh/kg	30-60 Wh/kg	50-90 Wh/kg	100-230 Wh/kg
Cycles	200-500	1 000-1 500	1 000	500-3 000
Domaine de température	0°C à 50°C	-30°C à 50°C	-20°C à 50°C	-20°C à 50°C
Autodécharge	~5 %/mois	~15 %/mois	~25%/mois	~2 %/mois
Durée de vie calendaire	5 ans	10 ans	5-10 ans	5-15 ans
Temps de charge standard	10 h	5 h	3-5 h	3

L'autodécharge d'une batterie est la réduction naturelle et progressive de son taux de charge lorsqu'elle n'est pas utilisée. L'autodécharge se produit en particulier lorsque la batterie n'est pas sollicitée pendant une période prolongée.

Tableau III.2 : caractéristique moyennes des différentes technologies de batterie en 2019 [33] .



Figure III.6 : différentes technologies de batterie.

III.2.3. Système de régulation

Les systèmes de régulation de charge sont des éléments d'un système photovoltaïque qui ont pour but de contrôler la charge et la décharge d'une batterie afin d'en maximiser la durée de vie. Son rôle principal est de réduire le courant lorsque la batterie est presque entièrement

chargée. Lorsqu'une batterie se rapproche d'un état de charge complète, de petites bulles commencent à se former sur les électrodes positives. A partir de ce moment, il vaut mieux réduire le courant de charge non seulement pour éviter des dégâts mais aussi afin de mieux atteindre l'état de charge complète. Un courant trop élevé peut provoquer une déformation des électrodes à l'intérieur, ce qui pourrait créer un court-circuit. Le régulateur de charge assure deux fonctions principales :

- la protection des batteries contre les surcharges et les décharges profondes.
- L'optimisation du transfert d'énergie du champ PV à l'utilisation.

III.2.3.1. Technique de régulation

Toute la régulation se fait grâce à la mesure de la tension aux bornes de la batterie. Une batterie déchargée possède une tension faible (autour de 11,4 V pour une batterie de 12 V), alors qu'une batterie chargée possède une tension forte (autour de 13,2 V). Le régulateur de Charge doit donc avoir une lecture précise de la tension aux bornes de la batterie, afin de savoir si elle se trouve dans une période de fin de charge ou en fin de décharge. C'est pour cela que l'on place toujours le régulateur à proximité des batteries, pour éviter les chutes de tension dues à la distance et pour pouvoir prendre en compte la température environnante [23].

Les régulateurs de charge de système photovoltaïque autonome peuvent se classer en quatre groupes principaux :

A. les régulateurs de charge parallèle (shunt)

Le régulateur shunt est bien adapté aux petits systèmes. En fin de charge, il court-circuite le module (il "shunte" le module) afin que la batterie ne reçoive plus de courant et ne soit pas en surcharge. Le courant excédentaire est ainsi dirigé vers une résistance qui dissipe l'énergie produite sous forme de chaleur. C'est une technologie ancienne qui n'est plus vraiment disponible sur le marché car elle ne permet pas de recharger la batterie à plus de 70% de sa capacité [23]. La figure III.7 illustre un régulateur de charge shunt :

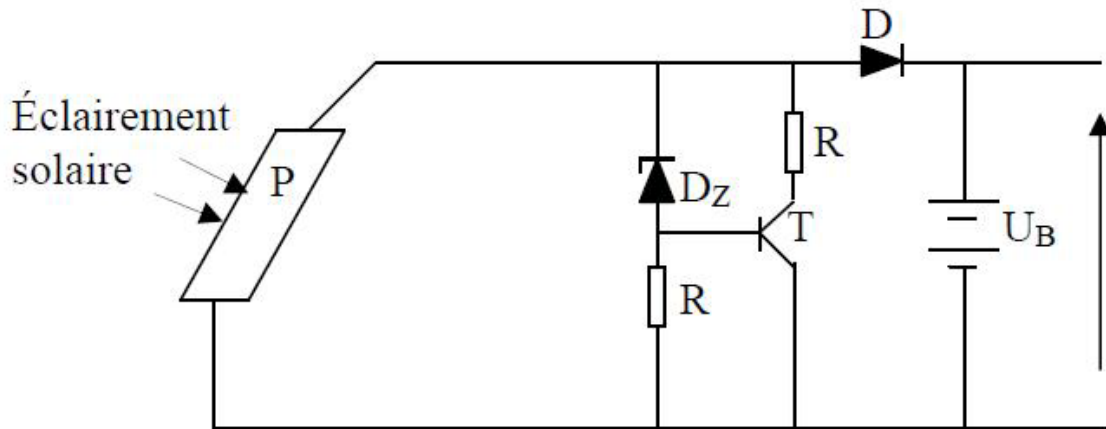


Figure III.7 : Schéma de principe d'un régulateur de charge parallèle [19].

Tant que la tension aux bornes de la batterie est faible, le courant I et la tension U aux bornes de la résistance r seront faibles également, donc le transistor est bloqué.

$$I_R = 0; I_b = I_p - I \dots\dots \text{III.1}$$

Le courant délivré par le générateur PV passe dans la batterie, des qu'on atteint la tension de référence de la diode Zener le courant I et la tension U croient brusquement, ainsi le transistor devient conducteur et délivre un courant I_e ; d'où :

$$I_b = I_p - I - I_e \dots\dots \text{III.2}$$

Avec :

I_R : Le courant traversant la résistance R .

I_b : Le courant traversant la batterie.

I_p : Le courant provenant du champ PV.

I_e : Le courant délivré par le transistor.

I : Le courant traversant la diode Zener.

Il faut ajouter impérativement une diode entre cet interrupteur (transistor) et la batterie pour ne pas court-circuiter la batterie. Cette diode joue également le rôle de blocage du courant nocturne pouvant s'écouler de la batterie vers le panneau.

B. Les régulateurs de charge série

Contrairement au régulateur shunt qui dérive le courant vers une résistance, le régulateur série stoppe la circulation du courant en ouvrant le circuit électrique. Les modules restent sous tension, mais les batteries sont à l'abri de la surcharge. Il s'agit également d'une technologie ancienne peu performante. Elle ne permet pas non plus de recharger les batteries au-delà de 70% de leur capacité. Étant donné que le module produit de l'électricité tant qu'il est éclairé, on ne peut pas stopper la recharge de la batterie autrement qu'en ouvrant le circuit et en créant une dérivation (figure III.8).

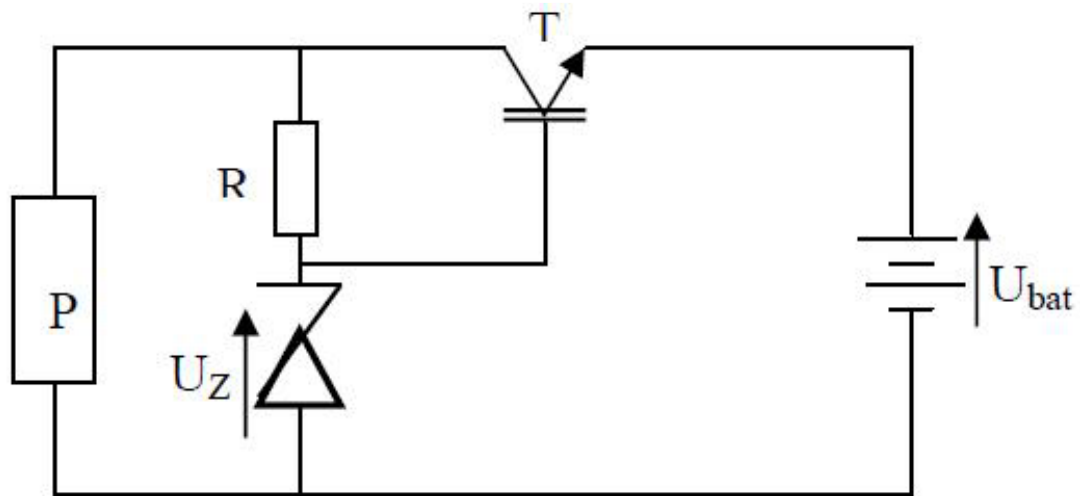


Figure III.8 : Schéma de principe d'un régulateur de charge série [19].

Tant que la tension U_b aux bornes de la batterie est inférieure à la tension de la diode Zener U_Z , le courant délivré par le panneau solaire charge la batterie à travers le transistor (absence de régulation), dès que la tension de la batterie devient supérieure à celle de la diode Zener, le transistor se bloque, et le courant ne passe qu'à travers la résistance (apparition de la régulation). Donc, le régulateur série ouvre le circuit électrique pour couper le courant qui provient du champ PV.

C. Régulateur PWM

Le régulateur PWM (Pulse With Modulation) ou MLI (Modulation en largeur d'impulsion) est un régulateur de génération plus récente qui a permis d'améliorer la recharge des batteries en passant de 70% (avec les anciens régulateurs de type shunt et série) à 100% de leur capacité.

C'est le plus utilisé dans les installations photovoltaïques autonomes [23].

Quand les modules fournissent de l'énergie à une batterie déchargée, le régulateur PWM procède au début de la même manière que les régulateurs shunt ou série, c'est-à-dire qu'il limite le courant de charge de la batterie à un ampérage constant. Plus la batterie se recharge, plus la tension à ses bornes augmente. A partir d'un certain niveau, le régulateur PWM va alors maintenir une tension constante et produire des impulsions de courant. Autrement dit, plusieurs fois par seconde, il va couper et rétablir le courant jusqu'à ce que la batterie soit totalement chargée. Dans un premier temps, les impulsions du régulateur sont longues et presque continues, quand la batterie s'approche de la fin de sa recharge, elles deviennent de plus en plus rares et espacées.

Bien que cette technologie de régulateur soit plus évoluée, elle possède tout de même des similitudes avec les régulateurs shunt ou série. Tant que la surface du module photovoltaïque est éclairée, celui-ci continue de fournir de l'électricité. Pour le déconnecter de la batterie il n'y a que deux solutions : on peut ouvrir le circuit électrique (comme pour les régulateurs série), ou on peut le court-circuiter (comme pour les régulateurs shunt). Les régulateurs PWM utilisent les mêmes techniques que les anciens, à la différence près que ces derniers fonctionnaient en mode tout ou rien (On/Off), alors que le PWM possède un microprocesseur beaucoup plus précis.

Nos régulateurs branchés derrière un ou plusieurs panneaux solaires permettent de recharger correctement un parc de batteries. Selon les modèles la visualisation, très facile à interpréter, vous donne les renseignements utiles, nombre d'ampères qui entrent dans les batteries, nombres d'ampères consommés sur les batteries, tension et état de charge des batteries, etc. Le choix du régulateur se fait en fonction de la puissance des panneaux photovoltaïques connectés dessus ainsi que la tension de l'installation.

Les régulateurs PWM limitent la tension fournie par le panneau à la tension des batteries. Il en résulte une perte de 15 à 30 % de l'énergie produite par les panneaux. Un parc de panneaux en 12v doit être raccordé à un parc de batterie en 12v, idem en 24v.

D. Régulateur MPPT (Maximum Power Point Tracking)

Régulateur MPPT ou un tracker MPPT est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Dans ce régulateur, un circuit mesure en permanence la tension et le courant du panneau pour tirer de l'énergie au point de puissance maximale. Ceci permet de garantir une récupération maximum d'énergie, quelque soient la température et l'ensoleillement. Ces régulateurs fonctionnent soit en élevant, soit en réduisant la tension. Un premier circuit ajuste la demande au point de puissance maximale de l'ensemble des panneaux et le deuxième circuit transforme le courant et la tension pour les adapter au type de batterie [29]. Le régulateur MPPT coûte en général beaucoup plus cher qu'un régulateur standard. C'est pour cette raison que son utilisation n'est pas généralisée, et qu'il n'est pas recommandé pour les petites installations (les pertes ne sont pas assez importantes).



Figure III.9 : Régulateur Solaire **MPPT** (à gauche) et **PWM** (à droite).

III.2.4. Système de protection

Le groupement des cellules photovoltaïque présente un effet indésirable lorsque le module est partiellement à l'ombre ou lorsque les cellules ne sont pas éclairées équitablement (éclairage non homogène). donc pour résoudre ce problème et pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées .

La diode anti-retour ne doit pas être confondue avec les diodes by-pass. La diode anti-retour sert à protéger le panneau solaire contre le

courant inverse pouvant entrer dans le panneau mais ne joue aucun rôle pour empêcher les points chauds (hot spots) dus à l'ombre et pour limiter la perte de rendement qu' s'ensuit.

- La diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les PV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit.
- Les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène (effet d'ombrage) évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées.

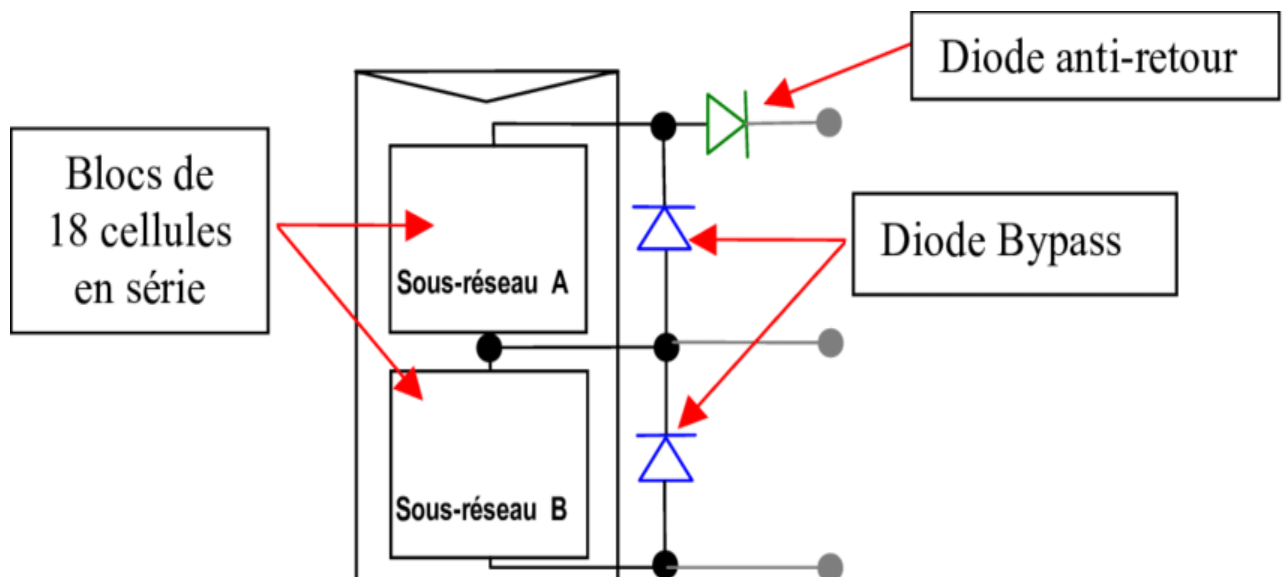


Figure III.10 : Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour .

L'installation solaire photovoltaïque est déconnectée à moitié. Trois panneaux (ceux du bas) fonctionnent normalement, tandis que les trois des hauts sont déconnectés (Figure III.11) . D'où la plus grande importance et la nécessité de positionner ses panneaux solaires de telle sorte qu'ils ne soient jamais ombrés à n'importe quelle heure de la journée.

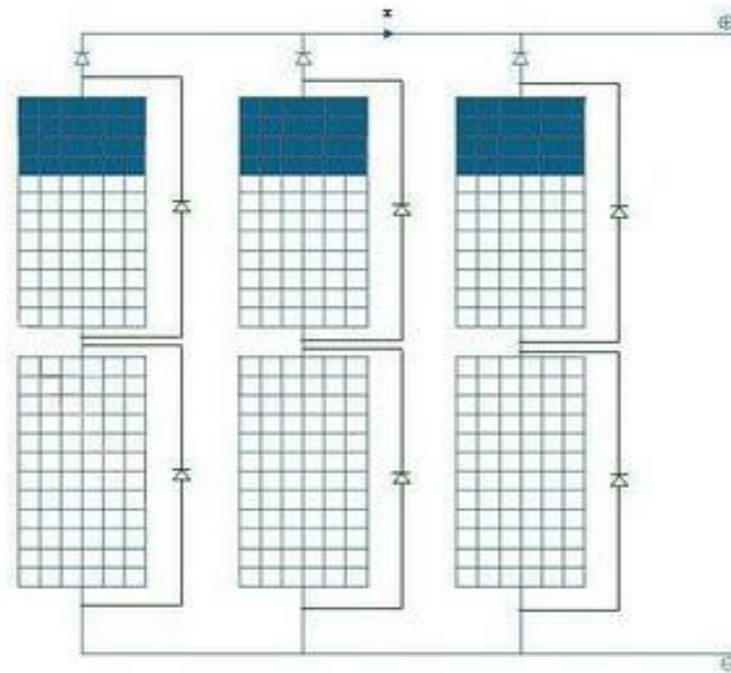


Figure III.11 : trois panneaux solaires déconnectés.

III.2.5. Système de conversion

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ PV et la charge (sans stockage avec charge en continu, il portera le nom de convertisseur continu-continu), soit entre la batterie et la charge (il sera alors appelé onduleur ou convertisseur continu-alternatif). L'onduleur est généralement associé un redresseur qui réalise la transformation du courant alternatif en courant continu et dont le rôle sera de charger les batteries et d'alimenter le circuit en continu de l'installation en cas de longue période sans soleil [16].

A. Le convertisseur continu - continu

Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximal [16].

Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT (maximum power point tracking). Son rendement se situe entre 90 et 95%. Ce système présente deux inconvénients pour un système PV de faible puissance :

- Prix élevé ;

- Le gain énergétique annuel par rapport à un système moins complexe (cas d'une régulation de la tension) n'est pas important.

B. Le convertisseur continu- alternatif (onduleur)

C'est un dispositif destiné à convertir le courant en courant alternatif. C'est un appareil électronique de haute technologie conçu pour répondre à toutes les exigences du réseau, comme la qualité, la sécurité et la fiabilité, et pour permettre un contrôle parfait du fonctionnement. Il se présente sous la forme d'un boîtier métallique de petite dimension, muni d'un radiateur et doit être placé sur un support vertical (mur par exemple). Il n'émet aucun parasite électromagnétique et ne génère quasiment aucun bruit. Afin de limiter les pertes, il doit être placé le plus près possible des panneaux photovoltaïques.

L'onduleur s'arrête automatiquement de fonctionner lorsque le réseau est mis hors tension. Une sécurité est en effet prévue afin de supprimer les risques d'électrocution lorsque des techniciens font une opération de maintenance sur le réseau. Selon la conception technique, un ou plusieurs onduleurs peuvent équiper un seul système photovoltaïque, même de petite taille. La formation de l'ordre de sortie peut être assurée par deux dispositifs :

Rotatif : c'est un moteur à courant continu couplé à un alternateur, son rendement varie de 50% à 60% pour 1 kW jusqu'à atteindre 90% pour 50 kW.

Ses avantages sont : simplicité, onde sinusoïdale, bonne fiabilité.

Ses inconvénients sont : cherté, faible rendement (surtout pour les faibles puissances).

Statique : on le désigne sous le nom d'onduleur. C'est un dispositif utilisant des transistors de puissance ou des thyristors. L'onde de sortie présente, dans le plus simple des cas, une forme carrée qui peut s'adapter à quelques types de charges, des pertes à vide considérables surtout pour des faibles puissances. Les onduleurs peuvent être améliorés à l'aide d'un filtrage ou par utilisation des systèmes en PWM (pulse width modulation) qui permettent grâce à la modulation de la longueur des impulsions d'obtenir une onde de sortie sinusoïdale [16]. Avec ce système, on obtient :

- Un rendement élevé sur une plage du taux de charge.
- De faibles pertes à vide.

▪ ***La puissance nominale :***

C'est la puissance exprimée en **VA** que le convertisseur est capable de délivrer en fonctionnement permanent. Théoriquement, le choix de la puissance à délivrer doit être la somme des puissances des équipements installés ou à installer, mais en pratique, il est rare que tous les appareils fonctionnent en même temps et le choix de la puissance nominale résultera de la valeur maximale du profil moyen de la consommation.

▪ ***Le rendement :***

C'est un critère très important, car il influe sur le dimensionnement du champ PV et de la batterie. Celui-ci varie en fonction du taux de charge (rapport de la puissance de sortie et de la puissance nominale), ainsi que la variation de ce rendement varie d'un onduleur à un autre. Le rendement de l'onduleur est aussi donné entre l'énergie consommée par la charge et l'énergie fournie par la source continue.

▪ ***La consommation à vide :***

Une consommation importante à vide va réduire l'énergie emmagasinée par la batterie (cas de nuit) [18]. Pour cette raison, il est important de limiter les pertes à un faible pourcentage de la puissance nominale (1 à 5%). Pureté de la tension sinusoïdale pure (220V – 50 Hz). La moins grande pureté de la tension de sortie est obtenue grâce à : un système de régulation qui tend à maintenir la tension et la fréquence aux valeurs nominales, quelle que soit la tension d'entrée. Un filtrage en sortie de l'onduleur, qui tend à lisser la forme de la tension donc à réduire le taux d'harmoniques.

C. La technologie des onduleurs couplés au réseau

L'onduleur couple au réseau est utilisé pour les installations photovoltaïques. Il permet de transformer le courant continu, produit par les modules solaires, en un courant ondulé conforme à celui du réseau. Il adapte également le courant produit à la fréquence et à la tension du réseau. Dans les installations d'habitation, le courant solaire produit est d'abord utilisé par l'habitation elle-même, si le courant produit pour l'habitation est excédentaire, l'excédent est injecté dans le réseau.

L'installation d'un onduleur couple au réseau électrique se fait avec l'accord de l'organisme de distributeur de l'énergie électrique pour des raisons de sécurité, un onduleur couplé au réseau doit constamment surveiller ces perturbations et interrompre immédiatement l'injection en cas de défaillance ou de coupure. Ceci est absolument nécessaire pour permettre une intervention sans danger sur le réseau [14].

▪ ***Onduleur modulaires (module inverter)***

Suivant ce concept, chaque module solaire dispose d'un onduleur individuel. Pour les installations les plus importantes, tous les onduleurs sont connectés en parallèle côté courant alternatif. Les onduleurs modulaires sont montés à proximité immédiate du module solaire correspondant [30].

▪ ***Onduleurs centralisés (central inverter) :***

Un onduleur centralisé de forte puissance transforme l'ensemble du courant continu produit par un champ de cellules solaires en courant alternatif (Figure II.11). Le champ de cellules solaires est en règle générale constitué de plusieurs rangées connectées en parallèle. Chaque rangée est elle-même constituée de plusieurs modules solaires connectés en série. Pour éviter les pertes dans les câbles et obtenir un rendement élevé, on connecte le plus possible de modules en série [30].

▪ ***Onduleurs « String » (Rangée)***

L'onduleur String est le plus utilisé (Figure III.12). Le plus souvent, huit (ou plus) modules solaires sont connectés en série. Comme une seule connexion série est nécessaire, les coûts d'installation sont réduits. Il est important de noter qu'en cas d'ombrage partiel des modules solaires, il n'y a pas de perte, l'emploi de diodes de by-pass est fortement recommandé [30].

Les installations jusqu'à 3 Kilowatt de puissance sont fréquemment réalisées avec un onduleur String. Pour une puissance plus élevée, il est possible de connecter plusieurs onduleurs String en parallèle, cote courant alternatif. L'intérêt dans ce concept est d'utiliser un plus grand nombre d'onduleurs du même type. Cela réduit les coûts de

production et apporte un intérêt supplémentaire : si un onduleur tombe en panne, seule la production de la rangée concernée est défaillante.

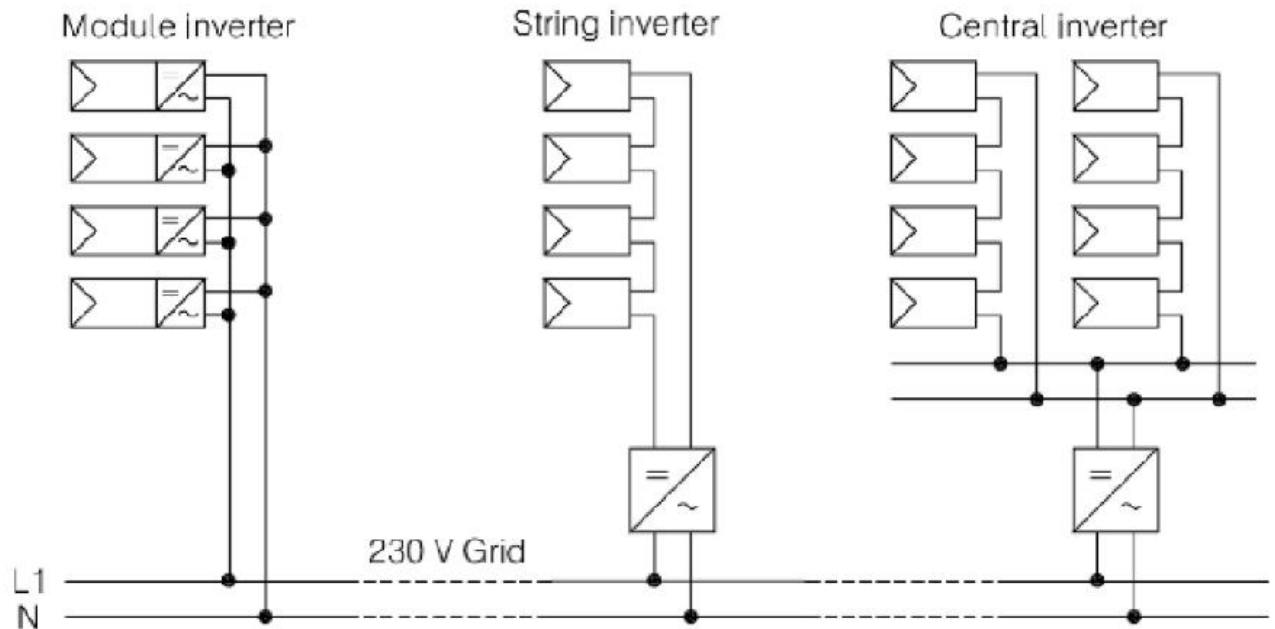


Figure III.12 : classification des onduleurs PV connectés au réseau [30].

Ils sont toujours conçus en triphasé. La plupart du temps, les systèmes (PV) sont installés dans les réseaux de distribution basse tension avec une puissance allant jusqu'à 30 KVA. Le type du réseau choisi en raccordement, détermine la possibilité du choix de systèmes de surveillance, et la détection en cas d'islanding (défaut).

III.2.6. La Charge

La charge et l'équipement électrique alimenté par le système, pouvant être de type continu comme des équipements de télécommunications, le pompage d'eau, ou de type alternatif dans les cas d'usage domestique (maison solaire), ce cas nécessite un onduleur.

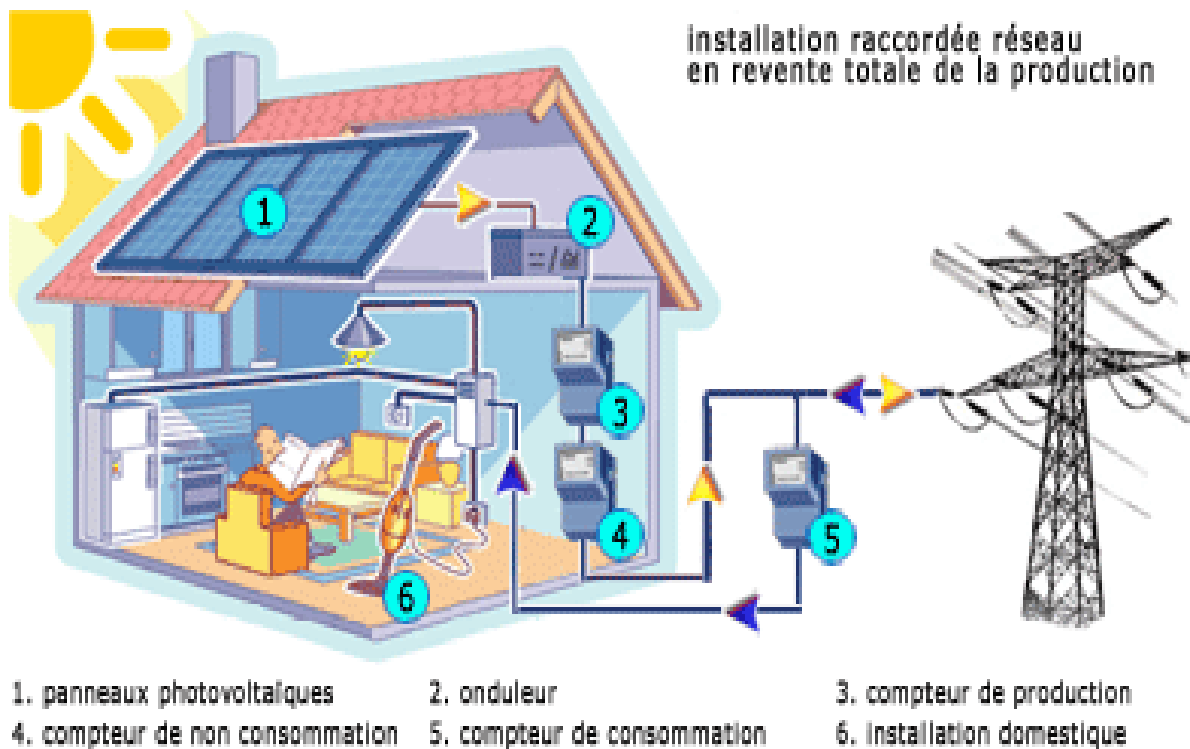


Figure III.13 : schéma d'une maison solaire.

III.3. Les différents types de systèmes photovoltaïques

Les trois genres de systèmes photovoltaïques que l'on rencontre généralement sont les systèmes autonomes, hybrides et connectés au réseau. Les deux premiers sont indépendants du service public de distribution d'électricité ; on les retrouve souvent dans les régions éloignées.

III.3.1. Système autonome

Il existe des systèmes autonomes au fil du soleil sans stockage et avec stockage :

A. Système au fil du soleil sans stockage [27]:

C'est le système le plus simple puisque l'énergie photovoltaïque est utilisée directement à partir des panneaux. L'appareil alimente par ce système ne fonctionnera qu'en présence de la lumière, et des que

l'éclairage sera suffisant pour atteindre la puissance demandée. Ce type de système est intéressant pour toutes les applications qui n'ont pas besoin de fonctionner dans l'obscurité, et pour lesquelles le besoin en énergie coïncide avec la présence de la lumière. L'inconvénient de ce système, c'est qu'on ne profite pas toujours des éclairages les plus élevés : pas de stockage, donc pas de récupération des surplus d'énergie solaire.

B. Système au fil du soleil avec stockage :

Cette installation est constituée essentiellement de trois composants : des modules solaires, la batterie, et le régulateur de charge (figure III.14). La batterie d'un tel système se charge le jour et sert de réservoir d'énergie en permanence ; elle peut recevoir un courant de charge et débiter un courant de décharge de valeur différente sans problème, à un instant donné. Les appareils alimentés sont donc câblés sur la batterie à travers le régulateur de charge, cela pour assurer le chargement optimal de l'accumulateur tel que, lorsque la batterie est pleine, ce dernier coupe la charge pour éviter qu'elle ne souffre de surcharge.

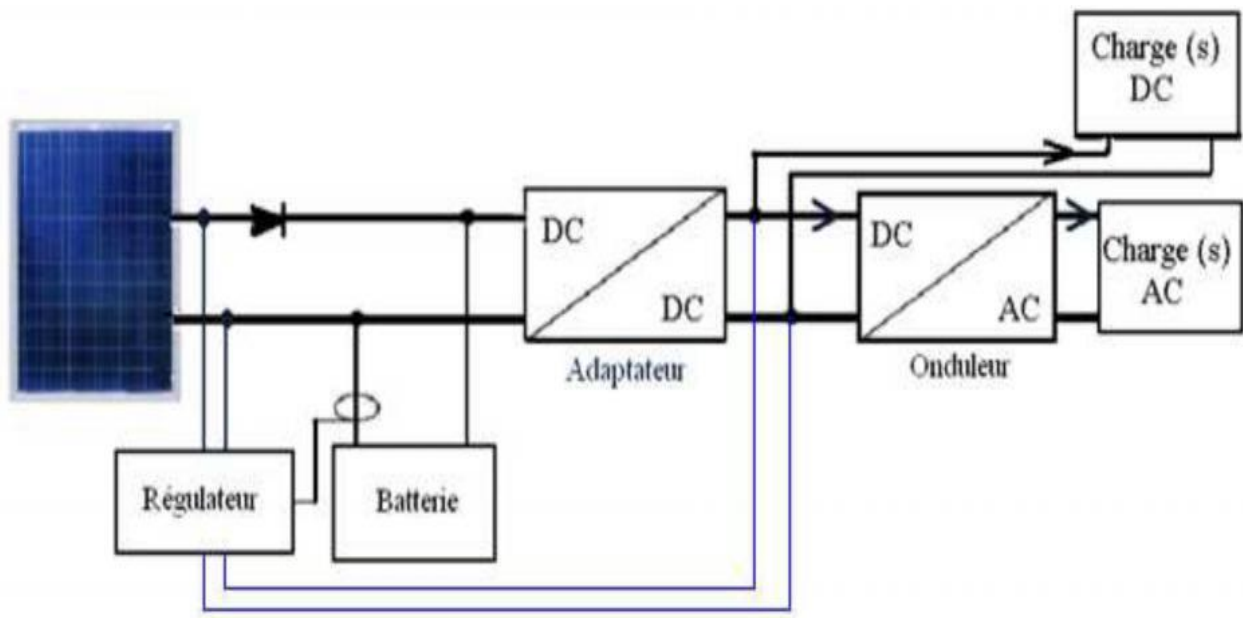


Figure III.14 : Système photovoltaïque avec stockage [24].

III.3.2. Système hybride

Une des limites d'un système autonome purement photovoltaïque, comme on vient de le décrire, est qu'il fournit une puissance donnée, variable selon la saison, mais que l'on ne peut pas dépasser au risque de détruire la batterie ; or les consommateurs ont des besoins qui évoluent, et pas forcément en phase avec les saisons.

Avoir un système hybride, c'est disposer d'une autre source d'électricité qui vient compléter l'apport photovoltaïque. Cette autre source peut être un groupe électrogène (appelé aussi "génératrice") ou une éolienne (figure III.15). De tels systèmes ont habituellement des accumulateurs de stockage d'énergie et donc ils permettent en outre de recharger la batterie lorsqu'elle est faible. Un tel système photovoltaïque hybride fournit une grande fiabilité du système et peut représenter la solution adéquate pour les sites isolés ; il convient aussi lorsque la demande en énergie est élevée (pendant l'hiver ou tout le long de l'année).

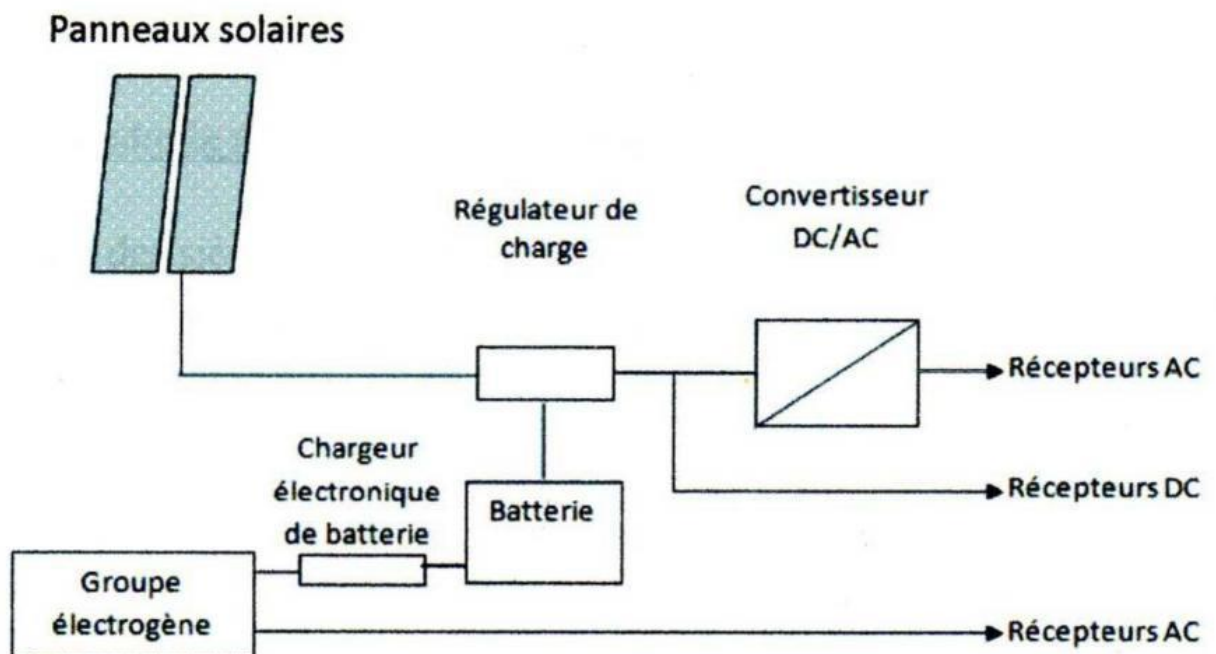


Figure III.15 : Système d'alimentation hybride photovoltaïque/ groupe électrogène [25].

- **L'énergie éolienne**

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est du indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement.

III.3.3. Systèmes raccordés au réseau

Un tel système s'installe sur un site raccordé au réseau (figure III.16). Généralement sur les habitations ou les entreprises qui souhaitent recourir à une forme d'énergie renouvelable et qui bénéficient d'un bon ensoleillement.

L'énorme avantage de cette solution est l'absence de batterie. On ne stocke plus l'énergie, on l'injecte directement au réseau local ou national. Il y a un compteur qui tourne dans un sens pour la consommation, et un autre dans l'autre sens pour la production. Mais il faut tout de même convertir le courant continu des panneaux en alternatif à travers un onduleur. Cet onduleur doit être homologué par la compagnie d'électricité qui va recevoir ce courant (il doit respecter des normes sur sa qualité sinusoïdale). Dans certains cas, on ajoute au système une batterie de secours pour les coupures de courte durée [27].

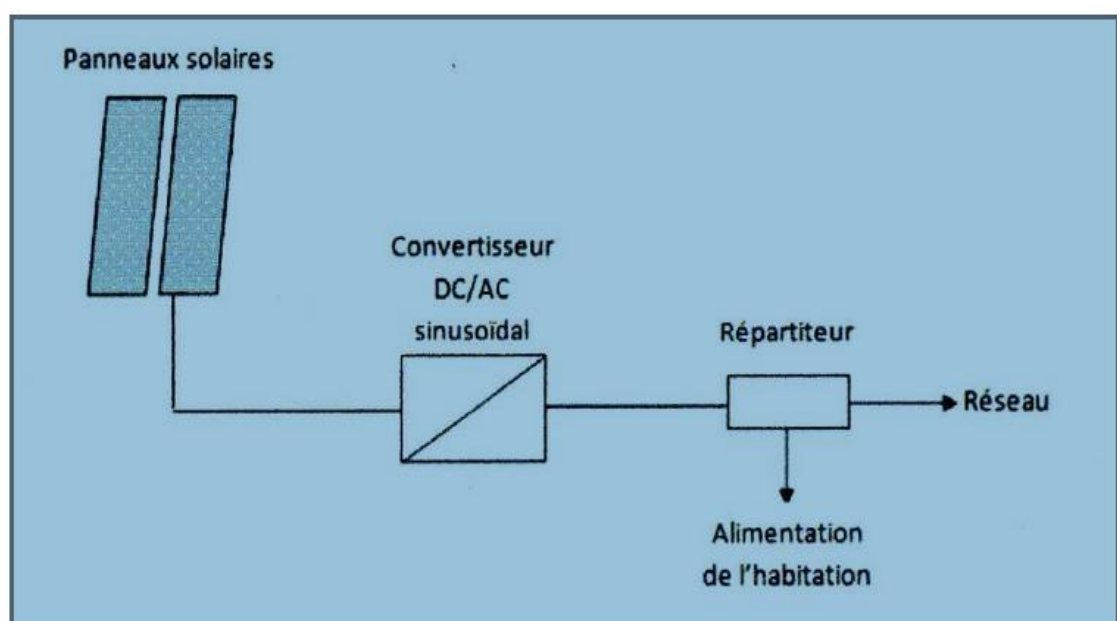


Figure III.16 : Système photovoltaïque raccordé au réseau [25].

III.4. Comparaison des systèmes photovoltaïques

Les centrales photovoltaïques non connectés au réseau peuvent être autonomes (avec ou sans accumulateurs), c'est-à-dire dépendant uniquement de l'énergie solaire, ou hybrides.

Les systèmes hybrides allient la technologie PV à une ou plusieurs autres formes de production d'électricité et comprennent habituellement des accumulateurs. Au moment de choisir le genre de système dont on a besoin, on doit tenir compte des facteurs suivants : demande totale, puissance maximale appelée, moments et périodes de l'année de la demande, fiabilité requise et accessibilité du système selon l'endroit où il sera installé.

A. Système autonome

Comme son nom l'indique, le système autonome est complet et ne comporte aucune source d'énergie d'appoint. Il comprend généralement des accumulateurs.

Dans certains cas, par exemple le pompage de l'eau (notamment pour irriguer les cultures) ou la ventilation d'une serre, on a besoin d'énergie électrique pendant les périodes ensoleillées seulement ; le système autonome sans accumulateurs convient alors. Toutefois, la plupart du temps, la demande d'énergie est indépendante de l'ensoleillement, et le système doit alors comporter des accumulateurs. Pour s'assurer une provision d'énergie durant l'année à l'aide d'un système alimenté uniquement à l'énergie solaire, il faut donc installer un champ de modules photovoltaïques beaucoup plus gros (donc beaucoup plus coûteux) et l'assortir d'accumulateurs. Ces systèmes sont pratiques dans les endroits isolés, où il n'y a pas de personnel sur place et où il est difficile et coûteux d'aller faire des tournées d'inspection. Les immobilisations requises sont alors vite compensées par les économies réalisées au titre des frais d'entretien et du ravitaillement en combustible. On emploie par conséquent des systèmes autonomes avec accumulateurs pour l'électrification des clôtures de pâturages, et pour les communications, le balisage, les dispositifs d'avertissement et les stations de surveillance ainsi que pour divers usages où la fiabilité et les exigences d'entretien sont des considérations de première importance.

Le système autonome peut aussi convenir dans le cas d'une résidence d'été, d'un voilier ou d'autres usages dont la période

d'utilisation correspond à la période d'ensoleillement maximal. Si on considère l'électricité comme un luxe et estime pouvoir Supporter les rares instants où le système ne suffira pas à nos besoins, le système autonome peut s'avérer une solution satisfaisante à prix raisonnable. Toutefois, si on tient à être assuré d'un approvisionnement constant à longueur d'année et si on a facilement accès aux produits consommateurs d'énergie, ce serait sans doute plus avantageux d'installer un **système hybride**

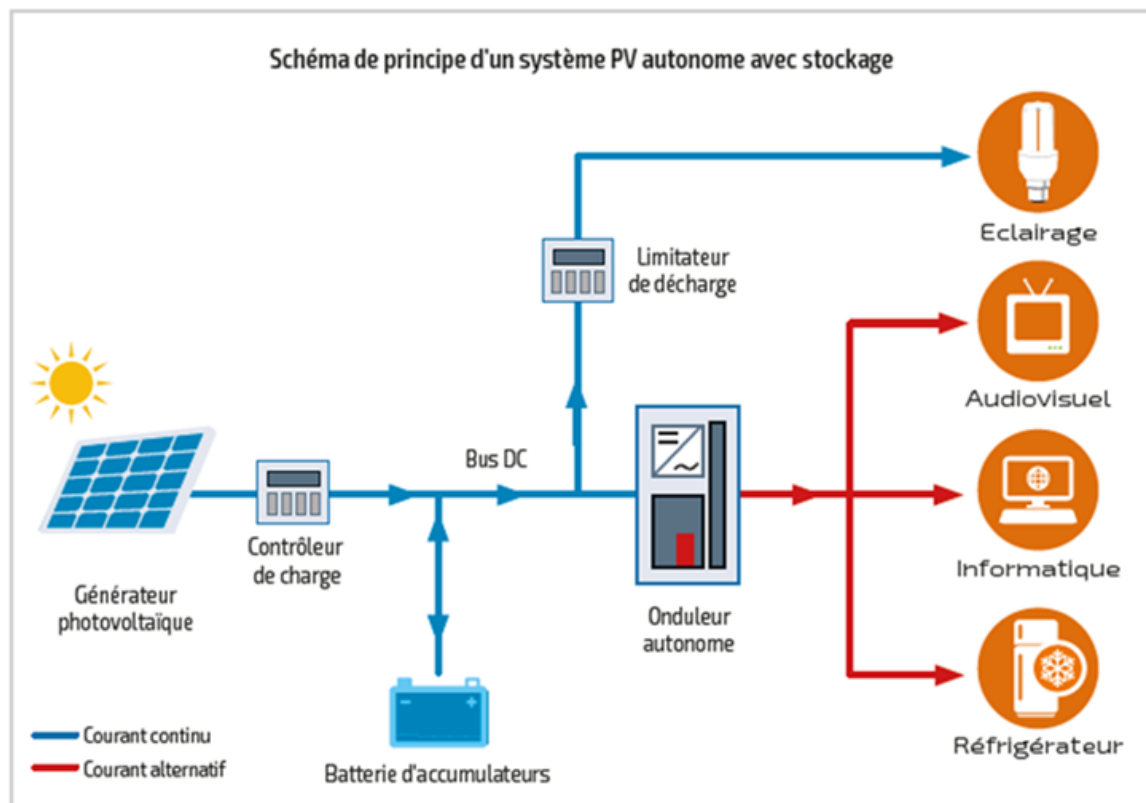


Figure III.17 : schéma de principe d'un Système PV autonome avec stockage .

B. Système hybride

Le système hybride allie l'énergie photovoltaïque à celle d'autres sources. En règle Générale, il comporte une éolienne ainsi qu'un groupe électrogène d'appoint au diesel, au Propane ou à l'essence. Un tel système peut convenir dans le cas d'une résidence ou d'un immeuble commercial non connecté à un réseau de distribution. Pour celui qui consomme plus de 2,5 kWh d'énergie par jour l'année durant et qui a besoin d'un groupe électrogène, ou qui habite une région ou

l'ensoleillement est limite pendant de longues périodes, le système hybride constitue probablement un bon choix.

La plupart des systèmes hybrides comportent une batterie d'accumulateurs dont provient la charge de consommation. Les modules maintiennent la charge des accumulateurs tant qu'il y a assez de soleil. Si on assortit une éolienne au système, celle-ci recharge les accumulateurs pendant les périodes venteuses, qui surviennent souvent lorsque le ciel est couvert ou durant la nuit. Par conséquent, les éléments éoliens et solaires se complètent avantageusement. Le groupe électrogène n'est mis en marche qu'à l'occasion pour charger les accumulateurs durant les périodes nuageuses prolongées, ou sans vent, et quand il est en marche, il tourne à plein régime. Son rendement et son efficacité énergétique sont donc bien supérieurs ; de plus, il nécessite alors moins d'entretien et il dure plus longtemps. Les Systèmes qui comportent à la fois des composantes solaires et éoliennes suffisent souvent aux besoins, sans qu'un groupe électrogène ne soit nécessaire.

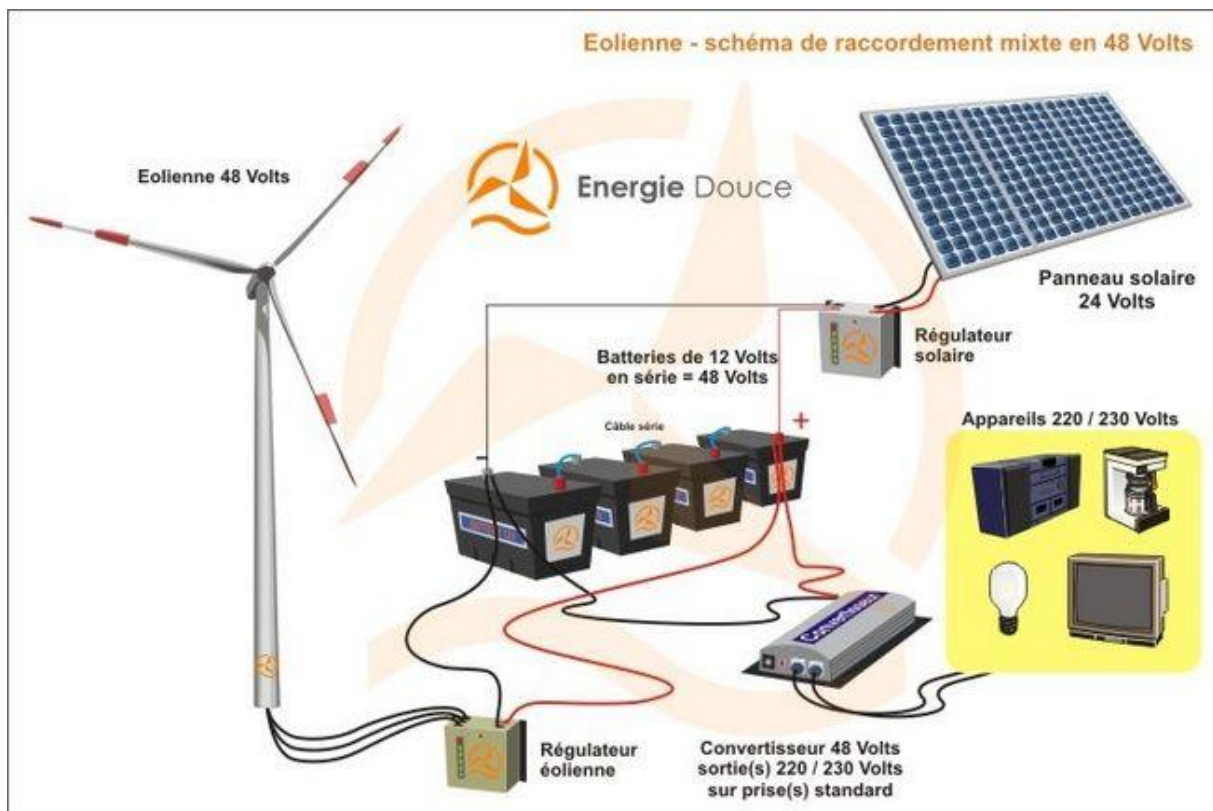


Figure III.18 : Système hybride PV/ Eolienne.

C. Centrale raccordée au réseau

La particularité de l'énergie photovoltaïque raccordée au réseau dans la plupart des cas, la centrale photovoltaïque peut être installée à proximité du lieu de consommation, évitant ainsi les pertes en ligne qui peuvent atteindre 15 % sur les grands réseaux électriques lorsque des centaines de kilomètres séparent les lieux de production et de consommation. Cette énergie répond bien au concept de la décentralisation. Une centrale photovoltaïque raccordée au réseau fonctionne «au fil du jour » de manière totalement transparente pour l'utilisateur et sans intervention de sa part. Son fonctionnement est particulièrement optimisé. Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires à moins que si nous voulions une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité [26].

L'énergie photovoltaïque raccordée au réseau est particulièrement bien adaptée à l'intégration dans la plupart des bâtiments quel que soit leur type (habitations, bureaux, entreprises, centres commerciaux,...). Elle est par ailleurs particulièrement souple d'emploi.

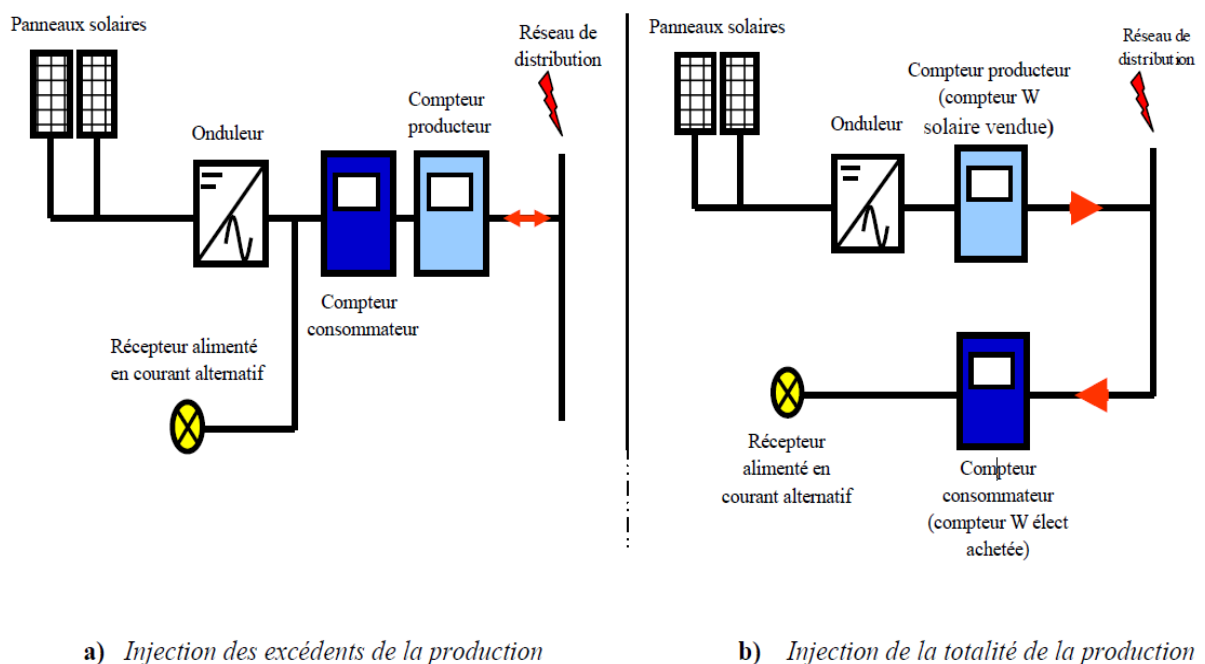


Figure III.19 : Schémas de principe du système connecté au réseau.

III.5. Les critères de choix d'une centrale photovoltaïque

Trois critères peuvent être pris en compte dans le classement en fonction de la structure du système.

- **Le premier critère** est la présence ou non d'une source d'énergie classique. Cette source conventionnelle peut être un générateur diesel, une micro turbine à gaz, et dans le cas d'une étude du réseau électrique complet, une centrale toute entière.
- **Un second critère** possible est la présence ou non d'un dispositif de stockage. La présence d'un stockage permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une ressource primaire à convertir en électricité. Les dispositifs de stockage peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, des volants d'inertie, ...etc.
- **La dernière** classification possible est celle relative au type de sources d'énergie renouvelables utilisées. La structure du système peut contenir un système photovoltaïque, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique (centrales hydroélectrique ou utilisation des vagues) ou une combinaison de ces sources. Un critère important pour la sélection de la source utilisée est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit d'installation du système hybride.
- **Un autre facteur** déterminant est le consommateur électrique alimenté. Son importance détermine le besoin d'une source supplémentaire, d'un dispositif de stockage et/ou d'une source conventionnelle.

III.6. Avantages et inconvénients d'une installation PV

✓ **Avantages [18] :**

- Une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au mégawatt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

✓ Inconvénients

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km² par an pour le BENELUX) avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.
- Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur.

III.7. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes notions qui entrent dans la constitution d'un système de captage photovoltaïque, Ainsi que les principes de fonctionnement de chaque élément.

Chapitre IV :

Modélisation et simulation d'un panneau photovoltaïque

IV. Introduction :

Le logiciel **Matlab** constitue d'un système interactif et convivial de calcul numérique et de visualisation graphique, destiné aux ingénieurs, aux techniciens et aux scientifiques. C'est un outil très utilisé, dans les universités comme dans le monde industriel, qui intègre centaines de fonctions mathématiques et d'analyse numérique (calcul matriciel le MAT de **Matlab** , traitement de signal, traitement d'images, visualisations graphiques, etc.).

Dans ce chapitre, nous simulons la cellule photovoltaïque, représenter sa caractéristique, à l'aide du programme **Matlab** .

IV.1. Modélisation du panneau photovoltaïque :

IV.1.1. Description du modèle utilisé :

a. Modèle d'une cellule photovoltaïque :

Le modèle utilisé est défini par une source de courant idéal associée à une diode [D] et à 2 résistances [R_{sh} , R_s]. La diode [D] décrit les propriétés semi-conductrices de la cellule photovoltaïque (modélisation du comportement de la cellule dans l'obscurité). La résistance [R_s], résistance série, modélise les pertes ohmiques du matériau. La résistance [R_{sh}], résistance shunt, modélise les courants parasites qui traversent la cellule.

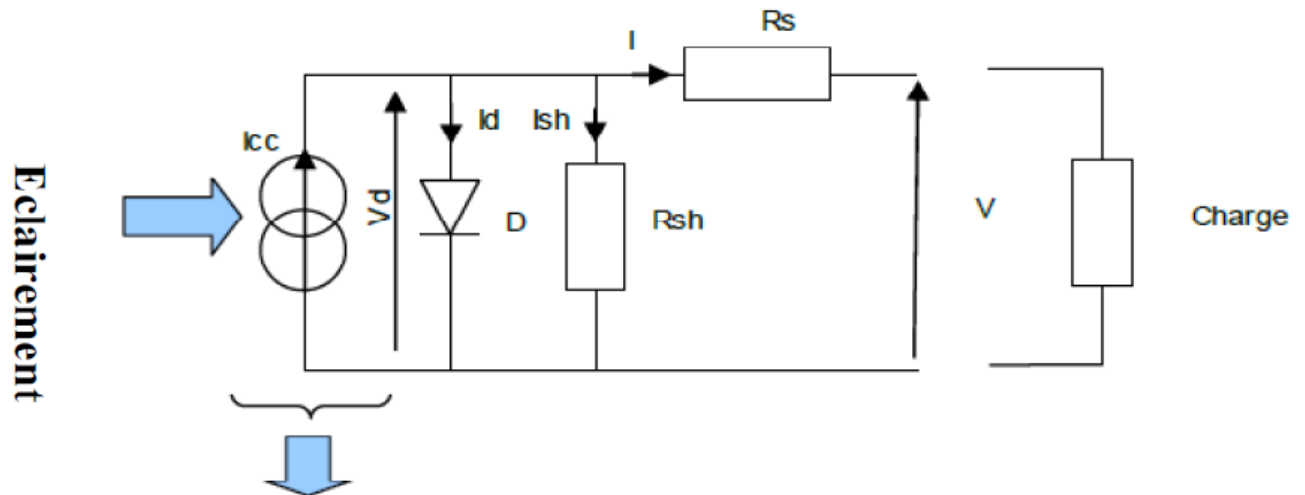


Photo courant crée par la cellule proportionnel au rayonnement incident du soleil

Figure (IV.1) : Modèle d'une cellule photovoltaïque.

b. Equations associées au modèle :

On considère que R_{sh} est très grande $\Rightarrow I_{sh} \rightarrow 0$. On a les équations suivantes :

$$I_{cc} = I_d + I$$

Avec :

$$I_d = I_s \cdot \left[\exp\left(\frac{V_d}{V_T}\right) - 1 \right] \quad \text{Et} \quad V_T = nKT/q$$

Alors :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_d = I_s \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot V_d}{nKT}\right) - 1 \right] \\ V_d = V + R_s \cdot I \end{array} \right. \quad \text{Avec : } \left\{ \begin{array}{l} T : \text{température de la cellule en kelvin} \\ n : \text{facteur d'idéalité de photophile.} \\ q : \text{charge de l'électron : } 1.602 \times 10^{-19} \text{C} \\ K : \text{C}^{\text{te}} \text{ de Boltzmann : } 1.38 \times 10^{-23} \text{J/K} \\ I_s : \text{courant de saturation.} \end{array} \right.$$

On caractérise 3 points de fonctionnement :

- $I_{cc} \longrightarrow$ Court-circuit $\longrightarrow V = 0$
- $V_{co} \longrightarrow$ Circuit ouvert $\longrightarrow I = 0$
- $V_{pm} \text{ et } I_{pm} \longrightarrow$ Point de puissance maximale $\longrightarrow P_m$

c. Valeur de R_s :

On a :
$$I_{cc} = I_s \cdot \left[\exp \left(\frac{q \cdot V_d}{nKT} \right) - 1 \right] + I$$

En circuit Ouvert on a $I = 0$ alors :
$$I_{cc} = I_s \cdot \left[\exp \left(\frac{q \cdot V_{co}}{nKT} \right) - 1 \right]$$

On en décrit :

$$I_s = I_{cc} / \left[\exp \left(\frac{q \cdot V_{co}}{nKT} \right) - 1 \right] \longrightarrow I_s = I_{cc} / \exp(q \cdot V_{co} / nKT)$$

Avec : $\exp(q \cdot V_{co} / nKT) \gg 1$

Le facteur d'idéalité va être utilisé pour définir le nombre de cellules du panneau photovoltaïque que l'on souhaite modéliser (**n = nombre de cellules**). Lorsque l'on se trouve au point de fonctionnement de la puissance maximale (V_{pm} , I_{pm}), on peut écrire l'équation :

$I_{cc} = I_d + I_{pm}$, Sachant que (V_{pm} , I_{pm}) est un couple de valeurs connues. A partir de cette équation, on en déduit :

$$I_{cc} = I_s \cdot \exp[q(V_{pm} + R_s \cdot I_{pm}) / nKT] + I_{pm}$$

En posant $V_t = KT/q$ alors :

$$I_{cc} = I_s \cdot \exp[(V_{pm} + R_s \cdot I_{pm}) / n \cdot V_t] + I_{pm}$$

On obtient : $(I_{cc} - I_{pm}) / I_s = \exp[(V_{pm} + R_s \cdot I_{pm}) / n \cdot V_t]$

La valeur de **Rs** se déduit de l'équation :

$$R_s = n \times V_t \times \log((I_{cc} - I_{pm}) / I_s) / I_{pm} - V_{pm} / I_{pm}$$

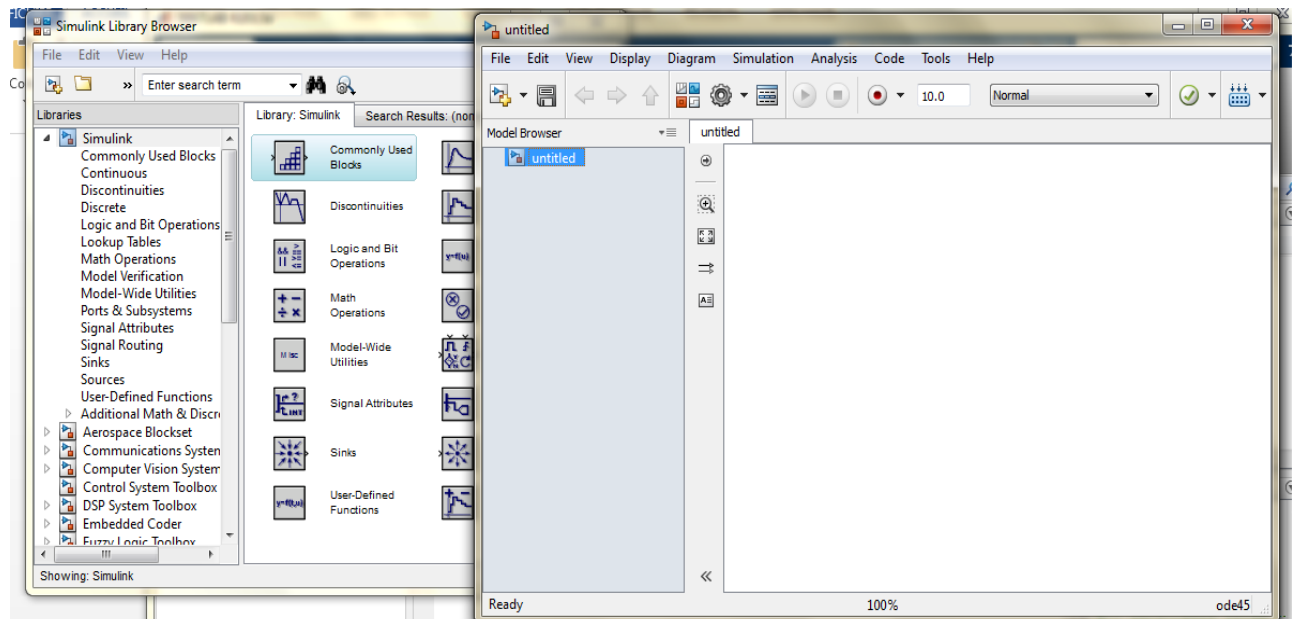
IV.2. Création du modèle du panneau photovoltaïque sous Matlab /Simulink

IV.2.1. Création de la « boîte noire »

➤ Lancer **Matlab** et créer le répertoire de travail.

➤ Lancer **simulink** .

➤ Aller dans **File** puis **new model**. Une fenêtre doit apparaitre et elle va nous permettre de créer notre modèle de panneau photovoltaïque



➤ Pour créer notre modèle, on va travailler avec les composants disponibles dans la **library Simscape/SimElectronics**. Pour modéliser notre panneau photovoltaïque nous avons besoin de :

Diode → on la trouve dans Simscape/SimElectronics/Semiconductor Devices .

Résistance → on les trouve dans Simscape/SimElectronics/Passive Devices .

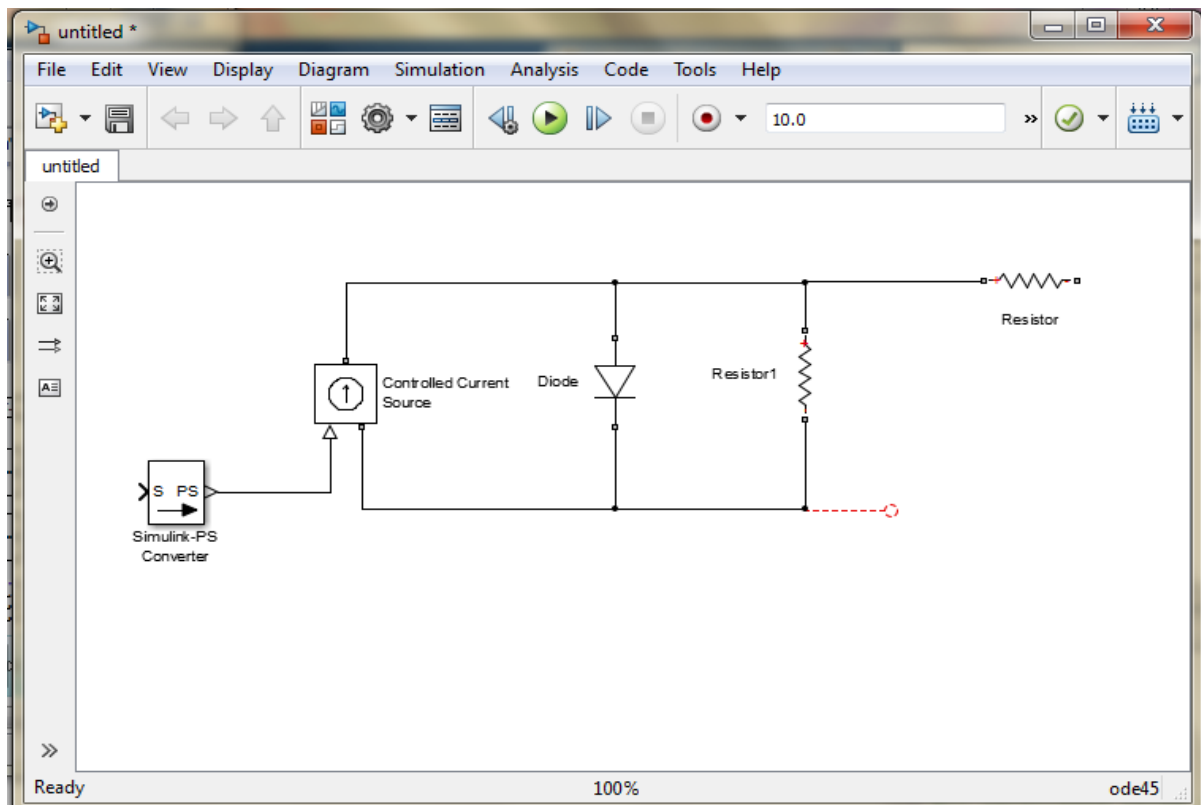
➤ Créer sous **simulink** (dans la fenêtre PV) .

Il faut intégrer au modèle, le générateur de courant. Ce générateur doit être commande en fonction de l'éclairement du panneau photovoltaïque. Pour cela, on va utiliser un « Controlled current source » de la library Simscape/Foundation Library /Electrical/ Electrical Sources. Pour trouver rapidement ce générateur de courant,

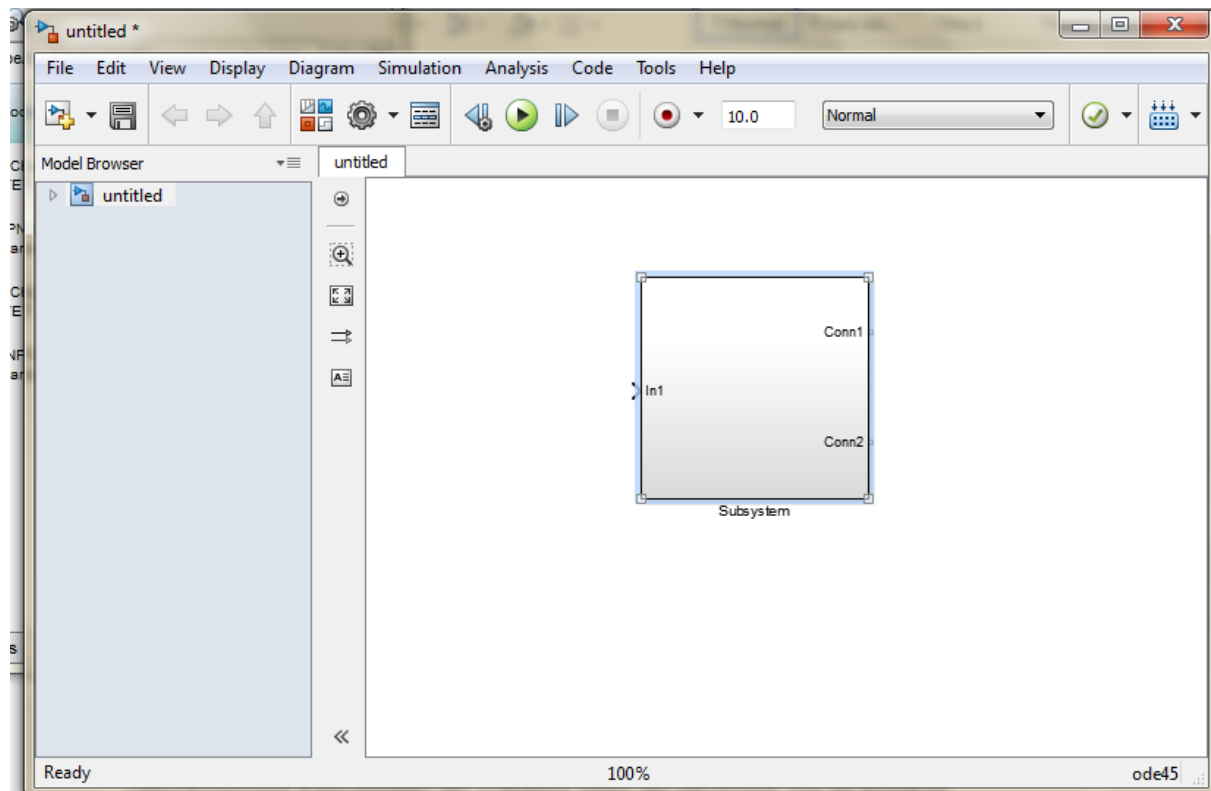
taper **Controlled current** source au niveau de zone de recherche du browser de simulink.

De la même façon, rechercher le « Simulink-PS converter » et le positionner sur le modèle.

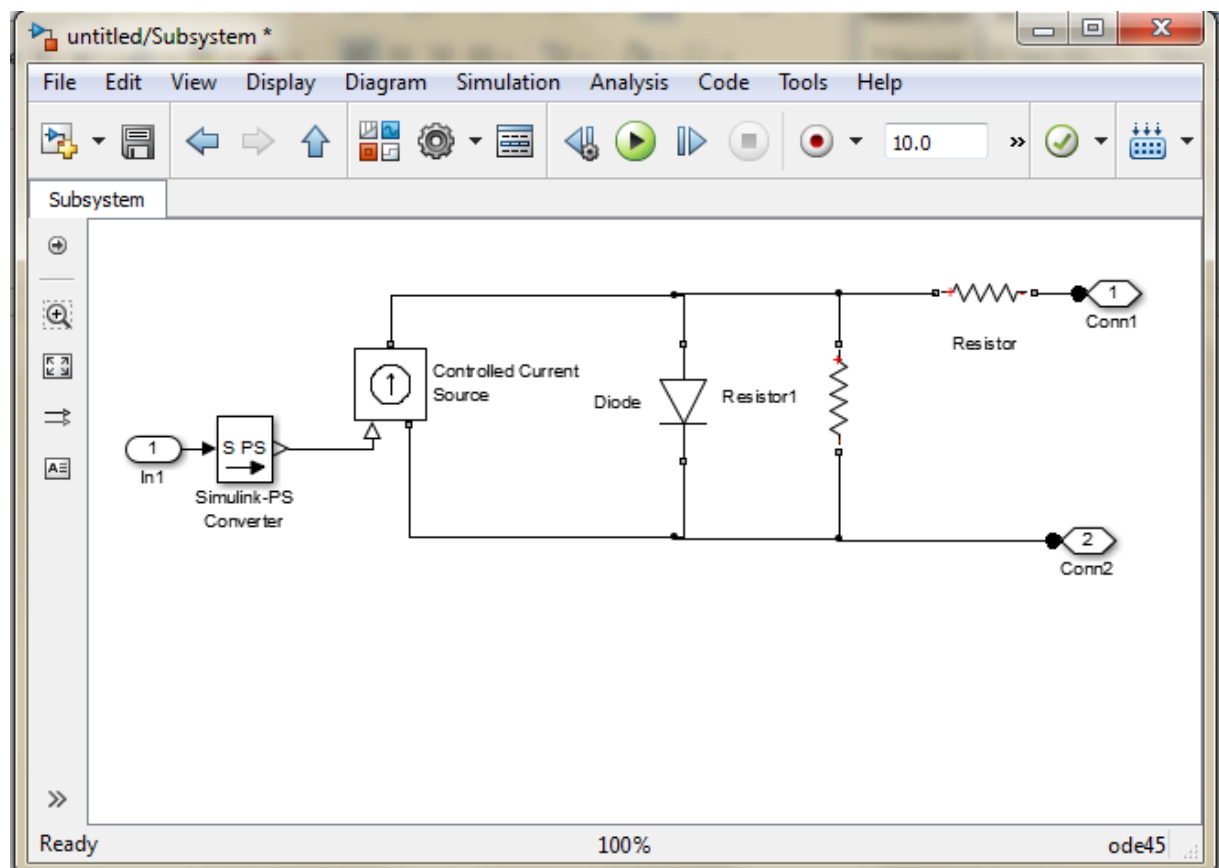
le modèle donne :



- La création du modèle sous forme de boîte noire se fait en sélectionnant l'ensemble du schéma puis en cliquant sur le bouton droit de la souris → **create Subsystem** .

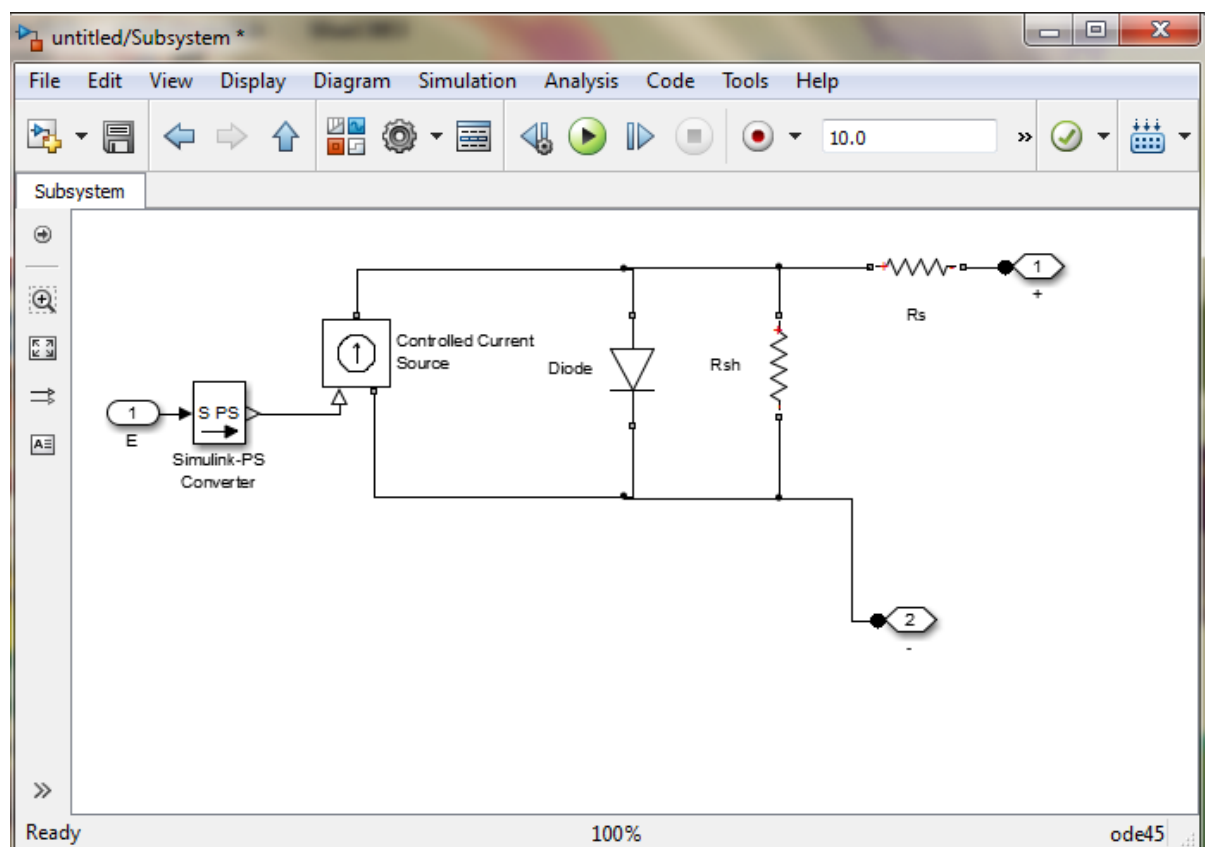


- Si on double clique sur la boîte noire, on doit voir apparaître dans une fenêtre le modèle qui a été élaboré auparavant.



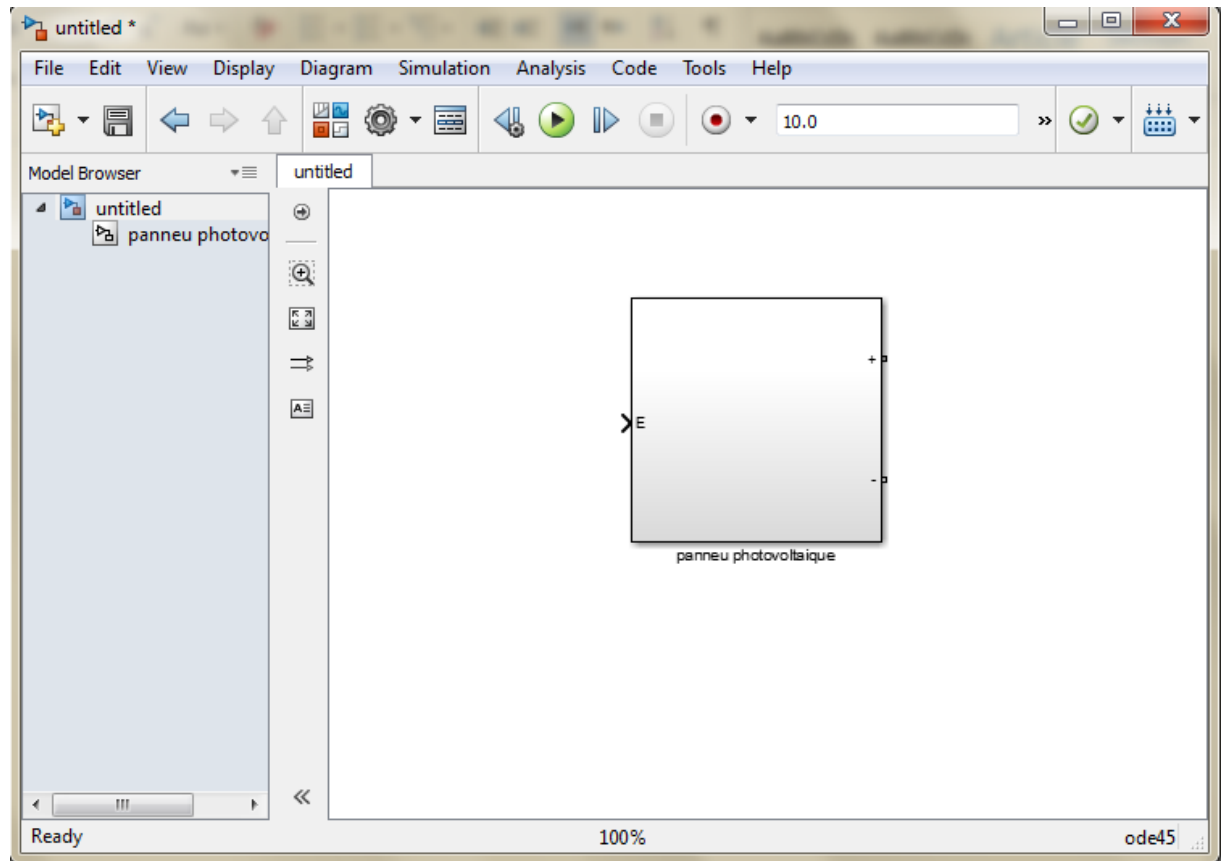
- Cliquer sur **In1**, et modifier le texte en tapant E , faites de même pour Conn1 Conn2 en les renommant + et - . Sauvegarder les modifications.
- Double cliquer sur la sortie + (Conn1) et vérifier que **Right** est sélectionnée.
- Double cliquer sur la sortie - (Conn2) et vérifier que **Right** est sélectionnée.
- Cliquer sur Resistor1 et modifier le texte en tapant **Rsh**.
- Cliquer sur Resistor et modifier le texte en tapant **Rs**.

➤ Vous devez obtenir la vue ci- dessous:



- Sélectionner le modèle boîte noire et appuyer sur CTRL-R pour effectuer une rotation. Positionner la boîte noire en mettant l'entrée E à gauche.
- Cliquer sur le texte Subsystem et modifier le en tapant panneau photovoltaïque.

Vous devez obtenir la vue ci-dessous :



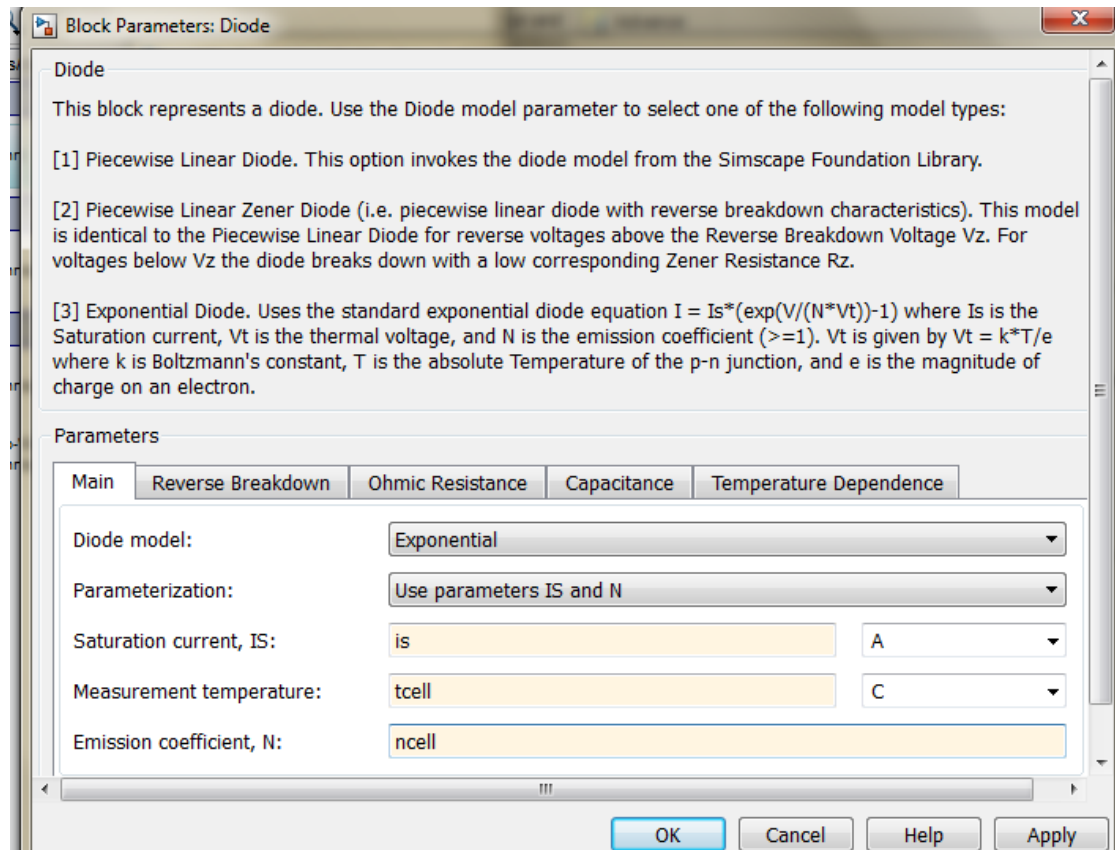
Le modèle de panneau photovoltaïque

IV.2.2. Paramétrage du modèle

Le paramétrage s'effectue à partir des données que l'on peut extraire des documents techniques du panneau photovoltaïque que l'on souhaite simuler. Ces paramètres sont :

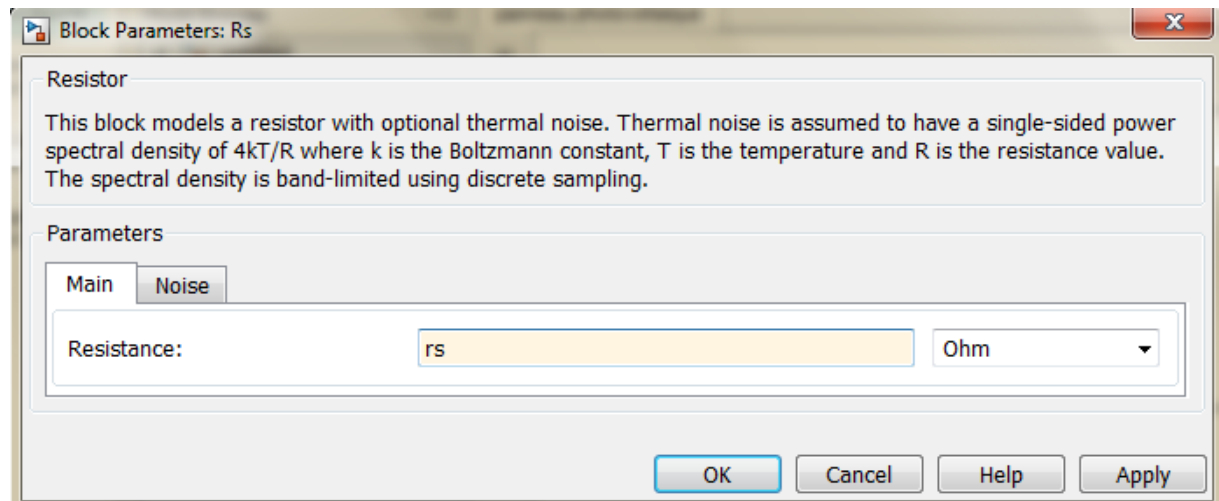
- **Vco** : tension de circuit ouvert.
- **Icc**: courant de court-circuit .
- **Vpm**: tension de puissance maximale.
- **Ipm**: courant de puissance maximale.
- **Ncell**: nombre de cellule composant le panneau.

- **Tcell**: température des cellules.
- Double cliquer sur le modèle (boite noire) du panneau photovoltaïque afin de faire apparaître le modèle avec les composants le constituant.
- Double cliquer sur la diode afin de faire apparaître la fenêtre de paramétrage.



Paramétrer la diode comme le montre la figure ci-dessus. On voit apparaître les variables **Tcell** et **Ncell**.

- Double cliquer sur la résistance série [**Rs**] du modèle et compléter comme ci-dessous le paramètre de la résistance .



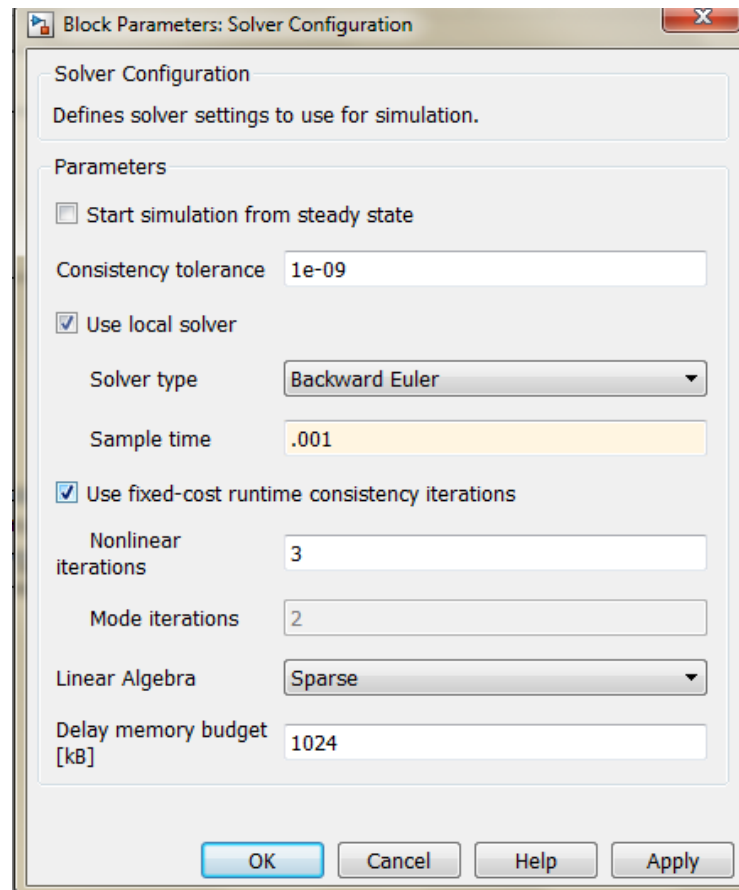
- Double cliquer sur la résistance shunt [**Rsh**] du modèle et mettre une valeur de 1 Méga-Ohm.

IV.2.3. Création d'un script contenant les valeurs des paramètres du modèle :

- Dans la barre principale de **Matlab** , cliquer sur **New Script** . Une fenêtre doit apparaître.
- Sauvegarder ce fichier sous le nom calcul-valeurs.

IV.2.4. Simulation du modèle

On va simuler le modèle du panneau photovoltaïque afin de vérifier son comportement. Dans le menu **simulink** , ouvrir un nouveau modèle et positionner les différents éléments de simulation comme le montre la figure ci-dessous. Pour utiliser le panneau photovoltaïque, copier le modèle et le coller.

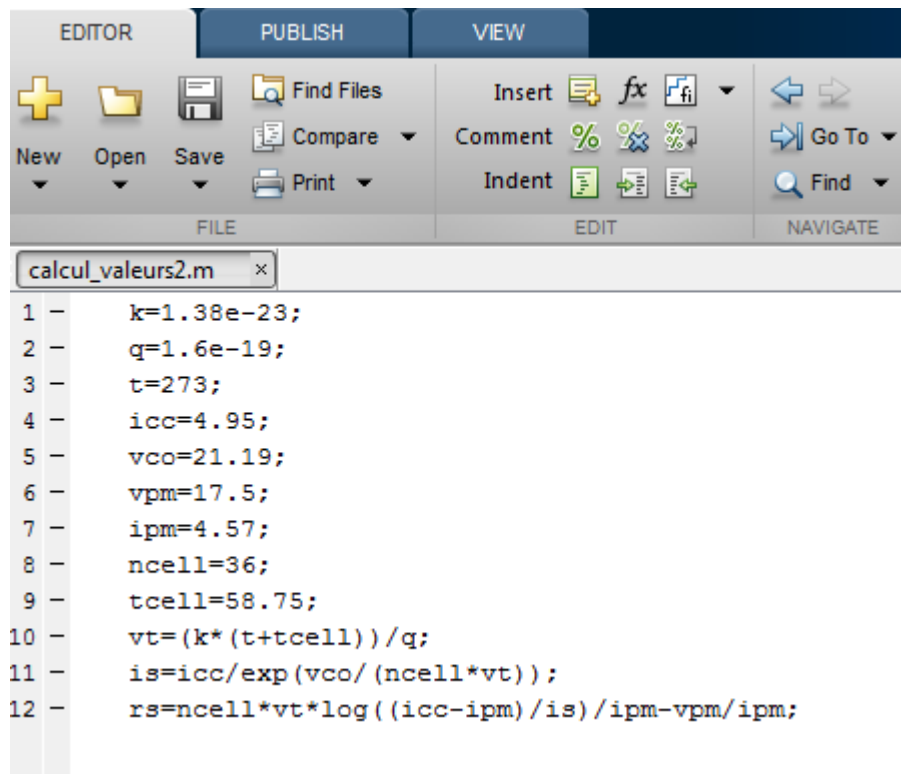


- Configurer la rampe (Ramp) avec un slope = 5.
- Pour pouvoir simuler le modèle du panneau, il faut entrer les valeurs des paramètres du panneau à modéliser dans le fichier calcul_valeurs.m .On va utiliser les paramètres d'un panneau photovoltaïque du type Suntech STP080 12/B6 monocristallin .

Tension à circuit ouvert	<i>V_{oc} (V)</i>	<i>21.9</i>
Tension optimale	<i>V_{opt} (V)</i>	<i>17.5</i>
Courant de court-circuit	<i>I_{cc} (A)</i>	<i>4.95</i>
Courant optimal	<i>I_{opt} (A)</i>	<i>4.57</i>
Puissance maximale	<i>P_{max} (W)</i>	<i>80</i>
T° opérationnelle		<i>-40°C à 85°C</i>
Tension max de système		<i>715 V DC</i>
Technologie fabrication		<i>Mono-SI</i>
Tolérance de puissance		<i>+/- 5 %</i>
Dimensions		<i>1195x541x30 mm</i>
Poids		<i>8 Kgs</i>

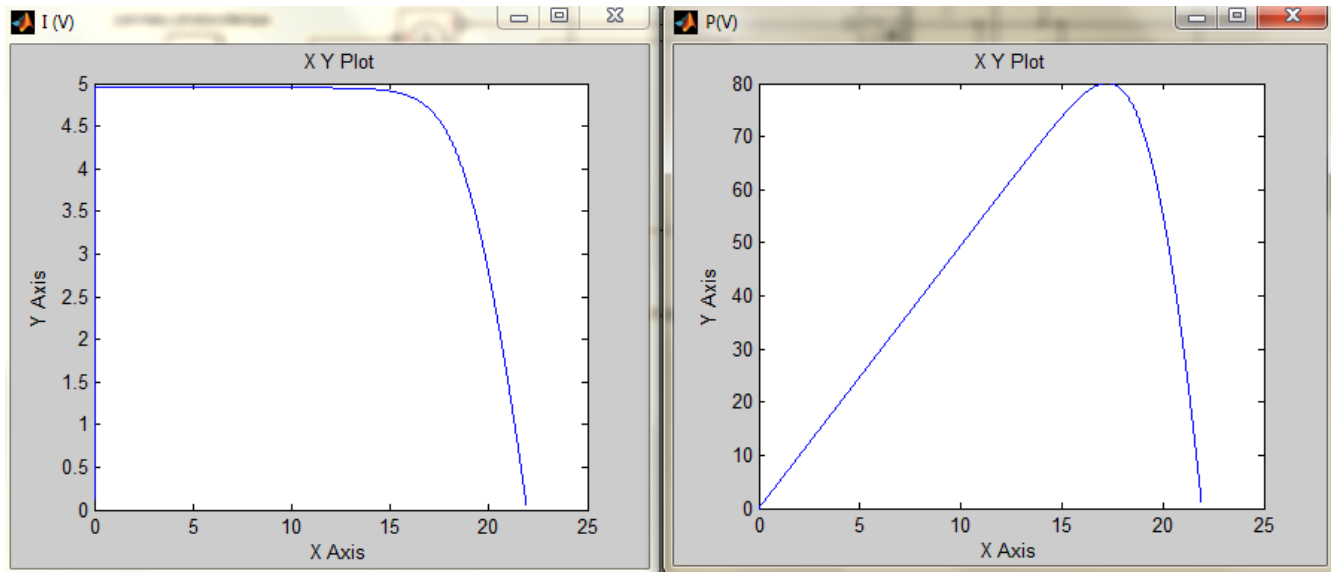
Tableau (IV.1) : Paramètre d'un panneau photovoltaïque du type Suntech STP080 12/B6 monocristallin.

- Compléter le fichier comme ci-dessous et sauvegarder le :

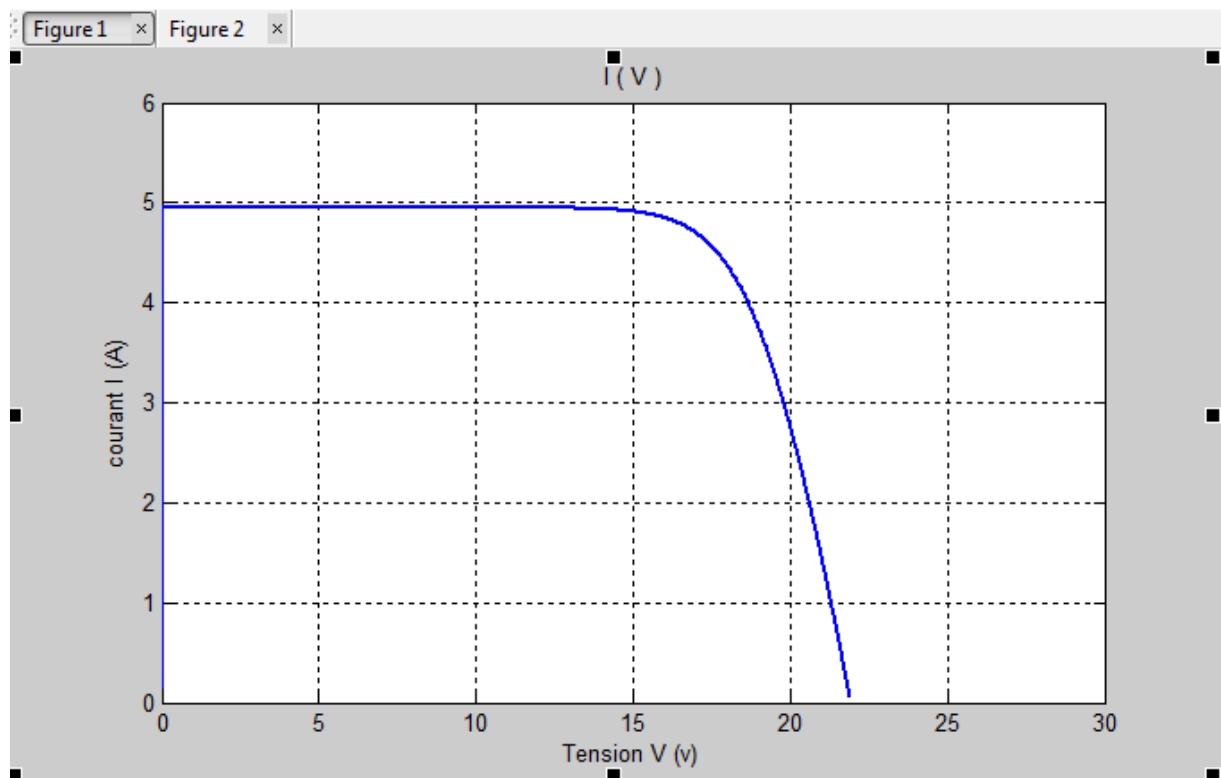


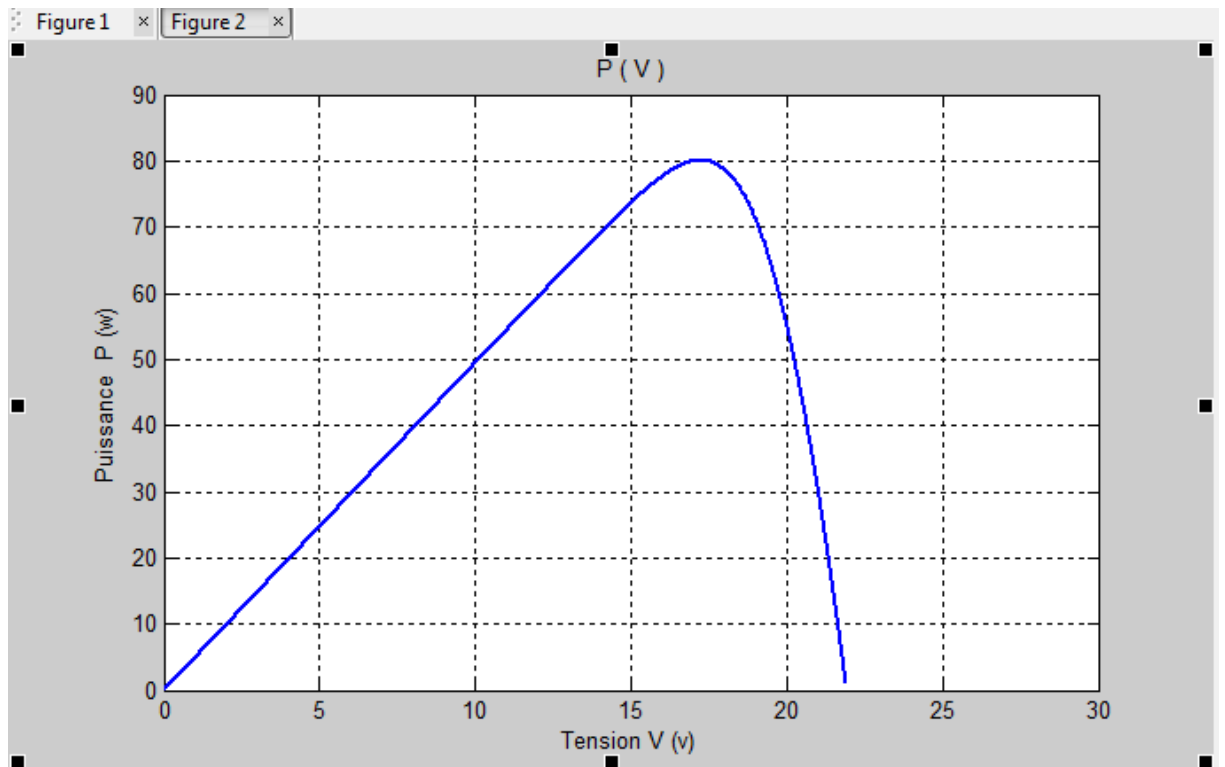
```
1 - k=1.38e-23;  
2 - q=1.6e-19;  
3 - t=273;  
4 - icc=4.95;  
5 - vco=21.19;  
6 - vpm=17.5;  
7 - ipm=4.57;  
8 - ncell=36;  
9 - tcell=58.75;  
10 - vt=(k*(t+tcell))/q;  
11 - is=icc/exp(vco/(ncell*vt));  
12 - rs=ncell*vt*log((icc-ipm)/is)/ipm-vpm/ipm;
```

- Paramétrer la valeur du bloc constant a **4.95** (correspond à une irradiante de **1000W/m²**).
- Sauvegarder le fichier sous le nom << panneau1 >>.
- Lancer la simulation (Run)
- On définit 3 variables : courant, tension et puissance. On va pouvoir utiliser ces variables sous Matlab et ainsi valider notre modèle par rapport aux caractéristiques du panneau photovoltaïque que l'on a souhaité modéliser.
- Lancer la simulation .



- Dans la fenêtre command Windows de Matlab, taper l'instruction `plot(V,P) ; plot(V,I)`.
- Une figure doit apparaitre montrant l'évolution de la puissance. Cliquer sur Tools → Data Statistics et sélectionner ***Ymax*** (Puissance max).





IV.3. Influence de température et l'irradiation sur un panneau PV :

Nous avons maintenu une température constante à différents irradiances. Dans la figure (IV.3) , on remarque que l'accroissement du courant de court-circuit I_{cc} est beaucoup plus important que l'augmentation de la tension de circuit ouvert V_{co} , car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement et la tension du circuit ouvert est une fonction logarithmique. Figure (IV.4) montre l'influence de l'irradiation sur la puissance P qui augmente avec une irradiante croissante.

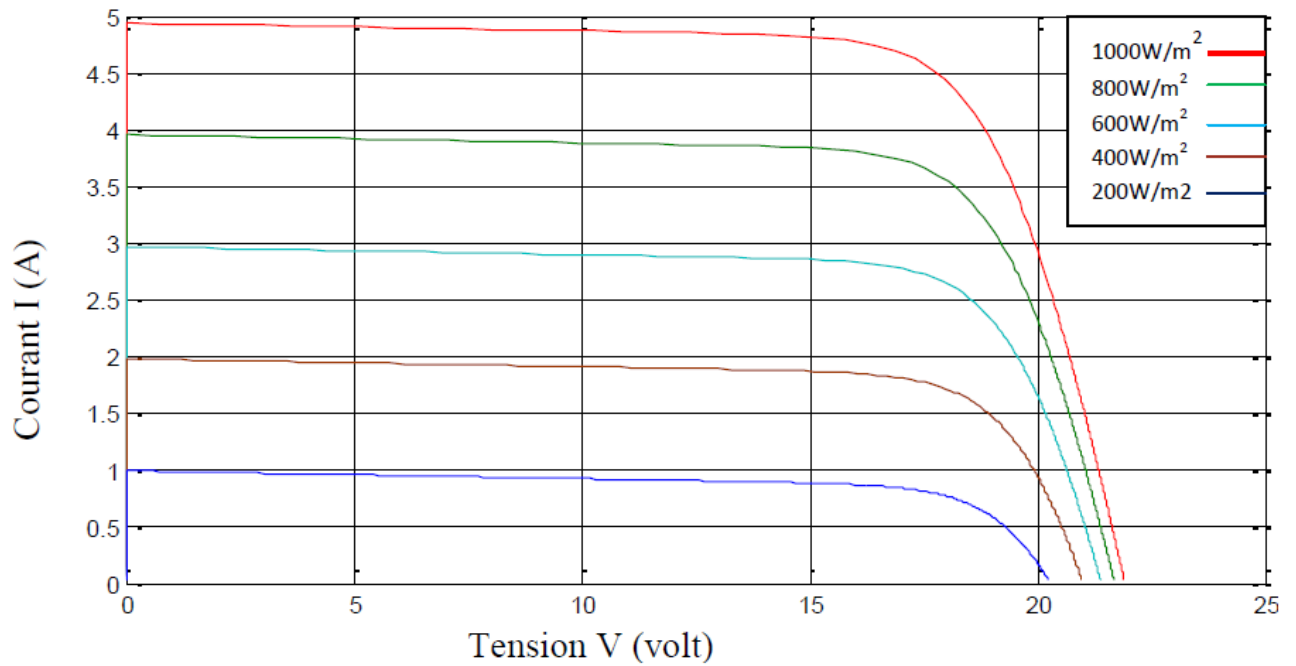


Figure (IV.3) : Influence de l'irradiation sur la caractéristique I(V) pour un panneau PV à T=25°C.

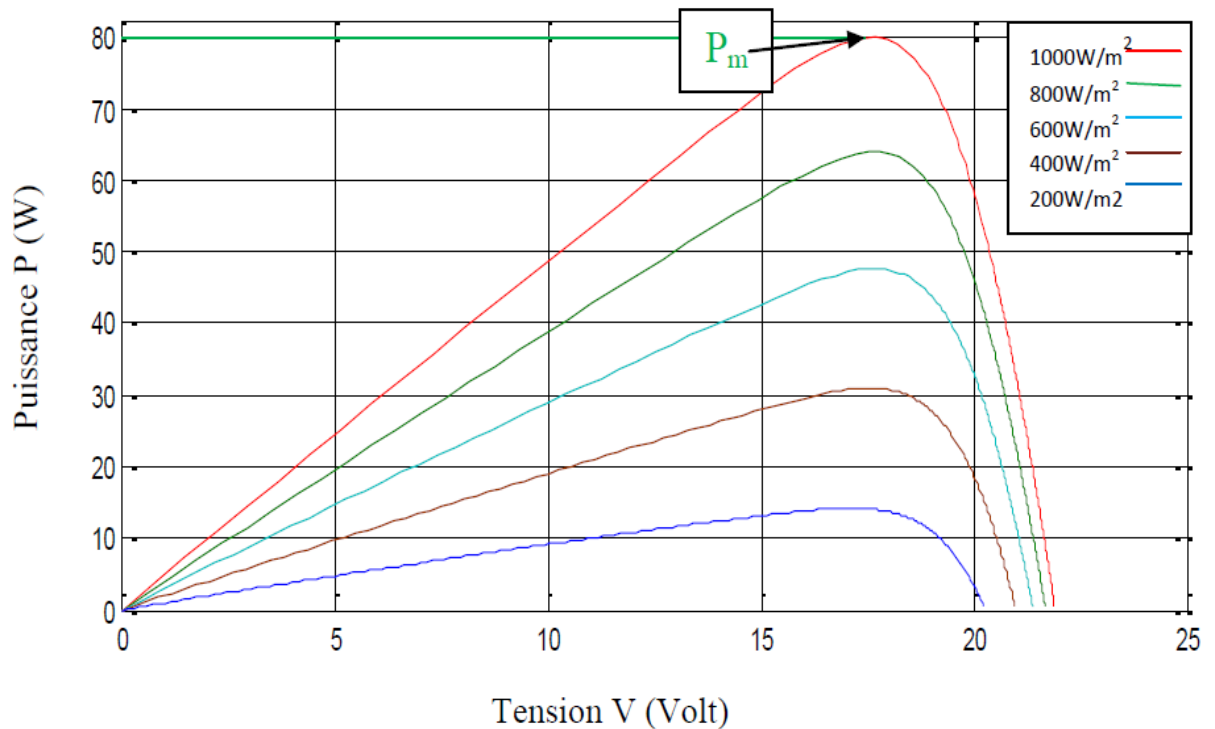


Figure (IV.4) : Influence de l'irradiation sur la caractéristique P(V) pour un panneau PV à T=25°C.

Par contre, lorsque nous avons maintenu une irradiation constant pour différentes températures. Figure (IV.5) représente les différentes

allures $I(V)$ selon la température. La tension à vide V_{co} diminue avec l'augmentation de la température. La variation de tension à vide est pratiquement compensée par la variation du courant de court-circuit I_{cc} . Figure (IV.6) représente la puissance nominale fournie par un panneau qui varie très légèrement avec la température et la tension diminue.

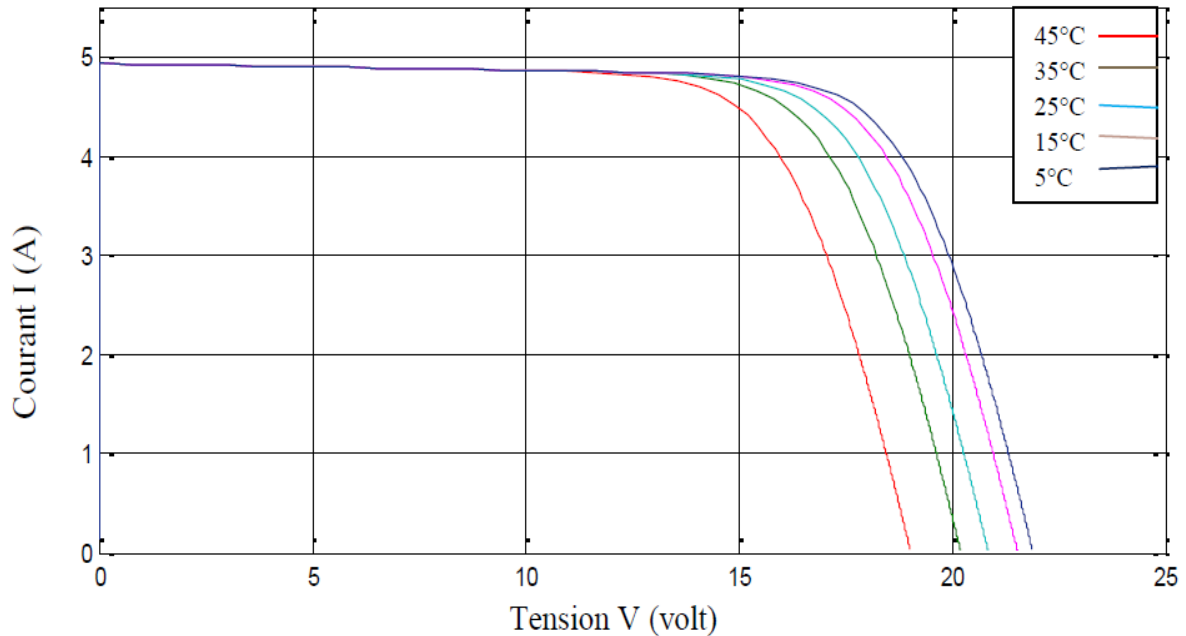


Figure (IV.5) : Influence de la température sur la caractéristique $I(V)$ pour un panneau PV à $E=1000W/m^2$

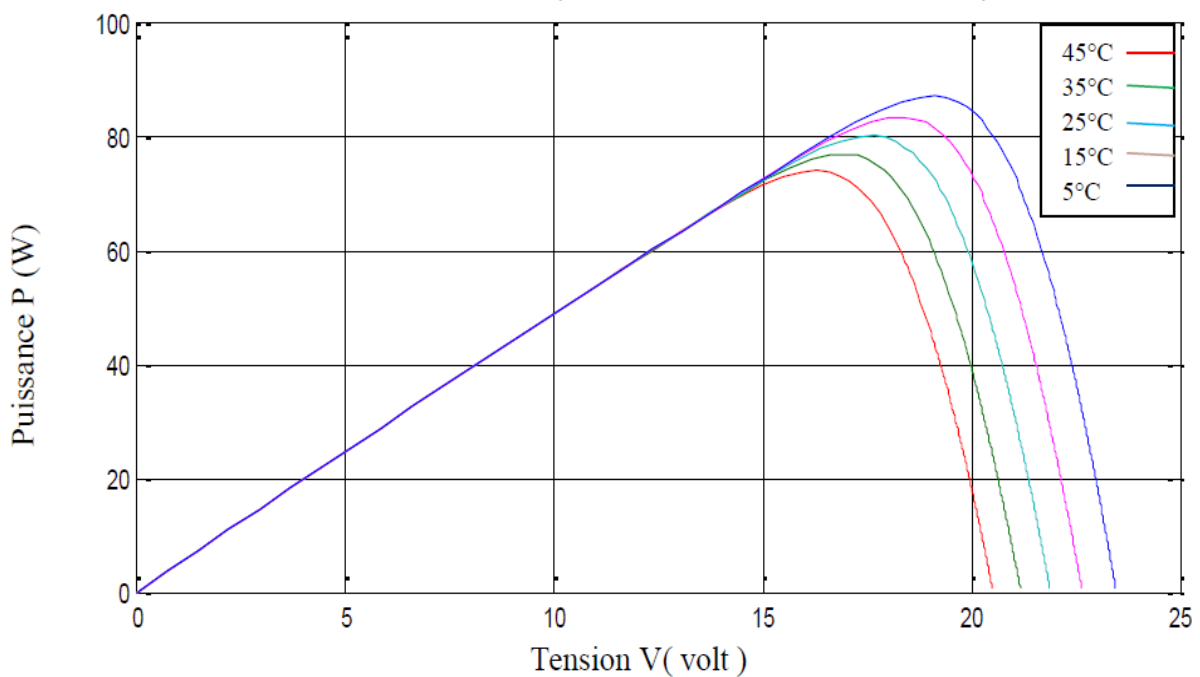


Figure (IV.6) : Influence de la température sur la caractéristique $P(V)$ pour un panneau PV à $E=1000W/m^2$

IV.4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous simulons la cellule photovoltaïque, le Matlab Faciliter à étudier la caractéristique de la cellule PV.

Conclusion Générale :

La protection de l'environnement est devenue une préoccupation majeure ces dernières années. De nombreuses voies de recherches se sont donc orientées vers l'utilisation des énergies renouvelables, dont l'énergie solaire. L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie renouvelable car elle utilise une source d'énergie d'origine naturelle qui est le Soleil.

L'objectif de ce travail est l'étude le principe de fonctionnement et mesure des caractéristiques d'une cellule solaire et l'étude d'influences de la température et d'irradiation sur ces caractéristiques. La température et l'irradiation solaire sont des paramètres très importants dans le comportement des cellules solaires ; car les performances électriques d'une cellule solaire sont très sensibles à celles-ci.

Dans un premier temps, On a rappelé, des généralités sur la source fondamentale de l'énergie photovoltaïque ; le soleil, son pouvoir énergétique et les propriétés de son rayonnement.

Dans un deuxième temps, nous avons revu les différentes technologies des cellules solaires commercialisées sur le marché, et présenté leurs caractéristiques.

Dans un troisième temps, nous avons décrit le fonctionnement des centrales photovoltaïques en s'étalant sur chaque composant du système.

Dans un quatrième temps, on utilise le logiciel **MATLAB** pour la simulation de caractéristiques d'une cellule et l'influence de température et irradiation à ces caractéristiques.

On note que notre étude est effectuée, pour un cas particulier ; un panneau photovoltaïque du type Suntech STP080 12/B6 monocristallin. En effet, le développement d'autres travaux dans le même contexte est envisagé, concernant l'étude d'autres types de panneau solaire

Enfin, L'énergie solaire est toutefois une solution d'avenir qui vaut le coup d'être plus exploitée, d'autres plus que de nombreuses améliorations sont encore possible.

Liste des figures

Figure A : exemples d'électrification par des systèmes PV.

Figure I.1 : Types d'énergie solaire.

Figure I.2 : Coupe schématique du soleil.

Figure I.3 : Cycle du carbone ; 4 noyaux d'hydrogène se transforment en un noyau d'hélium avec émission de 3 photons γ , de 2 positrons e^+ et de 2 neutrinos ν_e .

Figure I.4 : Répartition spectrale du rayonnement solaire : a) Hors atmosphère ($AM0$) .b) A l'incidence 41.8° ($AM1,5$).

Figure (I.5) : Représentation de l'air mass AM_x .

Figure I.6 : Pyranomètre doté de ses caractéristiques.

Figure I.7 : Taux de rayonnement solaire en l'Algérie

Figure II.1 : Cellule photovoltaïque.

Figure II.2 : Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

Figure II.3 : Schéma équivalent d'une cellule idéale.

Figure II.4 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.

Figure II.5 : Caractéristiques $I=f(U)$ et $P=f(U)$ d'une cellule photovoltaïque.

Figure II.6 : les différentes zones de caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule PV.

Figure II.7 : différents régimes selon la puissance d'éclairement.

Figure II.8 : Évolution de la caractéristique I-V en fonction de l'éclairement (à gauche) et de la température (à droite).

Figure II.9 : Structure d'une cellule photovoltaïque.

Figure II.10 : Évolution de la production mondiale des différentes technologies de C.PV

Figure II.11 : Photos de cellules monocristallin(a) et multicristallin (b).

Figure II.12 : Deux exemples de modules utilisant Sia (silicium amorphe).

Figure II.13 : Structure d'une cellule photovoltaïque au CdTe.

Figure II.14 : Les différentes zones de la caractéristique $I(V)$.

Figure II.15 : ruban métallique d'une cellule.

Figure II.16 : Encapsulation des cellules.

Figure II.17 : caractéristiques résultantes d'un groupement de (N_s) cellules en séries.

Figure II.18 : caractéristiques d'un groupement de (N_p) cellules en parallèle .

Figure II.19 : (a) architecture classique d'un panneau solaire photovoltaïque avec diodes de protections. (b) défaillance d'une des cellules du module PV et activation de diode de circulation I_{pv} .

Figure II.20 : caractéristique ($I_{pv}-V_p$) d'un panneau photovoltaïque (BP585) et effet d'une des (36) cellules qui composent le module PV.

Figure III.1 : Schéma général d'une installation photovoltaïque.

Figure III.2 : Panneau solaire.

Figure III.3 : Boîte de dérivation.

Figure III.4 : Caractéristique charge et décharge d'une batterie

Figure III.5 : Construction d'une batterie monobloc

Figure III.6 : différentes technologies de batterie.

Figure III.7 : Schéma de principe d'un régulateur de charge parallèle [19].

Figure III.8 : Schéma de principe d'un régulateur de charge série [19].

Figure III.9 : Régulateur Solaire **MPPT** (à gauche) et **PWM** (à droite).

Figure III.10 : Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour.

Figure III.11 : trois panneaux solaires déconnectés.

Figure III.12 : classification des onduleurs PV connectés au réseau [30].

Figure III.13 : schéma d'une maison solaire.

Figure III.14 : Système photovoltaïque avec stockage [24].

Figure III.15 : Système d'alimentation hybride photovoltaïque/ groupe électrogène [25].

Figure III.16 : Système photovoltaïque raccordé au réseau [25].

Figure III.17 : schéma de principe d'un Système PV autonome avec stockage.

Figure III.18 : Système hybride PV/ Eolienne.

Figure III.19 : Schémas de principe du système connecté au réseau.

Figure (IV.1) : Modèle d'une cellule photovoltaïque.

Figure (IV.2) : Modèle de simulation pour un panneau photovoltaïque.

Figure (IV.3) : Influence de l'irradiation sur la caractéristique $I(V)$ pour un panneau PV à $T=25^{\circ}\text{C}$.

Figure (IV.4) : Influence de l'irradiation sur la caractéristique $P(V)$ pour un panneau PV à $T=25^{\circ}\text{C}$.

Figure (IV.5) : Influence de la température sur la caractéristique $I(V)$ pour un panneau PV à $E=1000\text{W/m}^2$

Figure (IV.6) : Influence de la température sur la caractéristique $P(V)$ pour un panneau PV à $E=1000\text{W/m}^2$

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Caractéristiques principales du soleil.

Tableau II.1 : Rendement de différents types des cellules.

Tableau II.2 : Classification de différents types de cellules photovoltaïques.

Tableau III.1 : Comparaison entre les différentes technologies de batteries.

Tableau III.2 : caractéristique moyennes des différentes technologies de batterie en 2019

Tableau (IV.1) : Paramètre d'un panneau photovoltaïque du type Suntech STP080 12/B6 monocristallin.

Références

- [1] A. Labouret, M. Viloz, Energie solaire photovoltaïque, 3ème édition, DUNOD, Paris, 2006.
- [2] J. Bernard, Energie solaire calcul et optimisation, 1ère édition, ELLIPES, Paris, 2004.
- [3] A.Oi, « Design and simulation of photovoltaic water pumping system », Partial Fulfillment of the Requirements for the degree of master of science in Electrical Engineering, Faculty of California Polytechnic State University San Luis Obispo, september 2005.
- [4] B. Pire, "Bethe Hans Albrecht", ENCYCLOPEDIE UNIVERSALIS, version 12.00, logiciel et moteur de recherche OPTI Media, Paris 2007.
- [5] A. Mabrouk, « Étude de conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique », mémoire de magister en électricité solaire de l'école nationale polytechnique El Harrach, Alger 2008.
- [6] S. Petibon, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, Janvier 2009.
- [7] R.P. Mukund, « *Wind and solar Power Systems* », CRC Press LLC, New York, 1999.
- [8] Henry Mathieu et Hervé Fanet, Physique des semiconducteurs et des composants électroniques, 6e édition, Dunod, Paris, 2009.
- [9] K. Helali, « Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative », Mémoire de Magister, UMMTO, 2012.
- [10]. www.enerzine.com.
- [11] S.VIGHETTE, « Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : choix et dimensionnement des étages de conversion », Thèse de Doctorat, université de Grenoble, septembre 2010.
- [12] A. Zerga, F. Benyarou et B. Benyousef, « Optimisation du rendement d'une cellule solaire NP au silicium monocristallin », Revue des Energies Renouvelables, 1998, pp.95-100.

- [13] C. Bernard, J. Chauvin, D. Lebrun, J.F. Muraz, P. Stassi, « Station solaire autonome pour l'alimentation des antennes de l'expérience de radio détection à l'Observatoire Pierre Auger », L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL.2006.
- [14] N. Achaibou, A. Malek, N. Bacha, « Modèle de vieillissement des batteries plomb acide dans l'installation PV », Revue des Energies Renouvelables, N. spécial (CHEMSS), pp 61-66, 2000.
- [15] I. Tsuda, K. Kurokawa, K. Nozaki, « Annual simulation results of photovoltaic system with redox flow battery », solar Energy Materials and solar cells 35, pp 503 – 508, 1994.
- [16] D. Thévenard and M. Ross, « Validation and Vérification of Component Models and System Models for the PV », CETC-internal report 2003-035, Canada, 2003.
- [17] P. Derk « Electrochemical Energy Storage for Renewable Source and Grid Blancing », ouvrage ISBN:978-0-444-62616-5, 2014.
- [18] B. Brousse, Réalisation et caractérisation de cellules photovoltaïques organiques obtenues par dépôt physique, Thèse de doctorat, faculté de sciences et technique, spécialité : électronique des hautes fréquences et optoélectronique, université de Limoges (France), 2004.
- [19] Z. Bachi, S. El. Fodil, « Conception et réalisation d'un système de régulation de charge semi statique a sortie fixe pour installation photovoltaïque », mémoire d'ingénieur d'état, USTHSB.1992.
- [20] B. Fleche, D. Delagnes, Energie solaire photovoltaïque, [En ligne] : [http://www.iufmrese.cict.fr/catalogue/2006/Toulouse/PV/A Introduction PV/Energie solaire _photovoltaïque.pdf](http://www.iufmrese.cict.fr/catalogue/2006/Toulouse/PV/A%20Introduction%20PV/Energie%20solaire%20photovoltaïque.pdf)
- [21] A. Labouret, M. Viloz, Energie solaire photovoltaïque, 3ème édition, DUNOD, Paris, 2006.
- [22] C. Hennous et K. Ait allala, « Dimensionnement et installation d'un système photovoltaïque (Application a la F.G.E.I) », Mémoire de fin d'études, UMMTO, 2009.
- [23] <http://www.arebor-energie.fr/>.
- [24] R. Lakehal « Réalisation d'un système de pilotage d'un simulateur solaire : mesures I-V et extraction des paramètres » mémoire de master université de Tlemcen, Algérie, 2011.

- [25] G. Tiwari et D. Swapnil, «Fundamentals of photovoltaic modules and their applications» Royal society of Chemistry, Inde, 2010.
- [26] mémoire Energie solaire 2017 .
- [27] M. Reggane, D. Djidja, « Étude d'une installation photovoltaïque pour l'alimentation en électricité d'un centre enfûteur de GPL (NAFTAL) », mémoire de Master, UMMTO, 2012.
- [28] I. Tsuda, K. Kurokawa et K. Nozaki, «Annual simulation results of photovoltaic system with redox flow battery», Solar Energy Materials and solar cells, volume 35, pp. 503-508, 1994.
- [29] A. Labouret et M. Villoz, « Énergie solaire photovoltaïque, le manuel du professionnel», Dunod, 2003.
- [30] D. Shulz, M.Jahn, « Grid integration of photovoltaics and fuel cells», Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks, Springer London, 2008.
- [31] CRDP de Basse-Normandie - thém@doc - Les énergies renouvelables, c'est quoi? Énergie solaire. [En ligne] :<http://www.crdp.accaen.fr/energies/Soleil.htm>.
- [32] A. Ricaud, Photopiles solaires, 1ère édition, presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1997.
- [33] <https://www.photovoltaique.info/fr/realiser-une-installation/choix-du-materiel/les-accessoires-additionnels/les-batteries/>
- [34] Mémoire « L'Etude conceptuelle d'un système de conditionnement de puissance pour une centrale hybride PV/Eolien 2011-2012
- [35] Majid ZANDI, " CONTRIBUTION AU PILOTAGE DES SOURCES HYBRIDES D'ENERGIE ELECTRIQUE," thèse doctorat NANCY Université - Institut National Polytechnique de Lorraine 2010.
- [36] www.dmseducation.com
- [37] www.solarbuzz.com.
- [38] M. Nkouimi, «Outil d'aide au dimensionnement des systèmes photovoltaïques domestiques», Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur de conception, École National Supérieur Polytechnique de Yaoundé, 2010.