

MEMOIRE DE PROJET DE FIN D'ETUDES.

Option: Physique et Application.

Modélisation et simulation d'une cellule photovoltaïque par Matlab.

Présenté par : INNAN Nouhaila

Encadré par : Pr. BENNAI Mohamed

Remerciement

Tout d'abord, je tiens à souligner que mon travail est tissé dans une ambiance encourageante et motivante à l'aide d'une équipe que j'admire et j'apprécie beaucoup.

Grace à mon encadrant et ses doctorants que j'arrive à peaufiner et finir ce projet. Leur soutien m'a offert une énergie de travail sans lassitude, leurs remarques me réconfortent beaucoup et alimentent ma capacité intellectuelle et renouvellent ma façon dont j'interprète mon projet.

J'avoue que ce travail ne peut avoir eu le jour sans le soutien prescrit par la collaboration de cette équipe.

*Je remercie en particulier mon encadrant Monsieur **Mohamed Bennai** professeur de l'enseignement supérieur à la faculté des sciences Ben M'sik de Casablanca qui m'a aidé à ériger ce mémoire, ses consignes et ses directives m'ont orienté vers des résultats escomptés, il veille sur toute mes démarches que j'ai entreprises et effectuées pour arriver à produire ce projet sans oublier sa confiance, et sa disponibilité qu'il m'a consacré.*

*Je remercie M^{lle} **Leila Nouri** doctorante en Laboratoire de Physique de la Matière Condensée de son aide qui m'a donné et ses consignes directives qui sont bénéfiques, elle m'a aussi consacré son temps précieux pour me soutenir.*

*Et je remercie aussi M^{lle} **Sara Mdafai** doctorante en Laboratoire de Physique de la Matière Condensée de ce qui a fait pour ce projet, elle ne cesse pas de me donner des remarques et des notes afin que je rectifie le tir. J'apprécie ses précieuses informations qui sont tellement prodigieuses et son aide afin de ficeler ce projet.*

*La personne qui m'a aidé à élaborer graphiquement et à tisser syntaxiquement et lexicalement ce projet, c'est **mon père** que j'aimerais bien le louer et graver et sculpter sa présence dans ce mémoire, mille et un remerciements.*

Je présente mes salutation les plus distinguées à ceux et à celles, chacun de son côté, qui m'ont soutenu d'une façon ou d'une autre, pour donner naissance à ce projet.

*Enfin, je remercie infiniment **les membres du jury** après avoir accepté d'évaluer ce projet de fin d'étude.*

2.3.3.3.1.	Les cellules Multi-jonctions à fort rendement.....	28
2.3.3.3.2.	Les cellules de Grätzel.....	29
2.3.3.3.3.	Les cellules photovoltaïques organiques	29
2.3.4.	Les constituants de base d'une cellule photovoltaïque	29
2.3.5.	Les Recombinaisons.....	31
2.3.5.1.	Recombinaisons radiatives	32
2.3.5.2.	Recombinaisons d'Auger	32
2.3.5.3.	Recombinaisons de Shockley-Read-Hall.	34
2.4.	Conclusion.....	35
3.	Chapitre 2 : Modélisation d'une Cellule Photovoltaïque.....	36
3.1.	Introduction	37
3.2.	Paramètres photovoltaïques	37
3.2.1.	Courant de court-circuit.....	38
3.2.2.	Tension en circuit ouvert	38
3.2.3.	La puissance optimale d'une cellule photovoltaïque	39
3.2.3.1.	Caractéristique P(V) d'une cellule photovoltaïque	39
3.2.4.	Facteur de forme	40
3.2.5.	Rendement de conversion d'énergie.....	40
3.3.	Modèle électrique d'une cellule PV	40
3.3.1.	Modèles à une diode.....	41
3.3.1.1.	Modèle à une diode avec trois paramètres	41
3.3.1.2.	Modèle à une diode avec quatre paramètres.....	42
3.3.1.3.	Modèle à une diode avec cinq paramètres.....	43
3.3.2.	Modèles à deux diodes	44
3.3.2.1.	Modèle à deux diodes avec cinq paramètres	44

3.3.2.2.	Modèle à deux diodes avec six paramètres	45
3.3.2.3.	Modèle à deux diodes avec sept paramètres.....	46
3.4.	Conclusion.....	47
3.	Chapitre 4 : Simulation d'une Cellule photovoltaïque par Matlab	48
3.1.	Introduction	49
3.2.	Matlab	49
3.3.	Simulation par Matlab.....	49
3.3.1.	Modèle Choisi.....	49
3.3.2.	Paramètres utilisés	51
3.3.3.	Programme de simulation.....	52
3.3.3.1.	Caractéristique I(V) d'une cellule PV	52
3.3.3.2.	Influence de la température sur la caractéristique I(V)	53
3.3.3.3.	Influence de la résistance série sur la caractéristique I(V)	55
3.3.3.4.	Influence de la résistance parallèle sur I(V)	57
3.3.3.5.	Influence de facteur d'idéalité sur la caractéristique I(V)	59
3.4.	Résultats et discussion.....	62
3.4.1.1.	Caractéristique I(V) d'une cellule PV	62
3.4.1.2.	Influence de la température sur la caractéristique I(V)	63
3.4.1.3.	Influence de la résistance série sur la caractéristique I(V)	64
3.4.1.4.	Influence de la résistance parallèle sur I(V)	65
3.4.1.5.	Influence de facteur d'idéalité sur la caractéristique I(V)	66
3.5.	Conclusion	66
4.	Conclusion Générale	67
5.	Références Bibliographiques	68
6.	Résumé - Abstract.....	70

Liste des tableaux :

Chapitre 1 :

Tableau 1.1 : Avantages et Inconvénients pour les technologies les plus utilisées d'une cellule photovoltaïque.

Tableau 1.2 : Comparaison entre les cellules en silicium monocristallin et polycristallin de 1^{ère} génération.

Tableau 1.3 : Les avantages et les inconvénients des cellules de 2^{ème} génération.

Chapitre 3 :

Tableau 3.1 : Différents paramètres par Masaki et Tatsuo.

Liste des figures :

Chapitre 1 :

Figure 1.1 : Le rayonnement solaire global en Afrique.

Figure 1.2 : Spectre du rayonnement solaire.

Figure 1.3 : Effet de l'ensoleillement par rapport aux saisons annuel.

Figure 1.4 : Schéma de principe de la conversion photoélectrique.

Figure 1.5 : Dopage des semi-conducteurs.

Figure 1.6 : (a)- Schéma de bande de la jonction n-p d'une cellule solaire et (b)- Génération des paires électron-trou dans le réseau cristallin du silicium.

Figure 1.7 : Les différentes cellules photovoltaïque.

Figure 1.8 : Répartition des matériaux sur le marché mondial du photovoltaïque [8].

Figure 1.9 : Composition d'une cellule photovoltaïque [17].

Figure 1.10 : Recombinaison radiative. Traversée directe de la bande interdite par un électron bouchant un trou avec émission d'un photon (d'après [22]).

Figure 1.11 : Recombinaison d'Auger. Traversée de la bande interdite par un électron se recombinant avec un trou (a) après avoir cédé de l'énergie à un autre électron (b) avant de céder de l'énergie à un autre trou, qui la dissipe ensuite.

Figure 1.12 : Recombinaison Shockley-Read-Hall (SRH), Et est une centre de piégeage d'électrons ou de trous.

Chapitre 2 :

Figure 2.1: Les caractéristiques I(V) d'une cellule PV.

Figure 2.2: Caractéristique puissance-tension et courant-tension d'une cellule PV.

Figure 2.3 : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode Avec trois paramètres.

Figure 2.4 : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode avec quatre paramètres.

Figure 2.5 : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode avec cinq paramètres.

Figure 2.6 : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes avec cinq paramètres.

Figure 2.7 : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes avec six paramètres.

Figure 2.8 : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes avec sept paramètres.

Chapitre 3 :

Figure 3.1 : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes avec sept paramètres.

Figure 3.2 : Caractéristique $I(V)$ d'une cellule PV.

Figure 3.3 : Influence de la température sur la caractéristique $I(V)$.

Figure 3.4 : Influence de la résistance série sur la caractéristique $I(V)$.

Figure 3.5 : Influence de la résistance parallèle sur la caractéristique $I(V)$.

Figure 3.6 : Influence de facteur d'idéalité sur la caractéristique $I(V)$.

Symboles :

Symboles	Unités	Définitions
E	ev	Energie de photon.
h	j/s	Constate de Planck.
ν	Cycles/s	Fréquence de la radiation.
λ	nm	Longueur d'onde.
C	m/s	Célérité de la lumière
Φ	W/s	Flux lumineux
Lx	nm	Longueur d'absorption du faisceau dans le matériau à partir de la surface du semi-conducteur.
Ref		Coefficient de réflexion de l'énergie lumineuse à la surface du matériau.
γ		Coefficient d'absorption qui selon le matériau et qui traduit la probabilité d'absorption d'un photon par unité de longueur.
B_r	cm ³ /s	Coefficient recombinaison Radiative.
U_r		Taux net de recombinaison radiative.
τ_R		Temps moyen d'un mécanisme radioactif.
C_n, C_p	cm ⁶ /s	Coefficients d'Auger.
τ_A		Temps moyen d'un mécanisme Auger.
σ_p		Section de capture des électrons.
σ_n		Section de capture des trous.
n_{ie}		Concentration intrinsèque avec rétrécissement du gap.
$\Delta E_c, \Delta E_v$		Rétrécissements aux bords du gap, causés par le dopage (band gap narrowing).

n_i		Concentration intrinsèque sans effet de rétrécissement du gap.
n_0, p_0		Concentrations des porteurs à l'équilibre.
E_F		Niveau de Fermi.
E_{Fi}		Niveau intrinsèque de Fermi localisé proche du milieu du gap.
τ_{SRH}		Temps moyen d'un mécanisme SRH.
V_{co}	V	Tension à circuit ouvert
I_{cc}	A	Courant de court-circuit et un
FF		facteur de forme
I_{ph}	A	Photo courant (A)
R_p	Ω	Résistance parallèle.
R_s	Ω	Résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours.
q	Coulomb	Charge de l'électron.
K_B	J/K	Constante de Boltzmann.
T	Kelvin	Température effective de la cellule.
I_0	A	Courant de saturation inverse de diode.
P	Watt ou J/s	Puissance Optimale
A	m^2	Surface génératrice.
E	W/m^2	l'ensoleillement.
η		rendement
I_{sh}	A	Courant de la résistance parallèle
n		Facteur d'idéalité.
V_{th}		Tension thermique.

Notation :

PV : Photovoltaïque.

PCBM : [6,6]-phényl- C_{61} -butanoate de méthyle.

CZ : Czochralski.

FZ : Float Zone.

HIT : Heterojunction with Intrinsic Thin layer.

ZSW : Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg ou Centre for Solar Energy and Hydrogen Research.

BSF : Back Surface Field.

1E3P : Modèle à une diode avec trois paramètres.

1E4P : Modèle à une diode avec quatre paramètres.

1E5P : Modèle à une diode avec cinq paramètres.

2E5P : Modèle à deux diodes avec cinq paramètres.

2E6P : Modèle à deux diodes avec six paramètres.

2E7P : Modèle à deux diodes avec sept paramètres.

FF : Facteur de Forme.

CSSC : Les cellules solaires sensibilisées par colorant.

MPP : Point de Puissance Maximal.

Introduction Générale

L'énergie étant qu'une source à plusieurs bases se groupe en deux types : l'énergie renouvelable et non renouvelable, ce dernier est le genre de ressources qui sont en cours d'exécution avec le passage du temps quand il est utilisé de manière intensive, parce qu'ils existent dans la nature, ces sources sont rares, et causent la pollution à l'environnement, comme la source de combustible fossile, le gaz naturel, le pétrole, le charbon... dont la terre foisonne mais l'essor démographique au niveau planétaire réduit proportionnellement la consommation de l'énergie, sans oublier l'augmentation de consommation participe aussi à la disparition graduellement de ce type d'énergie.

L'homme a exploité cette énergie pour réaliser des fins souhaitables et tolérables en faveur de lui, mais il tombe au contraire de ce qu'il veut établir.

Comme l'énergie non renouvelable est un élément nuisible, qui affecte la vie des êtres vivants, elle menace la rusticité, et la continuité, on a pensé à trouver une issue pour endiguer ce fléau, et donner une solution la plus adéquate à cette problématique.

Effectivement, des recherches ont été faites pour utiliser les énergies renouvelables au lieu des énergies non renouvelables.

Les énergies renouvelables sont créées à partir de sources d'énergies naturelles et écologiques comme le soleil, le vent, l'eau, la marée ou les matières organiques, ces énergies sont issues de phénomènes naturels, réguliers ou constants qui les rendent inépuisables. Elles sont également parfois appelées énergies "vertes" ou "propres" car elles émettent moins de CO₂ que les énergies issues de sources fossiles.

Aujourd'hui les différents gouvernements cherchent à accroître la part d'énergie d'origine renouvelable sur le marché de l'énergie afin de lutter pour la sauvegarde de l'environnement.

L'utilisation de l'énergie solaire comme source d'énergie électrique est la meilleure solution pour obtenir l'énergie libre et sans danger pour l'environnement, la quantité d'énergie du soleil qui atteint la terre par une journée ensoleillée est estimée à 1000W/m². Donc, si ces rayons peuvent fournir de l'énergie à travers l'ensemble des cellules solaires qui sont placés sur les toits de nos maisons.

Alors nous pouvons obtenir une énergie libre adéquate aux exigences de la vie quotidienne.

La conversion directe de la lumière du soleil en énergie électrique est l'une des principales réalisations scientifiques du 20^{ème} siècle, c'est la meilleure technologie actuellement utilisée dans le domaine des énergies renouvelables, cette technique a commencé depuis plusieurs décennies, mais on a introduit la phase d'exploitation réelle lorsqu'ils sont utilisés dans les programmes spatiaux à la fin des années cinquante, des milliers de dizaines de systèmes ont été installés dans diverses applications telles que l'éclairage, les communications, la pompe à eau, des chargeurs de batterie, et le fonctionnement des réfrigérateurs, des médicaments et d'autres utilisations.

Le but de ce travail est de modéliser et simuler l'influence de la résistance série sur la caractéristique $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque, pour cela nous avons élaborés les trois chapitres :

- Dans le premier chapitre, l'étude sera consacrée à la conversion photovoltaïque. On donnera quelques généralités sur les cellules photovoltaïques, les différents types de cellules PV et leurs principes de fonctionnement.
- Dans le deuxième chapitre, on va présenter les paramètres photovoltaïques et les différents modèles électriques des cellules PV.
- Le troisième est le dernier chapitre, qui est le plus important, on le subdivise en deux grandes parties :
 - ✚ La simulation de cellule PV par Matlab et l'influence de différents paramètres sur la caractéristique $I(V)$.
 - ✚ L'analyse et la discussion des résultats de cette simulation.

Chapitre 1 :

Généralités sur les Cellules Photovoltaïques

1.1. Introduction :

L'énergie est l'ingrédient le plus nécessaire pour maintenir la vie sur la terre. Elle est impliquée dans tous les domaines de la vie, sans exception, parce que l'énergie lumineuse aide l'être humain pour voir les choses, et obtenir la chaleur nécessaire pour alimenter son corps.

Nous pouvons utiliser cette énergie de plusieurs manières :

-*Energie passive* : utilisation directe du rayonnement solaire.

-*Energie thermique* : utilise la chaleur du rayonnement solaire.

-*Energie photovoltaïque* : transforme le rayonnement solaire en électricité grâce à des cellules photovoltaïques.

Ce chapitre décrit les principaux éléments du système photovoltaïque. Dans une première partie des notions essentielles sur le rayonnement solaire sont présentées. On y explique comment l'énergie solaire varie selon l'endroit et la saison.

Dans une seconde partie on présente le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, ses différents types, ses générations, les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque, la technologie photovoltaïque, et les mécanismes des recombinaisons d'un semi-conducteur.

1.2. Rayonnement Solaire :

1.2.1. Le soleil et son rayonnement :

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Elle a une forme pseudo-sphérique et un diamètre 1 391 000 Km. Soit environ 50 fois de celui de la terre et la distance qui leur sépare est 1 490 598 000 Km. Il est composé de 80% d'*hydrogène*, 19% d'*hélium* et 1% d'un mélange de plus de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques qui restent. Sa température au cœur atteint 107 K [1].

Depuis que *Langevin et Perrin*, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'*Einstein*, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire *hydrogène-hélium* transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'*hydrogène* en 560 millions de tonnes d'*hélium*, la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions °C. Ainsi,

à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement.

Sa lumière, peut être considérée comme la propagation d'une onde électromagnétique, à une vitesse de la célérité de la lumière 3.10^8 m/s, et elle met environ 8 minutes pour parvenir à la terre [1, 2].

L'observation de l'intensité du flux solaire et sa distribution spectrale en dehors de l'atmosphère a montré que l'énergie est émise sous forme électromagnétique répartie en un spectre s'étendant de la longueur d'onde 0.3 micromètres (*ultraviolet*) à 5 micromètres (*infrarouge*) avec un maximum pour 0.47 micromètres dans le visible [1].

Toutes les valeurs données auparavant, ne sont pas permanentes car l'activité solaire subit pas mal des perturbations et d'éruption solaire, mais leurs conséquences ne dépassent pas 4% de variation d'intensité du rayonnement émis [2].

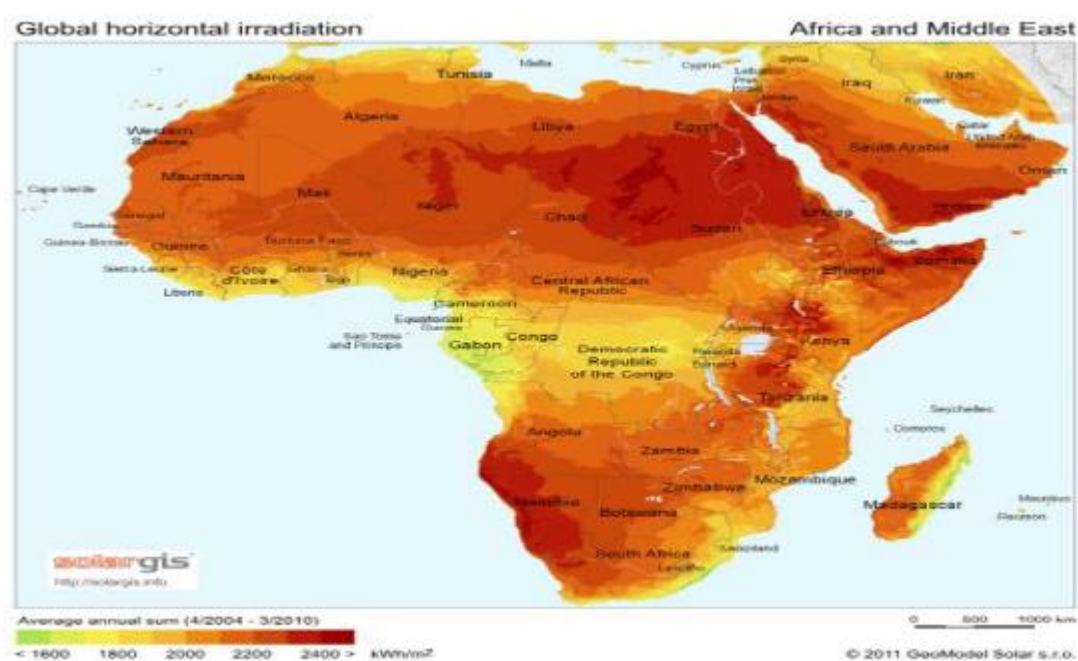


Figure 1.1 : Le rayonnement solaire global en Afrique.

1.3.3. Spectre solaire :

Le spectre du soleil c'est sa décomposition en longueur d'onde ou «couleur». La lumière solaire est en effet composée de toutes sortes de rayonnements de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde. Les photons; grains de lumière qui composent ce rayonnement électromagnétique, sont porteurs d'une énergie qui est reliée à leur longueur d'onde par la relation suivante :

$$E = h\nu = h \frac{C}{\lambda} \quad (1.1)$$

Où :

E : Énergie du photon (eV).

h : La constante de *Planck* (6.625×10^{-34} joules-secondes).

ν : Fréquence de la radiation (en cycles/seconde).

λ : Longueur d'onde.

C : Célérité de la lumière (3.10^8 m/s).

La théorie ondulatoire et corpusculaire de la lumière permet d'aborder les échanges entre la matière et le rayonnement. L'énergie n'est pas indéfiniment invisible.

En effet, la plus petite particule d'énergie qui peut être transférée dans un processus est le *quantum*. La lumière est une forme d'énergie et le *quantum* de lumière est appelé photon.

Dans la théorie de la mécanique quantique, *Planck* a suggéré que l'énergie du photon correspondant à une radiation de fréquence donnée est reliée à sa longueur d'onde **figure (1.2)** [1,2].

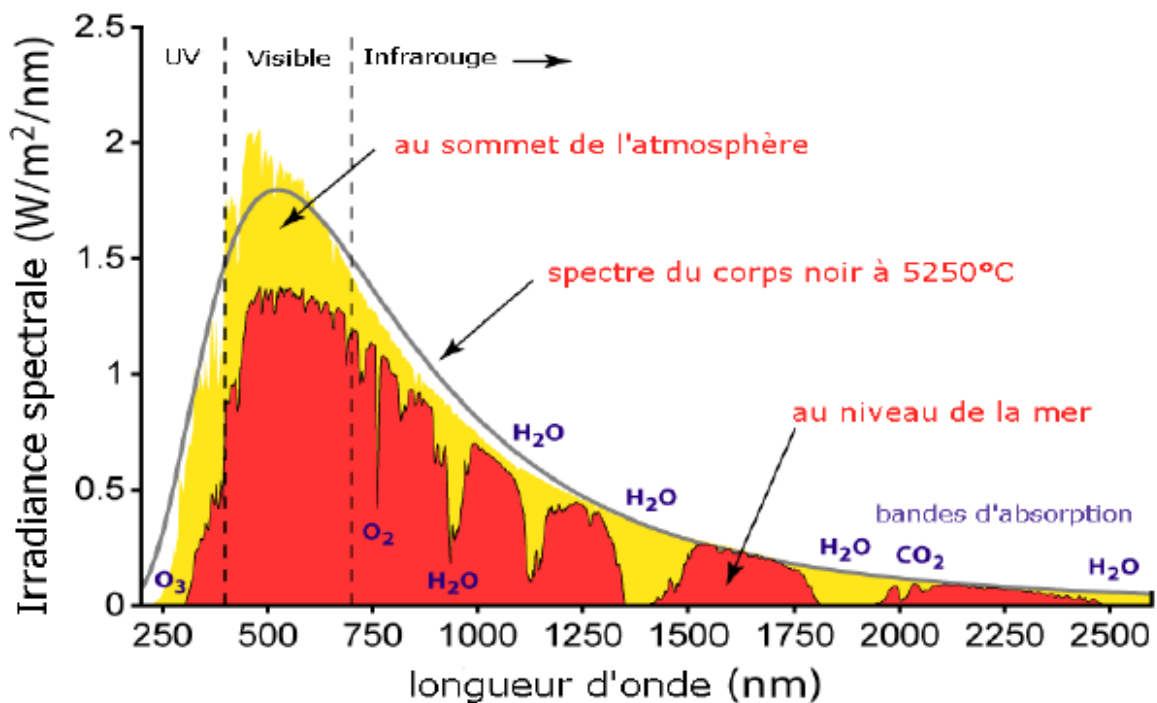


Figure 1.2 : Spectre du rayonnement solaire.

Une radiation lumineuse rencontrant un semi-conducteur est absorbée suivant la loi de *Lambert-Bouguer* :

$$\phi(x) = \phi_i(1 - Ref)e^{-\gamma Lx} = \phi_0 e^{-\gamma Lx} \quad (1.2)$$

Où :

Lx : Longueur d'absorption du faisceau dans le matériau à partir de la surface du semi-conducteur.

Ref : Coefficient de réflexion de l'énergie lumineuse à la surface du matériau.

γ : Coefficient d'absorption qui selon le matériau et qui traduit la probabilité d'absorption d'un photon par unité de longueur.

En se basant sur le rayonnement solaire pour produire l'énergie, forcément nous allons rencontrer pas mal des difficultés, car c'est un phénomène naturel, il n'est pas disponible à chaque moment, aussi on ne peut pas emmagasiner ni transporter cette énergie solaire. Pour cela avant de concevoir un système solaire photovoltaïque, il est, conseiller d'étudier la disponibilité d'ensoleillement sur la zone par rapport au temps, et de déterminer la quantité maximale qu'il peut avoir en ensoleillement, pour pouvoir optimiser son dimensionnement et prévoir le matériel qu'il faudra pour assurer la continuité de sa production [2].

Pour cela, il faut d'abord comprendre l'effet de la rotation (moment de la journée) et de l'inclinaison (saison de l'année) de la terre sur le rayonnement solaire. L'absorption atmosphérique est plus faible lorsque le soleil se trouve à son point le plus haut dans le ciel, c'est-à-dire plein sud dans l'hémisphère nord et plein nord dans l'hémisphère sud.

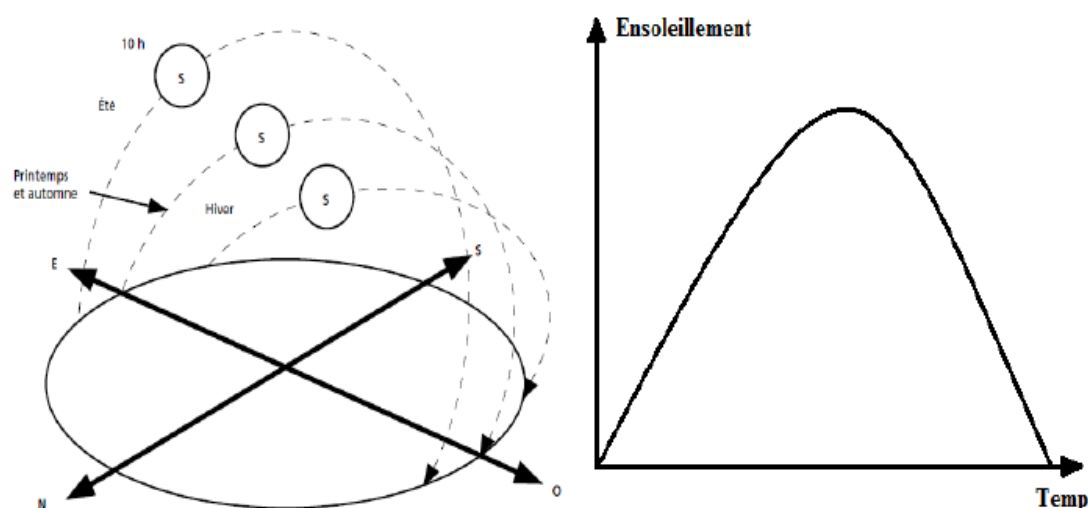


Figure 1.3 : Effet de l'ensoleillement par rapport aux saisons annuelles.

En effet, la distance que doit parcourir le rayonnement dans l'atmosphère est plus court, lorsque le soleil est directement au-dessus de l'endroit visé.

C'est le « *midi solaire* », moment où le rayonnement solaire direct est le plus intense. Comme le soleil est plus haut et que les journées sont plus longues en été, la quantité totale d'énergie reçue sur un plan horizontal y est plus grande qu'en hiver [3].

1.3. Cellules Photovoltaïques :

1.3.1. Définitions et Fonctionnement :

Les photopiles ou cellules solaires ou **cellules photovoltaïques** sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants.

Les matériaux les plus connus sont :

- *Le Silicium (Si).*
- *Le sulfure de Cadmium (Cds).*
- *L'Arséniure de Gallium (As Ga).*
- *Le Tellure de Cadmium (Cd Te).*
- *Le Germanium (Ge).*
- *Le Phosphor Indium (In P).*

Toutes fois, le matériau le plus couramment utilisé est le *silicium* pur, obtenu à partir de la *silice* (*quartz* ou *sable*) par transformation chimique et métallurgique. On distingue à cet effet :

- Le *silicium mono* ou *poly-cristallin* qui représente plus de 90% de la production de cellule.
- Le *silicium amorphe*, généralement utilisé dans la plus part des petites applications.

Le phénomène mis en jeu dans l'effet photovoltaïque consiste en l'apparition d'une différence de potentiel quand on génère des porteurs des charges par excitation lumineuse au voisinage d'une jonction, c'est-à-dire d'un contact entre

deux semi-conducteurs de types différents : l'un positif, et le second négatif. (**Figure 1.4**) [18, 25, 27].

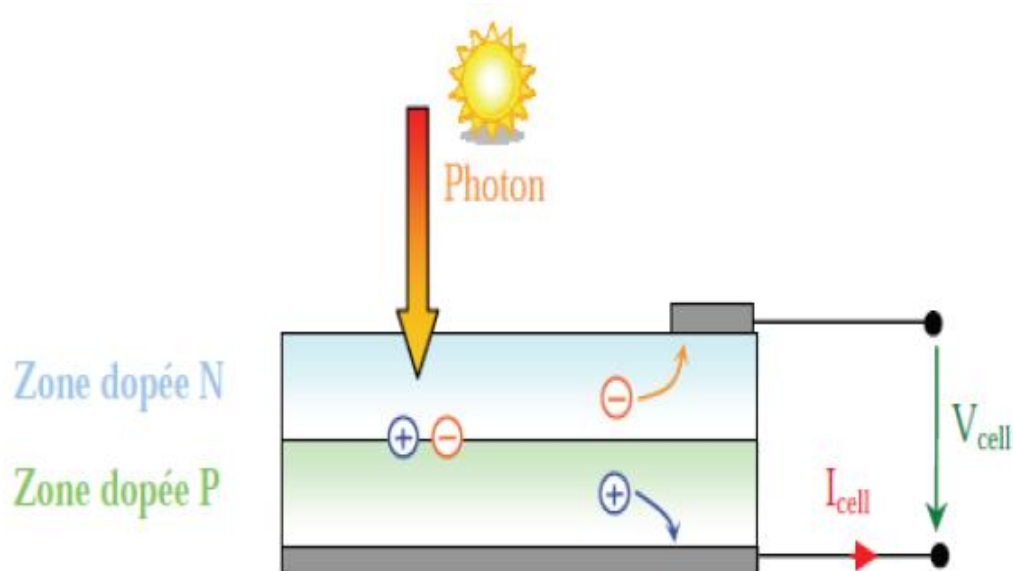


Figure 1.4 : Schéma de principe de la conversion photoélectrique.

Dans la pratique, pour le cas du silicium, on obtiendra un semi-conducteur de type P (positif) en dopant le silicium avec le bore et de celui de type N (négatif) en dopant avec du phosphore [7].

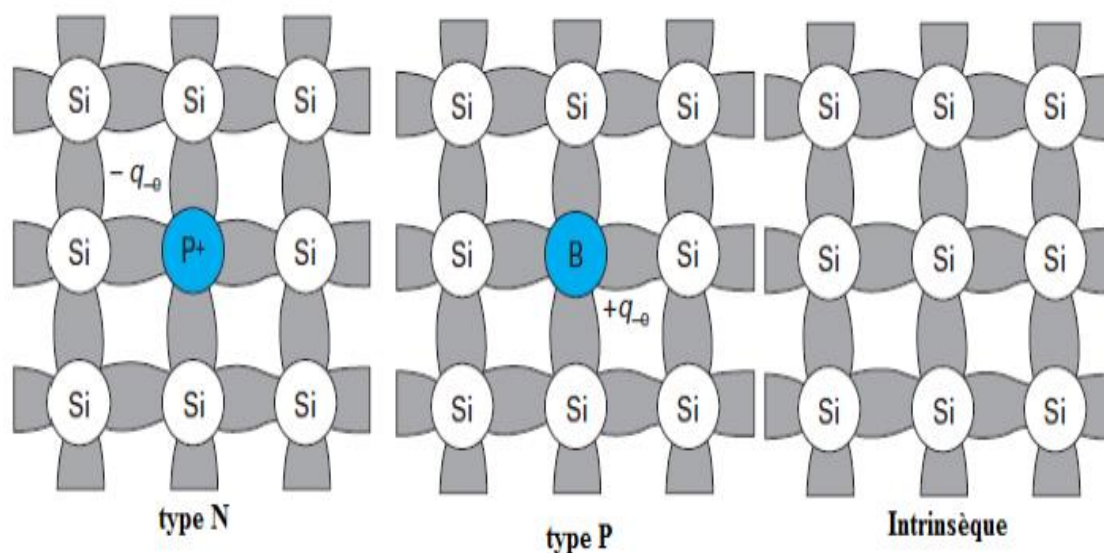


Figure 1.5 : Dopage des semi-conducteurs.

Ainsi, l'effet photovoltaïque résulte de la discontinuité qui existe dans le semi-conducteur entre le niveau d'énergie que peuvent prendre les porteurs de charges que sont les électrons et les trous. Cette discontinuité forme une bande interdite dont la longueur correspond à environ *électronvolt* pour le *silicium*. Ainsi, pour autant

qu'il possède une énergie supérieure à celle correspondante à la bande interdite (dite énergie de *Gap*) comme nous venons de l'expliquer ci-dessus, un photon pourra « arracher » un électron à la bande de valence et l'amener à la bande de conduction. Cependant, tout arrachement d'électron occasionne la création d'un trou. En définitive, à chaque fois qu'un photon arrive avec une énergie supérieure à celle de *Gap*, il y a création d'une paire électron-trou. Lorsque cette création a lieu à proximité d'une région où règne un champ électrique intense, les porteurs libres en excès sont séparés et collectés de part et d'autre du semi-conducteur, d'où l'établissement d'un courant électrique dans le semi-conducteur. [4, 5, 1,6].

La création d'un courant électrique à partir du rayonnement (effet photovoltaïque) est donc liée à trois phénomènes, voir (**figure 1.6**) [5] :

- La création de paires électron-trou sous l'effet du rayonnement.
- Le mouvement des paires électron-trou vers la jonction sous l'action des forces de diffusion.
- La collecte de toutes les paires électron-trou.

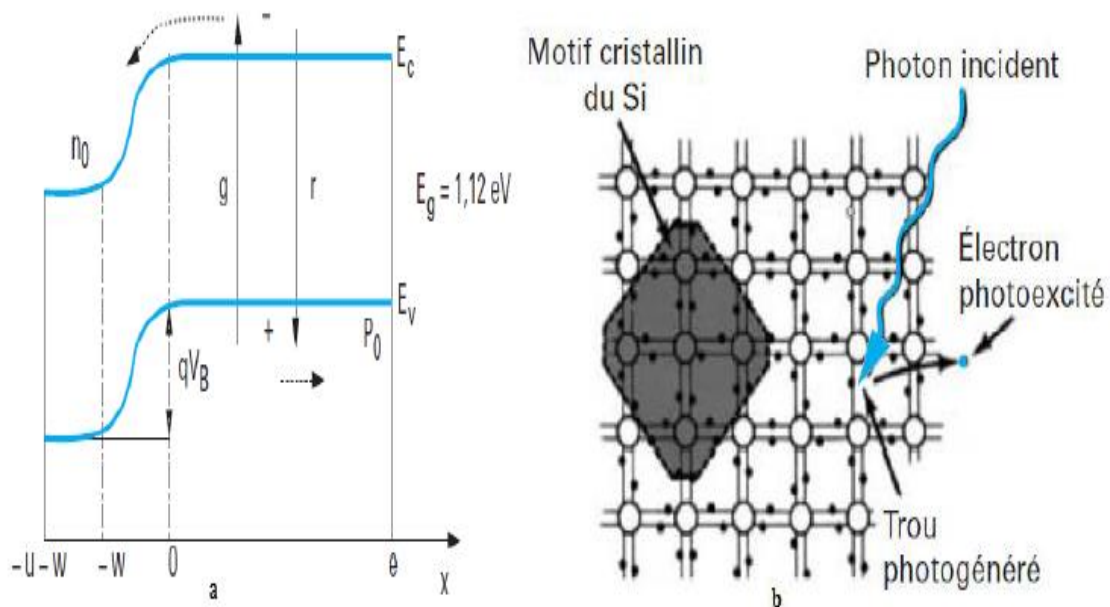


Figure 1.6 : (a)- Schéma de bande de la jonction p-n d'une cellule solaire et (b)- Génération des paires électron-trou dans le réseau cristallin du silicium.

1.3.2. Les Avantages et les inconvénients de l'énergie Solaire :

Les avantages et les inconvénients de différentes technologies de la fabrication des cellules photovoltaïques sont représentés dans le tableau suivant :

Type	Durée de vie	Avantages	Inconvénients
Cellule en Silicium Monocristallin	+/- 30 ans	<ul style="list-style-type: none"> • Très bon rendement (environ 150Wc/m²) • Durée de vie importante 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût élevé • Rendement faible sous un faible éclairement
Cellule en Silicium Polycristallin	+/- 30 ans	<ul style="list-style-type: none"> • Bon rendement (environ 100Wc/m²) • Durée de vie importante • Meilleur marché que le monocristallin 	<ul style="list-style-type: none"> • Rendement faible sous un faible éclairement.
Cellule silicium Amorphe en Couche mince	+/- 10 ans	<ul style="list-style-type: none"> • Fonctionnent avec un éclairement faible • Bon marché par rapport aux autres types de cellules • Moins sensible aux températures élevées 	<ul style="list-style-type: none"> • Rendement faible en plein soleil (environ 60Wc/m²) • Durée de vie courte

Tableau 1.1 : Avantages et Inconvénients pour les technologies les plus utilisées d'une cellule photovoltaïque.

L'énergie solaire est l'une des énergies renouvelables les plus importantes, elle a plusieurs points positifs, mais il y a aussi quelques inconvénients.

Avantages de l'énergie solaire :

L'énergie solaire dispose d'une gamme de fonctionnalités d'où on peut noter les avantages les plus importants :

- L'énergie solaire est la meilleure solution dans les zones reculées qui ne sont pas atteintes par les lignes électriques publiques.
- L'alimentation électrique issue de l'énergie solaire n'est pas polluante et ne produit aucun bruit comme dans le cas des générateurs électriques.
- Bien que le coût de la création des systèmes d'énergie solaire est cher, mais vous ne payez pas la facture d'électricité pour votre consommation.
- Vous pouvez installer des systèmes solaires sur les toits ou même sur le dos des places de stationnement comme une solution pour le manque d'espace.

Inconvénients de l'énergie solaire :

Bien que l'énergie solaire est facilement obtenue, mais elle peut représenter certaines inconvénients :

- L'énergie solaire ne peut pas être générée, durant les heures de non ensoleillement.
- Le brouillard et les nuages réduisent l'efficacité des systèmes d'énergie solaire.
- Les panneaux solaires doivent être constamment propres et exempts de poussière afin qu'ils puissent fonctionner efficacement.
- Le coût de l'installation de ce système est très cher.

1.3.3. Les Générations et les types d'une Cellule Photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est une jonction P-N active sous l'effet des rayons lumineux. Les cellules solaires photovoltaïques se différencient par leurs rendements et/ou par leurs compositions cristallines. Pour cela, il existe trois générations et chaque génération a ses constitutions [2].

1.3.3.1. Les cellules de 1^{ère} génération :

Les cellules de première génération sont basées sur une seule jonction P-N et utilisent généralement le silicium sous forme cristalline comme matériau semi-conducteur. Le silicium est fondu puis refroidi afin d'obtenir un cristal qui sera découpé en fines tranches (les wafers) pour obtenir la cellule photovoltaïque. Cette méthode de production est très énergivore et donc très chère. Elle nécessite par ailleurs un silicium de grande pureté. On différencie les cellules en silicium monocristallin et en silicium polycristallin.

Les cellules en silicium monocristallin	Les cellules en silicium polycristallin
Très bon rendement.	Bon rendement (Moins bon que les cellules monocristallines).
Sensibilité accrue aux rayonnements directs.	Sensibilité accrue aux rayonnements directs.
Coût très élevé.	Fort sensibilité à la température.
	Coût moins élevé que pour les cellules monocristallin.

Tableau 1.2 : Comparaison entre les cellules en silicium monocristallin et polycristallin de 1^{ère} génération.

1.3.3.1.1. Le silicium :

La filière Silicium représente actuellement 99% du marché des modules photovoltaïques comme le montre la *figure 1.7*. Il est l'un des éléments les plus abondants sur terre, parfaitement stable et non toxique.

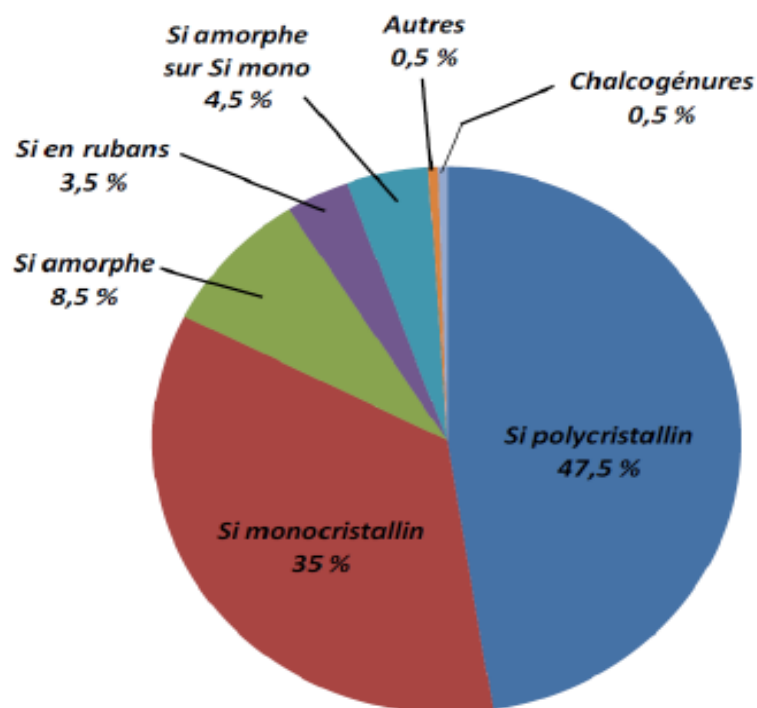


Figure 1.7 : Répartition des matériaux sur le marché mondial du photovoltaïque [8].

On trouve plusieurs technologies pour le photovoltaïque silicium détaillées ci-après, d'une part les cellules à base de Silicium massif (monocristallin, polycristallin, rubans) dites de première génération, et qui constituent à l'heure actuelle l'essentiel des modules photovoltaïques commercialisés et d'autre part la technologie à base de Silicium en couche mince.

1.3.3.1.2. Silicium monocristallin :

Il existe deux méthodes par lesquelles il est possible d'obtenir du silicium monocristallin de qualité microélectronique, mais nécessitant cependant une dépense d'énergie considérable, proche du MWh [8]. Les siliciums obtenus sont appelés CZ (méthode Czochralski) et FZ (« Float Zone »), et permettent d'obtenir des rendements de conversion records en laboratoire, de l'ordre de 25 % pour des cellules de 4 cm² (Université de New South Wales, Australie) [9], soit supérieurs de huit points à ceux de l'industrie. Les inconvénients de cette technologie sont les rendements faibles obtenus sous un faible éclairage et surtout le coût prohibitif de production des matériaux.

1.3.3.1.3. Silicium polycristallin :

Le Silicium polycristallin est produit par des techniques de croissance qui assurent la formation d'une structure colonnaire avec de gros cristaux (dénommé Silicium multicristallin) afin de limiter les effets néfastes des joints de grains. Cependant, le matériau multicristallin est d'une part contraint et disloqué, et d'autre part contaminé par des impuretés résiduelles de la matière première de silicium. Cette dernière est en partie constituée par des rebuts de l'industrie de la microélectronique, c'est-à-dire le Silicium monocristallin CZ ou FZ. Les rendements de conversion industriels, qui étaient de l'ordre de 8 à 10% avant 1980, sont actuellement de 16 à 17 % pour des grandes plaquettes de 200 cm² [9]. Il s'agit de la technologie la plus représentée sur le marché du photovoltaïque car elle allie à la fois des rendements de conversion élevés avec un coût de production faible par rapport à la filière Silicium monocristallin.

1.3.3.1.4. Silicium en ruban autosupporté :

Les techniques de production de Silicium cristallin en rubans autosupportés ont été très séduisantes sur le plan technologique. La plus connue est basée sur l'effet de capillarité entre deux lèvres de carbone. Ces rubans ont connu de nombreux développements au niveau de la recherche et, pour certains d'entre eux, jusqu'à la conception de chaînes de production préindustrielles. Cependant, la vitesse de croissance linéaire extrêmement lente (quelques cm/min) pousse les industriels à

abandonner progressivement cette technologie. Les meilleurs rendements obtenus sont néanmoins de l'ordre de 15 % [9].

1.3.3.1.5. Silicium en couches minces nanocristallin et amorphe :

Depuis les années 1970, des recherches intensives ont été entreprises pour utiliser du Silicium non cristallisé, c'est-à-dire à l'état amorphe. Ce sont les cellules des calculatrices ou des montres.

Le silicium amorphe présente plusieurs avantages, en particulier son fonctionnement possible en intérieur sous faible éclairage contrairement au silicium cristallin, son fort coefficient d'absorption, sa faible consommation énergétique durant le cycle de production et son aptitude à être déposé sur des grandes surfaces (de l'ordre de 1 m²). Cependant, les cellules photovoltaïques à base de silicium amorphe présentent de faibles rendements (inférieurs à 10 % au niveau industriel) et une diminution assez rapide de leurs performances au cours du temps [9]. L'avenir des couches de silicium amorphe passera probablement, par un mariage avec le silicium cristallin. En effet, les hétérostructures à base de silicium amorphe/silicium cristallin (structure HIT de Sanyo [10]) présentent des rendements de laboratoire de plus de 21 % et de 16 % en production industrielle.

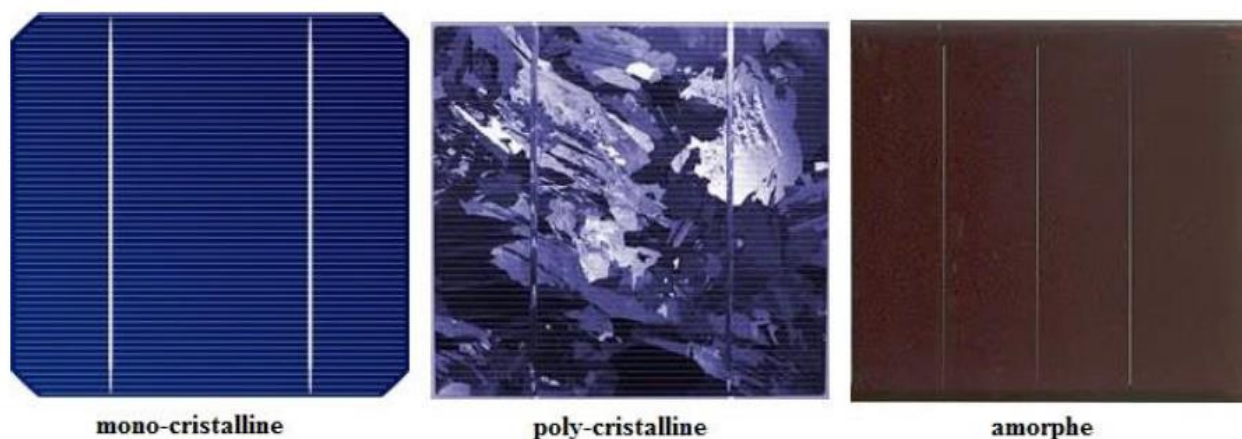


Figure 1.8 : Les différentes cellules photovoltaïque.

1.3.3.2. Les cellules de 2^{ème} génération :

1.3.3.2.1. Cellules en couches minces :

Les couches minces constituent la seconde génération de technologie photovoltaïque. Dans cette génération, on distingue le Silicium amorphe (a-Si), le di-Sélénium de Cuivre Indium (CIS), le Tellure de Cadmium (CdTe), et d'autres. Appelées aussi les chalcogénures, nous citons deux types CdS-CdTe et CIS.

Dans le cas de couches minces, la couche de semi-conducteur est directement déposée sur un substrat (ex : verre, plastique,...). La production de ce type de cellules est moins coûteuse que celle de la 1^{ère} génération puisqu'elles consomment moins de matériaux semi-conducteurs et ne nécessitent pas de passer par l'étape de transformation en « wafers ».

Ces cellules possèdent divers avantages et inconvénients :

Avantages	Inconvénients
✓ Sensibilité accrue aux rayonnements diffus.	✓ Certains éléments très polluants lors de la fabrication (Cadmium).
✓ Moins sensible à l'ombrage dû à la forme longitudinale des cellules.	✓ Performance diminuant dans le temps.
✓ Moins de matériau de base pour la fabrication.	✓ Performance diminuant dans le temps.
✓ Moins sensible aux fortes températures.	✓ Rendement moindre que les cellules de 1 ^{ère} génération.
✓ Permet la fabrication de panneaux souples et flexibles.	

Tableau 1.3 : Les avantages et les inconvénients des cellules de 2^{ème} génération.

1.3.3.2.2. Matériaux à base de Tellure de Cadmium :

Jusqu'à une date récente, il était admis que la filière à base de Sulfure de Cadmium et de Tellure de Cadmium (CdS-CdTe) représentait l'une des approches les plus prometteuses pour le photovoltaïque terrestre. La valeur de 1,45 eV de la bande d'énergie interdite du CdTe est idéalement adaptée au spectre solaire [9]. En outre, son très grand coefficient d'absorption fait que la quasi-totalité du spectre est absorbée sur une profondeur de 2 μm . Les résultats de rendement de conversion sont très encourageants: près de 11 % sur une surface de 4900 cm^2 . Cependant, les

problèmes d'environnement associés à l'utilisation du Cadmium freinent les tentatives de développement de cette filière.

1.3.3.2.3. Matériaux à base de Sélénure de Cuivre Indium :

Avec un coefficient d'absorption 100 à 1000 fois plus fort que celui du silicium cristallin (dans la gamme de 1,1 à 2,6 eV), le Di-Sélénure de Cuivre et d'Indium (CIS) est un matériau très prometteur [9]. Ce composé type I-III-VI, de structure chalcopyrite, a un rendement théorique de l'hétérojonction (n)CdS (p)CuInSe₂ qui se situe autour de 25 %. Les cellules à base de composés chalcopyrites quaternaires de type Cu(Ga,In)(Se,S)₂ ont récemment atteint des rendements de conversion record de 18,8 % en laboratoire [11]. Malgré les difficultés connues pour maîtriser cette filière à grande échelle, un rendement de 12,8 % a été obtenu sur le plan industriel par ZSW [9].

1.3.3.3. Les cellules de 3^{ème} génération :

La troisième génération vise à passer la limite maximale de rendement des cellules actuelles, qui est d'environ 30%. Plusieurs concepts sont envisagés pour atteindre cet objectif :

- Superposition de multiples cellules (utilisant des bandes d'énergie différentes).
- Cellules à concentration.
- Utilisation des photons à basse énergie qui ne sont habituellement pas abordés par la cellule.
- Cellules à électrons chauds produisant plus de paires d'électron/trou pour des énergies supérieures à la bande d'énergie.
- Conversion des photons pour ajuster le spectre de la lumière solaire aux caractéristiques du semi-conducteur.

1.3.3.3.1. Les cellules multi-jonctions à fort rendement :

Il est parfois difficile de trouver un matériau absorbant l'ensemble du spectre solaire avec un fort coefficient d'absorption. Les cellules multi-jonction III-V dites (de troisième génération) répondent à cette problématique. En effet, il s'agit de l'empilement de divers composés III-V, chacun optimise pour absorber une partie

du spectre solaire avec efficacité. L'empilement, obtenu par croissance épitaxiale, permet donc de capter une grande partie du spectre solaire, et mène à une cellule unique composée en réalité de plusieurs cellules en série. De part le domaine de spectre solaire dont les photons sont récoltés et la minimisation des pertes dues à la thermalisation, ces cellules permettent d'atteindre les records connus à ce jour en matière de conversion photovoltaïque. Des rendements de plus de 40% ont ainsi été obtenus sous lumière concentrée [11]. Le procédé de fabrication et les matériaux utilisés pour la fabrication de ces cellules entraînent un coût extrêmement élevé qui cantonne ces matériaux à des applications spatiales.

1.3.3.3.2. Les cellules nanocristallines à colorant ou cellules de Grätzel :

Inspirée par la photosynthèse, l'équipe de Michael Grätzel a développé au début des années 1990 des cellules solaires fonctionnant selon un principe différent de celui décrit précédemment [12]. Ces cellules sont composées d'un électrolyte, d'un colorant et d'un oxyde semi-conducteur inorganique. Le meilleur rendement certifié reporté est de 10,4 % pour une cellule de 1 cm² et est à mettre au profit de la société Sharp [11]. Des tests de stabilité effectués montrent que la durée de vie des cellules est de 20 ans en fonctionnement. Cependant, à cause de fuites possibles de l'électrolyte liquide, celui-ci est remplacé par des électrolytes solides pour lesquels les rendements chutent alors à 6,7 % [7].

1.3.3.3.3. Les cellules photovoltaïques organiques :

L'effet photovoltaïque est observé depuis 30 ans dans les matériaux semi-conducteurs organiques. Les premières cellules présentaient des rendements de conversion en énergie très faibles (<10⁻⁵%). En 1986 l'équipe de Tang a montré que les rendements proches du 1% sont atteignables [13]. Le rendement n'a pas été amélioré que depuis le début des années 2000, il a dépassé les quatre pourcent avec les travaux de J. Xue [14], après ça une valeur record de 7.9% est obtenue par la firme SOLARMER, utilisant des matériaux dérivés du fullerène (PCBM) et un copolymère alterne.

1.3.4. Les constituants de base d'une cellule photovoltaïque :

Bien que différentes structures soient envisageables pour l'élaboration des cellules photovoltaïques, des parties similaires sont présentes dans chaque composant (**la figure 1.3**). La partie essentielle de la cellule solaire est la jonction (P-N) de deux régions semi-conductrices; cette jonction est appelée :

→ *Homojonction* : si les deux régions font partie d'un même semi-conducteur.

→ *Hétérojonction* : si les deux régions font partie de deux semi-conducteurs différents.

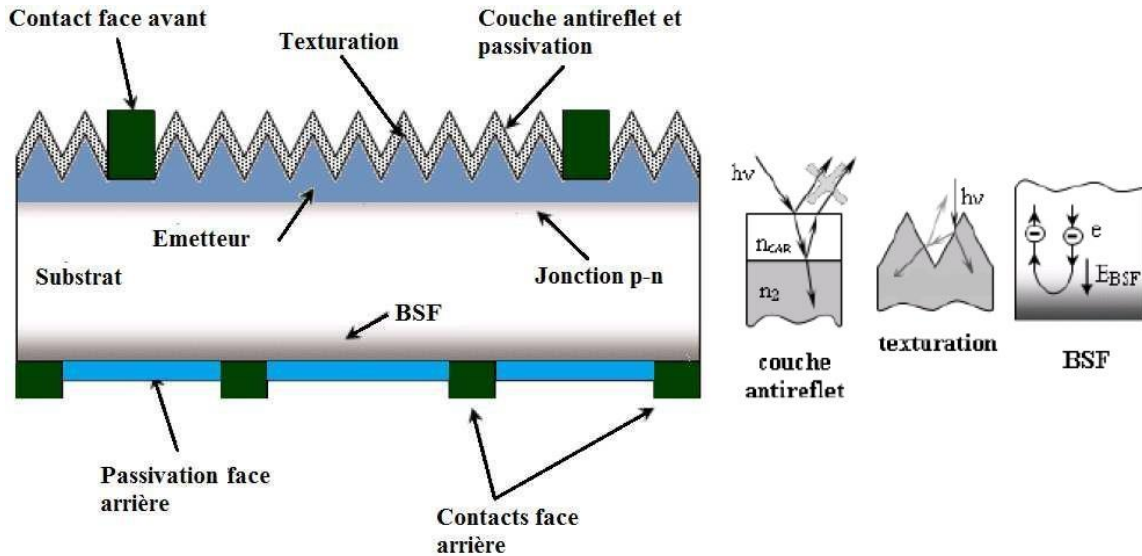


Figure 1.9 : Composition d'une cellule photovoltaïque [17].

Passivation des faces avant et arrière :

La surface des semi-conducteurs contient une densité importante de défauts (liaisons pendantes, impuretés, etc.) entraînant des pertes non négligeables liées à la recombinaison en surface. La passivation consiste à améliorer les qualités électroniques de la surface et du volume du matériau en neutralisant les effets de ses défauts électriquement actifs. Diverses couches de passivation sont utilisées en photovoltaïque mais les principales sont l'Oxyde thermique de Silicium (SiO_2) et le Nitrure de Silicium hydrogéné (SiNx:H).

Couche antireflet :

Pour minimiser la réflexion de la lumière, une couche antireflet (CAR) d'épaisseur (d_{CAR}) et d'indice de réfraction n_{CAR} est utilisée. Le principe d'action des couches antireflet est basé sur l'interférence des faisceaux lumineux dans les couches diélectriques minces. Si l'épaisseur de la couche diélectrique est égale à :

$$d_{CAR} = \frac{(2.N + 1)}{4n_{CAR}}; \quad N = 0, 1, 2, \dots$$

On obtiendra l'annulation des deux faisceaux réfléchis à l'interface air/CAR et l'interface CAR/semi-conducteur (deux rayons réfléchis en opposition de phase).

Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, une double couche antireflet est utilisée (avec deux diélectriques différents) [18].

Différentes CAR sont utilisées en photovoltaïque : TiO_2 , SiO_2 , ZnS , MgF_2 , SiN_x , etc.

Texturation de la surface :

La texturation du silicium est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule. Cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique, généralement de forme pyramidale. La longueur d'onde de la lumière incidente étant inférieure aux dimensions des structures ainsi réalisées, les rayons incidents suivent les lois de l'optique géométrique.

Contacts face avant et arrière :

Les contacts métalliques à l'émetteur et au substrat servent à collecter le courant de porteurs photo générés. Les contacts doivent être ohmiques, c'est-à-dire que la caractéristique $I(V)$ du contact doit être linéaire. La résistance des contacts est un paramètre très important. La forte résistance des contacts augmente la résistance série de la cellule et baisse le facteur de forme et le rendement [19].

Couche BSF :

Le champ électrique arrière (BSF : Back Surface Field) consiste à créer une barrière de potentiel (par exemple, jonction P^+ / p) sur la face arrière de la cellule pour assurer une passivation. La barrière de potentiel induite par la différence de niveau de dopage entre la base et le BSF tend à confiner les porteurs minoritaires dans la base. Ceux-ci sont donc tenus à l'écart de la face arrière qui est caractérisée par une vitesse de recombinaison très élevée.

1.3.5. Recombinaisons :

Les électrons et les trous n'atteignent pas tous les bornes de la cellule. Beaucoup d'électrons remplissent en effet un trou en chemin en retombant dans la bande de valence. Ceci donne lieu à une dissipation de porteurs de charge nommée recombinaison, qui s'oppose à la génération. L'électron chutant émet de l'énergie et fait disparaître de l'intensité électrique. La recombinaison est donc un problème majeur auquel est confronté le fabricant de cellules solaires. Il existe deux types de recombinaisons. Les recombinaisons intrinsèques, telles les recombinaisons radiatives et d'Auger, sont inévitables. En revanche, les recombinaisons extrinsèques, telles les recombinaisons de Shockley-Read-Hall, sont dues à des défauts du matériau, comme les impuretés, les imperfections cristallographiques ou

les radicaux libres présents en surface. Après une présentation du calcul des recombinaisons, ces différents mécanismes seront examinés.

1.3.5.1. Recombinaisons radiatives :

La recombinaison radiative est le phénomène inverse de la création d'un couple électron-trou par absorption d'un photon. Un électron de la bande de valence se recombine directement avec un trou de la bande de conduction et émet un photon (**Figure 1.10**). Le taux brut de ce phénomène est proportionnel aux concentrations n et p . Le taux net de recombinaison radiative U_r est la différence entre les taux brut de recombinaison radiative et de génération de couples électron-trou à l'équilibre thermique. Or ce dernier est égal au taux de recombinaison brut à l'équilibre $B_r n_i^2$, où B_r est une constante valant $4,73 \cdot 10^{-15} \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$ [20,21]. Il s'ensuit les égalités :

$$U_r = B_r(np - n_i^2) = B_r \Delta n(n_0 + p_0 + \Delta n)$$

$$\text{et ainsi } \frac{1}{\tau_r} = B_r(n_0 + p_0 + \Delta n)$$

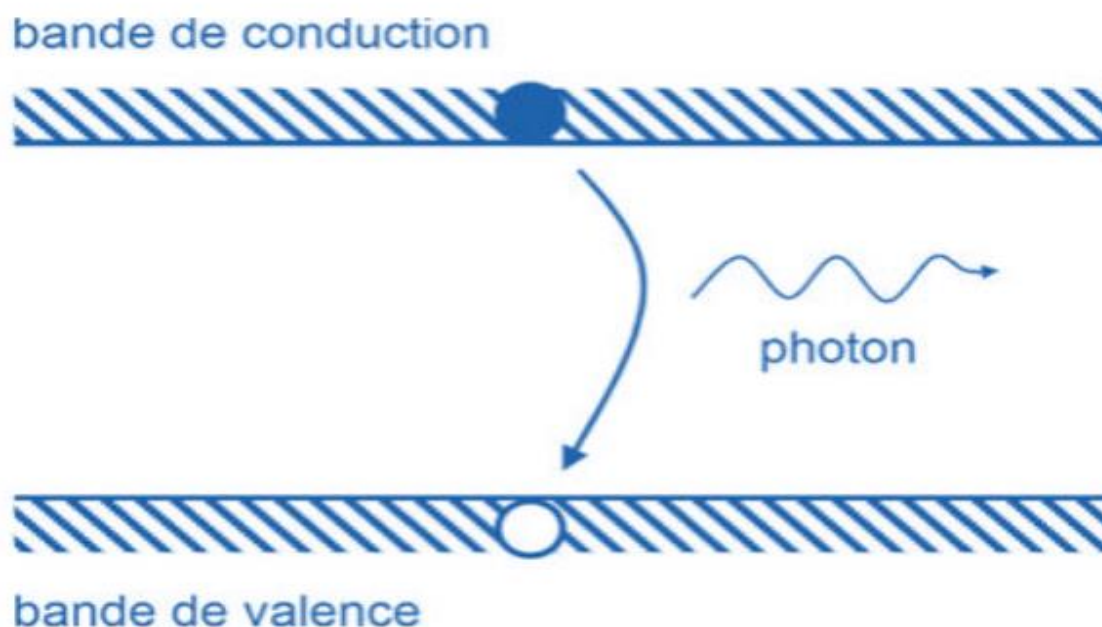


Figure 1.10 : Recombinaison radiative. Traversée directe de la bande interdite par un électron bouchant un trou avec émission d'un photon (d'après [22]).

1.3.5.2. Recombinaisons d'Auger :

Une recombinaison d'Auger implique trois particules. Soit un électron se recombine avec un trou en ayant communiqué de l'énergie à un autre électron,

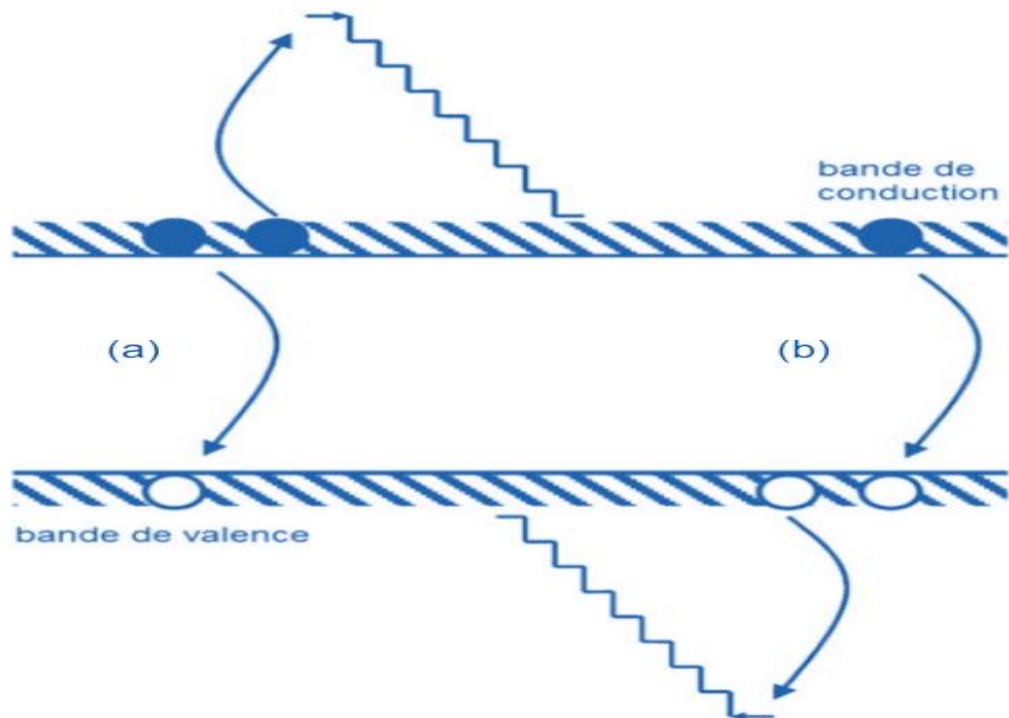
lequel libère ensuite de la chaleur (Fig. 1.11 a), soit un trou se recombine avec un électron et ce faisant communique de l'énergie à un autre trou, lequel libère ensuite lui aussi de la chaleur (Fig. 1.11 b). Ainsi, la recombinaison d'Auger comprend deux mécanismes dépendant chacun de trois concentrations. Puisqu'il n'y a ni recombinaison ni génération nettes, le taux de recombinaison à l'équilibre thermique doit être égal au taux de génération; cela donne les différences de produits de concentrations U_{eeh} et U_{ehh} :

$$U_{eeh} = C_n(n^2p - n_0^2p_0) \text{ et } U_{ehh} = C_p(np^2 - n_0p_0^2)$$

Où C_n et C_p sont les coefficients d'Auger des deux processus. Le temps moyen d'un mécanisme Auger est donc l'inverse de la somme des deux taux de recombinaison :

$$\tau_A = \frac{\Delta n}{C_n(n^2p - n_0^2p_0) + C_p(np^2 - n_0p_0^2)}$$

Figure 1.11 : Recombinaison d'Auger. Traversée de la bande interdite par un



électron se recombinant avec un trou (a) après avoir cédé de l'énergie à un autre électron (b) avant de céder de l'énergie à un autre trou, qui la dissipe ensuite.

1.3.5.3. Recombinaisons de Shockley-Read-Hall :

Ce mécanisme est directement lié à la présence des impuretés et des défauts dans le silicium. Ces impuretés/défauts génèrent un niveau intermédiaire dans le Gap du silicium. En conséquence, ils jouent le rôle de pièges pour les électrons (ou les trous) qui se déplacent de la bande de conduction (ou de valence) vers la bande de valence (ou de conduction). Ce piégeage influence la conductivité du silicium. Les impuretés/défauts peuvent également jouer le rôle d'un centre de recombinaison en piégeant à la fois un électron de la bande de conduction et un trou de la bande de valence, provoquant ainsi la recombinaison des deux [23].

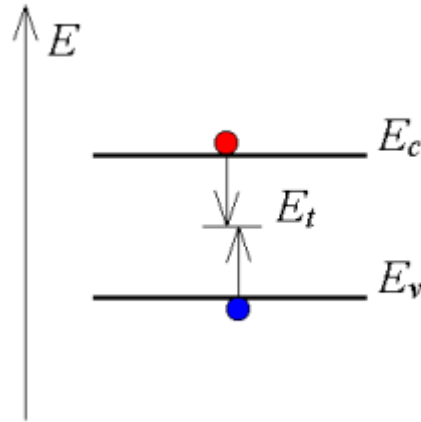


Figure 1.12 : Recombinaison Shockley-Read-Hall (SRH), E_t est une centre de piégeage d'électrons ou de trous.

Le taux de ces recombinaisons SRH par unité de volume via un centre de concentration N_t localisé au niveau E_t dans le gap avec une section de capture des électrons σ_p et des trous σ_n est donné par :

$$R_{SRH}^{volume} = \frac{np - n_{ie}^2}{\tau_{p0}(n + n_1) + \tau_{n0}(p + p_1)} \quad (cm^{-3}.s^{-1})$$

Avec $n_{ie}^2 = n_{ie}^2 e^{\frac{\Delta E_c + \Delta E_v}{KT}}$

n_{ie} : Concentration intrinsèque avec rétrécissement du gap.

ΔE_c et ΔE_v : Représentent les rétrécissements aux bords du gap, causés par le dopage (band gap narrowing).

n_i : Concentration intrinsèque sans effet de rétrécissement du gap.

n_0 et p_0 : les concentrations des porteurs à l'équilibre ($n_i^2 = p_0 n_0$).

n et p sont les concentrations de porteurs hors équilibre :

$$n = n_0 + \Delta n \text{ et } p = p_0 + \Delta n$$

On peut définir n_1 et p_1 par :

$$n_1 = n_{ie} e^{\frac{E_t + E_{Fi}}{KT}} \text{ et } p_1 = p_{ie} e^{\frac{E_t + E_{Fi}}{KT}}$$

E_F est le niveau de Fermi et E_{Fi} le niveau intrinsèque de Fermi localisé proche du milieu du gap.

La durée de vie SRH est donnée par l'équation suivante :

$$\tau_{SRH} = \frac{\Delta n}{R_{SRH}} = \frac{\tau_{n0}(p_0 + p_1 + \Delta n) + \tau_{p0}(n_0 + n_1 + \Delta n)}{C_n(n^2 p - n_0^2 p_0) + C_p(np^2 - n_0 p_0^2)}$$

1.4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié la technologie photovoltaïque, commençant par quelques notions sur le rayonnement solaire. Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques, ses générations et les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque, et par conséquent nous avons développé d'une manière brève les mécanismes de recombinaisons d'un semi-conducteur, et par ailleurs on a mis en évidence les diverses filières technologiques d'une cellule photovoltaïque.

Chapitre 2 :

Modélisation d'une Cellule Photovoltaïque

2.1. Introduction :

La cellule photovoltaïque est représentée généralement par un circuit équivalent dont les paramètres sont calculés expérimentalement en utilisant la caractéristique courant-tension. Dans la littérature, il existe plusieurs types des circuits équivalents de la cellule photovoltaïque.

Dans ce chapitre, on va étudier chaque paramètre qui caractérise une cellule photovoltaïque et formuler des circuits équivalents de façon générale en décrivant les différents modèles électriques des cellules photovoltaïques.

2.2. Paramètres photovoltaïques :

La cellule solaire est caractérisée par un rendement de conversion, une tension à circuit ouvert V_{co} , un courant de court-circuit I_{cc} et un facteur de forme FF. Ces paramètres sont déterminés à partir de la caractéristique courant-tension.

Sous un éclairement donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension $I(V)$ représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule.

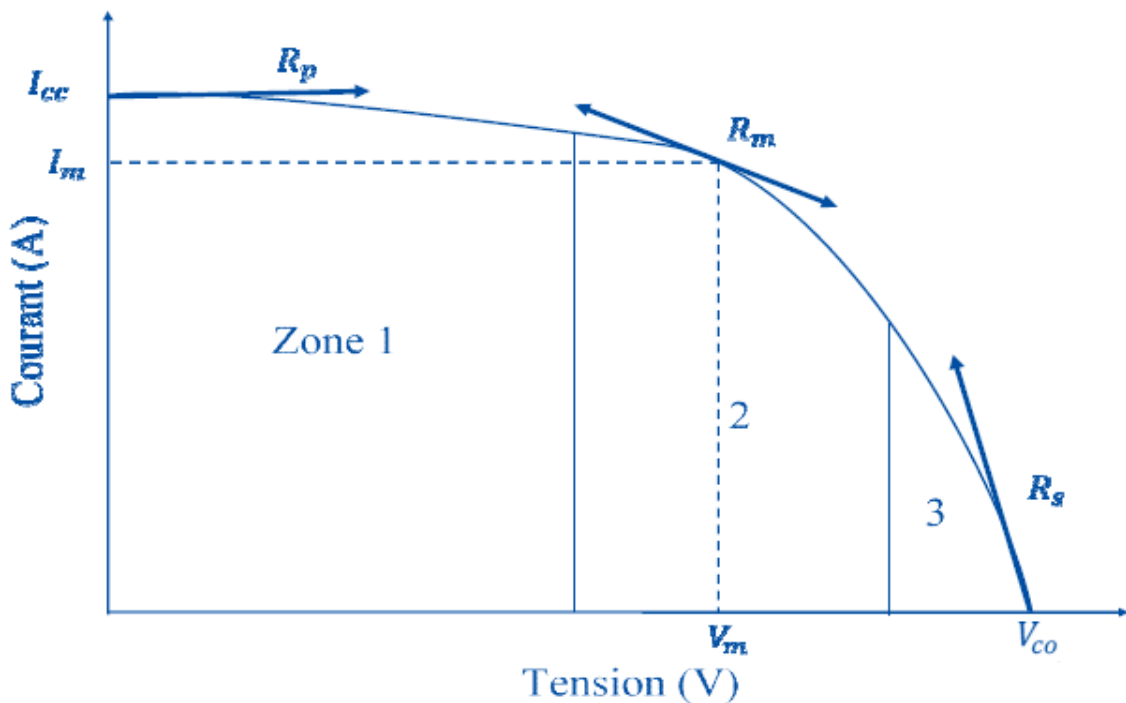


Figure 2.1: Les caractéristiques I-V d'une cellule PV.

La caractéristique $I(V)$ représente les 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) : 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.

Deux grandeurs physiques définissent cette courbe, qui sont, le courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert.

2.2.1. Courant de court-circuit :

Le courant de court-circuit I_{cc} est le courant obtenu quand les bornes de cellule sont peu circuitées ($V = 0$). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement solaire et de la température.

L'expression approchée du courant de court-circuit est donnée par :

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_s}{R_p}}$$

Où :

I_{ph} : Photo courant (A)

R_p : Résistance parallèle.

R_s : Résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours.

2.2.2. Tension en circuit ouvert :

La tension à circuit ouvert V_{co} est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire, de la résistance shunt et de la barrière d'énergie. Sa valeur diminue avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse.

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{I_{cc}}{I_0} + 1\right)$$

Avec :

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

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

T : Température effective de la cellule (Kelvin).

I_0 : Représente le courant de saturation inverse de diode (A).

2.2.3. La puissance optimale d'une cellule photovoltaïque :

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température, vitesse de circulation de l'air ambiant, etc.), la puissance électrique P disponible aux bornes d'une cellule PV est égale au produit du courant continu fourni I par la tension continue de la cellule V .

$$P = I \times V$$

2.2.3.1. Caractéristique $P(V)$ d'une cellule photovoltaïque :

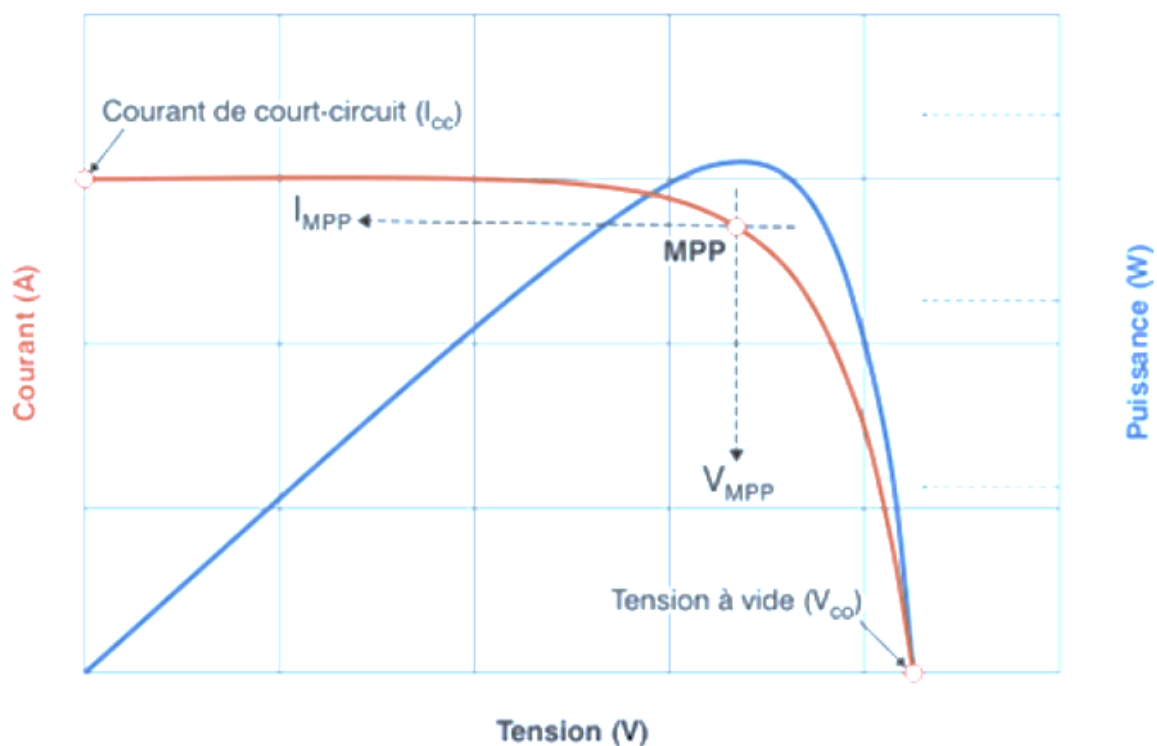


Figure 2.2: Caractéristique puissance-tension et courant-tension d'une cellule PV.

A partir de la caractéristique courant-tension, il est intéressant de dessiner le graphe de la puissance en fonction de la tension V (figure (2.2)), qu'on appelle aussi caractéristique puissance-tension.

2.2.4. Facteur de forme :

Un paramètre important est 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 facteur de forme, encore souvent appelé par sa dénomination anglaise « Fill Factor » correspond à la puissance maximum délivrée par la cellule, divisée par la puissance formée par le produit $V_{co} I_{cc}$, correspondant à la puissance maximale idéale. Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales.

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} I_{cc}}$$

2.2.5. Rendement de conversion d'énergie :

Le rendement η des cellules PV, désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme le rapport de la puissance maximale fournie par la cellule à la puissance lumineuse d'incident.

$$\eta = \frac{V_m I_m}{E A}$$

A est la surface génératrice en m^2 et E l'ensoleillement en W/m^2 .

(I_m , V_m): Coordonnées du point de fonctionnement.

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert.

2.3. Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque PV :

Les différents modèles à comparer sont les modèles à une exponentielle (le modèle à 4 paramètres 1E4P, le modèle 5 à paramètres 1E5P, le modèle à 3 paramètres 1E3P, et les modèles à deux exponentielles (le modèle à 7 paramètres 2E7P, le modèle à 6 paramètres 2E6P et le modèle à 5 paramètres 2E5P).

2.3.1. Modèles à une diode :

2.3.1.1. Modèle à une diode avec trois paramètres :

Une Cellule photovoltaïque idéale peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode. Nous allons donner le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque à trois paramètres à une seule diode comme il est illustré sur la figure 2.3.

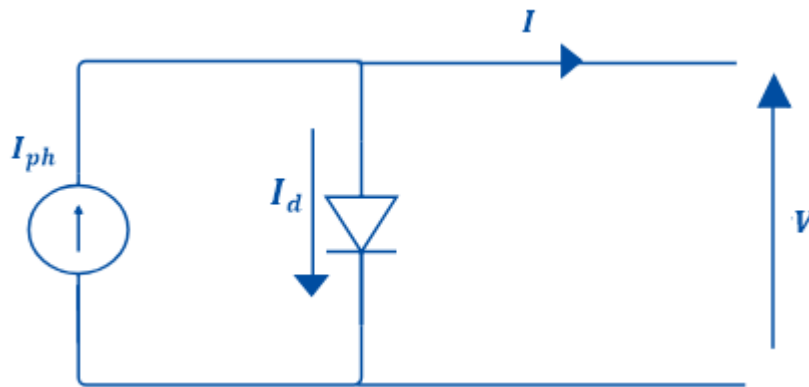


Figure 2.3 : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode avec trois paramètres.

Les trois paramètres de ce circuit sont : Photo-courant ($I_{ph}(A)$), Facteur d'idéalité (n) et Le courant de saturation inverse de la diode ($I_0 (A)$). Grâce au schéma équivalent (figure 2.3) en appliquant les lois de Kirchhoff, et finalement, on obtient les équations suivantes :

$$I_{ph} - I_d = 0 \Rightarrow I = I_{ph} - I_d$$

Le courant de la diode est donné par la formule suivante :

$$I_d = I_0 \left(\exp \left(\frac{qV}{KTn} \right) - 1 \right)$$

Et après des simplifications, on obtient :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp \left(\frac{qV}{KTn} \right) - 1 \right)$$

2.3.1.2. Modèle à une diode avec quatre paramètres :

Le modèle à quatre paramètres traite la cellule PV comme une source de courant, dépendante l'éclairement, connecté en parallèle avec une diode en série avec une résistance série R_s . La figure 2.4 illustre le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque à quatre paramètres à une diode.

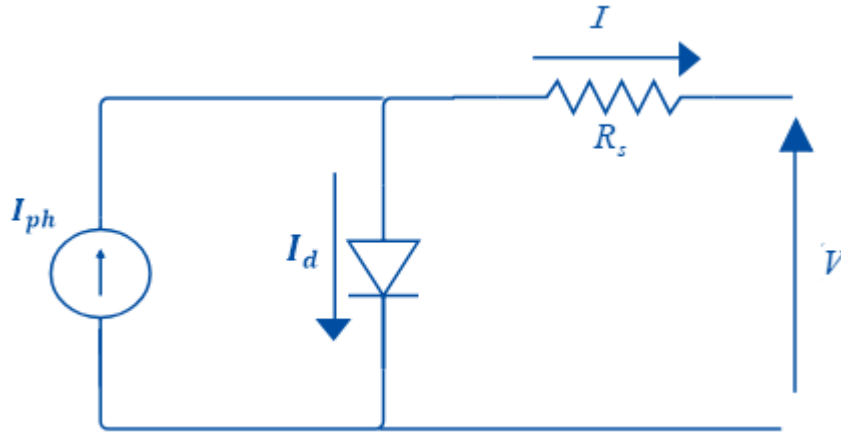


Figure 2.4 : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode avec quatre paramètres.

La différence de ce modèle par rapport au modèle précédent c'est le quatrième paramètre qui est la résistance $R_s(\Omega)$, cette dernière représente une perte de tension en sortie.

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir des lois de Kirchhoff :

$$I_{ph} - I_d = 0$$

Le courant de diode est donné par la formule suivante :

$$I_d = I_o \left(\exp \left(q \frac{(V + R_s I)}{KTn} \right) - 1 \right)$$

Finalement on obtient l'équation générale de ce modèle :

$$I = I_{ph} - I_o \left(\exp \left(q \frac{(V + R_s I)}{KTn} \right) - 1 \right)$$

2.3.1.3. Modèle à une diode avec cinq paramètres :

Dans le cas d'une cellule PV réelle, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite.

On modélise donc cette perte de tension par une résistance R_s et les courants de fuite par une résistance parallèle R_p . La différence de ce modèle par rapport au modèle précédent c'est le cinquième paramètre qui est la résistance $R_p(\Omega)$.

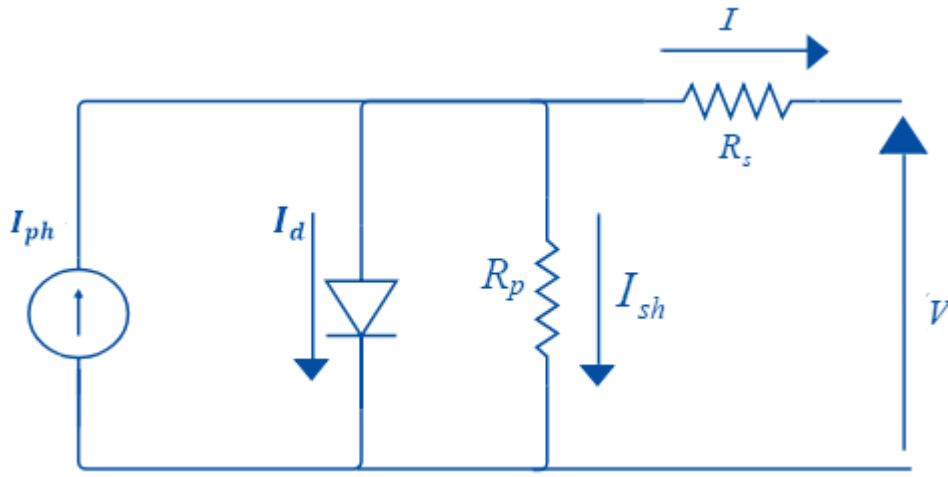


Figure 2.5 : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode avec cinq paramètres.

Grâce au schéma équivalent (figure 2.5) et en utilisant les lois de Kirchhoff on aura les équations suivantes :

$$I = I_{ph} - I_{sh} - I_d$$

Le courant de la diode est donné par la formule suivante :

$$I_d = I_o \left(\exp \left(q \frac{(V + R_s I)}{KTn} \right) - 1 \right)$$

Le courant de la résistance parallèle est donné par la relation :

$$I_{sh} = \frac{V + IR_s}{R_p}$$

On obtient l'équation générale de ce modèle :

$$I = I_{ph} - \frac{V + IR_s}{R_p} - I_o \left(\exp \left(q \frac{(V + R_s I)}{KTn} \right) - 1 \right)$$

2.3.2. Modèles à deux diodes :

2.3.2.1. Modèle à deux diodes avec cinq paramètres :

Nous avons, cette fois-ci, deux diodes, et le circuit équivalent de ce modèle est obtenu en utilisant un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes, comme il est illustré sur la figure (2.6).

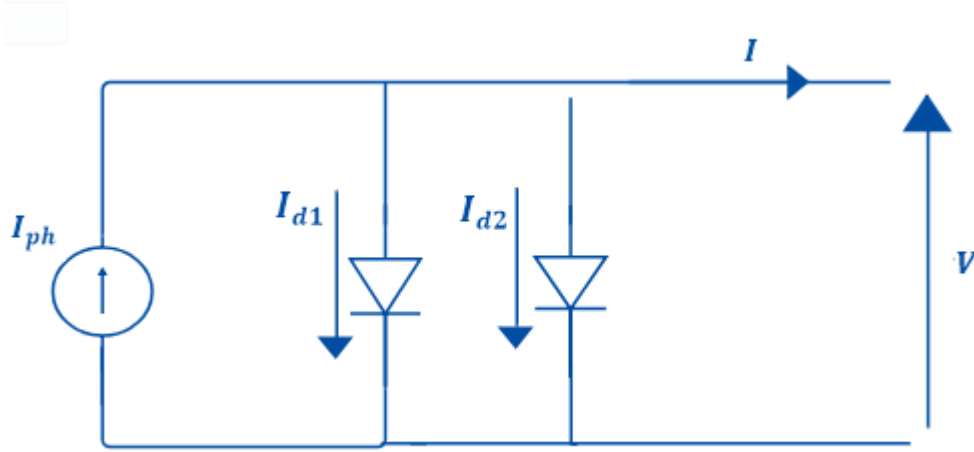


Figure 2.6 : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes avec cinq paramètres.

Les cinq paramètres de ce circuit sont : photo-courant ($I_{ph}(A)$), facteur d'idéalité de diode 1 (n_1), Facteur d'idéalité de diode 2 (n_2), le courant de saturation inverse de la diode 1 (I_{01} (A)) et le courant de saturation inverse de la diode 2 (I_{02} (A)). Grâce au schéma équivalent (figure 2.6) et en utilisant les lois de Kirchhoff on obtient les équations suivantes :

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2}$$

Les diodes étant des éléments, sa caractéristique I-V est donnée par les relations :

$$I_{d1} = I_{01} \left(\exp \left(\frac{qV}{KTn_1} \right) - 1 \right)$$

$$I_{d2} = I_{02} \left(\exp \left(\frac{qV}{KTn_2} \right) - 1 \right)$$

On obtient l'équation générale de ce modèle :

$$I = I_{ph} - I_{01} \left(\exp \left(\frac{qV}{KTn_1} \right) - 1 \right) - I_{02} \left(\exp \left(\frac{qV}{KTn_2} \right) - 1 \right)$$

2.3.2.2. Modèle à deux diodes avec six paramètres :

Le modèle à deux diodes avec six paramètres traite la cellule PV comme une source de courant, dépendante de l'éclairement, branchée avec deux diodes en parallèle et une résistance R_s . Le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque à deux diodes avec six paramètres est illustré sur la figure (2.7).

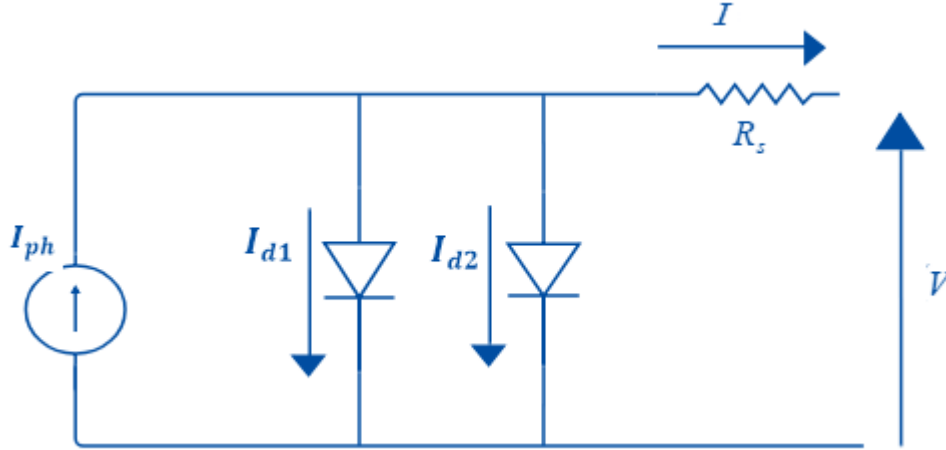


Figure 2.7 : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes avec six paramètres.

La différence de ce modèle par rapport au modèle précédent c'est le sixième paramètre qui est la résistance R_s .

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir des lois de Kirchhoff :

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2}$$

Les diodes étant des éléments, sa caractéristique $I(V)$ est donnée par les relations :

$$I_{d1} = I_{01} \left(\exp \left(q \frac{(V + R_s I)}{K T n_1} \right) - 1 \right)$$

$$I_{d2} = I_{02} \left(\exp \left(q \frac{(V + R_s I)}{K T n_2} \right) - 1 \right)$$

On obtient l'équation générale de ce modèle :

$$I = I_{ph} - I_{01} \left(\exp \left(q \frac{(V + R_s I)}{K T n_1} \right) - 1 \right) - I_{02} \left(\exp \left(q \frac{(V + R_s I)}{K T n_2} \right) - 1 \right)$$

2.3.2.3. Modèle à deux diodes avec sept paramètres :

Le modèle à sept paramètres se compose d'une résistance parallèle R_p , une résistance série R_s et deux diodes pour la polarisation de la cellule et le phénomène de la recombinaison des porteurs minoritaires (figure 2.8).

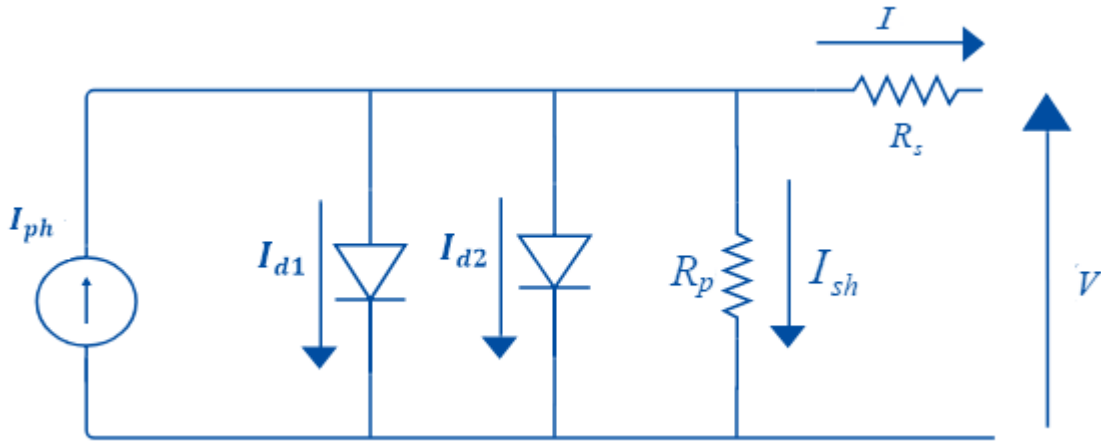


Figure 2.8 : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes avec sept paramètres.

La relation liant le courant à la tension dans ce cas est :

$$I = I_{ph} - I_{sh} - I_{d1} - I_{d2}$$

Où les courants I_{d1} et I_{d2} sont donnés par :

$$I_{d1} = I_{01} \left(\exp \left(q \frac{(V + R_s I)}{K T n_1} \right) - 1 \right)$$

$$I_{d2} = I_{02} \left(\exp \left(q \frac{(V + R_s I)}{K T n_2} \right) - 1 \right)$$

Le courant de la résistance parallèle est donné par la relation :

$$I_{sh} = \frac{V + I R_s}{R_p}$$

On obtient l'équation générale de ce modèle :

$$I = I_{ph} - \frac{V + I R_s}{R_p} - I_{01} \left(\exp \left(q \frac{(V + R_s I)}{K T n_1} \right) - 1 \right) - I_{02} \left(\exp \left(q \frac{(V + R_s I)}{K T n_2} \right) - 1 \right)$$

2.4. Conclusion :

Dans le présent chapitre, nous avons étudié les paramètres qui caractérisent une cellule PV, et nous avons exposé les six modèles principaux, chaque modèle est présenté par un circuit équivalent basé sur la modélisation mathématique de la courbe courant-tension.

Chapitre 3 :

Simulation d'une Cellule Photovoltaïque par Matlab

3.1. Introduction :

La première partie de ce chapitre sera consacrée à la simulation d'une cellule photovoltaïque, on fera l'étude d'un circuit équivalent pour un modèle à deux exponentielles à sept paramètres, et en utilisant le logiciel Matlab, on obtiendra la caractéristique $I(V)$ de la cellule, ensuite on étudiera l'influence de chaque paramètre sur les performances de la cellule : la température, résistance série, résistance parallèle et facteur d'idéalité.

Et dans la deuxième partie, on va analyser les résultats obtenus de cette simulation.

3.2. MATLAB :

MATLAB pour MATrix LABoratory, est une application qui a été conçue afin de fournir un environnement de calcul matriciel simple, efficace, interactif et portable, permettant la mise en œuvre des algorithmes développés, il permet de manipuler des matrices, d'afficher des courbes et des données, de mettre en œuvre des algorithmes, de créer des interfaces utilisateurs, et peut s'interfacer avec d'autres langages comme le C, C++, Java, et Fortran. Matlab est constitué d'un noyau relativement réduit, capable d'interpréter puis d'évaluer les expressions numériques matricielles qui lui sont adressées (appelées m-files ou fichiers.m) et exécutées depuis la fenêtre de commande. Ce noyau est complété par une bibliothèque de fonctions prédéfinies, très souvent sous forme de fichiers m-files, et regroupés en paquets ou toolboxes. A côté des toolboxes requises Local et Matlab, il est possible d'ajouter des toolboxes spécifiques à tel ou tel problème mathématique, Optimization Toolbox, Signal Processing Toolbox par exemple, ou encore des toolboxes créées par l'utilisateur lui-même. Ces caractéristiques (et d'autres encore) font aujourd'hui de Matlab un standard incontournable en milieu académique, dans la recherche et l'industrie.

3.3. Simulation par Matlab :

3.3.1. Modèle choisi :

Le modèle choisi c'est le modèle de deux diodes à sept paramètres (2E7P) (Figure 3.1).

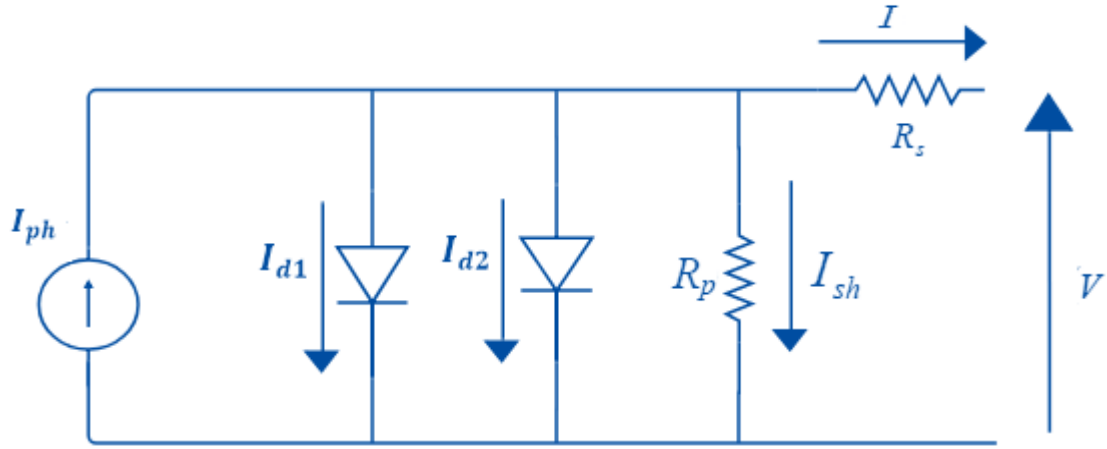


Figure 3.1 : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes avec sept paramètres.

Comme on a montré dans le chapitre 2, l'équation générale de ce modèle s'écrit sous la forme :

$$I = I_{ph} - \frac{V + IR_s}{R_p} - I_{01} \left(\exp \left(q \frac{(V + R_s I)}{KTn_1} \right) - 1 \right) - I_{02} \left(\exp \left(q \frac{(V + R_s I)}{KTn_2} \right) - 1 \right)$$

On pose $V_{th} = \frac{K_B \cdot T}{q}$

Avec V_{th} tension thermique.

$$I = I_{ph} - \frac{V + IR_s}{R_p} - I_{01} \left(\exp \left(\frac{(V + R_s I)}{V_{th} n_1} \right) - 1 \right) - I_{02} \left(\exp \left(\frac{(V + R_s I)}{V_{th} n_2} \right) - 1 \right)$$

Et on a pris $I_{d1} = I_{d2}$ comme approximation [25], d'où $I_{01} = I_{02}$ et $n_1 = n_2$

L'équation devient:

$$I = I_{ph} - I_{sh} - I_d$$

$$I_d = I_{d1} + I_{d2} \text{ Avec } I_{d1} = I_{d2} = I_0 (\exp(W(V + R_s I)) - 1)$$

$$\text{Et } I_0 = I_{01} + I_{02}$$

$$I = I_{ph} - I_{sh} - I_0 (\exp(W(V + R_s I)) - 1)$$

$$\text{Avec } W = \frac{1}{V_{th} \cdot n}$$

$$\text{Et } I_{sh} = \frac{V + IR_s}{R_p}$$

Le photo-courant représente le générateur idéal de courant en faisant $I=0$ ($V=V_{co}$) :

$$I_{ph} = \frac{V_{co}}{R_p} + I_0(\exp(WV) - 1)$$

Le courant de saturation I_0 :

$$I_0 = I_{01} + I_{02}$$

$$I_{01} = I_{02} = \frac{\left(I_{cc} \left(1 + \frac{R_s}{R_p} \right) - \frac{V_{co}}{R_p} \right)}{\exp(WV) - 1}$$

3.3.2. Paramètres utilisés :

Les paramètres utilisés dans cette simulation sont tirés d'un travail expérimental de Masaki et Tatsuo (Tableau 3.1) [24], et aussi les fiches techniques des cellules formées par les constructeurs (Data Sheet) [28].

Sans oublier que le travail expérimental et les fiches techniques ont travaillé sur une cellule solaire sensibilisée par colorant à base de dioxyde de titane (TiO_2).

Paramètres	I_{cc}	V_{co}	n	R_s	R_p
Valeurs	0.0024 A	0.699 V	2.5	38.1 Ω	3683 Ω

Tableau 3.1 : Différents paramètres par Masaki et Tatsuo.

3.3.3. Programme de simulation :

3.3.3.1. Caractéristique I(V) d'une cellule PV :

```
%*****  
clear all,  
%*****  
Icc=0.0024;Vco=0.699;Rs=38.1;Rp=3683;  
K=1.38e-23;T=298;q=1.6e-19;n=2.5;  
W=q/(n*K*T);  
Io1=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));  
Io2=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));  
Io=Io1+Io2;  
Iph=Vco/Rp+Io*exp(W*Vco);  
V=0; k=0; I=Icc;  
while I>=0;  
Id1=Io*(exp(W*(V+Rs*I))-1);  
Id2=Io*(exp(W*(V+Rs*I))-1);  
Id=Id1+Id2;  
Ish=(V+Rs*I)/(Rp);  
I=Icc-Id-Ish;  
if I>=0; k=k+1; II(k)=I; IIs(k)=Ish; VV(k)=V;  
IIs(k)=Icc; IId(k)=Id; end;  
V=V+0.01; end;  
VV=[VV Vco]; II=[II 0];  
plot(VV,II,'r'); hold on;grid on  
xlabel(' Tension ( V ) ');  
ylabel(' Courant ( A ) ');  
PP=VV.*II;  
[Pmax,j]=max(PP)  
Imax=II(j)  
Vmax=VV(j)  
plot(VV(j),II(j),'*'); hold on;  
text(0.41,0.0019448,'P_{m}')
```

3.3.3.2. Influence de la température sur la caractéristique I(V) :

```

%Pour T=298k
hold on;
Icc=0.00234;Vco=0.7;Rs=38.1;Rp=3683;
K=1.38e-23;T=298;q=1.6e-19;n=2.5;
W=q/(n*K*T);
Io1=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Io2=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Io=Io1+Io2;
Iph=Vco/Rp+Io*exp(W*Vco);
V=0; k=0; I=Icc;
while I>=0;
Id1=Io*(exp(W*(V+Rs*I))-1);
Id2=Io*(exp(W*(V+Rs*I))-1);
Id=Id1+Id2;
Ish=(V+Rs*I)/(Rp); I=Icc-Id-Ish;
if I>=0; k=k+1; II(k)=I; IIsh(k)=Ish; VV(k)=V;
IIPH(k)=Icc; IID(k)=Id; end;
V=V+0.01; end;
VV=[VV Vco]; II=[II 0];
plot(VV,II,'b'); hold on;grid on
xlabel(' tension ( V ) ');
ylabel(' Courant ( A ) ');
%Pour T=318k
hold on;
Icc=0.00236;Vco=0.65;Rs=38.1;Rp=3683;
K=1.38e-23;T=318;q=1.6e-19;n=2.5;
W=q/(n*K*T);
Io1=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Io2=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Io=Io1+Io2;
Iph=Vco/Rp+Io*exp(W*Vco);
V=0; k=0; I=Icc;
while I>=0;
Id1=Io*(exp(W*(V+Rs*I))-1);
Id2=Io*(exp(W*(V+Rs*I))-1);
Id=Id1+Id2;
Ish=(V+Rs*I)/(Rp); I=Icc-Id-Ish;

```

```

if I>=0; k=k+1; II(k)=I; IISH(k)=Ish; VV(k)=V;
IIph(k)=Icc; IId(k)=Id; end;
V=V+0.01; end;
VV=[VV Vco]; II=[II 0];
plot(VV,II,'r'); hold on; grid on
xlabel(' tension ( V ) ');
ylabel(' Courant ( A ) ');
%Pour T=338K
hold on;
Icc=0.00238;Vco=0.5;Rs=38.1;Rp=3683;
K=1.38e-23;T=338;q=1.6e-19;n=2.5;
W=q/(n*K*T);
Io1=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Io2=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Io=Io1+Io2;
Iph=Vco/Rp+Io*exp(W*Vco);
V=0; k=0; I=Icc;
while I>=0;
Id1=Io*(exp(W*(V+Rs*I))-1);
Id2=Io*(exp(W*(V+Rs*I))-1);
Id=Id1+Id2;
Ish=(V+Rs*I)/(Rp); I=Icc-Id-Ish;
if I>=0; k=k+1; II(k)=I; IISH(k)=Ish; VV(k)=V;
IIph(k)=Icc; IId(k)=Id; end;
V=V+0.01; end;
VV=[VV Vco]; II=[II 0];
plot(VV,II,'g'); hold on; grid on
xlabel(' tension ( V ) ');
ylabel(' Courant ( A ) ');
%T=358 K
hold on;
Icc=0.0024;Vco=0.55;Rs=38.1;Rp=3683;
K=1.38e-23;T=358;q=1.6e-19;n=2.5;
W=q/(n*K*T);
Io1=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Io2=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Io=Io1+Io2;
Iph=Vco/Rp+Io*exp(W*Vco);
V=0; k=0; I=Icc;
while I>=0;

```

```

Id1=Io*(exp(W*(V+Rs*I))-1);
Id2=Io*(exp(W*(V+Rs*I))-1);
Id=Id1+Id2;
Ish=(V+Rs*I)/(Rp); I=Icc-Id-Ish;
if I>=0; k=k+1; II(k)=I; IIsh(k)=Ish; VV(k)=V;
IIph(k)=Icc; IId(k)=Id; end;
V=V+0.01; end;
VV=[VV Vco]; II=[II 0];
plot(VV,II,'k'); hold on; grid on
xlabel(' tension ( V ) ');
ylabel(' Courant ( A ) ');
legend('T1=298 K', 'T2=318 K', 'T3=338 K', 'T4=358 K', 'Location', 'southwest')

```

3.3.3.3. Influence de la résistance série sur la caractéristique I(V) :

```

%Pour Rs=28 Ohm
Icc=0.0024;Vco=0.699;Rs=28;Rp=3683;
K=1.38e-23;T=298;q=1.6e-19;n=2.5;
W=q/(n*K*T);
Io1=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Io2=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Io=Io1+Io2;
Iph=Vco/Rp+Io*exp(W*Vco);
V=0; k=0; I=Icc;
while I>=0;
Id1=Io*(exp(W*(V+Rs*I))-1);
Id2=Io*(exp(W*(V+Rs*I))-1);
Id=Id1+Id2;
IRp=(V+Rs*I)/(Rp); I=Icc-Id-IRp;
if I>=0; k=k+1; II(k)=I; IIRp(k)=IRp; VV(k)=V;
IIph(k)=Icc; IId(k)=Id; end;
V=V+0.01; end;
VV=[VV Vco]; II=[II 0];
plot(VV,II,'g'); hold on; grid on
xlabel(' tension ( V ) ');
ylabel(' Courant ( A ) ');
%Pour Rs=38 Ohm
Icc=0.0024;Vco=0.699;Rs=38;Rp=3683;
K=1.38e-23;T=298;q=1.6e-19;n=2.5;
W=q/(n*K*T);

```

```

Io1=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Io2=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Io=Io1+Io2;
Iph=Vco/Rp+Io*exp(W*Vco);
V=0; k=0; I=Icc;
while I>=0;
Id1=Io*(exp(W*(V+Rs*I))-1);
Id2=Io*(exp(W*(V+Rs*I))-1);
Id=Id1+Id2;
IRp=(V+Rs*I)/(Rp); I=Icc-Id-IRp;
if I>=0; k=k+1; II(k)=I; IIRp(k)=IRp; VV(k)=V;
IIPH(k)=Icc; IID(k)=Id; end;
V=V+0.01; end;
VV=[VV Vco]; II=[II 0];
plot(VV,II,'b'); hold on; grid on
xlabel(' tension ( V ) ');
ylabel(' Courant ( A ) ');
%Pour Rs=48 Ohm
Icc=0.0024;Vco=0.699;Rs=48;Rp=3683;
K=1.38e-23;T=298;q=1.6e-19;n=2.5;
W=q/(n*K*T);
Io1=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Io2=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Io=Io1+Io2;
Iph=Vco/Rp+Io*exp(W*Vco);
V=0; k=0; I=Icc;
while I>=0;
Id1=Io*(exp(W*(V+Rs*I))-1);
Id2=Io*(exp(W*(V+Rs*I))-1);
Id=Id1+Id2;
IRp=(V+Rs*I)/(Rp); I=Icc-Id-IRp;
if I>=0; k=k+1; II(k)=I; IIRp(k)=IRp; VV(k)=V;
IIPH(k)=Icc; IID(k)=Id; end;
V=V+0.01; end;
VV=[VV Vco]; II=[II 0];
plot(VV,II,'r'); hold on; grid on
xlabel(' Tension ( V ) ');
ylabel(' Courant ( A ) ');
%Pour Rs=58 Ohm
Icc=0.0024;Vco=0.699;Rs=58;Rp=3683;

```



```

K=1.38e-23;T=298;q=1.6e-19;n=2.5;
W=q/(n*K*T);
Io1=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Io2=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Io=Io1+Io2;
Iph=Vco/Rp+Io*exp(W*Vco);
V=0; k=0; I=Icc;
while I>=0;
Id1=Io*(exp(W*(V+Rs*I))-1);
Id2=Io*(exp(W*(V+Rs*I))-1);
Id=Id1+Id2;
IRp=(V+Rs*I)/(Rp); I=Icc-Id-IRp;
if I>=0; k=k+1; II(k)=I; IIRp(k)=IRp; VV(k)=V;
IIPH(k)=Icc; IID(k)=Id; end;
V=V+0.01; end;
VV=[VV Vco]; II=[II 0];
plot(VV,II,'k'); hold on; grid on
xlabel(' Tension ( V ) ');
ylabel(' Courant ( A ) ');
legend('R_{s}=28 (Ohm)','R_{s}=38 (Ohm)','R_{s}=48 (Ohm)','R_{s}=58 (Ohm)',
'Location','southwest' )

```

3.3.3.4. Influence de la résistance parallèle sur la caractéristique I(V) :

```

%Pour Rp=2000 Ohm
Icc=0.0024;Vco=0.699;Rs=38.1;Rp=2000;
K=1.38e-23;T=298;q=1.6e-19;n=2.5;
W=q/(n*K*T);
Io1=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Io2=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Io=Io1+Io2;
Iph=Vco/Rp+Io*exp(W*Vco);
V=0; k=0; I=Icc;
while I>=0;
Id1=Io*(exp(W*(V+Rs*I))-1);
Id2=Io*(exp(W*(V+Rs*I))-1);
Id=Id1+Id2;
Ish=(V+Rs*I)/(Rp); I=Icc-Id-Ish;
if I>=0; k=k+1; II(k)=I; IISH(k)=Ish; VV(k)=V;
IIPH(k)=Icc; IID(k)=Id; end;

```

```

VV=[VV Vco]; II=[II 0];
plot(VV,II,'b'); hold on; grid on
xlabel(' Tension ( V ) ');
ylabel(' Courant ( A ) ');
%Pour Rp=3000 Ohm
Icc=0.0024; Vco=0.699; Rs=38.1; Rp=3000;
K=1.38e-23; T=298; q=1.6e-19; n=2.5;
W=q/(n*K*T);
Io1=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Io2=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Io=Io1+Io2;
Iph=Vco/Rp+Io*exp(W*Vco);
V=0; k=0; I=Icc;
while I>=0;
Id1=Io*(exp(W*(V+Rs*I))-1);
Id2=Io*(exp(W*(V+Rs*I))-1);
Id=Id1+Id2;
Ish=(V+Rs*I)/(Rp); I=Icc-Id-Ish;
if I>=0; k=k+1; II(k)=I; IIsh(k)=ISH; VV(k)=V;
Iph(k)=Icc; IId(k)=Id; end;
V=V+0.01; end;
VV=[VV Vco]; II=[II 0];
plot(VV,II,'r'); hold on; grid on
xlabel(' Tension ( V ) ');
ylabel(' Courant ( A ) ');
%Pour Rp=4000 Ohm
Icc=0.0024; Vco=0.699; Rs=38.1; Rp=4000;
K=1.38e-23; T=298; q=1.6e-19; n=2.5;
W=q/(n*K*T);
Io1=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Io2=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Io=Io1+Io2;
Iph=Vco/Rp+Io*exp(W*Vco);
V=0; k=0; I=Icc;
while I>=0;
Id1=Io*(exp(W*(V+Rs*I))-1);
Id2=Io*(exp(W*(V+Rs*I))-1);
Id=Id1+Id2;
Ish=(V+Rs*I)/(Rp); I=Icc-Id-Ish;
if I>=0; k=k+1; II(k)=I; IIsh(k)=Ish; VV(k)=V;

```

```

Iph(k)=Icc; Id(k)=Id; end;
V=V+0.01; end;
VV=[VV Vco]; II=[II 0];
plot(VV,II,'g'); hold on; grid on
xlabel(' Tension ( V ) ');
ylabel(' Courant ( A ) ');
%Pour Rp=6000 Ohm
Icc=0.0024; Vco=0.699; Rs=38.1; Rp=6000;
K=1.38e-23; T=298; q=1.6e-19; n=2.5;
W=q/(n*K*T);
Io1=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Io2=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Io=Io1+Io2;
Iph=Vco/Rp+Io*exp(W*Vco);
V=0; k=0; I=Icc;
while I>=0;
Id1=Io*(exp(W*(V+Rs*I))-1);
Id2=Io*(exp(W*(V+Rs*I))-1);
Id=Id1+Id2;
Ish=(V+Rs*I)/(Rp); I=Icc-Id-Ish;
if I>=0; k=k+1; II(k)=I; Ish(k)=Ish; VV(k)=V;
Iph(k)=Icc; Id(k)=Id; end;
V=V+0.01; end;
VV=[VV Vco]; II=[II 0];
plot(VV,II,'k'); hold on; grid on
xlabel(' Tension ( V ) ');
ylabel(' Courant ( A ) ');
legend('R_{p1}=2000(Ohm)', 'R_{p2}=3000(Ohm)', 'R_{p3}=4000(Ohm)', 'R_{p4}=6000 (Ohm)', 'Location','southwest')

```

3.3.3.5. Influence de facteur d'idéalité sur la caractéristique I(V) :

```

%Pour n=1
Icc=0.0024; Vco=0.699; Rs=28.1; Rp=3683;
K=1.38e-23; T=298; q=1.6e-19; n=1;
W=q/(n*K*T);
Io1=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Io2=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Io=Io1+Io2;

```

```

Iph=Vco/Rp+Io*exp(W*Vco);
V=0; k=0; I=Icc;
while I>=0;
Id1=Io*(exp(W*(V+Rs*I))-1);
Id2=Io*(exp(W*(V+Rs*I))-1);
Id=Id1+Id2;
Ish=(V+Rs*I)/(Rp); I=Icc-Id-Ish;
if I>=0; k=k+1; II(k)=I; IIsh(k)=Ish; VV(k)=V;
IIph(k)=Icc; IId(k)=Id; end;
V=V+0.01; end;
VV=[VV Vco]; II=[II 0];
plot(VV,II,'g'); hold on; grid on
xlabel(' tension ( V ) ');
ylabel(' Courant ( A ) ');
%Pour n=1.5
Icc=0.0024;Vco=0.699;Rs=28.1;Rp=3683;
K=1.38e-23;T=298;q=1.6e-19;n=1.5;
W=q/(n*K*T);
Io1=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Io2=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Io=Io1+Io2;
Iph=Vco/Rp+Io*exp(W*Vco);
V=0; k=0; I=Icc;
while I>=0;
Id1=Io*(exp(W*(V+Rs*I))-1);
Id2=Io*(exp(W*(V+Rs*I))-1);
Id=Id1+Id2;
Ish=(V+Rs*I)/(Rp); I=Icc-Id-Ish;
if I>=0; k=k+1; II(k)=I; IIsh(k)=Ish; VV(k)=V;
IIph(k)=Icc; IId(k)=Id; end;
V=V+0.01; end;
VV=[VV Vco]; II=[II 0];
plot(VV,II,'b'); hold on; grid on
xlabel(' tension ( V ) ');
ylabel(' Courant ( A ) ');
%Pour n=2
Icc=0.0024;Vco=0.699;Rs=28.1;Rp=3683;
K=1.38e-23;T=298;q=1.6e-19;n=2;
W=q/(n*K*T);
Io1=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));

```

```

Io2=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Io=Io1+Io2;
Iph=Vco/Rp+Io*exp(W*Vco);
V=0; k=0; I=Icc;
while I>=0;
Id1=Io*(exp(W*(V+Rs*I))-1);
Id2=Io*(exp(W*(V+Rs*I))-1);
Id=Id1+Id2;
Ish=(V+Rs*I)/(Rp); I=Icc-Id-IRsh;
if I>=0; k=k+1; II(k)=I; IIsh(k)=Ish; VV(k)=V;
IIPH(k)=Icc; IID(k)=Id; end;
V=V+0.01; end;
VV=[VV Vco]; II=[II 0];
plot(VV,II,'r'); hold on; grid on
xlabel(' Tension ( V ) ');
ylabel(' Courant ( A ) ');
%n=2.5
Icc=0.0024;Vco=0.699;Rs=28.1;Rp=3683;
K=1.38e-23;T=298;q=1.6e-19;n=2.5;
W=q/(n*K*T);
Io1=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Io2=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Io=Io1+Io2;
Iph=Vco/Rp+Io*exp(W*Vco);
V=0; k=0; I=Icc;
while I>=0;
Id1=Io*(exp(W*(V+Rs*I))-1);
Id2=Io*(exp(W*(V+Rs*I))-1);
Id=Id1+Id2;
Ish=(V+Rs*I)/(Rp); I=Icc-Id-Ish;
if I>=0; k=k+1; II(k)=I; IIsh(k)=Ish; VV(k)=U;
IIPH(k)=Icc; IID(k)=Id; end;
V=V+0.01; end;
UU=[VV Vco]; II=[II 0];
plot(VV,II,'k'); hold on; grid on
xlabel(' Tension ( V ) ');
ylabel(' Courant ( A ) ');
legend('n=1','n=1.5','n=2','n=2.5','Location','southwest')

```

3.4. Résultats et discussions :

En programmant en Matlab on obtient les graphes suivants :

3.4.1. Caractéristique I-V d'une cellule PV :

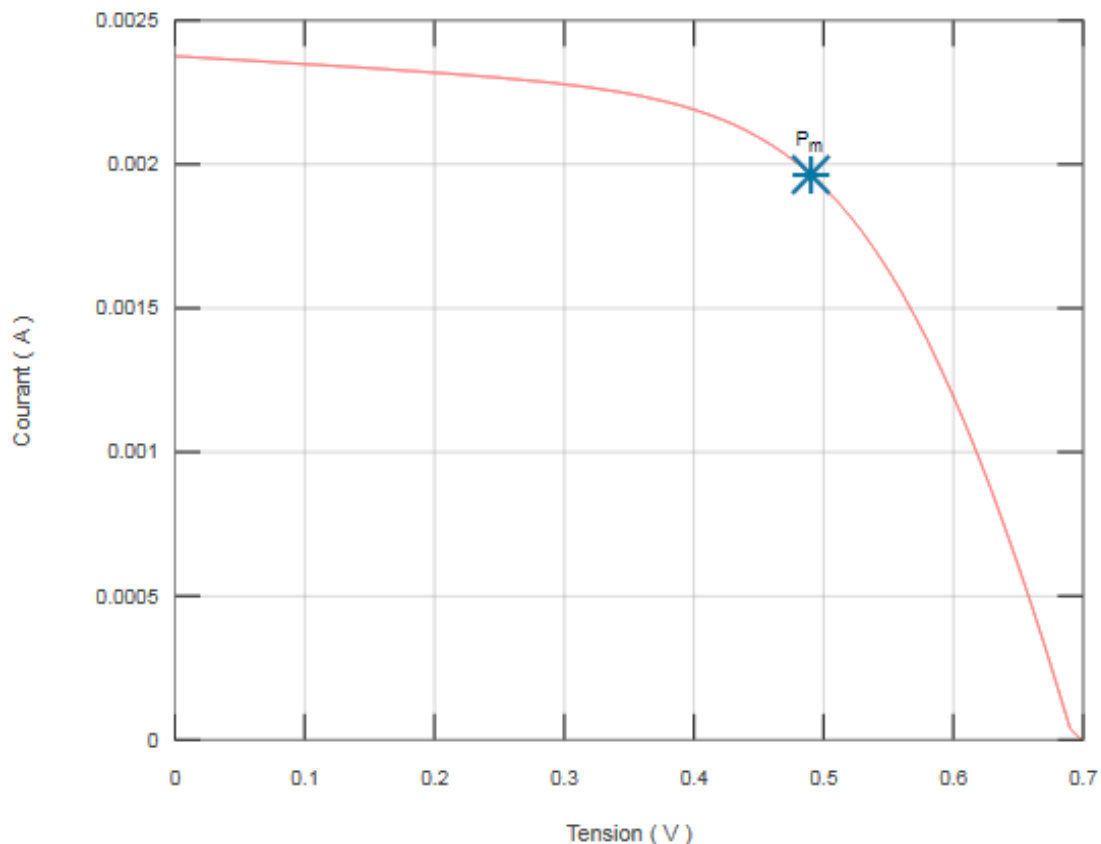


Figure 3.2 : Caractéristique I(V) d'une cellule PV.

La courbe caractéristique I(V) montre qu'une cellule photovoltaïque est une source de courant constante et de là nous pouvons tirer que le courant d'une cellule PV est à sa valeur maximale qui est égale au courant de court-circuit I_{cc} pour $V=0$. Ensuite, la tension augmente avec la diminution exponentielle du courant électrique jusqu'à ce qu'il s'annule et la tension atteint sa valeur maximale qui est égale à la tension du circuit ouvert V_{co} . Pour finir, le point en bleu représente le point de puissance maximale MPP qui correspond à des valeurs de courant et de tension optimales [26].

3.4.2. Influence de la température sur la caractéristique $I(V)$:

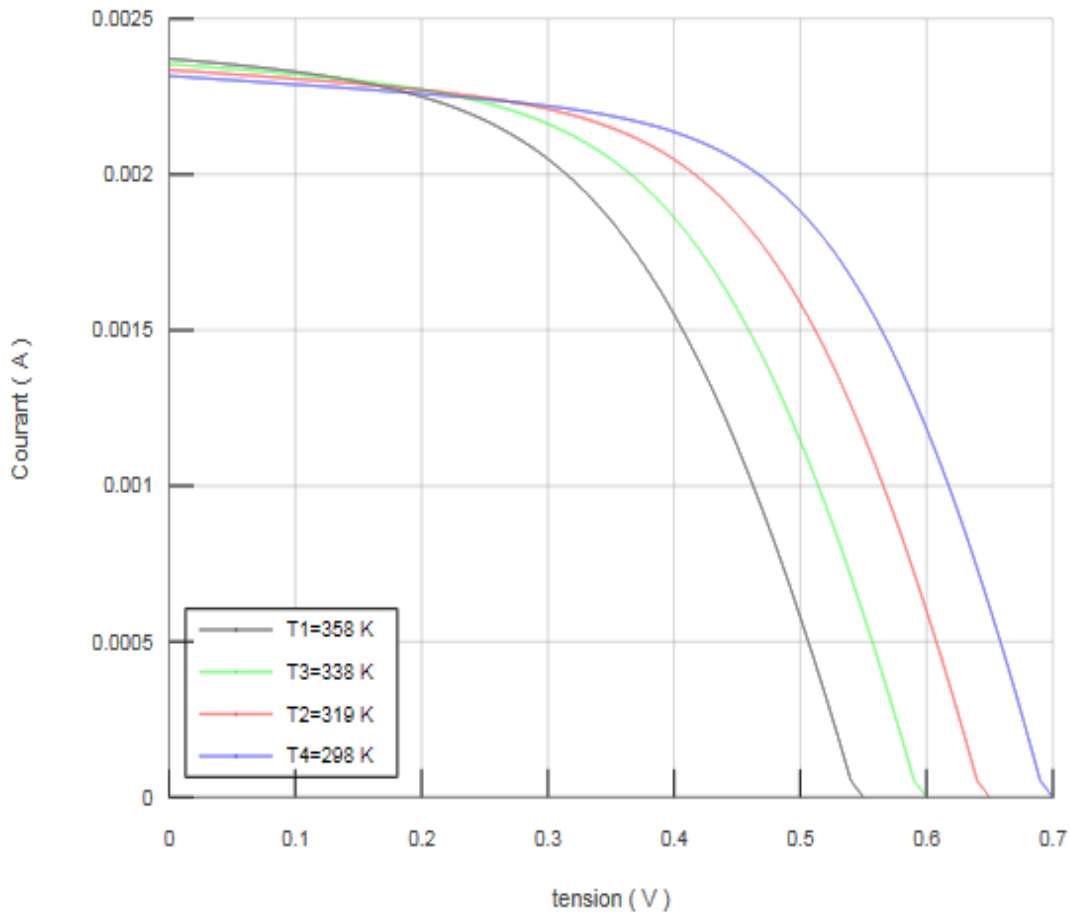


Figure 3.3 : Influence de la température sur la caractéristique $I(V)$.

La température est un paramètre important dans le comportement des cellules PV. L'augmentation de la température avec un éclairement fixe entraîne une diminution nette de la tension de circuit ouvert (V_{co}) et une augmentation du courant de court-circuit (I_{cc}), ainsi qu'une diminution de la puissance maximale (P_{max}). Pour une température qui change de 25 à 85 °C, on peut voir que la variation de la tension change beaucoup plus que le courant. Le courant de court-circuit, quant à lui, augmente avec une hausse de la température.

3.4.3. Influence de la résistance série sur la caractéristique I(V) :

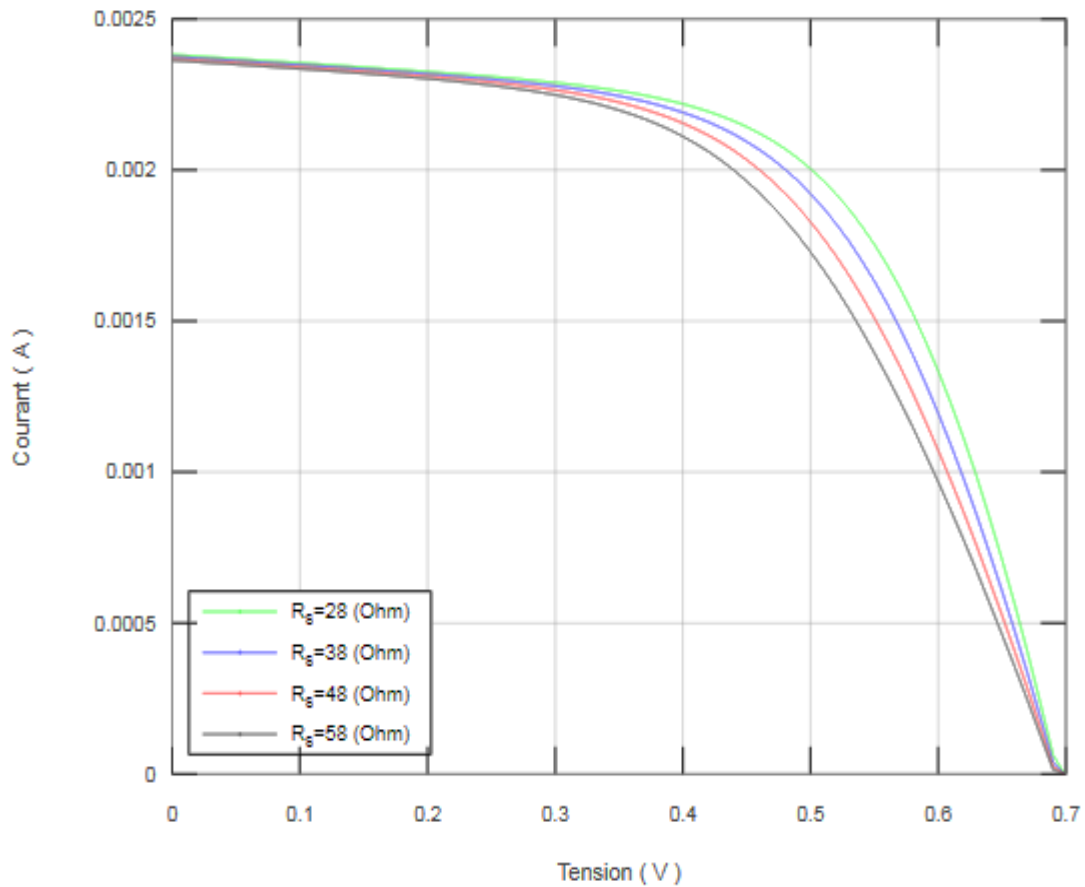


Figure 3.4 : Influence de la résistance série sur la caractéristique I(V).

La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode se comporte comme un générateur de tension, et lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur de courant de court-circuit (I_{cc}), ce qui va limiter le rendement de conversion. La résistance série est un élément parasite et doit être la plus petite possible [27].

3.4.4. Influence de la résistance parallèle sur la caractéristique I(V) :

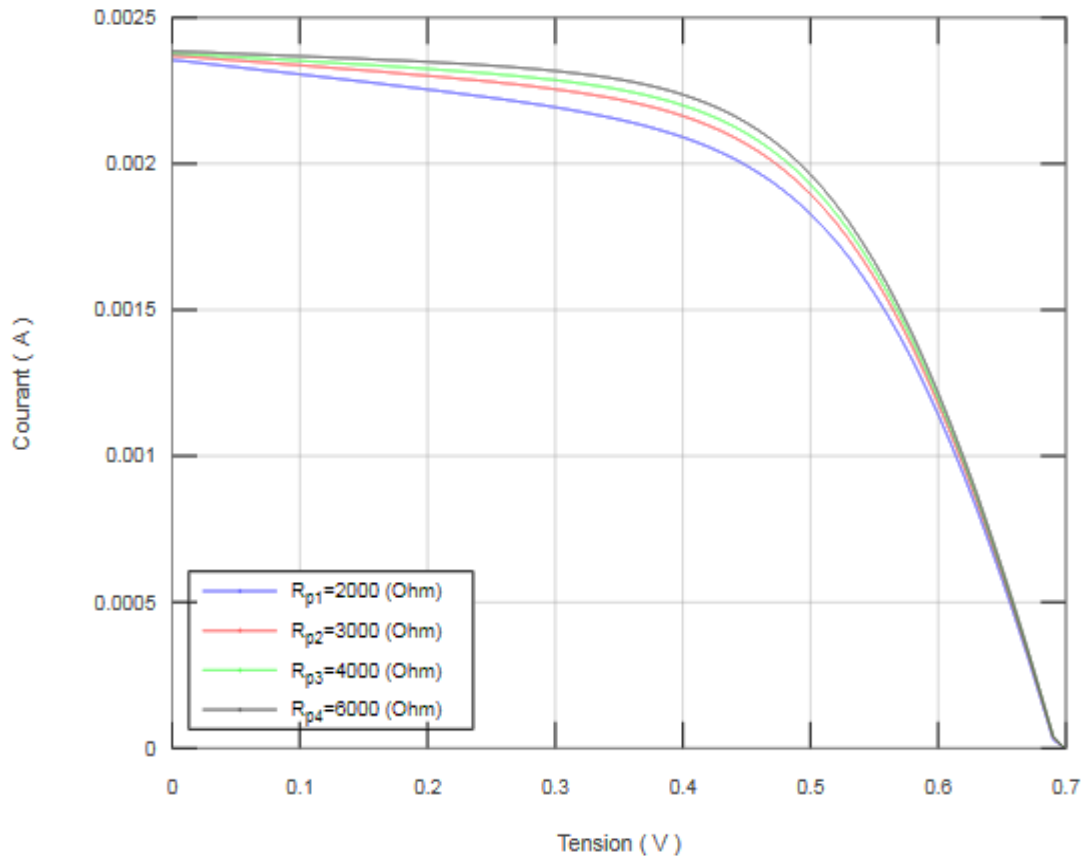


Figure 3.5 : Influence de la résistance parallèle sur la caractéristique I(V).

L'influence de la résistance parallèle (shunt) sur la caractéristique courant-tension se traduit par une légère diminution de la tension de circuit ouvert, et une augmentation de la pente de la courbe I(V) de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme une source de courant. La puissance fournie par une cellule solaire varie avec sa résistance parallèle, plus cette résistance est élevée plus la puissance fournie est importante. La résistance shunt a pour origine les imperfections de la qualité de la jonction (P-N) et elle est responsable de l'existence des courants de fuite.

3.4.5. Influence de facteur d'idéalité sur la caractéristique $I(V)$:

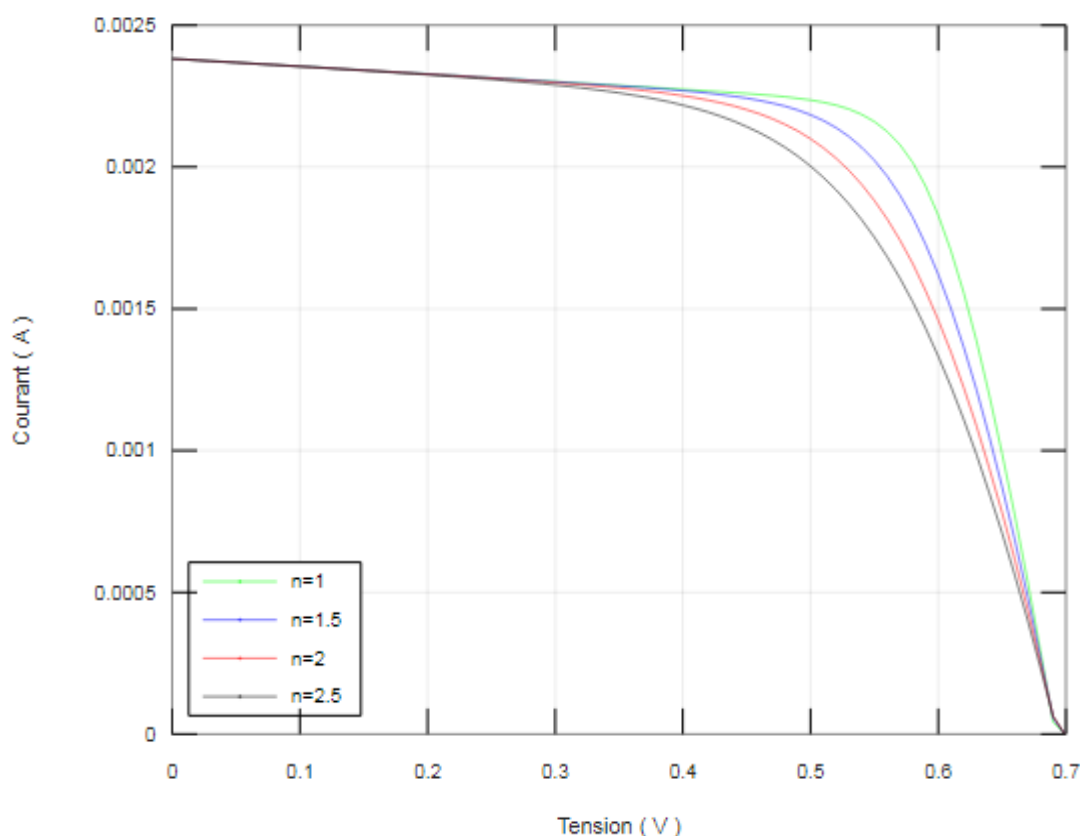


Figure 3.6 : Influence de facteur d'idéalité sur la caractéristique $I(V)$.

Les courbes montrent que l'augmentation du facteur d'idéalité augmente la tension en circuit ouvert V_{co} , en revanche le courant de court-circuit I_{cc} et la puissance maximale P_m diminuent ce qui provoque la diminution du rendement.

3.5. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté une simulation d'une cellule photovoltaïque, on s'est intéressé au modèle à deux diodes et on a étudié l'influence de différents paramètres sur la caractéristiques $I(V)$.

Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'analyse d'une modélisation et simulation d'une cellule photovoltaïque par Matlab.

Dans un premier lieu nous avons présenté d'une manière générale l'énergie photovoltaïque, ses différentes filières ainsi que le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

Dans un deuxième temps, nous avons étudié les paramètres qui caractérisent une cellule PV, et nous avons exposé les six modèles principaux.

Et pour la dernière partie qui a été consacrée à la modélisation d'une cellule PV par un schéma équivalent et grâce à MATLAB nous avons obtenu la caractéristique $I(V)$ et nous avons pu voir l'influence de différents paramètres sur cette caractéristique tel que : la température, la résistance série, la résistance parallèle et le facteur d'idéalité.

Références Bibliographiques

- [1] BOUBACAR Nouhou « CONCEPTION TECHNICO-ÉCONOMIQUE D'UN SYSTÈME DE POMPAGE AUTONOME PHOTOVOLTAÏQUE AÉROGÉNÉRATEUR » Maîtrise en Sciences appliquées « Université de Montréal; Polytechnique de Montréal » 1999.
- [2] ANNE LABOURET and al « Cellules solaires Les bases de l'énergie Photovoltaïque » 5ème édition.
- [3] Jimmy Royer and al « LE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE » IEPF/Université d'Ottawa/EIER/CREPA/Université. /C
- [4] Jean-Claude MULLER « Électricité photovoltaïque » Membre du Programme interdisciplinaire énergie du CNRS ; Institut d'électronique du solide et des systèmes In ESS (UMR 7163, CNRS-ULP).
- [5] Ludovic PROTIN ; Stéphan ASTIER « Convertisseurs photovoltaïques ».
- [6] Albert Paul Malvino, (2016), (8ème édition), «Principes d'électronique», chapitre 2 : Les semi-conducteurs.
- [7] Jean-Paul BARAUN, Benjamin FARAGGI, (2010), Cellules solaires Les bases de l'énergie photovoltaïque (5e édition), Paris.
- [8] Mathieu URIEN, ' Cellules photovoltaïques organiques à base copolymères à blocs de type rigide-flexible', thèse de doctorat, L'UNIVERSITÉ BORDEAUX I, 2008.
- [8] J. Zhao, A. Wang, M.A. Green et F. Ferrazza, Applied Physics Letters 1998, 73, 1991.
- [10] M. Taguchi, K. Kawamoto, S. Tsuge, T. Baba, H. Sakata, M. Morizane, K. Uchihashi, N. Nakamura, S. Kiyama et O. Oota, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 8, 503, 2000.
- [11] M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa et W. Warta, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 16-61, 2008.
- [12] B. O'Regan et M. Grätzel, Nature, 353, 737, 1991.
- [13] C.W. Tang, Applied Physics Letters, 48, 183, 1986.

- [14] J. Xue, S. Uchida, B.P. Rand et S.R. Forrest, *Applied Physics Letters*, 84, 3013, 2004.
- [18] Nichiporuk Oleksiy, Thèse de doctorat de L'INSA de Lyon, Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités, 2005.
- [19] M. Bashahu and A. Habiarimana, Review and test of methods for determination of the solar cell series resistance, *Renewable Energy*, 1995, Vol. 6, pp. 129-138.
- [20] Nicolas Richet, Les cellules photovoltaïques en silicium : théorie et fabrication. 2016.
- [21] T. Trupke, M. A. Green, P. Würfel, P.P. Altermatt, A. Wang, J. Zhao et R. Corkish. « Temperature dependence of the radiative recombination coefficient of intrinsic crystalline silicon ». In : *J. Appl. Phys.* 94 (2003), p. 4930–4937.
- [22] M. J. Kerr. « Surface, emitter and bulk recombination in silicon and development of silicon nitride passivated solar cells ». Thèse de doct. Canberra : Australian National University, 2002.
- [23] R. K. Ahrenkiel, “Recombination processes and lifetime measurements in silicon photovoltaics,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 76, no. 3, pp. 243-256, 2003.
- [24] Murayama, Masaki, Mori, Tatsuo, 2006. Evaluation of treatment effects for high-performance dye-sensitized solar cells using equivalent circuit analysis. *Thin Solid Films* 509, 123–126.
- [25] M. G. VILLALVA, J. R. GAZOLI et E. R. FILHO, « Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays », *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 5, p. 1198–1208, 2009.
- [26] H. Patangia, S. G. Gourisetti, A. Siddiqui, and S. Sharma, « A simplified PV model for low power MPPT controller design », *Proc. IEEE Asia-Pacific Conf. Circuits Syst.*, pp. 680–683, 2010.
- [27] M. Belarbi, A. Benyoucef, B. Benyoucef, Study of the equivalent circuit of a Dye-Sensitized Solar Cells, *Advanced Energy: An International Journal (AEIJ)*, Vol. 1, No. 2, April 2014.
- [28] <http://www.sanyo.com/solar>.

Résumé

Les énergies qu'on peut concevoir comme des énergies renouvelables s'évaluent et se progressent d'une façon rapide dont l'élément essentiel et rudimentaire est la cellule photovoltaïque à laquelle on a fait des recherches et des analyses différentes afin de montrer l'efficacité et la rentabilité de sa puissance et son rendement.

Le but du travail présenté dans ce mémoire de projet de fin d'études se résume en deux points :

- L'étude fine des différents modèles d'une cellule photovoltaïques.
- La simulation d'une cellule photovoltaïque de modèle à 2 diodes ainsi que l'influence des différents paramètres telles que la température, la résistance série, la résistance parallèle et facteur d'idéalité sur la caractéristique $I(V)$ de cette cellule.

Abstract

The use of renewable energies has in recent years considerable development. The basic element of this energy is the photovoltaic cell which has been the object of many in several research laboratories.

The purpose of the work presented in this thesis project is summarized in two points:

- The detailed study of the models of a photovoltaic cell.
- The simulation of a photovoltaic cell using two-diode model as well as the influence of different parameters such as temperature, the series and shunt resistance and ideality factor on the characteristic $I(V)$ of this cell.