

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

التعليم العالي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

عمار تليجي
UNIVERSITE AMAR TELIDJI, LAGHOUAT



كلية العلوم
Faculté des Sciences

:
Département : Science de la Matière

MEMOIRE DE Master

Domaine: Sciences de la Matière
Filière : Physique
Option : Physique des matériaux

Présenté par :
Attouche INES

THEME

Modélisation des cellules photovoltaïques à base de silicium (poly cristallin)

Président	Mr. KADIRI Cheikh	MAA.UATL
Examinatrice	Mme. HAMDI ROKIA	MAA.UATL
Encadreur	Mr. LOKBAICHI Ahmed	MAA.UATL

Promotion 2015/2016

Remerciements

Nous remercierons ' Allah ' de nous avoir donné la force et la patience et le courage pour mener à bien ce modeste travail.

Nous exprimons, au terme de cette étude, notre gratitude et toute notre reconnaissance à

***Mr LOKBAICHI Ahmed**, pour avoir assuré la direction de notre travail et opté pour son bon déroulement, sans oublier le temps qu'il nous a consacré et sa participation au cheminement de ce projet.*

*Nous remercierons **Mr KADIRI Cheikh** de nous avoir fait l'honneur de présider notre jury.*

*Nous voulons aussi remercier **Mme HAMDI ROKIA** pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de participer à ce jury.*

Nous remercions à tous les enseignants du département des sciences de la matière de l'université de Laghouat, qui ont veillé à notre formation.

Enfin, on exprime nos remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à:

*Mes très chers parents, pour leur
sacrifices, et qui n'ont jamais cesse de
m'encourager que dieux me les garde*

*Mes très chères sœurs : **Hadjer et son fils
Mohamed Taher***

*Mes très chers frères : **Brahim, Houssam***

*A mon chères fiancé **Abdelhafid** et sa
familles*

A tous mes amis (es)

Sommaire

Liste des figures.....

Liste des tableaux.....

Liste des symboles.....

Introduction générale.....01

Chapitre I : La jonction PN

Introduction03

I. Les matériaux semi-conducteurs.....03

I.1.Semi-conducteur intrinsèque.....04

I.2.Un semi-conducteur extrinsèque..... 05

I.2.1.Un semi-conducteur Type N..... 05

I.2.2.Un semi-conducteur Type P.....06

I.3. Répartition des porteurs dans les bandes de conduction et de valence.....06

I.4. Commentaires sur la signification du niveau de Fermi E_F08

I.5. La jonction PN.....09

I.5.1 La Jonction PN non-polarisé.....10

I.5.2. Répartition des porteurs..... 14

I.5.3. Jonction PN polarisé direct.....15

I.5.4 Jonction PN polarisé inverse18

I.6. Effet photovoltaïque.....21

I.6.1 - Comportement de la cellule photovoltaïque éclairée.....21

I.6.2. Les modèles analytiques.....22

Conclusion.....	22
-----------------	----

Chapitre II : Principe de la conversion photoélectrique

Introduction.....	23
II.1. Historique de l'effet photovoltaïque.....	23
II.2. Le rayonnement solaire.....	25
II.2.1. Notion sur le rayonnement solaire.....	25
II.3. Principe de la conversion photovoltaïque.....	27
II.3.1.l'interaction rayonnement /semi-conducteur.....	28
II.4. Les cellules photovoltaïques à base de silicium.....	28
II.4.1 Le silicium et ses propriétés.....	29
II.4.2.Les Différentes types des cellules photovoltaïques.....	29
Conclusion.....	32

Chapitre III : Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Introduction.....	34
III.1. Représentations électriques d'une cellule photovoltaïque.....	34
III.1.1.Différents modèles d'une cellule photovoltaïque.....	34
III.1.2. Caractéristique d'une cellule.....	37
III.1.3. Raccordement des cellules entre elles.....	38
III.1.3.1. Association en série.....	38
III.1.3.2. Association en parallèle.....	39
III.1.3.3. Association mixte.....	39
III.2. Partie modélisation.....	40
III.2.1. Calcul de I_{pv}	40
III.2.2. Calcul de I_0	41
III.2.3 Puissance d'une cellule PV.....	42
III.2.3.4 Rendement énergétique maximum η_m	43

III.3. L'outil Matlab/Simulink.....	44
III.3. Outils de simulation d'une cellule photovoltaïque.....	45
III.3.1. Système à simuler.....	45
III.3.2. Simulation d'une cellule photovoltaïque.....	46
III.3.3. Implantation.....	46
III.3.4. Le schéma de bloc du module photovoltaïque.....	46
III.3.5. Le schéma du calcul du courant I.....	48
III.3.6. Le schéma du calcul du courant I_{pv}	49
III.3.7. Le schéma du calcul du courant I_0	49
III.3.8. Le schéma du calcul du courant I_{on}	50
III.3.9. Le schéma du calcul la quantité aV_T	50
Paramètres de simulation.....	51
Résultats et discussion.....	52
Influence de la température.....	53
Influence de l'éclairement.....	54
Influence de résistance en série.....	56
Influence de résistance en parallèle.....	57
Etude comparative avec les résultats expérimentaux.....	59
Conclusion.....	59
Conclusion générale.....	60
Bibliographie	
Résumé	

Liste des figures

Figure	Titre	pages
Figure I.1	Représentation des bandes d'énergie	03
Figure I.2	Système cubique	04
Figure I.3	libération d'un électron par un atome de phosphore	05
Figure I.4	libération d'un trou par un atome de bore	06
Figure I.5	Distribution de fermi Dirac pour différent température	07
Figure I.6	barreau de silicium dopé p et barreau de silicium dopé n	09
Figure I.7	Jonction PN non-polarisé	10
Figure I.8	variation de la densité de charge (x)	12
Figure I.9	Variation du champ électrique $E(x)$	12
Figure I.10	La variation de la tension $V(x)$ dans la ZCE	13
Figure I.11	La densité des porteur jonction PN non-polarisé	15
Figure I.12	Jonction PN polarisé direct	15
Figure I.13	La densité des porteurs majoritaires et minoritaires jonction PN polarisé direct	17
Figure I.14	Jonction PN polarisé inverse	19
Figure I.15	La densité des porteurs majoritaires et minoritaires jonction PN polarisé inverse	20
Figure I.16	Polarisation direct et inverse $I(V)$	20
Figure I.17	Caractéristique d'une cellule PV	22
Figure II.1	Le soleil	26
Figure II.2	Le semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique	27
Figure II.3	Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur :(a) un semi-conducteur à gap direct, (b) à gap indirect	28
Figure II.4	Une cellule photovoltaïque monocristalline	30
Figure II.5	Une cellule photovoltaïque poly cristalline	30
Figure II.6	Une cellule photovoltaïque couche-mince	30
Figure III.1	Schéma d'application de l'effet photovoltaïque	34
Figure III.2	Circuit équivalent d'une cellule PV –Model idéal	35
Figure III.3	Circuit équivalent d'une cellule PV –	35
Figure III.4	Circuit équivalent d'une cellule PV –M - 1D	36

Figure III.5	schéma électrique équivalent d'une cellule en silicium cristallin-modèle 2D	37
Figure III.6	Caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule PV	38
Figure III.7	Association série	39
Figure III.8	Association parallèle	39
Figure III.9	Association mixte	39
Figure III.10	Circuit équivalent d'une cellule PV –Modèle 1-D	40
Figure III.11	Matlab	44
Figure III.12	Bibliothèque SIMULINK	45
Figure III.13	Circuit équivalent d'une cellule PV –Modèle 1-D	45
Figure III.14	Schéma Bloc d'un Module photovoltaïque sous Simulink	47
Figure III.15	courant totale	48
Figure III.16	courant I_{pv}	49
Figure III.17	courant I_o	49
Figure III.18	Courant I_{on}	50
Figure III.19	la quantité aV_T	50
Figure III.20	Caractéristique I(V) de la cellule solaire modélisée	52
Figure III.21	Caractéristique P(V) d'une cellule solaire	52
Figure III.22	Caractéristique courant-tension pour 5 températures différentes de cellule	53
Figure III.23	Caractéristique puissance-tension pour 5 températures différentes de cellules	54
Figure III.24	Caractéristique I(V) d'une cellule pour différentes valeurs d'éclairement	55
Figure III.25	Caractéristique P(V) d'une cellule pour différentes valeurs d'éclairement	55
Figure III.26	Caractéristique courant-tension d'une cellule pour différentes valeurs de R_s	56
Figure III.27	Caractéristique puissance -tension d'une cellule pour différentes valeurs de R_s	57
Figure III.28	Caractéristique courant -tension d'une cellule pour différentes valeurs de R_p	58
Figure III.29	Caractéristique puissance -tension d'une cellule pour différentes valeurs de R_p	58

Liste des tableaux

tableaux	titre	pages
Tableau I.1	Classification périodique de Mendeleiev	04
Tableau II.1	Classification de différents types de cellules photovoltaïques au silicium	31
Tableau(III.1)	paramètres de cellule simulée	51
Tableau III.2	Les résultats	53

Liste des symboles

E_g	Energie de la bande interdite (eV)
BV	la bande de valence
BC	la bande de conduction
PV	photovoltaïque
G	Eclairement (W/m ²).
R_p	Résistances parallèle shunt. (
R_s	Résistance série (
I_{pv}	Le photo-courant (A).
I_o	Courant de saturation (A).
T_n	La température de référence (298 °K).
I_{cc}	Le courant de court-circuit (A).
V_{ocn}	La tension de circuit ouvert (V).
I_{pvn} ou I_{ccr}	le courant photonique sous une condition de référence
K_t	le coefficient de variation du courant en fonction de la température ($K_t=0.65e-3$).
m	Rendement énergétique maximum
P_m	La puissance maximale produite PV (W).
V_m	Tension qui correspond à la puissance maximale (V).
I_m	Courant qui correspond à la puissance maximale (A).
I	Le courant électrique
V	La tension électrique
ZCE	Zone de charge d'espace

Introduction générale

Ces dernières années, la demande mondiale en énergie a atteint un seuil préoccupant pour un grand nombre de pays. L'épuisement annoncé des réserves pétrolières par les spécialistes et les changements climatiques dus aux gaz à effet de serre ont incité la communauté internationale à s'orienter vers les énergies renouvelables. Le développement de l'exploitation des énergies renouvelables a connu une forte croissance ces dernières années. La production d'électricité par des sources d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant les normes écologiques, notamment l'énergie solaire photovoltaïque.

Notre travail consiste à faire une modélisation d'une cellule photovoltaïque dans l'environnement « Matlab-Simulink » dont le but est l'optimisation de ce système pour un meilleur rendement ce qui veut dire une meilleure exploitation de l'énergie solaire. Pour cette modélisation, on va utiliser le modèle à une diode.

La simulation des cellules solaires à l'aide de différents logiciels consiste à comprendre leur comportement. Matlab est l'un de ces logiciels utilisés pour la modélisation, l'analyse et la simulation de systèmes physiques et mathématiques,

Nous avons organisé la présentation de ce mémoire en trois chapitres.

Le chapitre I : on parle dans ce chapitre de la jonction PN qui est nécessaire pour comprendre l'effet photovoltaïque.

Le chapitre II : on parle dans ce chapitre de l'effet photovoltaïque et le rôle de l'énergie solaire.

Le chapitre III : est consacré à la modélisation numérique du comportement d'une cellule photovoltaïque à base de silicium.

Introduction :

Les modules ou panneaux photovoltaïques sont composés de semi-conducteurs qui permettent de transformer directement la lumière du soleil en électricité. Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium (Si) et plus rarement d'autres semi-conducteurs dans ce chapitre, il est nécessaire de présenter les matériaux semi-conducteurs et les différents types des semi conducteurs et ainsi la jonction PN.

I. Les matériaux semi-conducteurs :

Un semi-conducteur est intermédiaire entre un métal et un isolant. [1]

A $T=0k$ il se comporte comme un isolant mais il conduit l'électricité que la température augmente. Sa conductivité augmente avec la température contrairement aux métaux.

La structure de bande est analogue à celle des isolants avec une zone interdite séparant la bande de valence de celle de conduction, mais la largeur de celle-ci est plus faible, la bande permise occupée la plus haute est complètement remplie : c'est la bande de valence et la bande permise vide la plus basse est la bande de conduction.

Lorsque la température augmente, l'énergie d'agitation thermique excite un certain nombre d'électrons de la bande de valence vers la bande de conduction, il y a conduction si l'on applique un champ électrique. à cette conduction d'origine électronique, s'ajoute celle des trous qui sont les places vacantes laissées par les électrons dans la bande de valence [1]. Pour un semi-conducteur, la conductivité est d'autant plus grande que le nombre d'électrons dans la bande de conduction est élevé [2]. Le matériau semi-conducteur est alors capable d'absorber des photons de longueurs d'onde bien supérieures à **250nm** (exemple du silicium, capable d'absorber des photons jusque **1100nm** avec une bande interdite de **1,12eV**). [3]

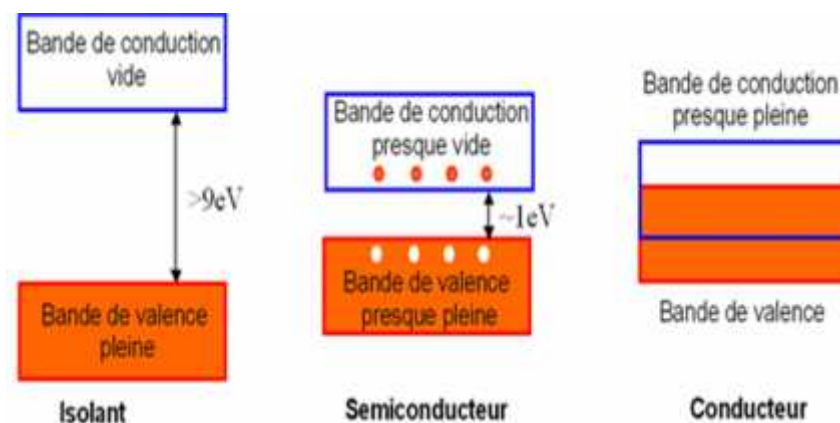


Figure I.1 : Représentation des bandes d'énergie

I.1.Semi-conducteur intrinsèque :

Les corps simples semi-conducteurs sont obtenus dans le groupe IV de la classification périodique des éléments (**voir le tableau I.1**). Ce sont le germanium, et sur tout le silicium.

	III	IV	V	
	⁵ B (Bore)	⁶ C (Carbone)	⁷ N (Azote)	
	¹³ Al (Aluminium)	¹⁴ Si (Silicium)	¹⁵ P (Phosphore)	¹⁶ S (Soufre)
³⁰ Zn (Zinc)	³¹ Ga (Gallium)	³² Ge (Germanium)	³³ As (Arsenic)	³⁴ Se (Sélénium)
⁴⁸ Cd (Cadmium)	⁴⁹ In (Indium)	⁵⁰ Sn (Etain)	⁵¹ Sb (Antimoine)	

Tableau 1.1 Classification périodique de Mendeleïev

Les corps simples semi-conducteurs ont la caractéristique principale d'être tétravalent, c'est -à-dire que leur couche extérieure comporte 4 électrons. Ils cristallisent dans le système du carbone (diamant) qui est le système cubique (**fig. I.2**). Chaque atome est au centre d'un tétraèdre régulier dont les 4 sommets sont occupés par les atomes voisins les plus proches. [4]

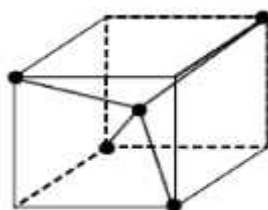


Figure I.2 Système cubique

Un semi-conducteur est dit intrinsèque lorsque le cristal n'est pas pollué par des impuretés pouvant changer la concentration en porteurs libre. Pour une température différente de 0°K des électrons peuvent devenir libres c'est à dire passer de la bande de valence a la bande de conduction. Où leur concentration est notées n .les électrons laissent des trous dans la bande de valence(B_v) avec une concentration notée p

On définit une concentration intrinsèque n_i égale aux concentrations n et p pour laquelle on montrera plus loin qu'elle est donnée par la relation :

$$n = p = n_i(T) = AT^{\frac{3}{2}} \exp\left\{-\frac{E_G}{2KT}\right\} \quad (1.1)$$

A : la constante spécifique du matériau.

I.2. Un semi-conducteur extrinsèque :

Un semi-conducteur extrinsèque est un semi-conducteur intrinsèque dopé par des impuretés spécifiques lui conférant des propriétés électriques adaptées aux applications électroniques (diodes, transistors, etc...) et optoélectroniques (émetteurs et récepteurs de lumière, etc...). [5]

I.2.1. Un semi-conducteur Type N :

On obtient un semi-conducteur de type n en dopant le silicium avec des atomes possèdent électrons sur leur couche de valence on utilise ainsi le phosphore (p) appartenant à la colonne de la classification périodique des éléments.

Quatre de ces cinq électrons de valence du phosphore sont mis commun avec les atomes de silicium voisins pour réaliser des liaisons de covalences (**fig. I.3.**) le 5^{ème} électron il se trouve libre dans la bande de conduction. L'atome de phosphore qui a fourni un électron libre est appelé atome donneur.

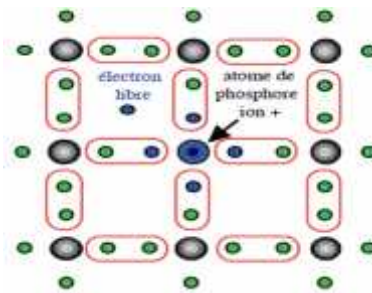


Figure I.3 : libération d'un électron par un atome de phosphore

Si N_d et la concentration des atomes donneurs, ceux-ci vont libérer une population n d'électron libres telle que : $n = N_d$

Les concentrations en électrons libres (n) et en trous libres (p) sont liées par la loi d'action de masse

$$n \cdot p = n_i^2 \quad \text{et} \quad p = \frac{n_i^2}{N_d} \quad (\text{I.2})$$

Les électrons sont les porteurs majoritaires et les trous les porteurs minoritaires.

I.2.2. Un semi-conducteur Type P

On obtient un semi-conducteur dopé p en injectant dans le silicium des atomes de la 3^{ème} colonne comme le bore qui possède trois électrons périphériques. Il manque un électron à l'atome trivalente de bore pour réaliser les liaisons covalentes avec les quatre atomes de silicium qui l'entourent (**fig. I.4**)

L'atome de bore qui capte un électron d'un atome de silicium voisin appelé atome accepteur. Si N_A est la concentration par cm^3 des atomes accepteurs ceux-ci vont libérer population p de trous libres égale à la concentration N_A : $p = N_A$

La loi d'action de masse :

$$np = n_i^2 \quad n = \frac{n_i^2}{N_A} \quad (\text{I.3})$$

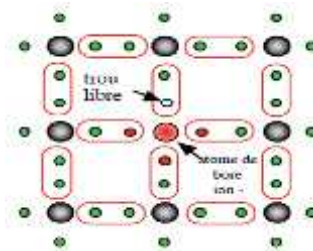


Figure I.4 : libération d'un trou par un atome de bore

Les trous sont les porteurs majoritaires et les électrons les porteurs minoritaires. [6]

I.3. Répartition des porteurs dans les bandes de conduction et de valence :

Densité d'état : La densité d'état N représente le nombre de places disponibles pour un niveau d'énergie E . Cette grandeur, dépendante de l'énergie électronique E , correspond à la place disponible pour les électrons dans la bande de conduction $N_c(E)$ et à la place disponible pour les trous dans la bande de valence $N_v(E)$. On peut écrire que :

$$N_c(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_c}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{E - E_c} \quad (\text{I.4})$$

$$N_V(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_V}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{E_V - E} \quad (I.5)$$

Où $h=6.626.10^{-34}$ Js est la constante de Planck et (m_c , m_v la masse effective de densité d'états dans la bande de conduction ou dans la bande de valence).

Distribution de Fermi-Dirac : C'est la probabilité qu'un état disponible soit occupé, c'est à dire le rapport du nombre de places occupées sur le nombre de places disponible. Elle a la forme suivante :

$$f(E) = \frac{dn}{dN} = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{kT}} + 1} \quad (I.6)$$

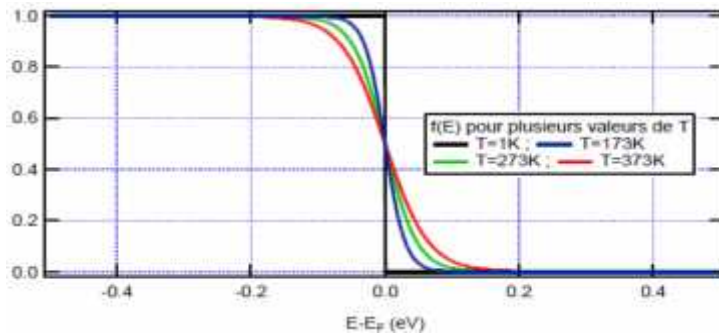


Figure I.5 : Distribution de Fermi-Dirac pour différentes températures

La fonction $f(E)$ est appelée distribution de Fermi-Dirac. T est la température absolue, k est la constante de Boltzmann et E_F est le niveau de Fermi et on s'intéresse aux dn états occupés sur dN états disponible

Densités de porteurs : La densité d'électrons n (exprimée généralement en cm^{-3}) dans la bande de conduction est alors obtenue en sommant sur toute la plage d'énergie couverte par cette bande, le produit de la densité d'états par le rapport du nombre d'états occupés sur le nombre d'états disponibles soit :

$$n = \int_{E_c}^{+\infty} N_c(E) f(E) dE \quad (I.7)$$

Il faut noter que la fonction que nous venons d'intégrer qui représente la densité de niveaux occupés pour chaque niveau d'énergie, présente un extremum dans la bande de conduction.

De même pour la densité des trous p (exprimée généralement en cm^{-3}) dans la bande de valence, la probabilité d'avoir un trou étant $1-f(E)$, on a :

$$p = \int_{E_C}^{+\infty} N_V E (1 - f E) dE \quad (I.8)$$

Pour un semi-conducteur dont le niveau de Fermi E_F est distant des extrema de plus de $3kT$ ($\sim 0,08\text{eV}$ à 300K), la fonction de Fermi se simplifie sous une forme exponentielle.

Pour $E > E_C$, comme $E - E_F > 3kT$ on écrit que :

$$f E = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{kT}} + 1} \approx e^{\frac{E_F-E}{kT}} \quad (I.9)$$

De même pour $E > E_V$, comme $E_F - E > 3kT$ on a

$$1 - f E = 1 - \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{kT}} + 1} \approx e^{\frac{E-E_F}{kT}} \quad (I.10)$$

On remarque que le produit des densités d'électrons par la densité de trous ne dépend que de l'énergie de gap du matériau semi-conducteur et de la température alors qu'il est indépendant du niveau de Fermi.

En effet, on a :

$$n \cdot p = n_i^2 \quad \text{avec } n_i = \sqrt{A_C \cdot A_V} \cdot e^{\frac{E_C-E_V}{2kT}} = g T \cdot e^{\frac{E_g}{2kT}} \quad (I.11)$$

Où n_i sera la densité de porteurs intrinsèques (pour le silicium à 300°K , $n_i = 10^{10} \text{cm}^{-3}$). La largeur $E_C - E_V$ de la bande interdite est appelé « gap » du semi-conducteur qui est noté E_g . Cette relation est valable pour les semi-conducteurs intrinsèques ou dopés.

I.4. Commentaires sur la signification du niveau de Fermi E_F :

Définition : Le niveau de Fermi d'un système représente la variation d'énergie libre de ce dernier pour une variation du nombre de porteurs. C'est le potentiel chimique du système.

Propriétés : Pour un système à l'équilibre qui n'est pas soumis à une influence extérieure, par exemple un champ électrique extérieur, ou un flux de photon, le niveau de Fermi doit être constant dans tout le système.

Si on approche deux éléments indépendants pour en faire un même système, le niveau de Fermi devra être identique dans les deux sous-ensembles du système une fois l'équilibre atteint. L'élément qui a vu son niveau de Fermi augmenter relativement à l'autre pour que les niveaux s'équilibrent aura reçu des électrons de l'autre élément.

Cas du semi-conducteur intrinsèque : Dans ce cas, $n=p=n_i$. En remplaçant les densités de porteurs par leurs expressions respectives, dans les égalités précédentes, on peut déterminer le niveau de Fermi pour un semi-conducteur intrinsèque E_{Fi} . Sachant qu'à température ambiante kT est très inférieur au gap, ce niveau se trouve très proche du milieu de la bande interdite :

$$E_{Fi} = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{kT}{2} \cdot \ln\left(\frac{A_V}{A_C}\right) \cong \frac{E_C + E_V}{2} \quad (I.12)$$

Le niveau de Fermi d'un semi-conducteur intrinsèque est donc situé au milieu de la bande interdite à $T=0K$. A T ambiante, E_F reste très proche du centre de la bande interdite.

Cas du semi-conducteur dopé : Pour le semi-conducteur de type N, le niveau de Fermi sera donc plus près de la bande de conduction que de la bande de valence.

Pour le semi-conducteur de type P, le niveau de Fermi sera plus près de la bande de valence que de la bande de conduction.

Cas d'un conducteur : Pour un conducteur, le niveau de Fermi est placé dans la bande de conduction. [7]

I.5. La jonction PN :

Une jonction PN est la mise en contact entre un semi-conducteur type N et un semi-conducteur type P issus d'un même cristal. [8]

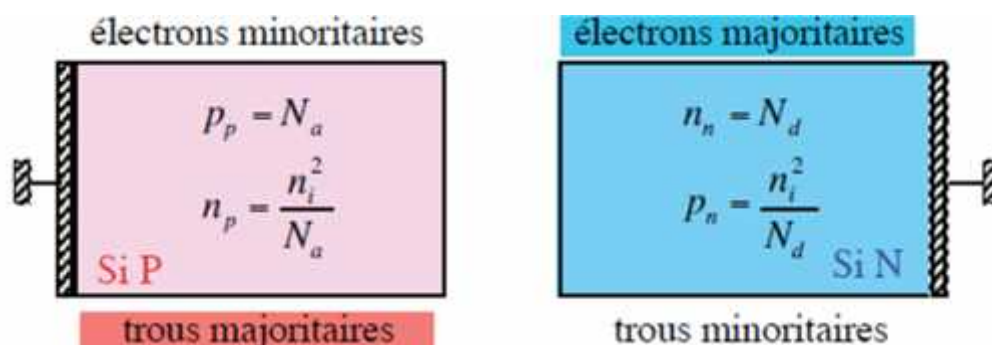


Figure I.6 : barreau de silicium dopé p et barreau de silicium dopé n

I.5.1 La Jonction PN non-polarisé :

Une jonction PN est constituée de deux zones respectivement dopées **P** et **N** et la transition de la zone **P** à la zone **N** se fait brusquement. Lorsque l'on assemble les deux régions. La différence de concentration entre les porteurs des régions **P** et **N** va provoquer la circulation d'un courant de diffusion tendant à égaliser la concentration en porteurs d'une région à l'autre. Les trous de la région **P** vont diffuser vers la région **N** laissant derrière eux des atomes ionisés, qui constituent autant de charges négatives fixes. Il en est de même pour les électrons de la région **N** qui diffusent vers la région **P** laissant derrière eux des charges positives. Il apparaît aussi au niveau de la jonction une zone contenant des charges fixes positives et négatives. Ces charges créent un champ électrique \vec{E} qui s'oppose à la diffusion des porteurs de façon à ce qu'un équilibre électrique s'établisse. [9]

Dans ces conditions les répartitions des charges, du champ électrique et du potentiel (fig. 1.6). La région dépeuplée de porteurs mobiles est appelée zone de charge d'espace (ZCE). Elle a une épaisseur de l'ordre de **0,5 μm** . La forme générale de la densité de charges dépend essentiellement du profil de dopage de la jonction. Dans le cas idéal (fig I.7) on peut déduire aisément la forme du champ électrique $\mathbf{E}(\mathbf{x})$ ainsi que du potentiel $\mathbf{V}(\mathbf{x})$ par application des équations de l'électrostatique. [10]

- **La barrière de potentiel :** Imaginons que le semi-conducteur "P" soit séparé du semi-conducteur "N". Dans le semi-conducteur "P" le niveau de **FERMI** se situe à une distance au-dessus du maximum de la **BV** telle que :

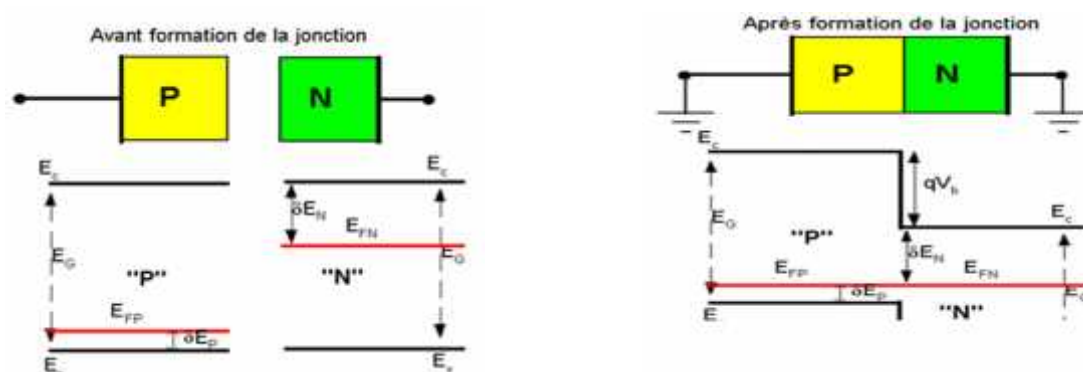


Figure I.7 : Jonction PN non-polarisé

$$\delta E_p = E_{FP} - E_V = k_b T \text{Log} \frac{N_V}{N_A} \quad (\text{I.13})$$

Dans le semi-conducteur "N" le niveau de Fermi se situe en dessous du minimum de la BC à une distance telle que :

$$\delta E_n = E_C - E_{FP} = k_b T \text{Log} \frac{N_C}{N_D} \quad (\text{I.14})$$

Si les deux semi-conducteurs font partie du même réseau cristallin et à l'équilibre thermodynamique les niveaux de FERMII s'alignent

$$E_G = qV_b + \delta E_n + \delta E_p \quad (\text{I.15})$$

Il apparaît une distorsion des bandes d'énergie. La différence entre le minimum de la BC du côté P et le minimum de la BC du côté N correspond à la variation de l'énergie potentielle de l'électron de conduction.

Cela se traduit par l'apparition d'une barrière de potentiel :

$$qV_b = E_G - k_b T \text{Log} \frac{N_C N_V}{N_D N_A} \quad (\text{I.16})$$

V_b : potentiel de barrière ou potentiel de diffusion

En introduisant la définition du nombre intrinsèque, la relation précédente devient :

$$V_b = V_T \cdot \ln \frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2} \quad , V_T = \frac{k_b T}{q} \quad (\text{I.17})$$

Il existe une variation du potentiel en traversant une jonction PN même si la polarisation extérieure est nulle.

En effet le potentiel $V(x)$ et le champ électrique $E(x)$ s'expriment en fonction de la densité de charges $\rho(x)$ par :

$$\frac{dE(x)}{dx} = \frac{1}{\epsilon} \rho(x) = q\epsilon(-N_A + N_D) \quad \text{Loi de Gauss} \quad (\text{I.18})$$

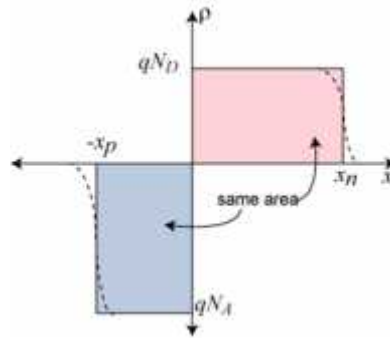


Figure I.8 : variation de la densité de charge (x)

- La variation du champ électrique :

$$\text{div}E = \frac{\rho}{\epsilon}$$

$$\rho = \begin{cases} -q \cdot N_A & -x_p < x < 0 \\ q \cdot N_D & 0 < x < x_n \end{cases}$$

$$E = \begin{cases} \int - \frac{q \cdot N_A}{\epsilon} dx = -\frac{qN_A}{\epsilon}x + C_1 & -x_p < x < 0 \\ \int \frac{q \cdot N_D}{\epsilon} dx = \frac{qN_D}{\epsilon}x + C_2 & 0 < x < x_n \end{cases} \quad (I.19)$$

$$E(-x_p) = \frac{qN_A}{\epsilon}x_p + C_1 = 0 \quad C_1 = -\frac{qN_A}{\epsilon}x_p$$

$$E(x_n) = \frac{qN_D}{\epsilon}x + C_2 = 0 \quad C_2 = -\frac{qN_D}{\epsilon}x_n$$

$$E = \begin{cases} -\frac{qN_A}{\epsilon}(x + x_p) & -x_p < x < 0 \\ \frac{qN_D}{\epsilon}(x - x_n) & 0 < x < x_n \end{cases}$$

- à $x = 0$ on a $E_{x<0}(0) = E_{x>0}(0) \Rightarrow -\frac{qN_A}{\epsilon}(x + x_p) = \frac{qN_D}{\epsilon}(x - x_n) \Rightarrow$
 $N_A x_p = N_D x_n \quad (I.20)$

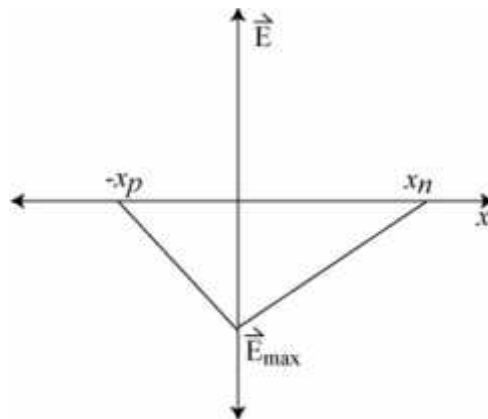


Figure I.9 : Variation du champ électrique E(x)

- La variation de la tension V dans la ZCE :

$$E(x) = -\frac{dV(x)}{dx} \quad \text{Expression du champ (I.20)}$$

$$V = \begin{cases} \int -E dx = \frac{qN_A}{\epsilon} | (x+x_p) & -x_p < x < 0 \\ \int -E dx = -\frac{qN_D}{\epsilon} | (x-x_n) & 0 < x < x_n \end{cases}$$

$$V = \begin{cases} \int \frac{qN_A}{\epsilon} | (x+x_p) dx = \frac{qN_A}{\epsilon} \left| \frac{x^2}{2} + xx_p \right| + C_3 & -x_p < x < 0 \\ \int -\frac{qN_D}{\epsilon} | (x-x_n) dx = -\frac{qN_D}{\epsilon} \left| \frac{x^2}{2} - xx_n \right| + C_4 & 0 < x < x_n \end{cases}$$

$$V(-x_p) = 0 \Rightarrow C_3 = \frac{qN_A}{2\epsilon} x_p^2$$

$$V_{x<0}(0) = V_{x>0}(0) \Rightarrow C_3 = C_4 = \frac{qN_A}{2\epsilon} x_p^2 \quad (\text{I.21})$$

$$V = \begin{cases} \frac{qN_A}{2\epsilon} | x+x_p |^2 & -x_p < x < 0 \\ -\frac{qN_D}{\epsilon} \left| \frac{x^2}{2} - xx_n \right| + \frac{qN_A}{2\epsilon} x_p^2 & 0 < x < x_n \end{cases}$$

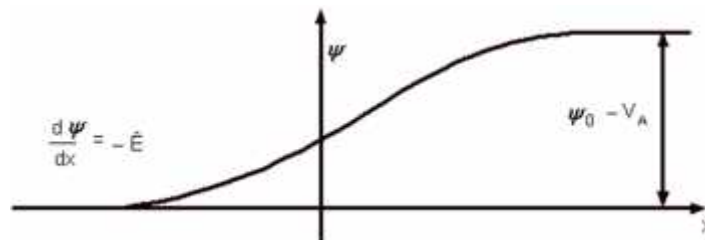


Figure I.10 : La variation de la tension V(x) dans la ZCE

La largeur de la ZCE :

$$W = x_n + x_p \quad \text{et pour } V(x = x_n) = V_0 \quad V_b = \frac{q}{2\epsilon} [N_D x_n^2 + N_A x_p^2] \quad (\text{I.22})$$

De plus la neutralité électrique globale du barreau impose la relation :

$$\text{on a } N_A \cdot x_A = N_D \cdot x_D \quad (\text{I.23})$$

$$W = x_n \left(1 + \frac{N_D}{N_A} \right) \Rightarrow x_n = \frac{W}{\left(1 + \frac{N_D}{N_A} \right)}$$

$$V_b = \frac{qx_n^2}{2\varepsilon} N_D + N_A \frac{x_p^2}{x_n^2} = \frac{qx_n^2}{2\varepsilon} N_D + N_A \frac{N_D^2}{N_A^2} = \frac{qx_n^2 N_D}{2\varepsilon} \left(1 + \frac{N_D}{N_A} \right)$$

$$W = \frac{2\varepsilon}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) V_b \quad (I.24)$$

I.5.2. Répartition des porteurs :

En dehors de la ZCE :

- $p_p = N_A$ = densité des trous du côté "P".
- $p_n = n_i^2/N_D$ = densité des trous du côté "N".
- $n_n = N_D$ = densité des électrons du côté "N".
- $n_p = n_i^2/N_A$ = densités des électrons du côté "P".

En reportant $p_p = N_A$ et $p_n = n_i^2/N_D$ dans :

$$V_b = \frac{k_b T}{q} \cdot \ln \frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2} \quad (I.25)$$

On obtient :

$$p_n = p_p \exp - \frac{qV_b}{k_b T} = N_A \exp - \frac{qV_b}{k_b T} \quad (cm^{-3}) \quad (I.26)$$

En reportant $n_n = N_D$ et $n_p = n_i^2/N_A$ dans :

$$v_b = \frac{k_b T}{q} \cdot \ln \frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2} \quad (I.27)$$

On obtient :

$$n_p = n_n \exp - \frac{qV_b}{k_b T} = N_D \exp - \frac{qV_b}{k_b T} \quad (cm^{-3}) \quad (I.28)$$

La densité des porteurs minoritaires de part et d'autre de la zone désertée est proportionnelle à l'inverse de l'exponentielle de la tension de barrière.

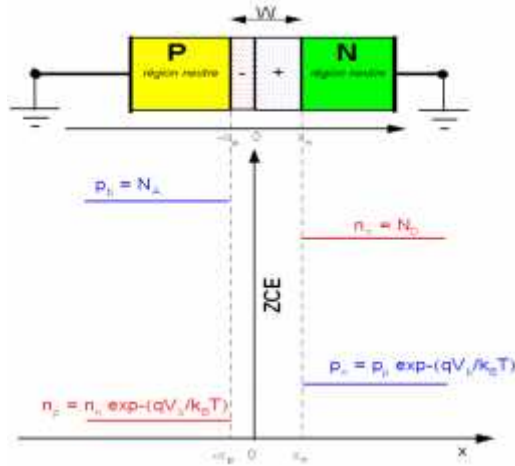


Figure I.11 : La densité des porteurs majoritaires et minoritaires jonction PN non-polarisé

I.5.3. Jonction PN polarisé direct :

On porte la partie "P" de la jonction à un potentiel positif par rapport à la partie "N". Lorsque le potentiel V_j est appliqué sur la partie "P" de la jonction, le niveau de FERMI du côté "P" descend de la quantité $q V_j$. La hauteur de la barrière de potentiel qui était de $q V_b$ sans polarisation est maintenant plus faible et elle vaut :

Dans toute l'étude qui suit, on supposera que $V_j < V_b$, c'est le régime de faible injection.

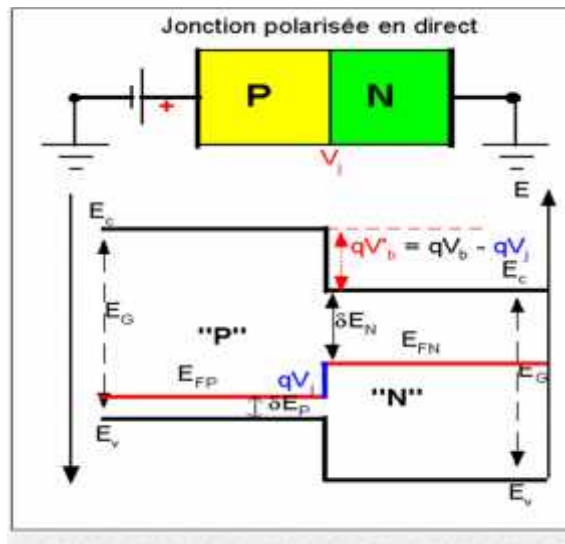


Figure I.12 : Jonction PN polarisé direct

$$qV'_b = qV_b - qV_j \quad (\text{eV}) \quad (\text{I.29})$$

Épaisseur de la ZCE en polarisation directe :

$$W' = W \sqrt{1 - \frac{V_j}{V_b}} \quad (\mu m) \quad (I.30)$$

Dans la relation : en intègre : $V'_b = V_b - V_j$, on obtient :

En appliquant une polarisation directe, on diminue la largeur de la zone désertée.

Calcul du champ électrique maximum :

La jonction étant abrupte, le champ électrique dans la ZCE a une forme triangulaire et : $E'_M = -2 V'_b/W'$:

Calcul du champ électrique maximum :

$$E'_M = E_M \sqrt{1 - \frac{V_j}{V_b}} \quad \left(\frac{V}{cm}\right) \quad (I.31)$$

En appliquant une polarisation directe, on diminue le champ électrique de rétion de diffusion, en conséquence, plus une jonction est polarisée en directe, plus la diffusion des trous de la région "P" vers la région "N" et la diffusion des électrons de la région "N" vers la région "P" vont être importantes. Il apparaît un courant : le courant direct.

Calcul du courant direct :

En polarisation directe, la densité des trous à la sortie de la ZCE du côté

"N" ($x = x'_n$) devient :

$$p'_n = p_p \exp(-qV'_b/k_B T) \text{ avec : } V'_b = V_b - V_j \text{ et : } p'_n = p_n \exp - \frac{qV_j}{k_B T} \quad (cm^{-3}) \quad (I.32)$$

De la même manière la densité des électrons à la sortie du la ZCE du côté

$$\text{"P"} (x = -x'_p) \text{ est : } n'_p = n_p \exp - \frac{qV_j}{k_B T} \quad (cm^{-3}) \quad (I.33)$$

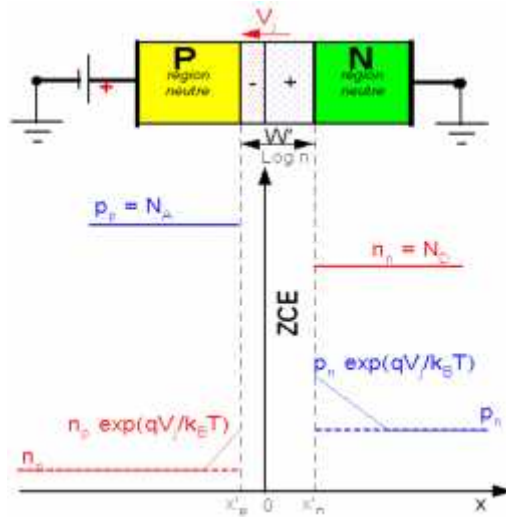


Figure I.13 : La densité des porteurs majoritaires et minoritaires jonction PN polarisé direct

Les trous "injectés" dans la région "N" sont minoritaires et vont se recombiner avec les électrons majoritaires. Les électrons "injectés" dans la région "P" sont minoritaires et vont se recombiner avec les trous majoritaires.

Le courant qui traverse la diode, mesurable de l'extérieur, est donc la somme des courants d'électrons dans la zone "N" et de trous dans la zone "P" consommés dans le phénomène de recombinaison.

Considérons de la "diode épaisse" : les contacts extérieurs sont situés à des distances de la jonction nettement plus grandes que les longueurs de diffusion des porteurs minoritaires. Dans ce cas l'évolution de la densité des porteurs positifs du côté "N" en régime stationnaire s'écrit :

$$p_n(x) - p_n = (p'_n - p_n) \exp - \left| \frac{x - x'_n}{L_p} \right| \quad (I.34)$$

Le courant de diffusion engendré par les trous qui traversent la jonction est alors :

$$J_{diff} = -qD_p \left[\frac{d(p_n(x) - p_n)}{dx} \right]_{x=x'_n} = \frac{qD_p D_n}{L_p} \left| \exp \frac{qV_j}{k_B T} - 1 \right| \quad (I.35)$$

Le courant généré par la diffusion des charges positives du côté "N" croit exponentiellement en fonction de la tension V_j appliquée sur la jonction.

Le **courant direct** I_D (*Forwardcurrent*) traversant la jonction est la somme du courant de diffusion des trous du côté "N" et du courant de diffusion des électrons du côté "P".

$$I_D = S J_{diffp} + J_{diffn} = Sq \frac{D_p p_n}{L_p} + \frac{D_n n_p}{L_n} \exp \frac{qV_j}{k_b T} - 1 \quad (\text{I.36})$$

Que l'on écrit souvent sous la forme :

$$I_D = I_S \exp \frac{qV_j}{k_b T} - 1 \quad (\text{mA}) \quad (\text{I.37})$$

Avec :

$$I_S = Sq n_i^2 \frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \quad (\text{I.38})$$

I_S est appelé **courant de saturation**. Il ne dépend pas de la tension appliquée ni du champ électrique mais varie très fortement avec la température :

$$\frac{I_S}{I_S} = 3 + \frac{E_g}{k_b T} \frac{T}{T} \quad (\text{I.39})$$

Le courant direct traversant une jonction croit exponentiellement en fonction de la tension V_j appliquée sur la jonction.

I.5.4 Jonction PN polarisé inverse :

On porte la partie "P" de la jonction à un potentiel négatif par rapport à la partie "N". V_j la différence de potentiel créée par la source extérieure **au niveau de la jonction** est négative.

Le potentiel de la partie "N" est le même, dans le diagramme énergétique ci-contre le niveau de FERMI du côté "N" ne bouge pas.

Lorsque la différence de potentiel V_j négative est appliquée sur la jonction, le niveau de FERMI du côté "P" monte de la quantité qV_j .

La hauteur de la barrière de potentiel qui était de qV_b sans polarisation est maintenant plus grande et elle vaut :

$$qV''_b = qV_b - qV_j \quad (\text{eV}) \quad (\text{I.40})$$

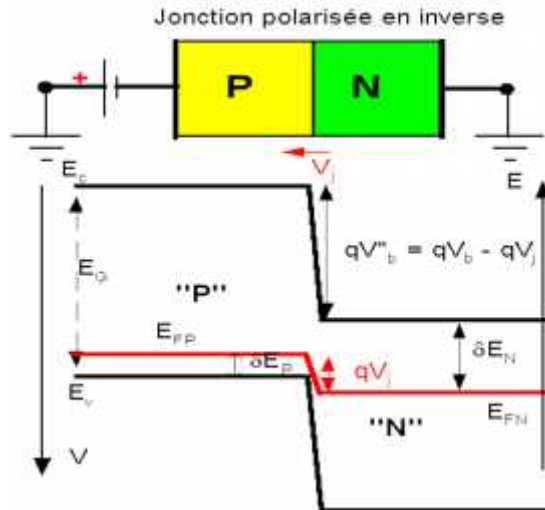


Figure I.14 : Jonction PN polarisé inverse

En appliquant une polarisation inverse, on augmente la hauteur de la barrière de potentiel qui existait quand la jonction n'était pas polarisée.

Épaisseur de la ZCE en polarisation directe :

$$W'' = W \sqrt{1 - \frac{V_j}{V_b}} \quad (\mu m) \quad (I.41)$$

Dans la relation : en intègre : $V''_b = V_b - V_j$, on obtient :

En appliquant une polarisation inverse ($V_j < 0$), on augmente la largeur de la zone désertée

Calcul du champ électrique maximum :

La jonction étant abrupte, le champ électrique dans la ZCE a une forme triangulaire et $E''_M = -2 V''_b / W''$: alcul du champ électrique maximum :

$$E''_M = E_{M'} \sqrt{1 - \frac{V_j}{V_b}} \quad \left(\frac{V}{cm}\right) \quad (I.42)$$

En appliquant une polarisation inverse, on augmente le champ électrique dans la ZCE.

Le courant inverse :

En polarisation inverse, la densité des trous à la sortie de la ZCE du côté "N" devient :

$$p''_n = p_n \exp(-qV''_b / k_B T) \quad \text{avec : } V''_b = V_b - V_j \quad \text{et : } p''_n = p_n \exp - \left(\frac{qV_j}{k_B T}\right) \quad (cm^{-3}) \quad (I.43)$$

De la même manière la densité des électrons à la sortie du la ZCE du côté "P" est :

$$n''_p = n_p \exp - \left(\frac{qV_j}{k_B T}\right) \quad (cm^{-3}) \quad (I.44)$$

Le même calcul que pour le courant direct mène à la même relation :

$$I_D = I_S \left| \exp \frac{qV_j}{k_B T} - 1 \right| \quad (1.45)$$

Mais comme V_j est négative $\exp (qV_j/k_B T)$ tend vers 0 , le courant inverse I_i est :

$$I_i = - I_S \text{ (ns)}$$

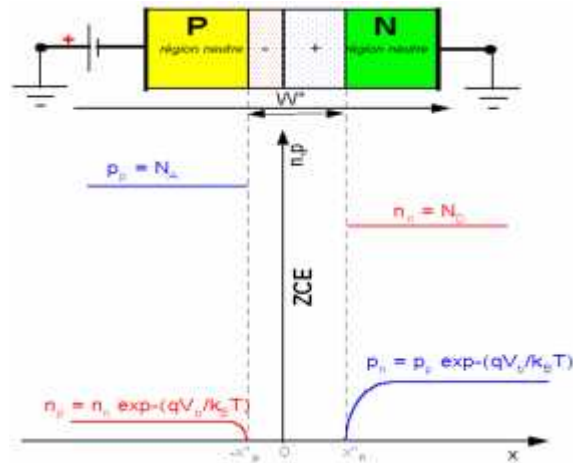


Figure I.15 : La densité des porteurs majoritaires et minoritaires jonction PN polarisé inverse

Le courant inverse traversant une jonction polarisée en inverse est très faible, indépendant de la tension appliquée et varie fortement avec la température. [11]

Caractéristique I(V) :

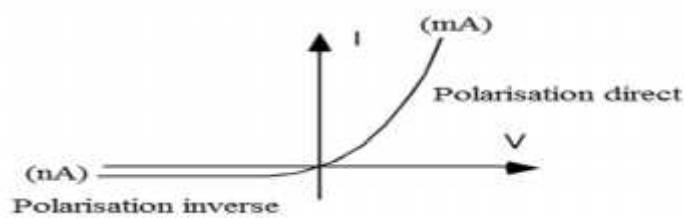


Figure I.16 : Polarisation direct et inverse I(V).

I.6. Effet photovoltaïque :

Quand une jonction PN est éclairée par des photons d'énergie supérieure à la valeur du gap E_g , des paires électron-trou sont générées et séparées sous l'influence du champ électrique interne qui règne dans la zone de transition, dite de charge d'espace.

Expérimentalement, il est possible d'étudier cet effet de deux manières :

a) Lorsque la jonction est utilisée sans polarisation extérieure, une différence de potentiel apparaît à ses bornes. C'est le fonctionnement en photopile. Les paires électron-trou créées lors de l'illumination sont collectées dans la zone de charge d'espace, l'existence du champ électrique interne permettant de s'affranchir d'une source extérieure. Les convertisseurs photovoltaïques d'énergie solaire fonctionnent de cette façon.

b) Lorsque la jonction est polarisée, son courant de saturation est modifié par l'apport de paires électron-trou. C'est le fonctionnement en photodiode. Dans cette modélisation on s'intéresse au premier mode de fonctionnement

I.6.1 - Comportement de la cellule photovoltaïque éclairée :

En pratique, la cellule est chargée par une résistance R_{ch} où est dissipée la puissance utile fournie. Sous éclairage dans la région de charge d'espace, le champ interne \bar{E}_i va séparer et collecter les paires électron-trou photogénérées. Les porteurs majoritaires (électrons dans le matériau **N**, trous dans le matériau **P**) sont repoussés de la zone de charge et s'arrêtent rapidement dans les zones mortes **P** et **N** où le champ est nul. Seuls peuvent franchir la zone de transition ceux d'entre eux qui ont une énergie (thermique) supérieure à eV_0 . Les porteurs minoritaires au contraire sont accélérés par le champ \bar{E}_i et traversent la zone de charge d'espace, provoquant le passage du courant électrique de la région **N** vers la région **P** (à l'intérieur de la cellule). La zone **P** est portée à un potentiel positif par rapport à la région **N** à cause de la circulation du courant dans la résistance R_{ch} . [12] Si l'on considère, en première approximation, que les chutes de tension dans les régions quasi neutres **P** et **N** sont nulles, la différence de potentiel aux bornes de la charge se retrouve aux extrémités de la zone de transition. Dans le cas d'une résistance de charge R_{ch} très grande, rendant le courant négligeable, on est dans les conditions de circuit ouvert : la tension aux bornes de la cellule V_{co} est alors maximale. [13]

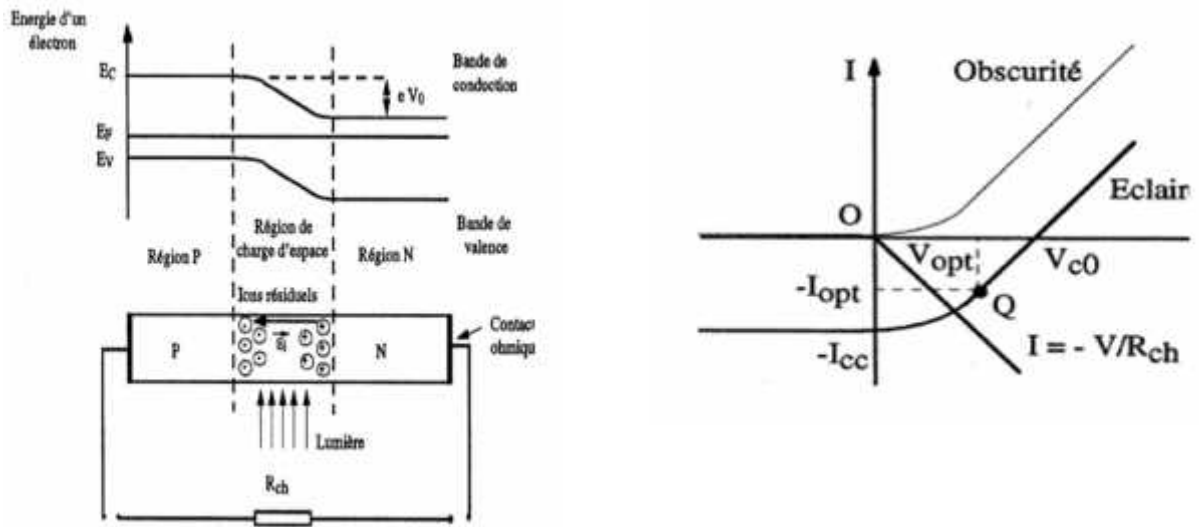


Figure I.17 : Caractéristique d'une cellule PV.

I.6.2. Les modèles analytiques :

Il existe plusieurs modèles pour représenter la cellule photovoltaïque :

- 1- Modèle idéal
- 2- Modèle avec pertes ohmiques
- 3- Modèle à une diode -Modèle 1-D
- 4- Modèle à deux diodes - Modèle 2-D

Ces modèles seront traités dans le chapitre III.

Conclusion :

La jonction PN constitue l'élément de base de toute l'électronique, et constitue le module élémentaire dont dépend le fonctionnement d'un grand nombre de dispositifs à semi-conducteurs. Les résultats obtenus trouveront leurs applications dans de nombreux composants plus complexes.

Chapitre II : Principe de la conversion photoélectrique

Introduction :

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancées sur le plan technologiques et industriel, en effet le silicium et l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique.

En effet le mot "photovoltaïque" vient de la grecque, "Photo" qui signifie lumière et de "Voltaïque" qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 - 1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la *lumière électricité* .

Pour décrire le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, il est nécessaire de présenter le rayonnement solaire qui est la source d'énergie incidente. Mais commençons d'abord par un rappel historique des dates importantes de la découverte de l'effet photovoltaïque à la réalisation de cellules photovoltaïques. [14]

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) ainsi que les différentes structures de silicium, et les différentes types des cellules photovoltaïques.

II.1. Historique de l'effet photovoltaïque :

L'effet photoélectrique est l'émission d'électrons d'un matériau, qui peut être un métal ou un semi-conducteur, lorsqu'il est éclairé. Les électrons ne sont émis que si la fréquence de la lumière est suffisamment élevée (la fréquence limite dépend du matériau), alors que leur nombre, qui détermine l'intensité du courant, est proportionnel à l'intensité de la source lumineuse. Deux effets sont à distinguer : l'émission d'électrons proprement dite et la modification de la conductivité du matériau qui donne l'effet photovoltaïque.

La conversion photovoltaïque repose sur l'effet photovoltaïque qui consiste en la transformation de l'énergie lumineuse en énergie électrique. La naissance d'une technologie résulte bien souvent de la combinaison des résultats des travaux connexes menés par nombre de chercheurs. C'est bien le cas pour le photovoltaïque. De la découverte de l'effet photoélectrique à la conception de la cellule photovoltaïque il a fallu attendre un siècle.

Les dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

1839 : Le français **Alexandre Edmond Becquerel (1820/1891)** découvre l'effet photoélectrique .Avec son père **Antoine César Becquerel (1788/1878)**, ils présentent devant

Chapitre II : Principe de la conversion photoélectrique

l'Académie des Sciences l'effet photoélectrique expérimenté avec des électrodes de platine et de cuivre plongées dans une solution électrolytique acide.

1873 : Willoughby Smith (1828/1891), ingénieur électricien anglais, découvre avec son Assistant **J. Mayles** propriétés photosensibles du sélénium.

1875 : Ernst Werner Von Siemens (1816/1892), ingénieur et industriel allemand, expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

1877 : William Grylls Adams (1836/1915), professeur anglais, met en évidence l'effet photovoltaïque du sélénium.

1885 : Ernst Werner von Siemens précise que la conductivité du sélénium est proportionnelle à la racine carrée de l'intensité de la lumière et imagine les possibilités de captage de l'énergie solaire.

1887 : Heinrich Rudolf Hertz (1857/1894), physicien allemand, publie les résultats de ses expériences photoélectriques dans un article intitulé "Sur un effet de la lumière ultraviolette sur les décharges électriques".

1902 : Philippe Lenard (1862/1947), physicien allemand, fait une série d'observations sur l'énergie cinétique des électrons et détermine que le seuil de l'effet photoélectrique dépend de la fréquence de la lumière incidente.

1905 : Albert Einstein (1879/1955), physicien allemand, publie "Sur un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière". En 1921, il reçoit le prix Nobel de physique pour son apport à la physique théorique et particulièrement son explication de l'effet photoélectrique.

1916 : Robert Andrews Millikan(1868/1953), physicien américain, confirme expérimentalement les travaux d'Einstein.

1939 : Russel Ohl (1898/1987), ingénieur américain, découvre la jonction p-n et ses travaux le conduisent à développer la première cellule solaire en silicium.

1954 : La première photopile a été développée aux États-Unis par les chercheurs des laboratoires Bell (**D.M. Chapin, C.S. Fuller, et G. L. Pearson**), qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Leur cellule solaire a un rendement de conversion de **6 %**. Cette découverte constitue pour l'industrie

Chapitre II : Principe de la conversion photoélectrique

partiale naissante une solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites.

1958 : Une cellule avec un rendement de conversion de **9 %** est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace. [15]

II.2. Le rayonnement solaire :

II.2.1. Notion sur le rayonnement solaire :

Le Soleil est une « petite » étoile, une boule de gaz, dont le diamètre est de **1 391 000 km**, et qui est placée à **150 000 000 km** de nous. Cette distance est si grande que sa lumière nous parvient **8** minutes après avoir été émise. N'oublie pas qu'elle voyage à la vitesse de **300 000 km/s**, c'est-à-dire qu'elle fait **7 fois** le tour de la Terre en 1 seconde. Quant à son volume, il pourrait contenir **1 300 000** Terre. Avec une densité de **1,41** (contre 5,5 pour la Terre), sa masse est de **330 000** fois celle de la Terre (**1,99.10³⁰ kg** ou 2 milliards de milliards de milliards de tonnes). Il représente **99,867 %** de la masse totale du système solaire, c'est-à-dire que l'ensemble de toutes les planètes et comètes ne représente que le millième du Soleil. Il a déjà effectué **20 tours** de la Galaxie en traversant des densités variables de poussières qui interceptent une partie du rayonnement qu'il nous envoie. Cela a dû certainement avoir des conséquences sur le climat terrestre. Bien que sa lumière soit **600 000** fois plus élevée que celle de la Lune, il n'est visible qu'à une distance de **60 al** (année-lumière).

Notre Soleil est donc une énorme boule de gaz composée de **70%** d'hydrogène et de **28%** d'hélium, les **2%** restants représentent la plupart des autres atomes présents dans l'univers. Les étoiles sont les usines qui créent tous les matériaux existant dans l'univers, à partir de l'hydrogène. Plus de **60** éléments chimiques furent identifiés, tel **OH (radical hydroxyle)**, **CH (radical méthylique)** et aussi du titane, du **plomb**, du **mercure**, du **chlore**, du **silicium**, **cuiivre**, **calcium**, **indium**, **antimoine**, **zirconium**, **rhodium**, etc...

L'intensité lumineuse issue du soleil normalement incidente sur la surface de la Terre est appelée la constante solaire. Cette constante est approximativement d'une valeur de **1,4 kW/m²** au-dessus de la couche atmosphérique et est réduite sur Terre à **1 kW/m²** par réflexion et absorption des particules présentes dans la couche atmosphérique.

II.2.2. L'énergie émise par le soleil :

C'est une gigantesque bombe thermonucléaire dont la puissance, émise sous forme de photon, représente un chiffre considérable : **3,82. 10²⁶ Watts**. C'est le résultat de la combustion de 596 millions de tonnes par seconde d'hydrogène convertis en **592** millions de

Chapitre II : Principe de la conversion photoélectrique

tonnes par seconde d'hélium. La perte, **4 millions** de tonnes/seconde, se traduit sous forme de rayonnement gamma. Chaque cm^2 de sa surface émet une énergie de 6 kilowatts. Mais il n'arrive sur Terre que 5 milliardièmes (5.10^{-9}) de cette puissance. Cette pile thermonucléaire fonctionne grâce à la transformation de 4 noyaux d'atomes d'hydrogène qui fusionnent pour fournir 1 noyau d'atome d'hélium avec la libération d'une énergie de **25 000 mégawatts** par gramme et par seconde (**100 milliards** de bombes à hydrogène de 1 mégatonne).

Cette énergie provient du centre. La pression comprime les noyaux d'hydrogène et permet ainsi la fusion. Il ne faut pas confondre la fusion avec la fission, qui casse les noyaux dans une bombe atomique. La fusion d'un gramme d'hydrogène libère 140 milliards de calories, la calorie étant la quantité de chaleur nécessaire pour faire passer un gramme d'eau de **15°C** à **16°C**. Cela correspond à **0,14 W/cm²**.

Le transfert d'énergie du centre vers la surface s'effectue par rayonnement et par convection. La zone de convection est limitée par la photosphère, épaisse de **200 km**, et appelée ainsi parce que presque la totalité du rayonnement visible provient d'elle. Elle a une apparence granuleuse, provoquée par la turbulence de la partie supérieure de la zone de convection. La taille d'un granule peut dépasser celle de la France et la durée de vie peut aller de 10 minutes à plus de 10 heures, selon la taille. [16] (fig. II.1)

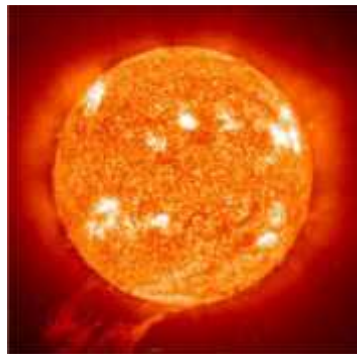


Figure II.1 : Le soleil

II.2.3. Normes de mesure du spectre d'énergie lumineuse émise par le soleil

Le soleil est constitué principalement de gaz, dont la fusion continue produit une quantité d'énergie phénoménale. La fusion des atomes d'hydrogène en atomes d'hélium permet en effet d'atteindre des températures de l'ordre de **20 millions** de degrés Kelvin. Cette énergie se traduit par l'émission d'un rayonnement composé de longueurs d'ondes

Chapitre II : Principe de la conversion photoélectrique

majoritairement comprises entre $0.2 \mu\text{m}$ et $3 \mu\text{m}$. Hors atmosphère le rayonnement émis par le soleil est constitué de [17]

9% d'UV	$(0.1\mu\text{m} < \lambda < 0,4 \mu\text{m})$
43% de visible	$(0.4\mu\text{m} < \lambda < 0,75 \mu\text{m})$
48% d'infrarouges	$(0.75\mu\text{m} < \lambda < 5 \mu\text{m})$

II.3. Principe de la conversion photovoltaïque :

Le mot « photovoltaïque » vient du grec « **photos** » qui signifie lumière et de « **Volta** » du nom du physicien italien qui en 1800 découvrit la pile électrique. La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique repose sur l'effet photoélectrique, c'est-à-dire sur la capacité des photons à créer des porteurs de charge électrons et trous, dans un matériau. Lorsqu'on illumine un semi-conducteur avec un rayonnement de longueur d'onde appropriée (l'énergie des photons doit être au moins égale à celle du gap énergétique du matériau), l'énergie des photons absorbés permet des transitions électroniques depuis la bande de valence vers la bande de conduction du semi-conducteur, créant ainsi des paires électron-trou, qui peuvent contribuer au transport du courant par le matériau lorsqu'on le polarise. Si on illumine une jonction **PN** (dispositif dans lequel le dopage du semi-conducteur passe brusquement d'un type **P** à un type **N**), les paires électron-trou qui sont créées dans la zone de charge d'espace de la jonction sont immédiatement séparées par le champ électrique qui règne dans cette région, et entraînées dans les zones neutres de chaque côté de la jonction. Si le dispositif est isolé, il apparaît une différence de potentiel aux bornes de la jonction ; s'il est connecté à une charge électrique extérieure, on observe le passage d'un courant alors qu'on n'applique aucune tension au dispositif. C'est le principe de base d'une cellule photovoltaïque . [18]

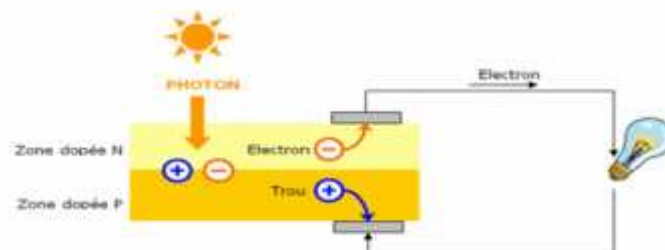


Figure II.2 : Le semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique

Chapitre II : Principe de la conversion photoélectrique

II.3.1.l'interaction rayonnement /semi-conducteur :

L'écart énergétique entre les bandes de valence et les bandes de conduction, ou gap, représente une caractéristique fondamentale des semi-conducteurs représente les différentes transitions possibles selon la nature du gap. Quand le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence coïncident dans l'espace des k , il s'agit d'un gap direct. Les transitions inter-bande s'effectuent verticalement, et sont donc radiatives .Ceci illustre le fonctionnement des semi-conducteurs binaires **III-V**, tels que le **(GaAs)**, beaucoup utilisé en optoélectronique. Dans le cas du silicium, le gap est indirect : les transitions électroniques entre les extrema des bandes sont obliques, donc non radiatives puisqu'elles impliquent un changement du vecteur d'onde de l'électron. Les électrons du sommet de la bande de valence peuvent toutefois être directement excités vers le minimum relatif central de la bande de conduction grâce à un photon de plus grande énergie. Pour que la transition s'effectue dans le gap indirect, il faut qu'un phonon soit au préalable absorbé (ou émis) par l'électron, afin que le vecteur d'onde de ce dernier correspond au maximum de la bande de valence, pour absorber un photon (**fig. II.3**). Notons que la valeur du gap du silicium est de **1.12 eV à 300 K** (ce qui correspond à une longueur d'onde de 1107 nm), mais celle du gap indirect vaut **3.4 eV (soit 365nm)**. [19]

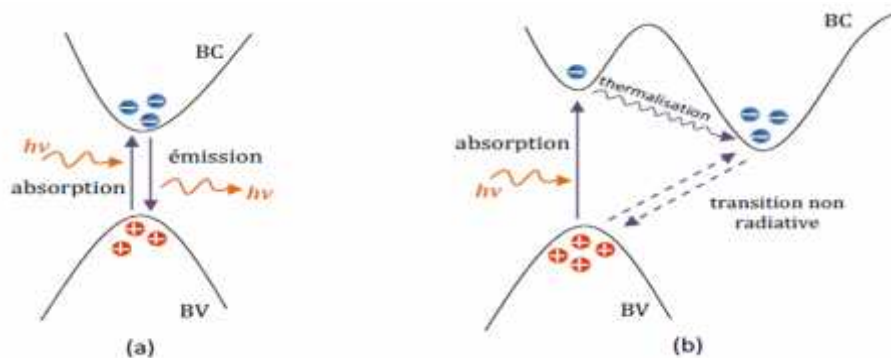


Figure II.3 : Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur:
(a) un semi-conducteur à gap direct, (b) à gap indirect.

II.4. Les cellules photovoltaïques à base de silicium :

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque 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

Chapitre II : Principe de la conversion photoélectrique

fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule. [18]

II.4.1 Le silicium et ses propriétés :

Il existe différentes techniques permettant la conversion directe de la lumière solaire en électricité. La plus connue est la conversion photovoltaïque effectuée à l'aide de matériaux semi-conducteurs tel que **le silicium (Si)**, **le germanium (Ge)**, **le sélénium (Se)** ou les composés semi-conducteurs tel que **l'arséniure de gallium (GaAs)**, ou le tellure de cadmium (**CdTe**). Les cellules solaires de type (**GaAs**) sont très coûteuses dans leur fabrication et leur utilisation est aujourd'hui limitée aux applications spatiales.

La majorité des cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir du silicium cristallin, car il possède la caractéristique d'être non toxique contrairement au cadmium ou au sélénium. En plus, il permet d'atteindre des efficacités de conversion remarquables. Le silicium constitue environ 28% de l'écorce terrestre sous forme de composés (silicates, silice), ce qui en fait une source quasi inépuisable. Il présente des propriétés optiques : l'absorption, la réflexion, la transmission et propriétés électriques spécifiques pour assurer la conversion photovoltaïque.

II.4.2. Les Différentes types des cellules photovoltaïques :

Il existe trois types principaux de cellules :

II.4.2.1. Les cellules monocristallines :

C'est la première génération des photopiles. Elle s'approche le plus du modèle théorique, ces cellules sont effectivement composées d'un seul cristal divisé en deux couches. Les matériaux de base pour de telles cellules ont de nombreux cristaux de silicium spécialement produits à cet effet, d'une taille d'environ de 10cm. ces cristaux sont ensuite sciés en plaques ultrafines, dopées et connectées. Les cellules monocristallines actuelles permettent d'obtenir des rendements élevés, de l'ordre de 15 à 20% (le rendement théorique maximal pour des cellules au silicium est de l'ordre de 40%).

Ces cellules souffrent néanmoins des inconvénients :

- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.
- Une durée d'amortissement de l'investissement en énergie élevée (jusqu'à 7 ans).

Chapitre II : Principe de la conversion photoélectrique



Figure II.4 : Une cellule photovoltaïque monocristalline

II.4.2.2. Les cellules poly-cristallines :

Il est constitué de plusieurs monocristaux juxtaposés dans différentes orientations donnant à la cellule un aspect mosaïque. Le silicium poly-cristallin est la technologie la plus répandue sur le marché mondial en raison de son bon rendement (environ 15 %) pour des coûts de fabrication maîtrisés. Il offre actuellement un bon rapport qualité/prix

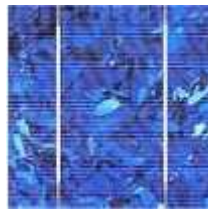


Figure II.5 : Une cellule photovoltaïque poly-cristalline

II.4.2.3. Les cellules amorphes en couche mince :




Le silicium est déposé en couche mince sur une plaque de verre ou un autre support souple. L'organisation irrégulière de ses atomes lui confère en partie une mauvaise semi-conduction. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire, par exemple pour l'alimentation des montres, des calculatrices, ou des luminaires de secours. Elles se caractérisent par un fort coefficient d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs, de l'ordre du micron. Par contre son rendement de conversion est faible (de 7 à 10 %) et les cellules ont tendance à se dégrader plus rapidement sous la lumière. [20]



Figure II.6 : Une cellule photovoltaïque couche-mince

Chapitre II : Principe de la conversion photoélectrique

Tableau II.1 : Classification de différents types de cellules photovoltaïques au silicium
[4]

	Silicium monocristallin	Silicium polycristallin	Silicium amorphe
Types			
Rendement	De 15% à 19%		7% à 10%
Durée de vie	35 ans	35 ans	< 10 ans
Avantage	Bon rendement en soleil direct	Bon rendement en soleil direct (moins que le monocristallin mais plus que l'amorphe)	Souplesse Prix moins élevé que les cristallins Bon rendement en diffus
Inconvénient	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...) Prix élevé.	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...) Prix élevé.	Mauvais rendement en plein soleil.

II.4.2. Avantages et inconvénients des systèmes Photovoltaïques :

II.4.2.1. Avantages :

Les cellules monocristallines

- Première génération de photopiles.
- Un taux de rendement excellent de 15 % et jusqu'à 24 % en laboratoire.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.

. Les cellules poly-cristallines

- Coût de production moins élevé.
- Procédé moins gourmand en énergie.
- Rendement de 13 % et jusqu'à 20 % en laboratoire.

Les cellules amorphes

- Coût de production bien plus bas.
- Rendement de seulement 6 % par module et de 14 % en laboratoire. [4]

Chapitre II : Principe de la conversion photoélectrique

Conclusion :

Pour une photopile, la production d'électricité est liée à la production d'électrons (et de trous) par les photons de la lumière qui éclaire le dispositif. Plus de photons frappent la cellule, plus la quantité d'électricité produite est importante. Pour un éclairage donné, cette quantité dépend du rendement de conversion de la photopile (énergie produite/énergie reçue) ; c'est pourquoi le **silicium** (dopé P et N) qui présente le meilleur rendement théorique de conversion est très utilisé dans la fabrication des cellules.

Chapitre III : Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Introduction :

De nombreux modèles mathématiques, ont été développés pour représenter le comportement très fortement non linéaire qui résulte de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de la réalisation des cellules PV.

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles représentatifs pour la cellule PV qui diffèrent entre eux par la procédure et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de la tension et du courant final du générateur photovoltaïque.

III.1. Représentations électriques d'une cellule photovoltaïque :

III.1.1. Différents modèles d'une cellule photovoltaïque :

III.1.1.2. Modèle de base :

Le principe de l'effet photovoltaïque n'est autre que celui d'une diode, ainsi lorsque l'on éclaire la jonction PN, la cellule étant chargée par une résistance, on observe l'apparition d'un courant I traversant une charge R_{Ch} , et une tension V à la borne de cette charge.

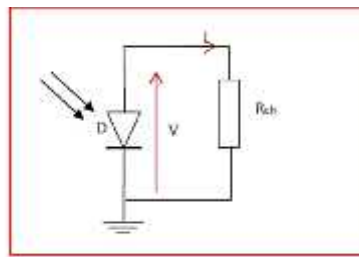


Figure III.1 : Schéma d'application de l'effet photovoltaïque

III.1.1.2. Modèle idéal :

La réflexion précédente nous permet d'aboutir au modèle électrique équivalent de la cellule photovoltaïque (**fig.III.2**). C'est le modèle le plus simple pour représenter la cellule solaire, car il ne tient compte que du phénomène de diffusion. Le circuit équivalent simplifié d'une cellule solaire se compose d'une diode et d'une source de courant montés en parallèle. La source du courant produit le photon courant I_{PV} qui est directement proportionnel à l'éclairement solaire G .

Chapitre III : Modélisation d'une cellule photovoltaïque

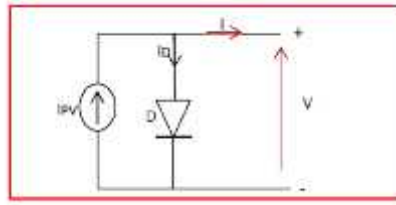


Figure III.2 : Circuit équivalent d'une cellule PV –Model idéal

L'équation courant tension **I-V** du circuit équivalent est donné comme suit :

$$I = I_{pv} - I_D \quad (\text{III.1})$$

I : courant fourni par la cellule

I_{pv} Photon-courant de la cellule proportionnelle à l'éclairement (**G**)

$$I_D = I_0 \left| \exp\left(\frac{V}{aV_T}\right) - 1 \right| \quad \text{avec} \quad V_T = \frac{kT}{q} \quad (\text{III.2})$$

Avec :

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode.

V_T : Tension thermique.

k : la constante de Boltzmann (**$1.38.10^{-23}$ joules/kelvin**).

T : la température cellule en kelvin

Q : la charge d'un électron (**$1.6.10^{-19}$ C**).

a : le facteur d'idéalité de la jonction.

V : la tension aux bornes de la cellule.

III.1.1.3.Modèle avec pertes ohmiques :

Ce modèle tient compte de la résistivité du matériau et des pertes ohmiques dues aux niveaux des contacts, ce qui permet une meilleure représentation du comportement électrique de la cellule par rapport au modèle idéal. Ces pertes sont représentées par une résistance série R_s dans le circuit équivalent (**fig.III.3**) :

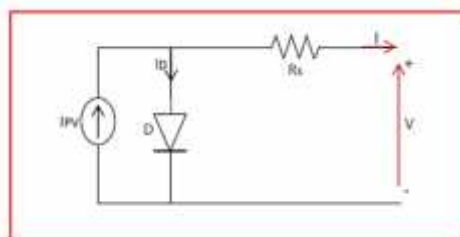


Figure III.3 : Circuit équivalent d'une cellule PV

Chapitre III : Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Après analyse du circuit, l'équation courant- tension est donnée comme suit :

$$I = I_{pv} - I_0 \left| \exp\left(\frac{V+IR_s}{\alpha V_T}\right) - 1 \right| \quad (\text{III.3})$$

R_s : La résistance série caractérisant les diverses résistances de contacts et de connexions

III.1.1.4. Modèle a une diode :

Le choix du modèle à cinq paramètres, permet d'effectuer une analyse et une évaluation des performances du module photovoltaïque, les plus proches de la réalité.

Ce model tient compte non seulement des pertes en tension exprimée par la résistance série R_s mais aussi des fuites de courants exprimées par une résistance parallèle R_p . C'est le modèle sur lequel s'appuient les constructeurs en donnant les caractéristiques techniques de leurs cellules solaires il est aussi considéré satisfaisant et même une référence pour les constructeurs pour cataloguer typiquement les modules solaires. [21]

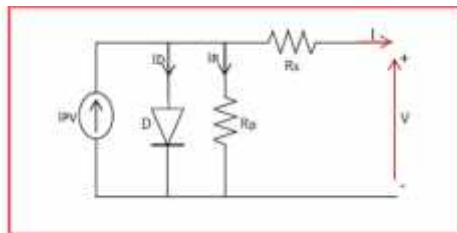


Figure III.4 : Circuit équivalent d'une cellule PV –Modèle 1-D

L'équation du courant délivré par la cellule photovoltaïque est décrite comme suit :

$$I = I_{pv} - I_0 \left| \exp\left(\frac{V+IR_s}{\alpha V_T}\right) - 1 \right| - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (\text{III.4})$$

R_p : La résistance modélisant les courants de fuites de la jonction.

III.1.1.5. Modèle à deux diodes - Modèle 2-D :

Ce modèle est dit le plus proche du comportement réel de la cellule solaire, du fait qu'il tient compte du mécanisme du transfert des charge à l'intérieur de la cellule, Les modèles à diode unique ont été fondés sur l'hypothèse que la perte de recombinaison dans la région d'appauvrissement est absente. Dans une cellule solaire réelle, la recombinaison représente une perte considérable, qui ne peut être adéquatement modélisés en utilisant une seule diode. L'examen de cette perte entraîne un modèle plus précis connu par le modèle à deux diodes. Toutefois, l'inclusion de la diode supplémentaire augmente les paramètres à sept (nouveaux paramètres : I_{02}, α_2).

Chapitre III : Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Le principal défi est maintenant d'estimer les valeurs de tous les paramètres du modèle, tout en maintenant un effort de calcul raisonnable.

Le modèle à deux diodes est présenté comme suit :

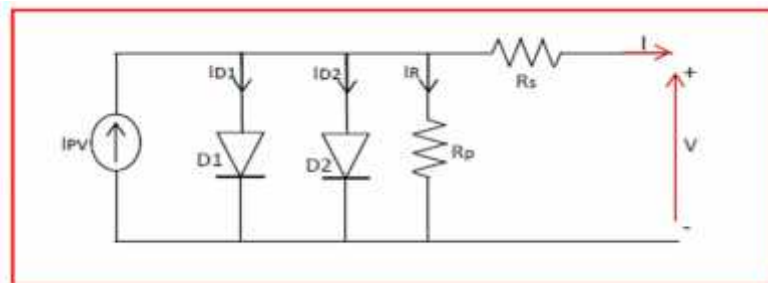


Figure III.5 : schéma électrique équivalent d'une cellule en silicium cristallin-modèle 2-D

L'équation suivante décrit le courant de sortie de la cellule photovoltaïque pour le modèle à deux diodes :

$$I = I_{pv} - I_{01} \left| \exp\left(\frac{V+IR_s}{\alpha_1 V_{T1}}\right) - 1 \right| - I_{02} \left| \exp\left(\frac{V+IR_s}{\alpha_2 V_{T2}}\right) - 1 \right| - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (\text{III.5})$$

Avec :

I_{01} : Courant de saturation inverse de la diode D1.

I_{02} : Courant de saturation inverse de la diode D2.

α_1 : Le facteur d'idéalité de la jonction de la diode D1

α_2 : Le facteur d'idéalité de la jonction de la diode D2

V_{T2} : Tension thermique de la diode D2

V_{T1} : Tension thermique de la diode D1

Les modèles de la cellule PV sont habituellement tirés des schémas équivalents (circuits électriques). Généralement, le schéma nommé : modèle à 1-D (figure) est le modèle le plus courant et sur lequel s'appuient un grand nombre de constructeurs pour donner les caractéristiques techniques de leurs cellules solaires. [22]

III.1.2. Caractéristique d'une cellule:

Sous un éclairage donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension (I-V) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. Trois grandeurs définissent cette courbe :

- Sa tension à vide : V_{CO} Cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.

Chapitre III : Modélisation d'une cellule photovoltaïque

- Son courant court-circuit : I_{CC} Cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.
- Son point de puissance maximal : MPP (en anglais : maximal power point) obtenu pour une tension et un courant optimaux V_{opt} , I_{opt} (parfois appelés aussi V_{MPP} , I_{MPP}).

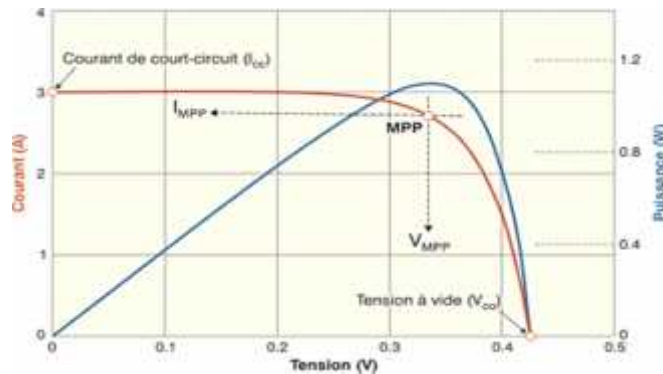


Figure III.6 : Caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule PV.

Actuellement, les cellules présentent des valeurs de l'ordre de 0.5V-3.5A-2.1 Wc.

III.1.3. Raccordement des cellules entre elles

Dans les conditions standardisées de test, la puissance maximale pour une cellule Si (silicium) de 100 cm² (10 sur 10) tourne aux alentours de 1,25 Watt. Cette cellule constitue donc un générateur de très faible puissance, insuffisant pour les applications électriques courantes. Les modules sont donc réalisés par association, en série et/ou en parallèle, de cellules élémentaires. La connexion en série augmente la tension pour un même courant alors que la connexion en parallèle augmente le courant pour une tension identique.

Pour que l'électricité générée soit utilisable pour nos applications électriques, il est donc nécessaire d'associer entre elles un grand nombre de cellules.

Les modules (généralement présentés sous forme de panneaux) sont constitués d'un certain nombre de cellules élémentaires placées en série afin de rendre la tension à la sortie utilisable.

Ces modules sont ensuite associés en réseau (série-parallèle) de façon à obtenir les tensions/courants désirés.

III.1.3.1. Association en série:

Par association en série (appelée "String"), les cellules sont traversées par le même courant et la tension résultante correspond à la somme des tensions générées par chacune des cellules.

Chapitre III : Modélisation d'une cellule photovoltaïque

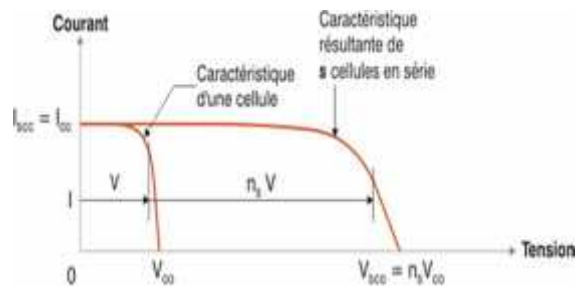


Figure III.7 : Association série

III.1.3.2. Association en parallèle :

Par association en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et le courant résultant correspond à la somme des courants générés par chacune des cellules.

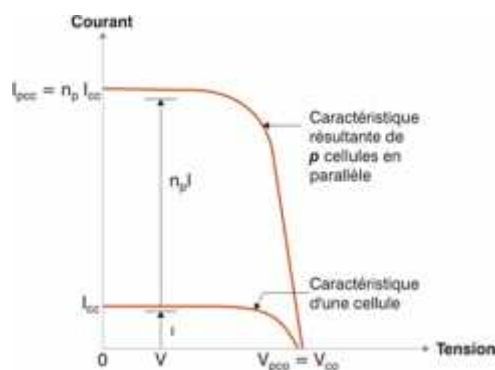


Figure III.8 : Association parallèle

III.1.3.3. Association mixte :

Les caractéristiques globales d'une installation se déduisent donc d'une combinaison des caractéristiques des constituants des $n_s * n_p$. [23]

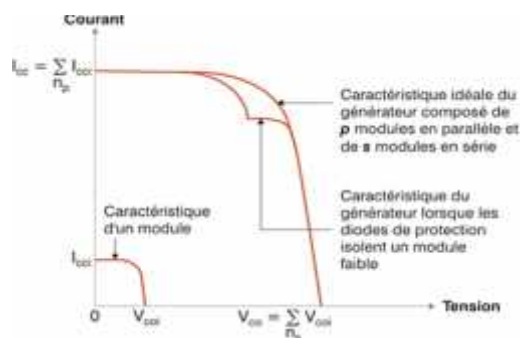


Figure III.9 : Association mixte

Chapitre III : Modélisation d'une cellule photovoltaïque

III.2. Partie modélisation :

Pour notre modélisation, on va utiliser le modèle à une diode :

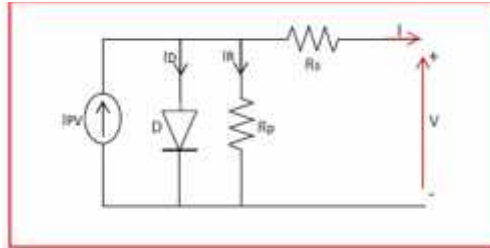


Figure III.10 : Circuit équivalent d'une cellule PV –Modèle 1-D

A partir du circuit équivalent de la figure, on peut écrire :

$$I = I_{pv} - I_D - I_{Rp} \quad (III.6)$$

Le courant qui passe dans la résistance R_p est donné par :

$$I_{Rp} = \frac{V + IR_S}{R_p}$$

Le courant dans la diode est donné par :

$$I_D = I_0 \left| \exp\left(\frac{V + IR_S}{\alpha V_T}\right) - 1 \right| \quad (III.7)$$

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (III.8)$$

L'équation du courant délivré par la cellule photovoltaïque est décrite comme suit :

$$I = I_{pv} - I_0 \left| \exp\left(\frac{V + IR_S}{\alpha V_T}\right) - 1 \right| - \frac{V + IR_S}{R_p} \quad (III.9)$$

III.2.1. Calcul de I_{pv} :

Le courant de court-circuit I_{cc} est l'intensité 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 fonction de la température, de la longueur d'onde du rayonnement de la surface active de la cellule, de la mobilité de porteurs. Ce courant est linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçue. Il est produit lorsqu'elle est soumise à un court-circuit $V = 0$. Comme $R_S \ll R_p$ on peut admettre que : $I_{pv} \approx I_{cc}$ pour $(G = 1000 \text{ W/m}^2)$. L'équation devient :

$$I = I_{cc} - I_0 \left| \exp\left(\frac{V + IR_S}{\alpha V_T}\right) - 1 \right| - \frac{V + IR_S}{R_p} \quad (III.10)$$

Chapitre III : Modélisation d'une cellule photovoltaïque

III.2.2. Calcul de I_0 :

La tension en circuit ouvert V_{ocn} est calculée lorsque le courant est nul. Comme suit :

$$V_{ocn} = \alpha V_T \ln \frac{I_{scn}}{I_{0n}} + 1 \quad (\text{III.11})$$

Comme $I_{cc} \gg I_0$, il est possible aussi de calculer V_{ocn} par la relation suivante :

$$V_{ocn} = \alpha V_T \ln \frac{I_{scn}}{I_{0n}}$$

Le courant de saturation inverse de référence de la diode I_{0n} est donné par :

$$I_{0n} = \frac{I_{scn}}{\exp \frac{V_{ocn}}{\alpha V_T} - 1}$$

V_T : la tension thermique pour une température de référence T.

Si l'on suppose que la résistance parallèle est infinie ($R_p = \infty$) l'équation se simplifie à :

$$I = I_{pv} - I_0 \exp \frac{V + I R_S}{\alpha V_T} - 1 \quad (\text{III.12})$$

La méthode de Newton est utilisée généralement pour résoudre l'équation non linéaire

Rappelons que la méthode de Newton est exprimée par :

$$X_{n+1} = X_n - \frac{f(X_n)}{f'(X_n)}$$

$f'(X_n)$ Dérivée de la fonction $f(X_n)$.

X_n Valeur actuelle de x.

X_{n+1} Valeur prochaine de x.

L'application de la méthode de Newton permet de calculer la valeur du courant I pour chaque itération par :

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{cc} - I_n - I_0 \exp \frac{V + I_n R_S}{\alpha V_T} - 1 - \frac{V + I_n R_S}{R_p}}{-1 - I_0 \frac{R_S}{V_T} \exp \frac{V + I_n R_S}{\alpha V_T} - 1 - \frac{R_S}{R_p}}$$

Les équations établies jusqu'à présent ne sont valables que pour un mode de fonctionnement spécifique en termes d'éclairement et de température. Pour généraliser la modélisation pour différents éclaircissements et températures, nous utilisons le modèle qui déplace la courbe de référence à de nouveaux emplacements.

Alors la nouvelle valeur du courant de court-circuit I_{cc} I_{pv} pour une irradiation G et une température T données est calculée selon l'équation suivante :

Chapitre III : Modélisation d'une cellule photovoltaïque

$$I_{pv} G, T = \frac{G}{G_n} I_{pvn} + K_I(T - T_n) \quad (\text{III.13})$$

I_{pvn} ou I_{ccr} : le courant photonique sous des condition des référence

T_n La température de référence, 298°K (25°C).

K_I : le coefficient de variation du courant en fonction de la température ($K_I=0.65e-3$).

Le courant de saturation de la diode dépend de la température. Sa valeur pour une température T donnée est calculée par [24]

$$I_0 = I_{0n} \frac{T}{T_n}^3 \exp \frac{qE_g}{\alpha k} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \quad (\text{III.14})$$

III.2.3 Puissance d'une cellule PV

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température, vitesse de circulation de l'air ambiant, etc...), la puissance électrique P(W) disponible aux bornes d'une cellule PV est :

$$P = VI$$

P(W) : Puissance fournie par la cellule PV.

V(V) : Tension mesurée aux bornes de la cellule PV.

I(A) : Intensité débitée par la cellule PV.

III.2.3.1 Puissance maximale d'une cellule PV :

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale $P_{max, idéal}$ correspondrait donc à la tension de circuit ouvert V_{0cn} multipliée par le courant de court-circuit I_{cc} :

$$P_{max, idéal} = V_{0cn} I_{cc}$$

$P_{max, idéal}$ (W) : La puissance fournie par la cellule PV.

V_{0cn} (V) : La tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV.

I_{cc} (A) : L'intensité de court-circuit débitée par la cellule PV.

III.2.3.2 Facteur de forme FF :

Le facteur de forme représente l'efficacité de la cellule, il peut nous renseigner sur le vieillissement de la cellule. C'est le rapport entre la puissance maximale que peut fournir une cellule et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (puissance optimale).

Chapitre III : Modélisation d'une cellule photovoltaïque

$$FF = \frac{P_{mp}}{P_{opt}} = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{ocn} \cdot I_{CC}}$$

III.2.3.3 Point de puissance maximale Pm :

L'utilisation optimale d'une photopile consiste à faire fonctionner une charge sous la tension maximale et à un courant maximal. En effet, suivant la formule $P=V.I$, pour que P soit maximal : il faut être dans les conditions où le produit $V.I$ est maximale, c'est le point de charge idéal de la photopile, ou point de puissance maximale Pm

III.2.3.4 Rendement énergétique maximum η_m :

Le rendement de conversion d'énergie est le rapport de la puissance générée et de la puissance du rayonnement solaire incident P_o . On appelle rendement maximal le rapport de la puissance maximale fournie P_{max} sur la puissance du rayonnement solaire incident P_i [21]

$$\eta_m = \frac{P_{max}}{P_i} = \frac{P_m \cdot I_m}{\Phi \cdot S}$$

S : Surface de la cellule solaire. :

: Flux incident

(I_m , V_m) : Coordonnées du point de fonctionnement pour obtenir la puissance maximale.

Chapitre III : Modélisation d'une cellule photovoltaïque

On présentera une étude de modélisation et de simulation d'un système photovoltaïque. Ainsi que la modélisation et la simulation ont été effectués sous le logiciel **MATLAB/ Simulink**.

III.3. L'outil Matlab/Simulink :



MATLAB fait également partie d'un ensemble d'outils intégrés dédiés au traitement du Signal. En complément du noyau de calcul Matlab, l'environnement comprend des modules optionnels qui sont parfaitement intégrés à l'ensemble :

- Une vaste gamme de bibliothèques de fonctions spécialisées (Toolboxes).
- Simulink, un environnement puissant de modélisation basée sur les schémas-blocs et de simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires.
- Des bibliothèques de blocs Simulink spécialisés (Blocksets).
- D'autres modules dont un Compilateur, un générateur de code C, un accélérateur.
- Un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal : le DSP Workshop.

SIMULINK est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques. Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal.

Simulink Library

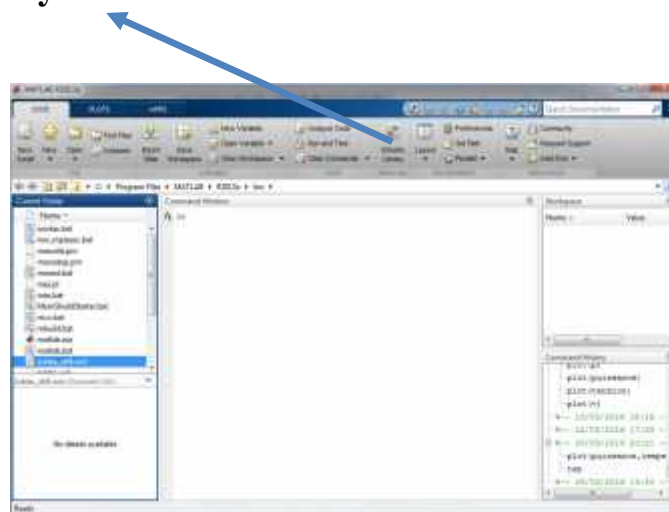


Figure III.11 : Matlab

Chapitre III : Modélisation d'une cellule photovoltaïque

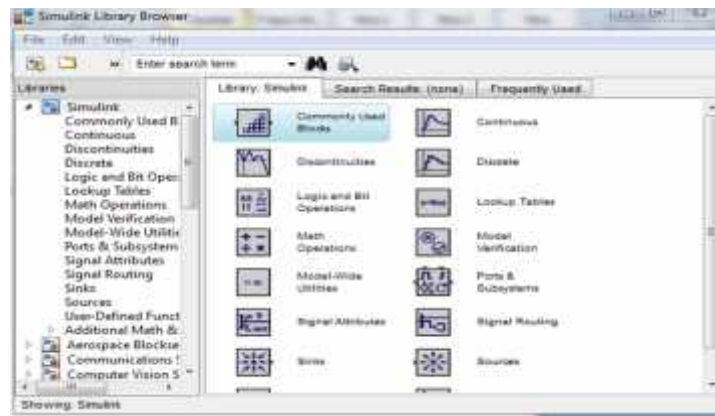


Figure III.12 : Bibliothèque SIMULINK

III.3. Outils de simulation d'une cellule photovoltaïque :

III.3.1. Système à simuler.

La cellule photovoltaïque peut être modélisée par un circuit électrique à une seule diode comme :

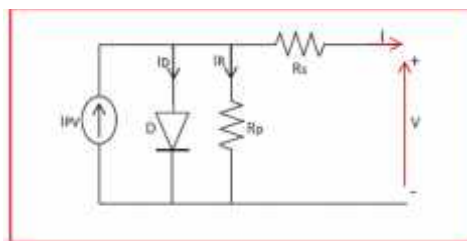


Figure III.13 : Circuit équivalent d'une cellule PV –Modèle 1-D

Les équations nécessaires pour la modulation d'une cellule PV dans le modèle 1D sont :

$$I = I_{pv} - I_0 \left| \exp\left(\frac{V + IR_S}{\alpha V_T}\right) - 1 \right| - \frac{V + IR_S}{R_p} \quad (1)$$

$$V_T = \frac{N_s k T}{q} \quad (2)$$

$$I_{pv}(G, T) = \frac{G}{G_n} I_{pvn} + K_I (T - T_n) \quad (3)$$

$$I_0 = I_{0n} \left(\frac{T}{T_n}\right)^3 \exp\left[\frac{q E_g}{\alpha k} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (4)$$

$$I_{0n} = \frac{I_{scn}}{\exp\left(\frac{V_{ocn}}{\alpha V_T} - 1\right)} \quad (5)$$

Chapitre III : Modélisation d'une cellule photovoltaïque

III.3.2. Simulation d'une cellule photovoltaïque :

Pour simuler ce modèle nous pouvons utiliser différents logiciels ou programmes ; parmi ceux-ci on peut citer le logiciel Matlab par son package « Simulink » qui est un environnement souple pour simuler les différents circuits électriques. Dans la section suivante nous allons illustrer cet outil de travail.

III.3.3. Implantation :

Nous traçons le schéma avec Simulink du système ainsi modélisé à l'aide d'intégrateurs, de gains, de sommateurs et de constantes. Nous identifions entre les variables et les expressions des gains en fonction des paramètres de notre circuit sur le schéma sous Simulink.

Post processeurs : nous utilisons différents outils de visualisation (oscilloscopes, traceurs XY, etc.) pour visualiser de manière conviviale les résultats de simulation du système

III.3.4. Le schéma de bloc du module photovoltaïque :

Le schéma de bloc du module photovoltaïque est représenté dans la **figure III.14**. On peut voir :

- Les variables d'entrées visibles [G, T, V]
- Les variables de sorties [I, V, P]
- Il existe des variables d'entrées non visible dans schéma de bloc comme [N_s , R_p , R_s]

Chapitre III : Modélisation d'une cellule photovoltaïque

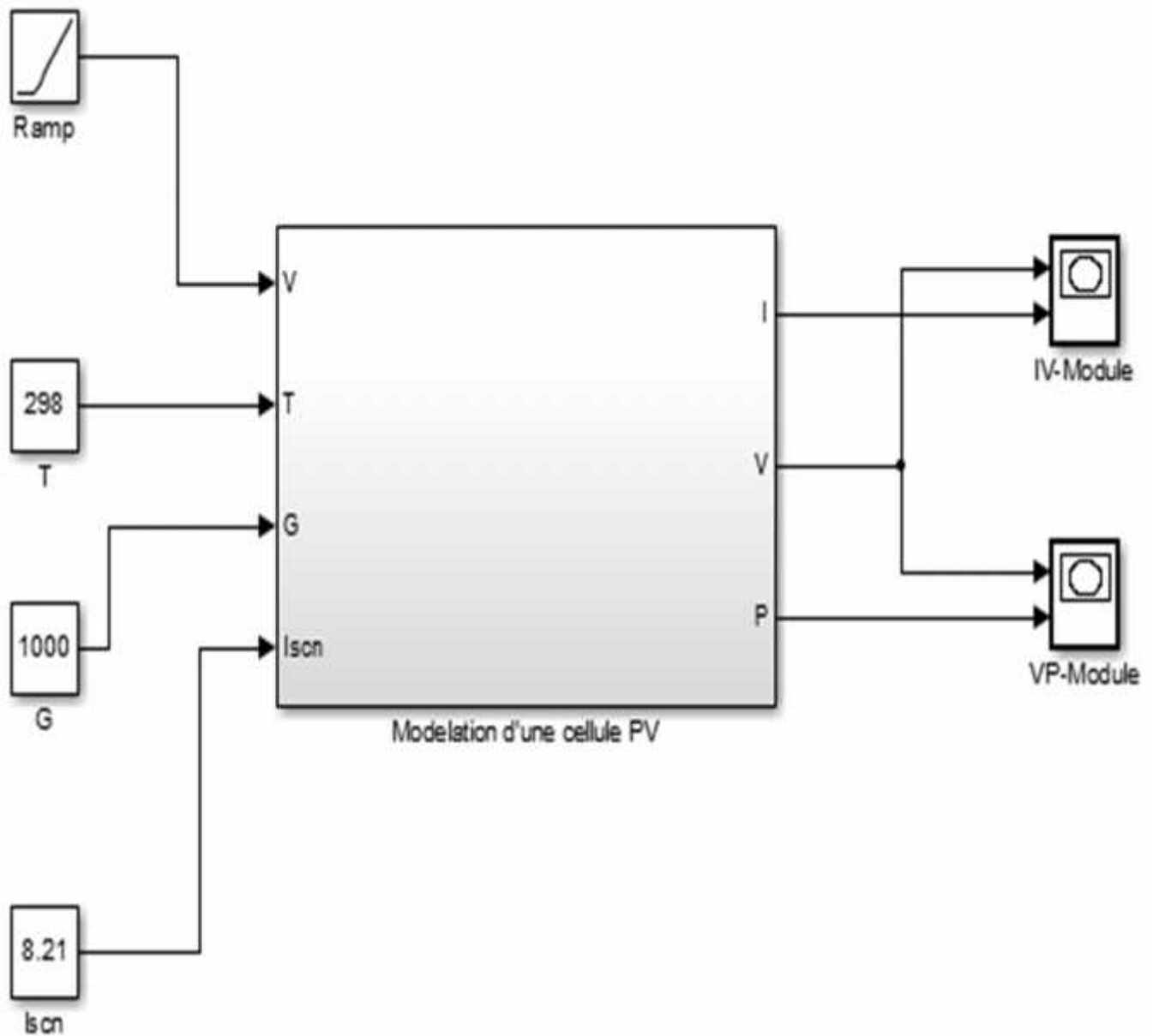


Figure III.14 : Schéma Bloc d'un Module photovoltaïque sous Simulink

Chapitre III : Modélisation d'une cellule photovoltaïque

III.3.5. Le schéma du calcul du courant I :

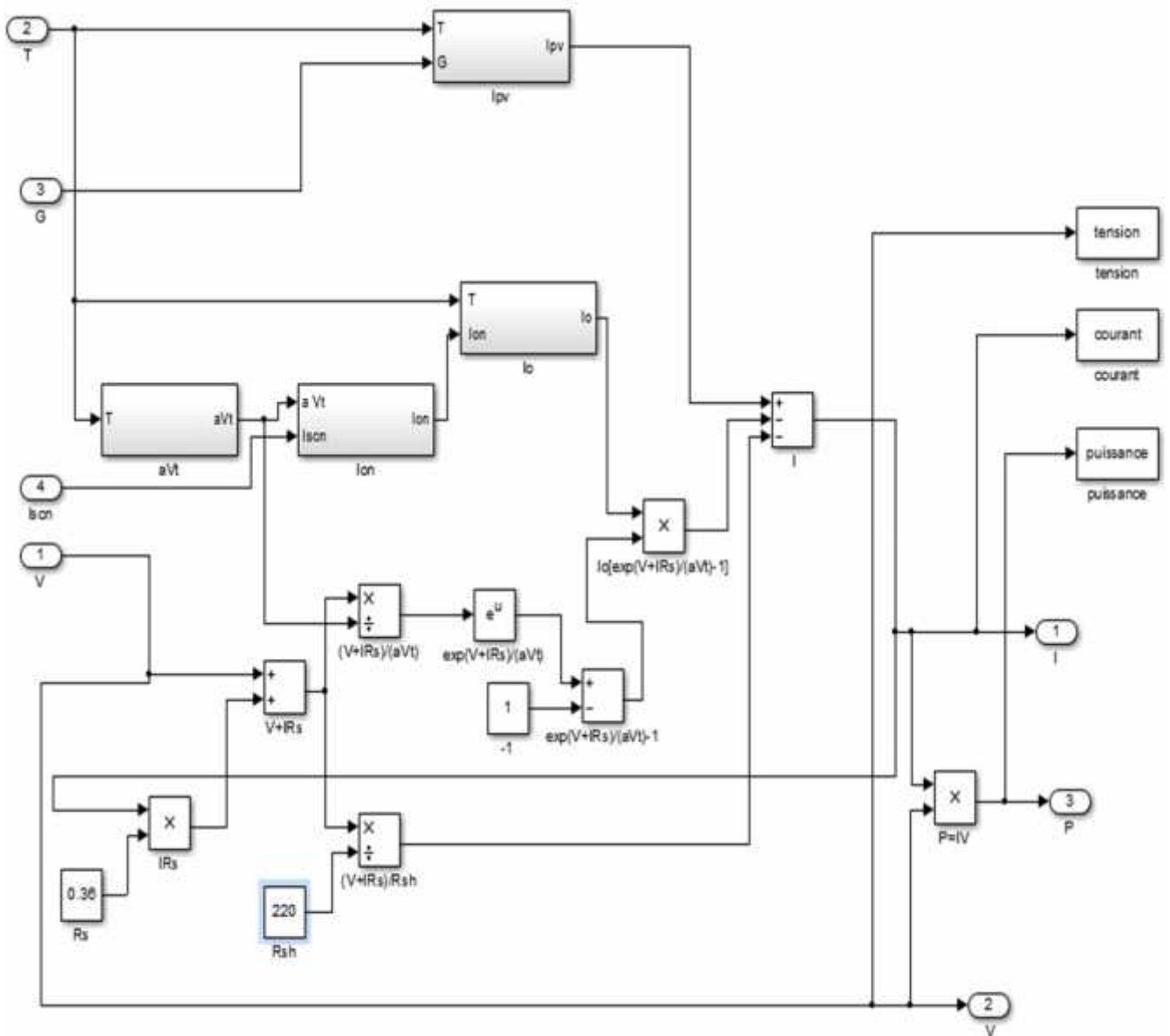


Figure III.15 : courant totale

$$I = I_{pv} - I_0 \left| \exp\left(\frac{V + I R_s}{a V_T}\right) - 1 \right| - \frac{V + I R_s}{R_p}$$

Chapitre III : Modélisation d'une cellule photovoltaïque

III.3.6. Le schéma du calcul du courant I_{pv} :

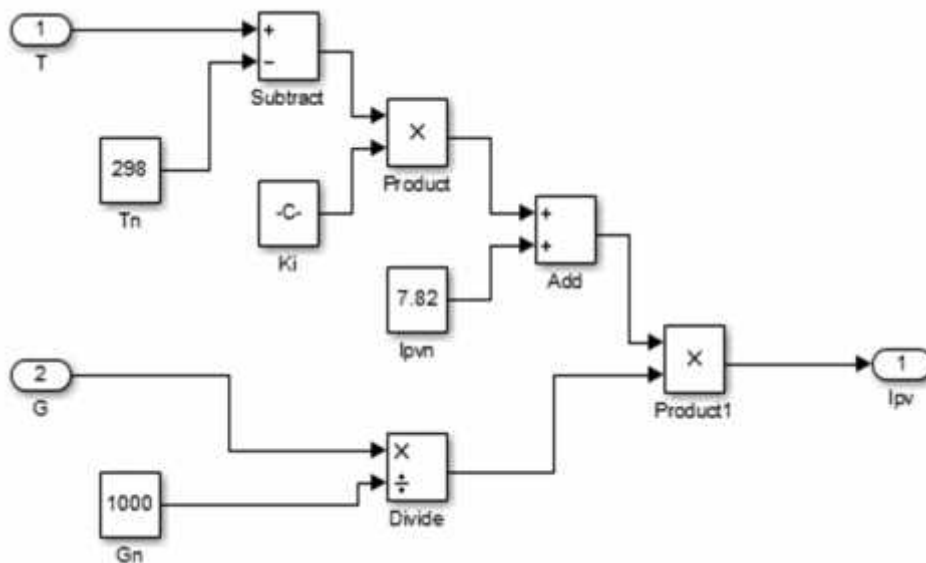


Figure III.16 : courant I_{pv}

$$I_{pv} = \frac{G}{G_n} I_{pvn} + K_I(T - T_n)$$

III.3.7. Le schéma du calcul du courant I_0 :

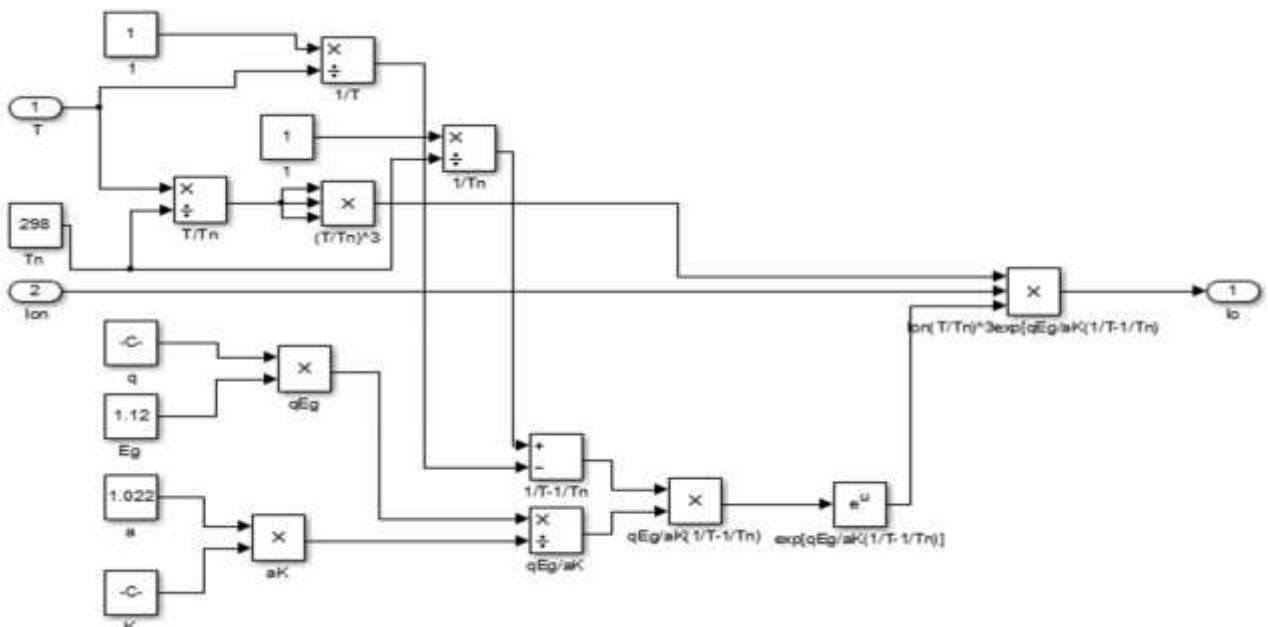


Figure III.17 : courant I_0

$$I_0 = I_{0n} \left(\frac{T}{T_n} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_g}{ak} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right]$$

Chapitre III : Modélisation d'une cellule photovoltaïque

III.3.8. Le schéma du calcul du courant I_{on} :

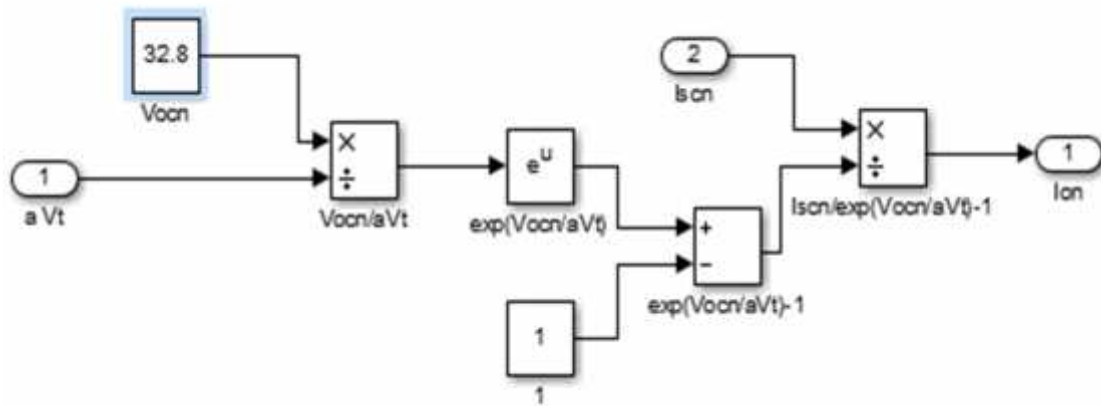


Figure III.18 : Courant I_{on} :

$$I_{on} = \frac{I_{scn}}{\exp\left(\frac{V_{ocn}}{aV_T}\right) - 1}$$

III.3.9. Le schéma du calcul la quantité aV_T :

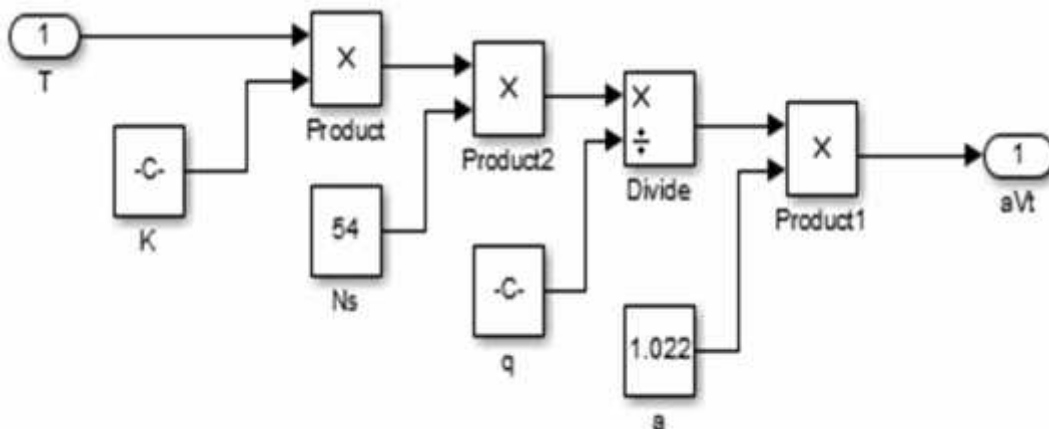


Figure III.19 : la quantité aV_T

$$aV_T = \frac{aN_s kT}{q}$$

Chapitre III : Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Le modèle précédent est le plus développé pour la simulation d'une cellule photovoltaïque; il nous permet de :

- Tracer la caractéristique des courbes I(V) et P(V).
- Déterminer les coordonnées du point de fonctionnement (I_m V_m),

Paramètres de simulation :

La photopile simulée à base de silicium **Poly 190 Wp 54cells en série** a les paramètres suivant :

Paramètre	Valeurs
R_s : Résistance en série	0.36
R_p : Résistance en parallèle	220
T_n : Température de référence	298°K
G_n : Éclairement	1000W/m ²
E_g : Énergie de gap	1.12 j
k : Constatant de Boltzmann	1.038×10 ⁻²³ (J /K)
N_s : Nombre des cellules	54
I_{PVn} (A)	7.82 A
a : Facteur d'idéalité de la jonction	1.022
I_{scn} (A) : Le courant de court-circuit	8.21A
V_{ocn} : La tension de circuit-ouvert	32.8 V
K_f : le coefficient de variation du courant en fonction de la température	0.65×10 ⁻³

Tableau(III.1) : paramètres de cellule simulée

Chapitre III : Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Résultats et discussion

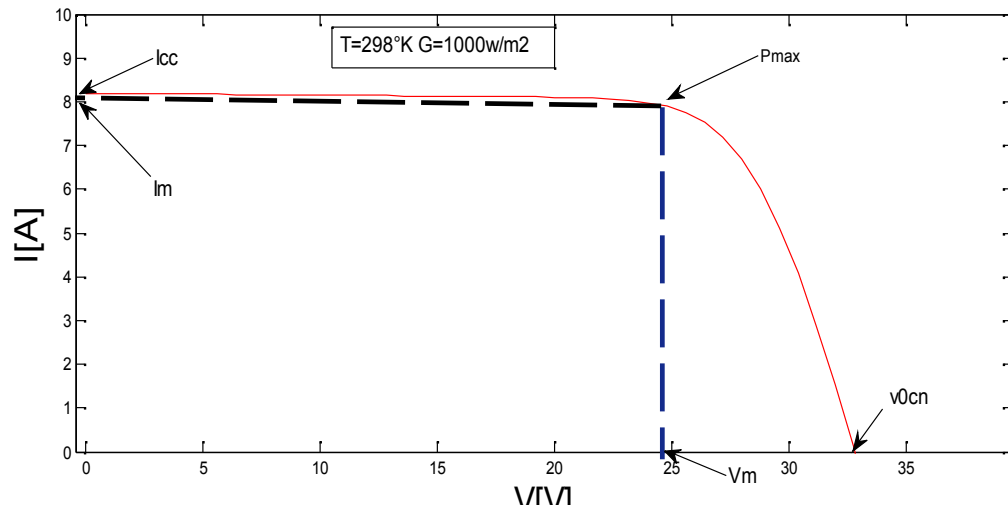


Figure III.20 : Caractéristique I(V) d'une cellule solaire

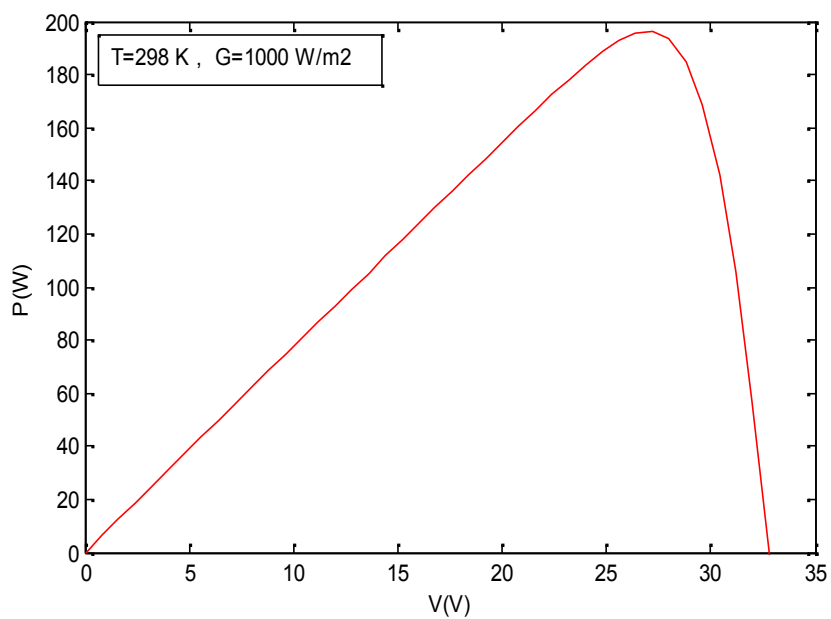


Figure III.21 : Caractéristique P(V) de la cellule solaire modélisée.

Chapitre III : Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Le tableau (III. 2) montre l'évolution avec la température de la tension en circuit ouvert (V_{co}), le courant de court circuit (I_{cc}), la puissance maximale extraite de la cellule (P_m)

I_{cc}	8.252333466294374 A
V_{co}	33.0239170958263V
V_m	24.50 V
I_m	7.91A
P_m	193.795 W

Tableau(III.2) : les résultats

Influence de la température :

La température est un paramètre important dans le comportement des photopiles pour au silicium poly-cristallin, ne serait-ce que parce qu'une cellule exposée à une éclaircement $G= 1000 \text{ W/m}^2$ n'en transforme en électricité que 12 % au plus, le reste (soit 88 %) étant dissipé en chaleur.

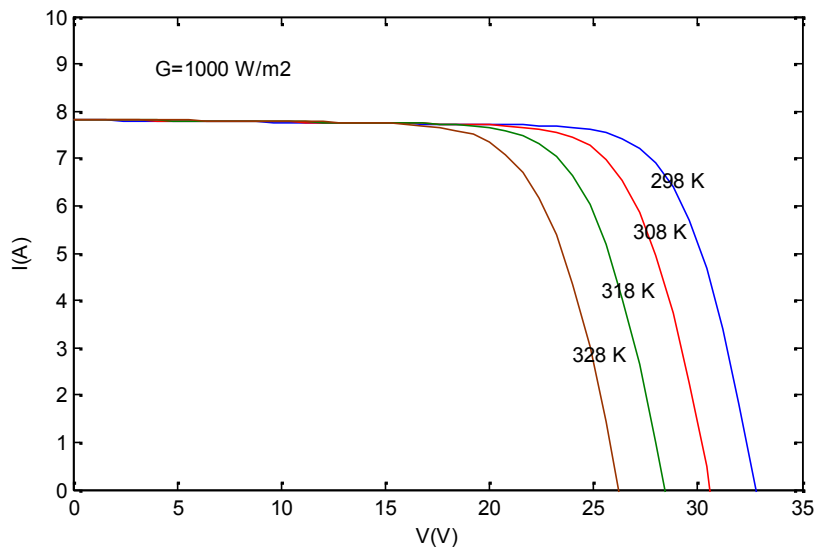


Figure III.22: Caractéristique I(V) pour différentes valeurs de températures

Chapitre III : Modélisation d'une cellule photovoltaïque

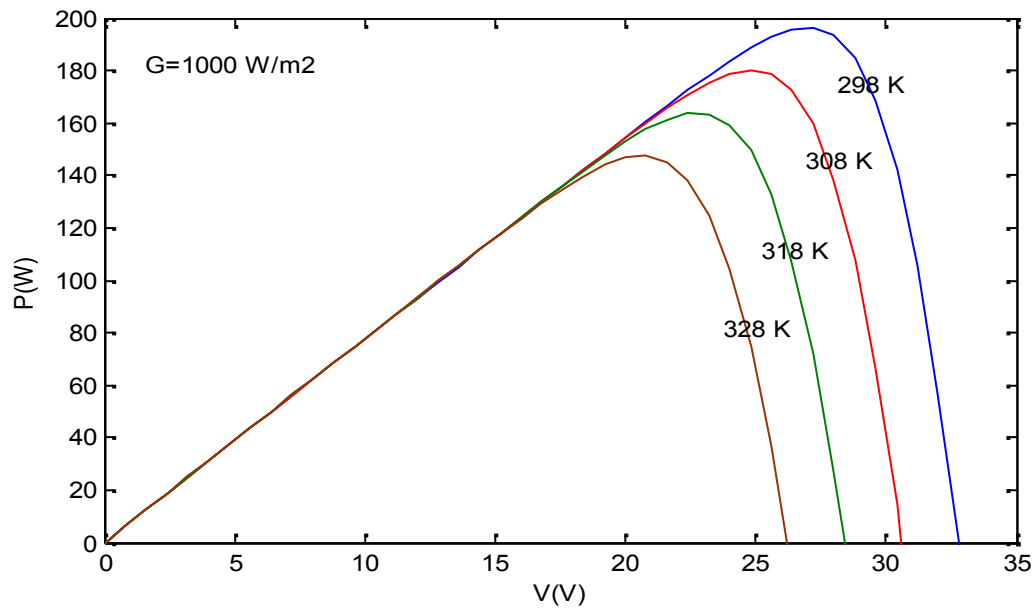


Figure III.23 : Caractéristique $P(V)$ pour différentes valeurs de températures

On remarque V_{ocn} diminue avec la croissance de la température. Ainsi nous pouvons conclure que la température a un impact négatif sur le rendement d'un module et une diminution de la puissance maximale avec l'augmentation de la température

Influence de l'éclairement :

L'effet de l'éclairement est très important sur le rendement en puissance d'une cellule photovoltaïque.

Les variations des courbes $I(V)$ et $P(V)$ pour des valeurs différentes de l'intensité de la lumière à température maintenue constante **298°K**, montrent l'existence des valeurs maximums de puissance pour des valeurs de tensions et d'intensité de courants, ses maximums sont importants pour des irradiances fortes ($G=1000 \text{ W/m}^2$) et de valeurs faibles pour des irradiances faibles..

Chapitre III : Modélisation d'une cellule photovoltaïque

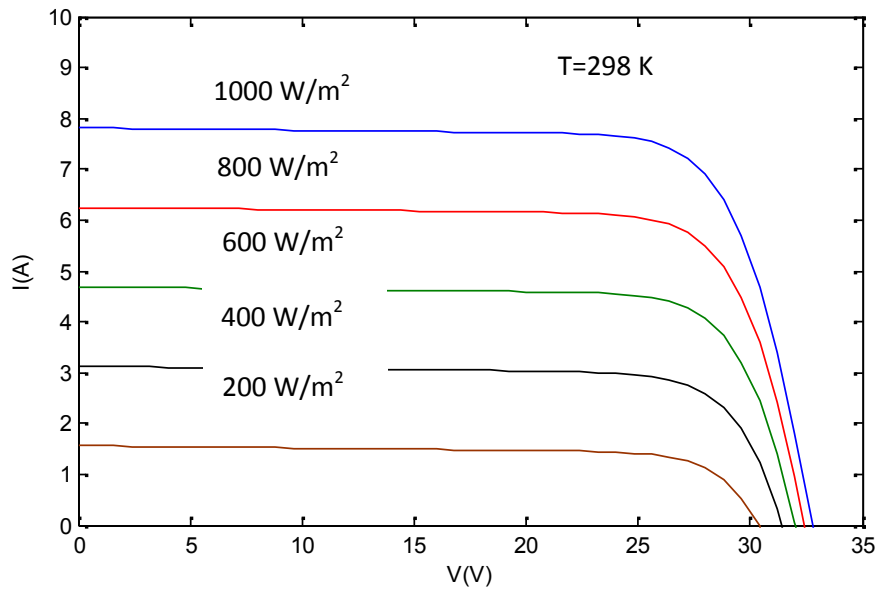


Figure III.24: Caractéristique I(V) d'une cellule pour différentes valeurs d'éclairement

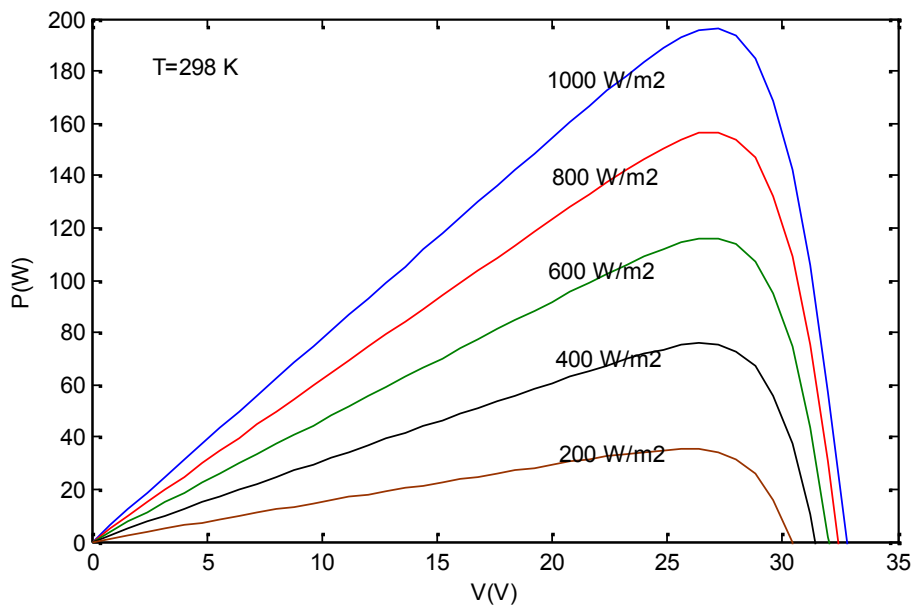


Figure III.25: Caractéristique P(V) d'une cellule pour différentes valeurs d'éclairement

Pour une irradiation a d'une température donnée, le courant de court-circuit augmente avec la croissance de l'intensité de la lumière et d'autre part la tension de circuit-ouvert (à vide) varie très peu

Chapitre III : Modélisation d'une cellule photovoltaïque

On peut conclure que le courant du court circuit I_{cc} est directement proportionnel à l'intensité lumineuse incidente; la variation de I_{cc} avec l'éclairement

Influence de résistance en série :

Pour voir l'influence de la résistance série sur les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule photovoltaïque, on a varié la valeur de la résistance série dans gamme de [0.2 , 1] sous les conditions : $T=298$ K, $G=1000$ W/m² et $R_p=220$.

La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la partie de la courbe où la cellule photovoltaïque se comporte comme un générateur de tension. On voit qu'elle n'influence pas sur la tension du circuit-ouvert.

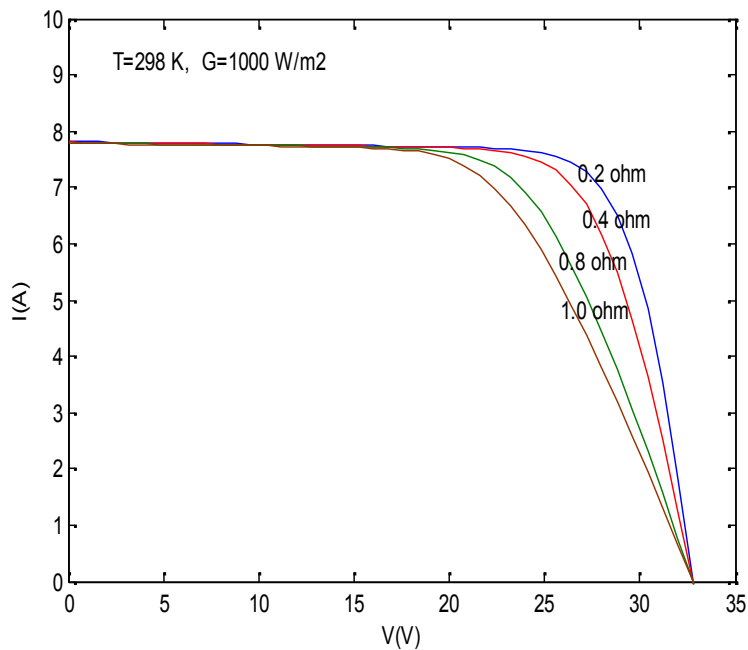


Figure III.26: Caractéristique $I(V)$ d'une cellule pour différentes valeurs de R_s

Chapitre III : Modélisation d'une cellule photovoltaïque

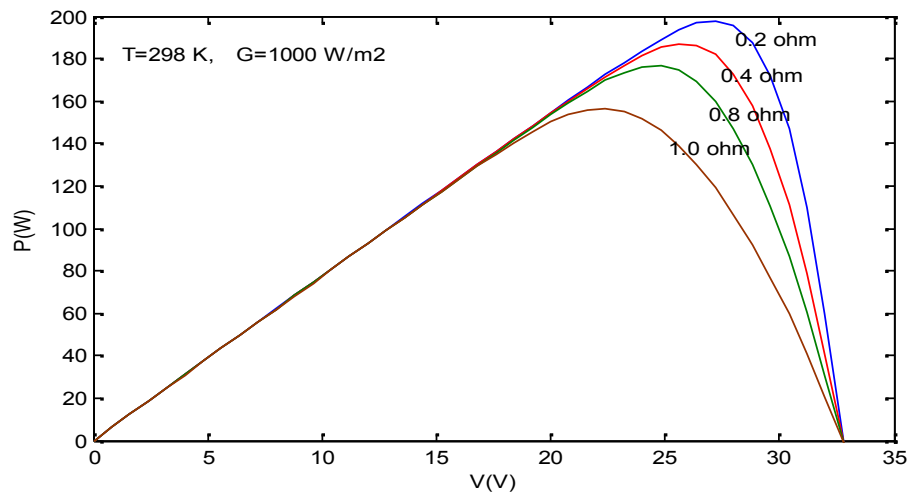


Figure III.27: Caractéristique P(V) d'une cellule pour différentes valeurs de R_s

On voit que la croissance de la résistance série se traduit par une diminution de la pente de la courbe de puissance.

Les performances du module PV diminuent quand la résistance R_s augmente, ainsi pour avoir un bon rendement il faut que la résistance R_s soit la plus petite que possible

On remarque que la tension de circuit ouvert (V_{co}) et le courant du court circuit (I_{cc}) ne sont pas modifiés, mais la caractéristique se déforme très rapidement sous l'effet de R_s . Cette influence se traduit par une diminution de la pente de la caractéristique $I-V$ dans la zone où la cellule fonctionne comme une source de tension lorsque R_s augmente. L'augmentation de la résistance série a un effet réductif considérable sur le point de fonctionnement.

Influence de résistance en parallèle :

Pour voir l'influence de la résistance parallèle sur les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule photovoltaïque, on a varié la valeur de la résistance série dans gamme de [20 , 220] sous les conditions : $T=298$ K, $G=1000$ W/m² et $R_s=0.36$.

La résistance parallèle est une résistance qui prend en compte les fuites inévitables du courant qui intervient entre les bornes d'une photopile. En général, la résistance parallèle est très élevée, son effet se fait sentir surtout dans la partie génération de courant.

Chapitre III : Modélisation d'une cellule photovoltaïque

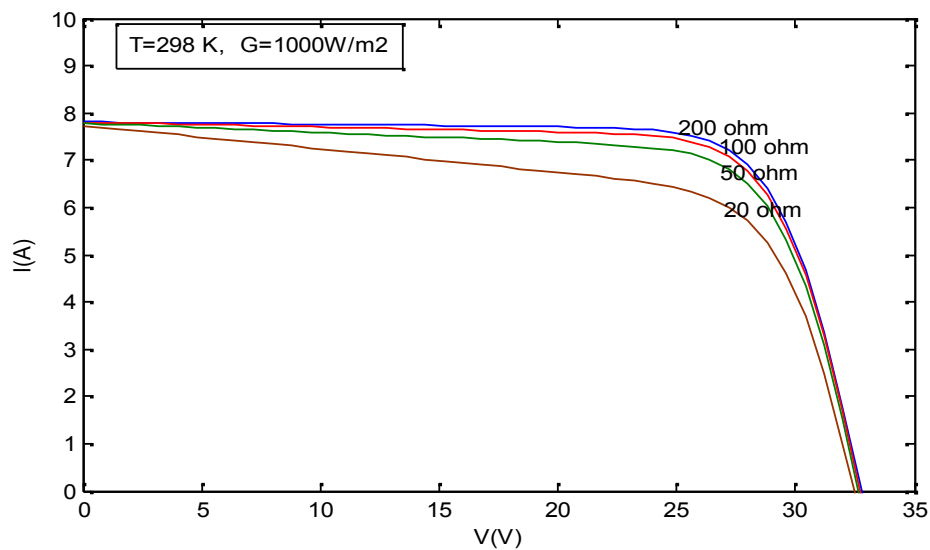


Figure III.28: Caractéristique $I(V)$ d'une cellule pour différentes valeurs de R_p

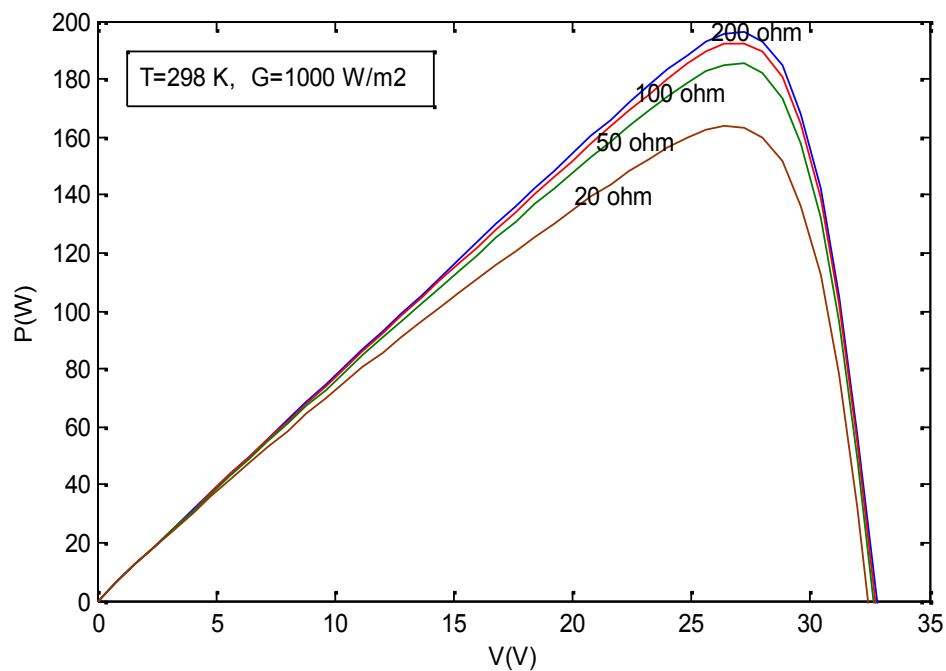


Figure III.29 : Caractéristique $P(V)$ d'une cellule pour différentes valeurs de R_p

On remarque que la tension de circuit ouvert (V_{co}) et le courant du court circuit (I_{cc}) ne sont pas modifiés. On voit que l'influence de la résistance parallèle se traduit par une augmentation de la pente de la courbe $I(V)$ de la cellule PV dans la zone où se comporte comme une source

Chapitre III : Modélisation d'une cellule photovoltaïque

de courant. On voit aussi que la puissance augmente avec la croissance de la valeur de la résistance parallèle. Les performances du module PV diminuent quand la résistance R_p diminue, ainsi pour avoir un bon rendement il faut que la résistance R_p soit la plus grande que possible.

Etude comparative avec les résultats expérimentaux

le tableau suivant montre les résultats expérimentaux obtenus et les résultats obtenus par la modélisation pour le point MPP (le point maximum de puissance) dans les conditions opératoires suivantes $G=1000\text{W/m}^2$ $T=298\text{K}$

Le modèle **poly 190 Wp 54 cell**

Les résultats expérimentaux [25]	Les résultats de la modélisation
$P_{MPP} = 190 \text{ W}$	$P_{max}=193.795 \text{ W}$
$I_{MPP}=7.12 \text{ A}$	$I_m=7.91 \text{ A}$
$V_{MPP}=26.70 \text{ V}$	$V_m=24.5 \text{ V}$

Ce modèle a été validé en comparant les résultats de simulation avec les mesures expérimentales. ce qui montre que le choix du modèle a une diode

Conclusion :

La recherche du point de fonctionnement optimal par des techniques d'optimisation (modélisation des cellules PV) représente ce qui est le plus important. Dans le cas d'une cellule photovoltaïque, le travail est difficile parce que les caractéristiques dépendent fortement de l'ensoleillement et de la température ambiante.

La température et l'éclairement sont les facteurs majeurs, dans le bon fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, ces deux facteurs doivent être étudiés de près lors de la mise en place d'une installation PV.

Le comportement d'une cellule PV peut donc se modéliser comme celui d'une jonction PN de par sa constitution, les matériaux utilisés, et les phénomènes physiques identiques mis en œuvre.

Conclusion générale

Les performances d'un générateur PV sont fortement influencées par les conditions climatiques, particulièrement l'irradiation solaire et la température du module PV. Dans cette étude, nous avons utilisé le modèle empirique à une diode pour simuler le fonctionnement des modules PV pour différentes conditions d'ensoleillement et de température. Le principal intérêt de ce modèle réside dans sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre à partir des caractéristiques techniques données pour le constructeur.

Des mesures réalisées dans les conditions réelles en utilisant la cellule PV à base de silicium (poly cristalin 190WP) ont permis de déterminer les caractéristiques I-V et P-V du cellule. Un modèle détaillé **Simulink** a été développé pour représenter les principes caractéristiques du cellule PV. Ce modèle a été validé en comparant les resultants de simulation avec les mesures expérimentales. Ce constat témoigne de la qualité du modèle proposé dans cette étude. L'outil présenté ici à l'avantage d'être modulaire, ce qui lui permet d'analyser et d'optimiser le fonctionnement global du système pour différentes charges électriques en fonction des données météorologiques du site et donc une meilleure compréhension des systèmes PV isolés.

Références bibliographiques

- 1-**BOUAFIA MOUNIR** « Modélisation et simulation d'une cellule solaire encouche mince à base de diséléniure de Cuivre, d'Indium et de Gallium « CIGS » » thèse de Master professionnel Université Kasdi Merbah–Ouargla
- 2-**ALAIN CHOVET et PASCAL MASSON** « cours physique de semi conducteur » ECOLE POLYTECHNIQUE UNIVERSITAIRE DE MARSEILLE
- 3- **Loïc BAILLY** « cellules photovoltaïques organiques souples à grande surface ». Thèse de doctorat. L'université BORDEAUX .École doctorale de sciences chimique 2010
- 4- Taher Tafticht , « Analyse et commande d'un système hybride Photovoltaïque Éolien » Thèse de doctorat. Université du Québec.
- 5- http://www.optiqueingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M05_C02/co/Contenu_04.html
- 6- Théorie générale simplifiée des sc. pd
- 7- www.physique.ens-cachan.fr/pagregp/.../elec/cours%20SC20152016.pdf
- 8- http://www.optiqueingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M05_C02/co/Contenu_04.html
- 9, I. Sari-Ali, B. Benyoucef, B.Chikh-Bled « Etude de la Jonction PN d'un Semi-Conducteur A l'équilibre Thermodynamique » Université Abou-Bakr Belkaïd,
- 10- https://www.brive.unilim.fr/files/fichiers/quere/Elec_phys/CHAP_2.pdf
- 11- www.polytech-lille.fr/cours-atome-circuit-integre/bip/bip131.htm
- 12- <http://physiqueeea.ujfgrenoble.fr/intra/Organisation/CESIRE/MCC/MC/SemiCond/SCvoltage.pdf>
- 13- **Bendjellouli Zakaria**, « Contribution à la modélisation d'une cellule solaire », Thèse de Magister, Université de Bechar, 2009.
- 14- **Kalaidji Farah, Chekrouni Nesrine**, « Commande d'un générateur photovoltaïque débitant sur une pompe (MPPT) », Thèse de Magistère, Université de Tlemcen, 2014.
- 15- **Djicknoum Diouf**, « Cellules photovoltaïques silicium à hétérojonctions et à structure interdigitée en face arrière », thèse de doctorat, Faculté des sciences d'Orsay, 2010.
- 16- **Benoit Brousse**, « réalisation et caractérisation de cellules photovoltaïques organiques obtenues par dépôt physique », thèse de doctorat, Université de Limoges, 2004.
- 17- **Makhtour Djamel, Gharbi Samir**, « Etude et simulation d'une structure à base de InGaN pour le photovoltaïque », Mémoire de master, Université Blida, 2013.
- 18- **Mohamed Ouled Salem**, « Analyse, Modélisation et Simulation des Pertes dans un Module Photovoltaïque à Base de Silicium Monocristallin », Mémoire de magister, Université de Tlemcen, 2010.

- 19- **LouardiRemach**, « Silicium poreux passivé par des nitrures et des oxydes de silicium. Application aux revêtements antiréfléchissants », thèse de doctorat, Université Constantine, 2011.
- 20- dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/1067/1/ChapitreI.pdf
- 21- **DJERIOU SALIM**, « Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone », Thèse de Magister, Université de Sétif, 2011.
- 22- **Meziani Zahra**, « modélisation de modules photovoltaïques », Thèse de Magister, Université de Batna, 2012.
- 23- <http://www.energieplus-lesite.be>
- 24- **HelaliKamelia**, « Modélisation d'une cellule photovoltaïques : étude comparative », Thèse de Magister, Université de Tizi-Ouzou, 2012.
- 25 -MODULES PHOTOVOLTAIQUE « SCHOCO MPE Série MPS05 »information technique sur les gammes de puissance de 190 a 210 WC FBSE 0902

Résumé

Abstract:

Résumé :

Dans ce travail nous avons essayé de modéliser une cellule photovoltaïque en utilisant le modèle à une diode. Pour réaliser cette modélisation, on a utilisé le logiciel Matlab- Simulink.

Cette modélisation a permis de voir l'influence des paramètres comme la température, l'intensité de la lumière, la résistance shunt et la résistance série sur le rendement en puissance d'une cellule photovoltaïque.

Les résultats expérimentaux ont été comparés avec les résultats obtenus avec la modélisation, cette comparaison a permis d'évaluer notre modèle.

Abstract:

In this work we tried to model a photovoltaic cell using the model with one diode. To realize this modeling, we used the Matlab-Simulink software.

This modeling allowed to see the influence of parameters such as temperature, light intensity, the shunt resistance and series resistance series on the power efficiency of a photovoltaic cell.

The experimental results were compared with results obtained with modeling, this comparison was used to evaluate our model.

_____ :

هذا
خلية ضوئية
Matlab-Simulink.
هذه
تأثير المتغيرات
الخلية الضوئية.
التجريبية
لتقييم

الثانوية لتحقيق هذه
عليها
هذه