



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement et de la recherche scientifique



Université Dr Moulay Tahar de Saïda

Faculté des sciences

Département de PHYSIQUE

Mémoire de : MASTER

Filière : PHYSIQUE

Spécialité : PHYSIQUE DES MATERIAUX

Thème

**Principe de fonctionnement et mesure des
caractéristiques d'une cellule photovoltaïque**

Présenté par : BERREZZOUG Hanane

Soutenu le : 09 / 06 /2016

Devant le jury composé de :

M ^f	O. ABBES Professeur (U. Saïda)	Président
M ^{me}	F. KHELFAOUI MAA (U. Saïda)	Encadreur
M ^{me}	N. BENKHALED MAA (U. Saïda)	Examinatrice
M ^{me}	M. HACHMAOUI MCB (U. Saïda)	Examinatrice

Année Universitaire 2015 – 2016

Résumé :

La conversion photovoltaïque est un processus photo-électronique qui fait intervenir l'interaction entre un photon et un électron. Le sujet est de présenter une étude sur le principe physique de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque basée sur les matériaux de base (semi-conducteur) à savoir le silicium cristallin, amorphe et l'arséniure de gallium et les étapes de fabrication d'une cellule solaire. Les paramètres externes que nous avons déterminés d'un module photovoltaïque sont le courant de court circuit (I_{CC}), la tension de circuit ouvert (V_{CO}), le facteur de forme (FF) et le rendement de conversion photovoltaïque η , en modélisant et simulant le module PV par Matlab, après avoir relevé leurs caractéristiques courant - tension (I-V), puissance - tension (P-V). On a étudié l'effet de température ainsi que d'intensité d'irradiation solaire sur les caractéristiques de deux types d'association de panneaux solaires (série et parallèle).

Abstract

Photovoltaic conversion is a photo-electron process involving the interaction between a photon and an electron. The subject is to present a study on the physical principle of operation of a photovoltaic cell based on the basic materials (semiconductor) namely crystalline silicon, amorphous gallium arsenide and steps of making a solar cell. External parameters, which determine a photovoltaic module, are the short-circuit current (I_{CC}), the open circuit voltage (V_{CO}), the fill factor (FF) and efficiency of photovoltaic conversion, modeling and simulating PV module using Matlab, after having overcome their current - voltage ($I(V)$), power - voltage (PV). We studied the effect of temperature and solar radiation intensity on the characteristics of two types of association of solar panels (shunt and parallel)

المخلص

في هذه المذكرة، تم عرض المبدأ الفيزيائي لعمل الخلية الشمسية و تمت دراسة تأثير الحرارة وشدة الإشعاعية على الخصائص المميزة لخلية شمسية سليكونية. لقد استنتجنا تيار الدارة المغلقة وكمون الدارة المفتوحة من البيانات I-V و P-V و معامل المثالية (n) و الشكل (FF) و هذه البيانات هي نتيجة لمحاكاة برمجية MATLAB و تمت مناقشة هذه النتائج

REMERCEMENTS

Louange à Dieu qui m'a donné la force pour achever ce modeste travail.

J'aimerais dans ces quelques lignes remercier toute personne qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué au bon déroulement de ces deux années, tant au niveau scientifique qu'au niveau humain.

Je tiens d'abord à remercier **M^r Abbes OUKACHA** Professeur à l'université de Saida qui me fait l'honneur d'accepter de présider le jury du mémoire.

Je tiens également à présenter mes remerciements à **M^{me} Nouria BENKHALED**, Maître Assistante de classe A à l'université de Saida et **M^{me} Malika HACHMAOUI**, Maître conférence de classe B à l'université de Saida, pour avoir accepté d'examiner ce travail et de me faire l'honneur de participer au jury. Qu'elles trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je voudrais témoigner ma reconnaissance à **KHELFAOUI Friha**, Maître Assistante de Classe A à l'université de Saida, pour m'avoir dirigé et encadré durant mon travail ainsi que pour m'avoir honoré en me proposant ce sujet, Il la remercie sous ses précieux et judicieux conseils qu'elle m'a prodigués tout a long de ce projet.

Je remercie vivement à **M^{elle} Mebarka ATIG**, ingénieur au laboratoire à l'université de Saida, pour sa précieuse aide à travers les multiples discussions scientifiques ainsi que pour sa disponibilité.

Mes remerciements vont inévitablement aussi à mes enseignants et mes collègues. Grand remerciement à mes parents, et à toute ma famille.

Enfin je tiens à remercier toutes les personnes que j'aurais pu omettre de citer et qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de ce travail.

DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents, pour leur sacrifice, ils n'ont jamais cessé de m'encourager. Que Dieu mes les garde.

Mes très chères sœurs : Wafa, Souad, Zohra et son mari Abdekader et ses fils Hadile, kholoud et Ahmed Abderahime.

**Mes très chers frères : Belaid , Yahya et son fils Abdnnour .
Ma grand-mère que Dieu me la garde.**

Mes très chers amis (es) : BENABBOU Abir, NOUALI Wahiba et FERDI Sid ahmad.

Mes amis(es) : KENANEDA Ahlam, KHALIFATI Fatima, KADI Fatima, AMRI Fatima, HAMADA Samira et DJELLEDJLI Nour alhouda.

Sommaire

Liste des figures.....	A
Liste des tableaux.....	B
Introduction générale.....	01
Chapitre I – Energie solaire	
I Introduction.....	04
I-2 Soleil	05
I-3 Pouvoir énergétique du soleil.....	07
I-4 Rayonnement solaire.....	09
Chapitre II- Bandes d'énergie et semi-conducteur	
II-1 Introduction	13
II-2-1 Notion de bandes d'énergie.....	13
II-2-2 Bande permise - Bande interdite.....	14
II-2.3 Bande de conduction - Bande de valence :.....	14
II-3 Isolant – Conducteur :.....	16
II-3-1 Isolants	16
II-3-2 Conducteurs.....	16
II-4 Population des bandes permises.....	17
II-4-1 Densité d'états permis.....	17
II-4-2 Fonction de FERMI DIRAC	18
II-4-3 Densité des porteurs	19
II-4-3-1 Densité des électrons dans la Bande de Conduction	19
II-4-3-2 Densité des trous dans la Bande de Valence.....	20

II-4-4 Semi-conducteurs.....	21
II-4-4-1 Semi-conducteur intrinsèque.....	21
II-4-5 Conductivité électrique	22
II-4-5-1 Conductivité d'un semi-conducteur intrinsèque.....	22
II-4-6 Semi-conducteur de type "N"	23
II-4-6-1 Ionisation des impuretés	23
II-4-6-2 Densité des porteurs libres.....	24
II-4-7- Semi-conducteur de type "P".....	25
II-4-7-1 Ionisation des impuretés	25
II-4-6-2 Densité des porteurs libres.....	27
II-4-8 Semi-conducteur homogène hors équilibre.....	28
II-5 Equations de continuité et des courants de diffusion et de conduction.....	28
II-5-1 Courant de conduction.....	28
II-5-2 Courant de diffusion (porteurs minoritaires).....	28
II-5-3 Equations de continuité.....	29
II-6 Définition de la jonction PN.....	29
II-6-1 Formation de la jonction pn.....	29
II-6-2 Zone de charge d'espace.....	31
II-7 Détermination du potentiel de diffusion et le champ électrique.....	31
II-7-1- Equation de poisson.....	31
II-7-2 Potentiel de diffusion et champ électrique dans la ZCE de la jonction abrupte.....	32
II-8 Largeur de la zone de charge d'espace	32
II-9 Jonction PN graduelle linéaire.....	33
II-10 Déformation des bandes d'énergie.....	34
II-10-1 Représentation des schémas.....	35
II-10-2 Jonction sous polarisation.....	35
II-10-2-1 Polarisation en direct.....	35
II-10-2-2 Polarisation en inverse.....	36

Chapitre III – Cellule photovoltaïque et ses caractéristiques

III-1 Introduction.....	38
III-2 Cellule photovoltaïque.....	38
III-3 Fonctionnement d'une cellule solaire.....	38
III-4 Caractéristiques électrique d'une cellule solaire.....	39
III-5 Circuit électrique équivalent.....	40
III- 6 Caractéristique d'une cellule solaire.....	42
III-6-1 Tension en circuit ouvert (V_{co})	42
III-6-2 Courant de court circuit(I_{cc})	42
III-6-3 Point de fonctionnement (la puissance maximale) P_m	42
III-6-4 Facteur de forme (FF)	43
III-6-5 Rendement (η)	43
III-7 Cellules mise en série	43
III-7-2 Cellules Mise en parallèle.....	44
III-8 Différents types de cellules solaires.....	45
III-8-1 Cellules solaires au silicium.....	45
III-8-2 Cellules solaires à couche mince	46
III-8-3 Cellules solaires organiques.....	47
III-9 Solutions pour protégé une cellule solaire.....	47

Chapitre IV-Modélisation d'un panneau solaire

IV-1 Introduction.....	49
IV-2 Modélisation du panneau photovoltaïque	49
IV-1-1 Description du modèle utilisé.....	49
IV- 1-1-1 Modèle d'une cellule photovoltaïque.....	49
IV-1-1-.2 Equations associées au modèle.....	50

IV-2-1-3 Valeur de R_s	50
IV-3 Création du modèle du panneau photovoltaïque sous Matlab/Simulink.....	51
IV-3-1 Création de la « boîte noire ».....	51
IV-3-2 Paramétrage du modèle.....	55
IV-3-3 Création d'un script contenant les valeurs des paramètres du modèle	56
IV-4 Simulation du modèle.....	57
IV-4-1 Influence de température et l'irradiation sur un panneau PV.....	60
IV-4-1-1 Influence de température et l'irradiation sur le rendement de conversion et le facteur de forme ;.....	62
IV-4-2 Influence de température et l'irradiation sur panneaux PV en série... ..	65
IV-4-3 Influence de température et l'irradiation sur panneaux PV en parallèle...	68
Conclusion générale	72
Bibliographie	C

LISTE DES FIGURES

Figure I-1	Types d'énergie solaire.	4
Figure I-2	Coupe schématique du soleil .	6
Figure I-3	Cycle du carbone; 4 noyaux d'hydrogène se transforment en un noyau d'hélium avec émission de 3 photons γ , de 2 positrons e^+ et de 2 neutrinos ν_e .	8
Figure I-4	Répartition spectrale du rayonnement solaire : a) Hors atmosphère (AM0) .b) A l'incidence 41.8° (AM1,5).	9
Figure I-5	Représentation de l'air mass AMx .	11
Figure II-1	Potentielle d'atomes éloignés.	13
Figure II-2	Potentielle d'atomes rapprochés.	13
Figure II-3	Formation d'une jonction pn .	30
Figure II-4	Variation de la différence de densités de donneurs et d'accepteurs pour une jonction abrupte.	30
Figure II-5	Diagramme d'énergie d'une jonction pn à l'équilibre thermodynamique.	34
Figure II-6	Jonction PN à l'équilibre thermodynamique. a) Charge d'espace, b) Champ électrique, c) Potentiel électrostatique.	35
Figure II-7	Jonction pn soumise à un champ électrique extérieur : Passage du courant.	36
Figure II-8	Jonction pn soumise à un champ électrique.	36
Figure III-1	Structure (gauche) et diagramme de bande (droit) d'une cellule solaire photovoltaïque. (Les dimensions respectives des différentes zones ne sont pas respectées).	39
Figure III-2	Caractéristique I-V d'une cellule solaire; à l'obscurité et sous éclairement	40
Figure III-3	Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire.	41
Figure III-4	Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_S cellules en série.	44
Figure III-5	Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_S cellules en parallèle.	45
Figure IV-1	Modèle d'une cellule photovoltaïque	49
Figure IV-2	Modèle de simulation pour un panneau photovoltaïque (PV).	57
Figure IV-3	Influence de l'irradiation sur la caractéristique I(V) pour un panneau PV à $T=25^\circ\text{C}$ ($1000\text{W}/\text{m}^2$; $800\text{W}/\text{m}^2$; $600\text{W}/\text{m}^2$; $400\text{W}/\text{m}^2$; $200\text{W}/\text{m}^2$).	60
Figure IV-4	Influence de l'irradiation sur la caractéristique P(V) pour un panneau PV à $T=25^\circ\text{C}$ ($1000\text{W}/\text{m}^2$; $800\text{W}/\text{m}^2$; $600\text{W}/\text{m}^2$; $400\text{W}/\text{m}^2$; $200\text{W}/\text{m}^2$).	60
Figure IV-5	Influence de la température sur la caractéristique I(V) pour un panneau PV à $E=1000\text{W}/\text{m}^2$ (5°C ; 15°C ; 25°C ; 35°C ; 45°C).	61
Figure IV-6	Influence de la température sur la caractéristique P(V) pour un panneau PV à $E=1000\text{W}/\text{m}^2$ (5°C ; 15°C ; 25°C ; 35°C ; 45°C).	61

Figure IV-7	Modèle de simulation pour 4 panneaux photovoltaïque (PV) en série.	65
Figure IV-8	Influence de l'irradiation sur la caractéristique I(V) des panneaux PV en série à T=25°C (1000W/m ² ; 800W/m ² ; 600W/m ² ; 400W/m ² ; 200W/m ²).	66
Figure IV-9	Influence de l'irradiation sur la caractéristique P(V) des panneaux PV en série à T=25°C (1000W/m ² ; 800W/m ² ; 600W/m ² ; 400W/m ² ; 200W/m ²).	66
Figure IV-10	Influence de la température sur la caractéristique I(V) des panneaux PV en série à E=1000W/m ² (5 °C;15 °C ; 25°C ; 35 °C ; 45°C).	67
Figure IV-11	Influence de la température sur la caractéristique P(V) des panneaux PV en série à E=1000W/m ² (5 °C;15 °C ; 25°C ; 35 °C ; 45°C).	67
Figure IV-12	Modèle de simulation pour 4 panneaux photovoltaïques (PV) en parallèle.	68
Figure IV-13	Influence de l'irradiation sur la caractéristique I(V) des panneaux PV en parallèle à T=25°C(1000W/m ² ; 800W/m ² ; 600W/m ² ; 400W/m ² ; 200W/m ²).	68
Figure IV-14	Influence de l'irradiation sur la caractéristique P(V) des panneaux PV en parallèle à T=25°C (1000W/m ² ; 800W/m ² ; 600W/m ² ; 400W/m ² ; 200W/m ²).	69
Figure IV-15	Influence de la température sur la caractéristique I(V) des panneaux PV en parallèle à E=1000W/m ² (5 °C;15 °C ; 25°C ; 35 °C ; 45°C).	69
Figure IV-16	Influence de la température sur la caractéristique P(V) de panneaux PV en parallèle à E=1000W/m ² (5 °C;15 °C ; 25°C ; 35 °C ; 45°C).	70

LISTE DES TABLEAUX

Tableau (I-1)	Caractéristiques principales soleil	5
Tableau (II-1)	Variation de la BI en fonction de température	16
Tableau (II-2)	Niveau de remplissage des atomes à 0 K	17
Tableau (IV-1)	Paramètre d'un panneau photovoltaïque du type Suntech STP080 12/B6 monocristallin.	58
Tableau (IV-2)	Les valeurs de tension de circuit-ouvert V_{co}, le courant de court-circuit I_{cc} et la puissance maximale P_m à différentes irradiations.	62
Tableau (IV-3)	Influence de l'irradiation sur le rendement η de conversion et le facteur de forme FF à différentes irradiations.	63
Tableau (IV-4)	Valeurs de tension de circuit-ouvert V_{co}, le courant de court-circuit I_{cc} et la puissance maximale P_m à différentes températures.	64
Tableau (IV-5)	Influence de température sur le rendement η de conversion et le facteur de forme FF à différentes températures.	65

INTRODUCTION

GÉNÉRALE.

L'énergie est la complication essentielle pour l'homme dans le monde actuel. L'exploitation de toute ses sources est la question que le futur va poser à l'homme. Cependant l'histoire réserve parfois des surprises. Avec la diminution du stock mondial d'hydrocarbures d'origine fossile (pétrole, gaz et charbon), la demande énergétique sans cesse croissante, la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante, les énergies renouvelables (solaire, marine, éolienne, etc.) reviennent au premier plan de l'actualité; leur exploitation arrange beaucoup l'environnement.

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables et la plus utilisée. Elle consiste à convertir directement le rayonnement électromagnétique (solaire ou autre) en électricité. Elle utilise pour ce faire des convertisseurs photovoltaïques cellules solaires qui représentent l'élément de base dans la conversion photovoltaïque.

L'utilisation des cellules solaires comme convertisseurs d'énergie solaire a fait apparaître le besoin d'étudier ces systèmes afin de les optimiser, et par conséquence développer l'exploitation de cette nouvelle source d'énergie renouvelable propre et qui n'émet pas de gaz à effet de serre, pour ces derniers raisons la branche solaire photovoltaïque mérite vraiment d'être mise à contribution.

L'expérience montre que le fonctionnement des cellules solaires dépend fortement de plusieurs paramètres; internes et externes (lié à l'entourage du fonctionnement: éclairage, concentration, température, etc.). L'étude de l'influence de ces différents paramètres sur le fonctionnement des photopiles solaires est possible à travers la connaissance de l'influence de chaque paramètre sur la caractéristique $I-V$ de la cellule.

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

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

Dans le second chapitre, nous avons présenté les bandes d'énergies dans un matériau, les semi-conducteurs (Le semi-conducteur intrinsèque, semi-conducteurs homogènes à l'équilibre et semi-conducteur homogène hors équilibre...), la conductivité électrique, le courant de conduction, le courant de diffusion et la jonction PN.

Dans le troisième chapitre, nous avons décrit le principe de fonctionnement et les caractéristiques (La tension en circuit ouvert V_{co} , Le courant de court circuit I_{cc} , La puissance maximale P_m , Le facteur de forme FF, Le rendement η) d'une cellule solaire, l'association des cellules en série et en parallèle, les différents types de cellules solaires et les solutions pour protéger une cellule solaire.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation et la discussion des résultats obtenus pour la modélisation d'un panneau photovoltaïque (influence de température et irradiation sur un panneau PV et 4 panneaux PV en série et en parallèle).

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

CHAPITRE I

ÉNERGIE

SOLAIRE

I-1 Introduction :

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

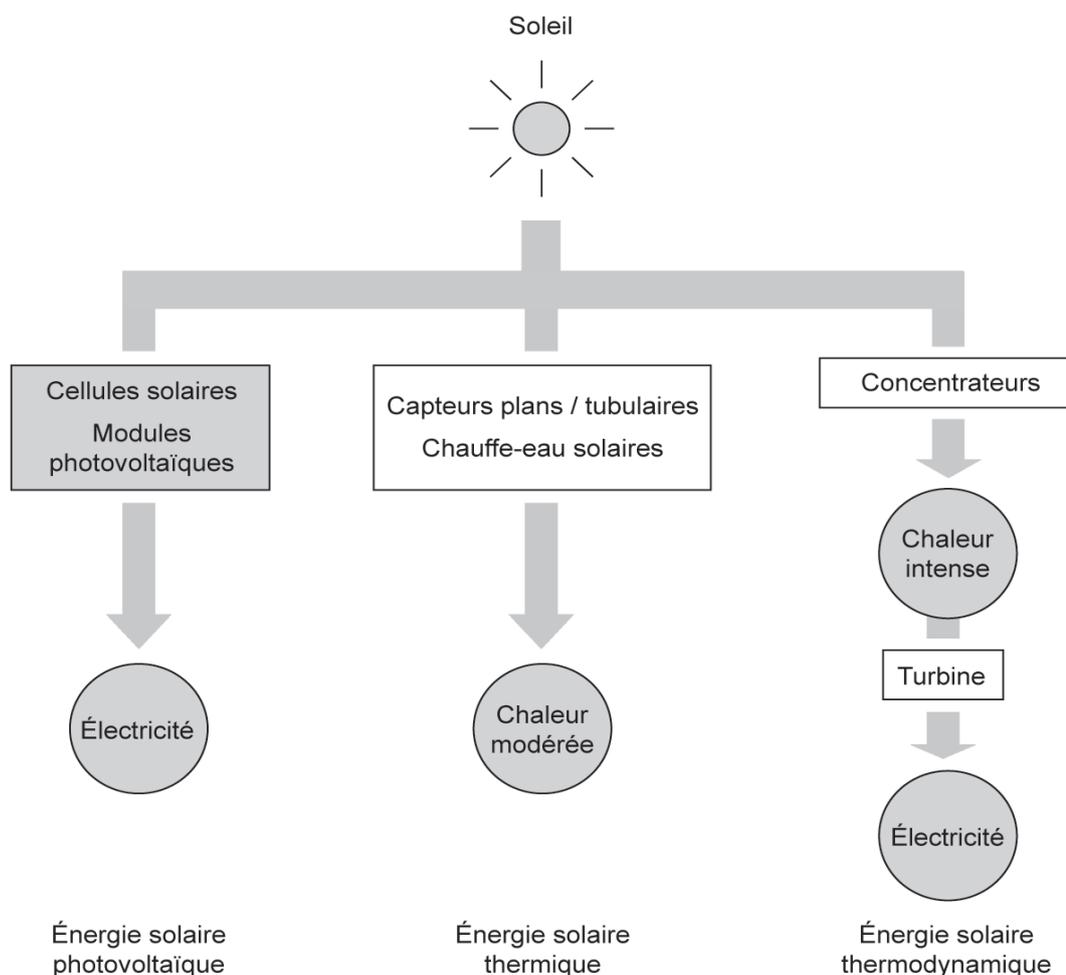


Figure (I-1) : Types d'énergie solaire.

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

Elle est radicalement différente de l'énergie solaire thermique qui, quant à elle, produit la chaleur à partir du rayonnement solaire infrarouge afin de chauffer de l'eau ou de l'air. On utilise dans ce cas des capteurs thermiques qui relèvent d'une toute

autre technologie. Dans le langage courant, ce sont des (chauffe- eau solaire) ou des capteurs à air chaud.

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

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

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

I-2 Soleil :

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

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

Tableau 1: Caractéristiques principales du soleil.

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

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

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

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

❖ La chromosphère : est l'atmosphère du soleil. Elle a une épaisseur d'environ $8\,000 \text{ Km}$ et une température de $20\,000 \text{ K}$ environ [2].

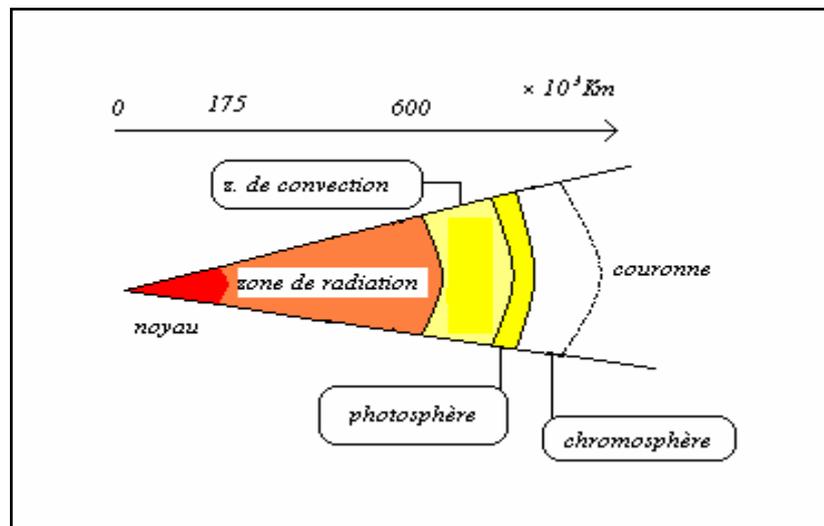


Figure (I-2): Coupe schématique du soleil.

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

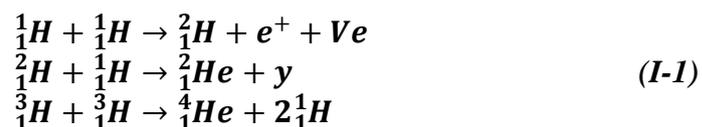
Le soleil est composé chimiquement [3] de **70 %** d'hydrogène et d'environ **28 %** d'hélium et le **2 %** restant étant mélange de plus de **100** éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connues. La distance terre-soleil est égale en moyenne et approximativement à [2] $150 \times 10^6 \text{ Km}$; cette distance est si grande que sa lumière nous parvient **8** minutes après avoir été émise.

I-2 Pouvoir énergétique du soleil :

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

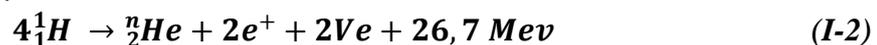
L'énergie solaire est produite par les réactions de fusion thermonucléaire d'hydrogène en hélium au sein du noyau du soleil; ce processus engendre un défaut de masse (Δm) qui se transforme en énergie (ΔE) selon la célèbre relation d'Einstein ($\Delta E = \Delta m \times C^2$) où C est la vitesse de la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

❖ Le cycle proton-proton : fournit **90 %** de l'énergie solaire. Les réactions nucléaires régissant ce cycle sont données, dans **91 %** des cas (dans **9 %** des cas, les réactions sont plus complexes et font intervenir des noyaux de béryllium **7** et **8**, de lithium **7** et de bore **8** [2]), par les équations (I.1) ci-dessous. La notation ${}_1\text{H}$ représente le noyau de l'atome d'hydrogène **1**, c'est-à-dire un proton. Il y a émission de positrons e^+ (rayonnement bêta plus « β^+ »), de neutrinos ν_e et de photons γ .



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

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



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

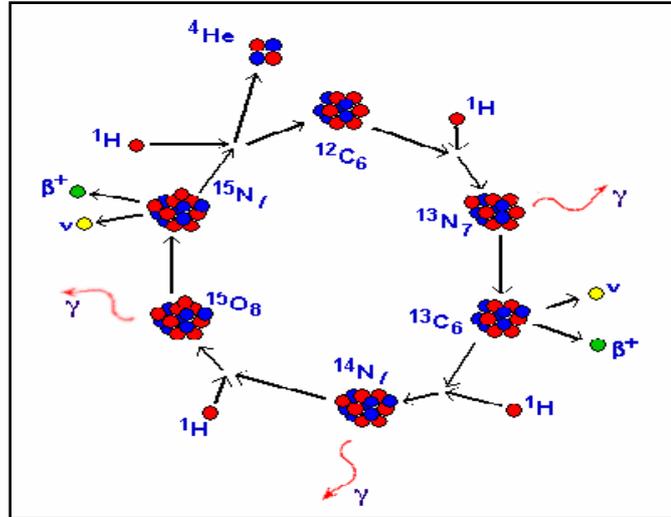


Figure (I-3) : Cycle du carbone; 4 noyaux d'hydrogène se transforment en un noyau d'hélium avec émission de 3 photons γ , de 2 positrons e^+ et de 2 neutrinos ν_e .

Pratiquement presque toutes les énergies renouvelables sont issues du soleil [5], Directement pour l'énergie solaire (photovoltaïque ou photo-thermique) ou indirectement pour l'énergie éolienne (réchauffement des masses d'air), l'hydraulique (cycle de l'eau) et la biomasse (chlorophylle), et l'énergie issue de la gravitation (énergie marémotrice). Ces énergies sont théoriquement inépuisables puisque reproductibles mais elles sont disponibles en quantité limitée à un endroit et un instant donné.

L'énergie solaire est la source d'énergie renouvelable la plus disponible et la plus importante. Cependant, l'énergie solaire reçue par la Terre représente par an près de **15 000** fois la totalité de la consommation énergétique mondiale actuelle [6] deux utilisations de l'énergie solaire sont offertes : la première étant de générer de la chaleur (le solaire thermique), la seconde étant de produire de l'électricité (le solaire photovoltaïque).

I-3 Rayonnement solaire :

La répartition spectrale du rayonnement solaire [6] est déterminée par la température de sa surface, à savoir $5900^{\circ} K$. La figure (I-4) donne l'allure de la répartition spectrale du rayonnement solaire réel hors atmosphère (l'éclairement spectral est définie comme une puissance reçue par une surface pour une longueur d'onde donnée; il s'exprime *en* $W/m^2 \cdot nm$ [7]) comparé à celle du corps noir à $5900 K$, on constate que le soleil se comporte approximativement comme un corps noir. Ces spectres montrent que le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur variant de $0.2 \mu m$ (ultraviolet) à $10 \mu m$ (infrarouge). Ce rayonnement solaire se décompose en bandes comme suit [8] :

- ❖ 6,4 % dans la bande ultraviolette (UV) : $0,2 < \lambda \leq 0,38 \mu m$.
- ❖ 48,0 % dans la bande visible : $0,38 < \lambda \leq 0,78 \mu m$.
- ❖ 45,6 % dans la bande infrarouge (IR) : $0,78 < \lambda \leq 10 \mu m$.

La figure (I.4), montre aussi, l'atténuation observée après le passage à travers une épaisseur d'atmosphère correspondant à une masse d'air 1,5 (on la définit ci-dessous), soit l'équivalent d'une hauteur du soleil de 41.8° « $h=41.8^{\circ}$ » au niveau de la mer (altitude nulle) [9].

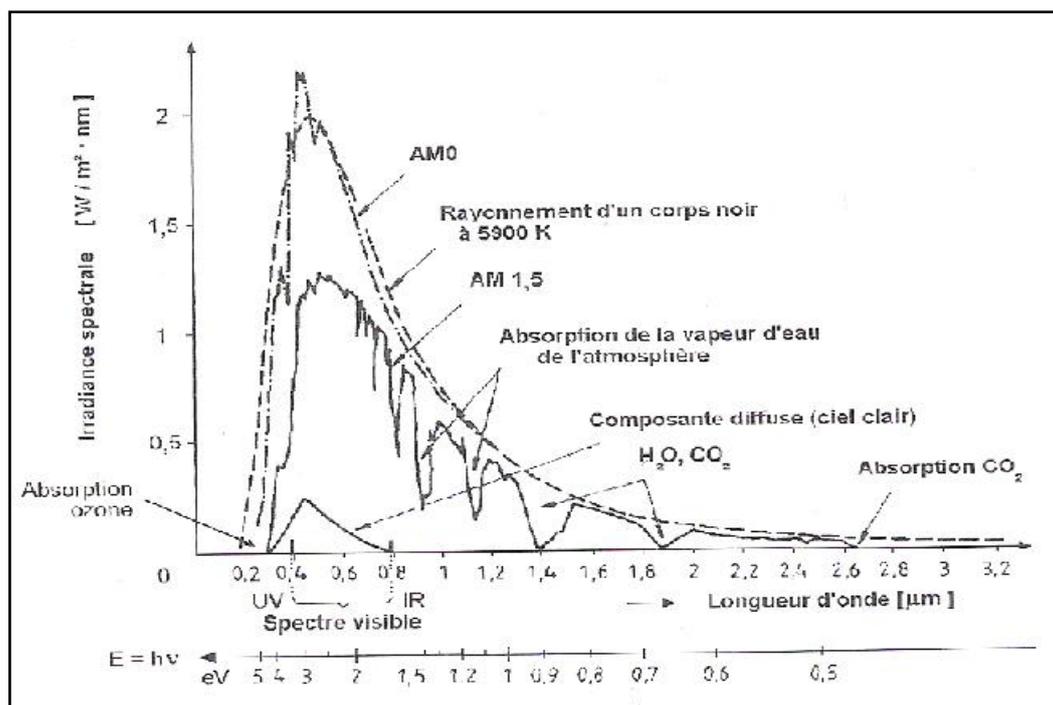


Figure (I-4) : Répartition spectrale du rayonnement solaire : a) Hors atmosphère (AM0) .b) A l'incidence 41.8° (AM1,5).

Le rayonnement reçu par l'atmosphère terrestre en incidence normal est constant et voisin de 1353 W/m^2 [2]. Le rayonnement solaire reçu au sol traversant les différentes couches atmosphériques; l'atmosphère modifie ce spectre énergétique du rayonnement solaire à travers trois mécanismes principaux : [10]

❖ l'absorption par les différents molécules gazeuses entrant dans sa composition [10] : **78 %** d'azote (N_2), **21 %** d'oxygène (O_2), **0.9 %** d'argon (Ar), **0.03 %** de dioxyde de carbone (CO_2) et d'autres gaz ainsi que la vapeur d'eau (H_2O) «très variable de **0** à **4 %**» et une couche mince d'ozone (O_3) dont le rôle est si important dans l'absorption des rayons ultraviolets les plus puissants.

❖ la diffusion moléculaire de Rayleigh : c'est la diffusion due aux molécules de gaz constituant l'atmosphère et dont la taille est très inférieure à la longueur d'onde de la lumière [10].

❖ la diffusion due aux particules qu'elle contient : aérosols, poussière et les nuages. D'où le flux énergétique solaire optimal reçu au sol se réduit alors à **1000 W/m^2** avec un spectre décalé vers le rouge par rapport au spectre hors atmosphère [11]. Le spectre diffère donc entre l'espace et la surface du globe; il diffère également à la surface de la terre en fonction du lieu. On le caractérise de façon globale par le nombre de masse d'air.

On appelle masse d'air ou Air Mass en anglais [9], le rapport entre l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu (figure I-4). Cela dépend surtout de la hauteur angulaire du soleil h . A l'aide des points O , A et M et cet angle h représentés à la figure (I-5), on écrit la longueur du trajet du Soleil a travers l'atmosphère :

$$\sin h = \frac{OA}{OM} \rightarrow OM = \frac{OA}{\sin h} \quad (I-3)$$

Donc l'Air Mass (AM) est :

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

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

Citons, à titre d'exemple :

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

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

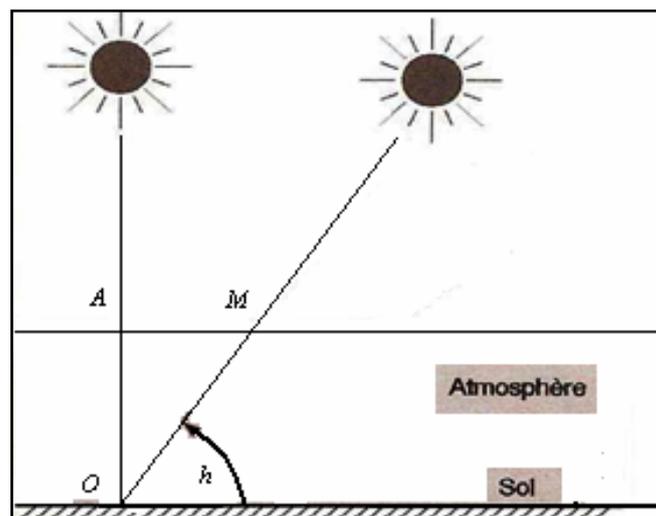


Figure (I-5): Représentation de l'air mass AM_x [9].

CHAPITRE II

BANDES

D'ÉNERGIE ET

SEMI-CONDUCTEUR

II-1 Introduction

Seule la mécanique quantique permet de traiter en détail les bandes d'énergie des électrons d'un cristal, on envisage ici uniquement une approche phénoménologique.

II-2-1 Notion de bandes d'énergie :

Soit une chaîne linéaire de N atomes identiques séparés les uns des autres par une distance d . Si d est "grande", chaque atome peut être considéré comme isolé des autres. D'après le principe d'exclusion de PAULI, chaque niveau d'énergie permis est occupé par deux électrons de spin opposé et il ne peut accueillir d'autres électrons.

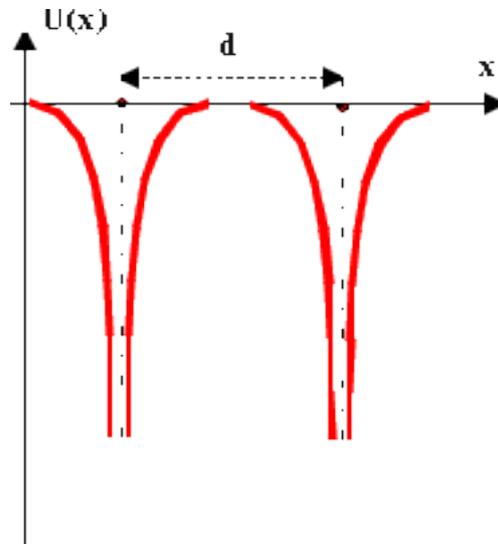


Figure (II-1) : Potentielle d'atomes éloignés.

Si d est "petite", de l'ordre de la distance inter-atomique dans un cristal, les fonctions potentielles se chevauchent. Les électrons d'un atome sont influencés par la présence des autres atomes, il y a une modification des niveaux d'énergie permis. Pour respecter le principe d'exclusion, chaque niveau permis va devoir se scinder en N niveaux discrets pour que chaque électron de la chaîne possède son énergie propre. Si N est très grand, les niveaux d'énergie sont très proches les uns des autres et à la limite ils forment une bande d'énergie possible [13].

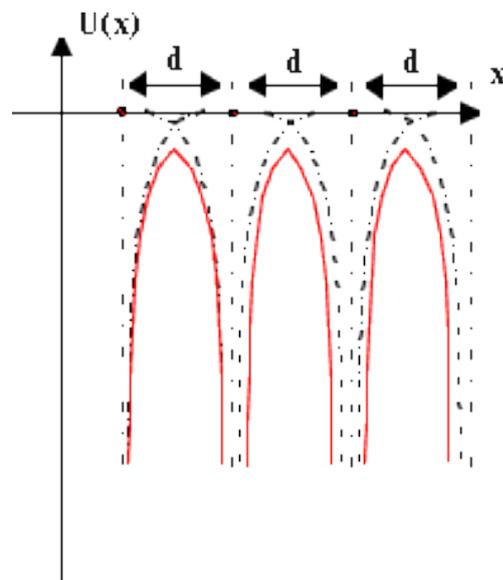
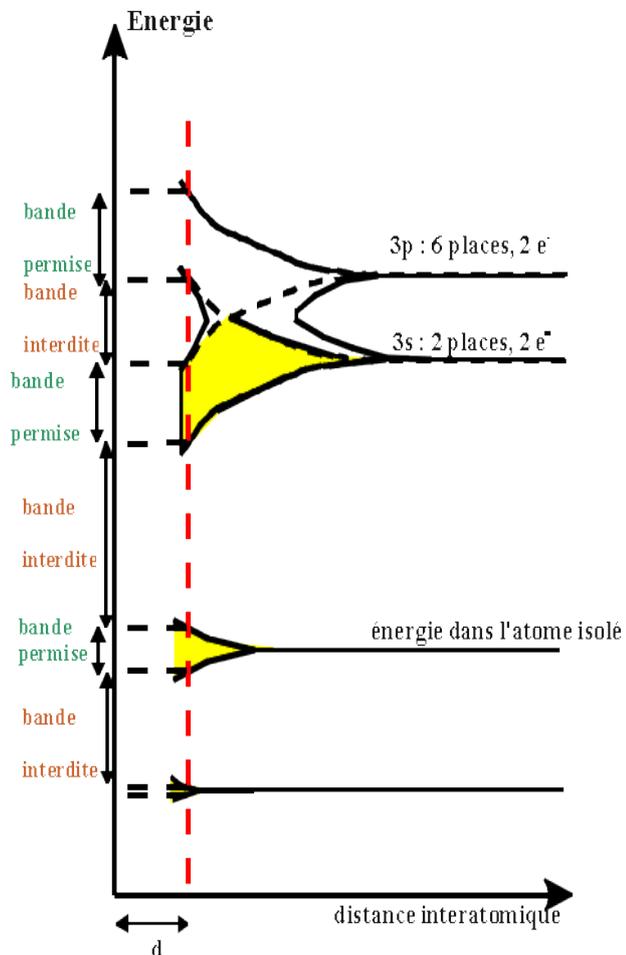


Figure (II-2) : Potentielle d'atomes rapprochés

II-2-2 Bande permise - Bande interdite.

Électron des couches "internes" :

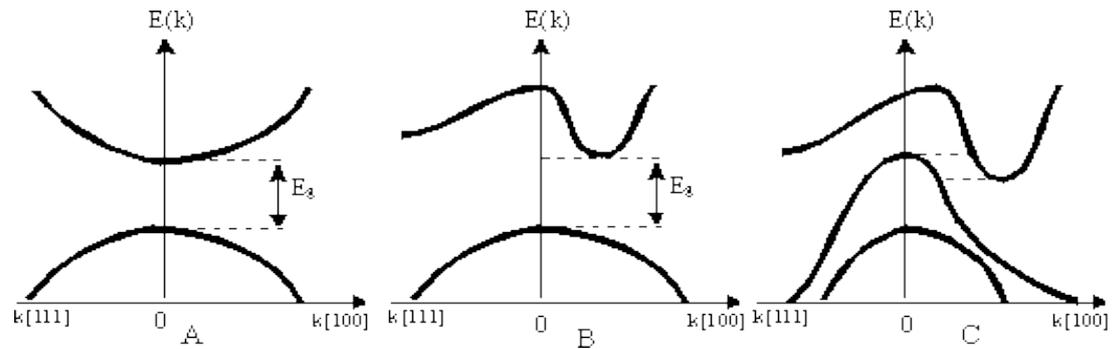
La perturbation est d'autant plus faible que les électrons sont plus proches du noyau. Électrons de la couche "externe": La division des niveaux d'énergie s'effectue sur un intervalle beaucoup plus important, il peut même y avoir des recouvrements de bandes. Apparition de bandes de niveaux permis (bande permise) séparées par des bandes d'énergie dépourvues de niveaux permis (bande interdite: **BI**) Exemple dans le germanium : bande qui correspond au niveau 1s (le plus proche du noyau) : épaisseur $10^{-3} eV$ 2 électrons 3s et 2 électrons 3p forment une bande pleine de $10 eV$ environ. les 4 places restantes sur le niveau 3p forment une bande vide d'épaisseur $20 eV$. la distance qui sépare les 2 bandes précédentes est d'environ $0.7 eV$.



La surface du cristal, les défauts chimiques ou de structure introduisent des états permis dans la bande interdite, fondamentalement, différents états des bandes permises ; les états localisés.

II-1.3 Bande de conduction - Bande de valence :

On représente l'évolution de l'énergie de l'électron par la courbe $E(k)$ en forçant le vecteur d'onde k à demeurer dans une direction remarquable de l'espace des k , c'est à dire une direction cristallographique du réseau réciproque. Diagramme d'énergie $E(k)$ permet de comprendre les propriétés électriques.



Dans les cas **A** et **B**, il existe E_g : hauteur de la bande interdite (band gap, energy gap). C'est la différence entre le point le plus bas de la bande supérieure et le point le plus haut de la bande inférieure [13] :

- bande interdite directe (direct gap) si le minimum de la bande supérieure correspond au même vecteur d'onde que le maximum de la bande inférieure (cas **A**);
- bande interdite indirecte dans l'autre cas (cas **B**).
- Dans le cas **C**, il a recouvrement de la bande inférieure par la bande supérieure, il n'y a pas de bande interdite, tous les niveaux d'énergie sont permis.

Très souvent, seuls les électrons situés dans la bande au voisinage immédiat de la bande interdite sont envisagés. Dans ces conditions $E(k)$ est approximée par une parabole :

- $E(k) = E_{\min} + Ak^2$ pour la bande supérieure;
- $E(k) = E_{\max} - Bk^2$ pour la bande inférieure.

c'est l'approximation des bandes d'énergie paraboliques (modèle de SOMMERFELD).

La bande d'énergie totalement remplie d'énergie la plus élevée s'appelle la Bande de Valence (**BdV**) (valence band). On notera toujours E_v , l'énergie maximale de cette bande permise. La bande d'énergie totalement vide ou partiellement remplie d'énergie la plus élevée s'appelle la Bande de Conduction (**BdC**) (conduction band). On notera toujours E_c l'énergie minimale de cette bande permise.

$$E_g = E_c - E_v \quad (\text{II-1})$$

E_g dépend de la température. Elle diminue faiblement selon la loi empirique suivante :

$$E_g(T) = E_{g0} - AT^2 / (T + B) \quad (II-2)$$

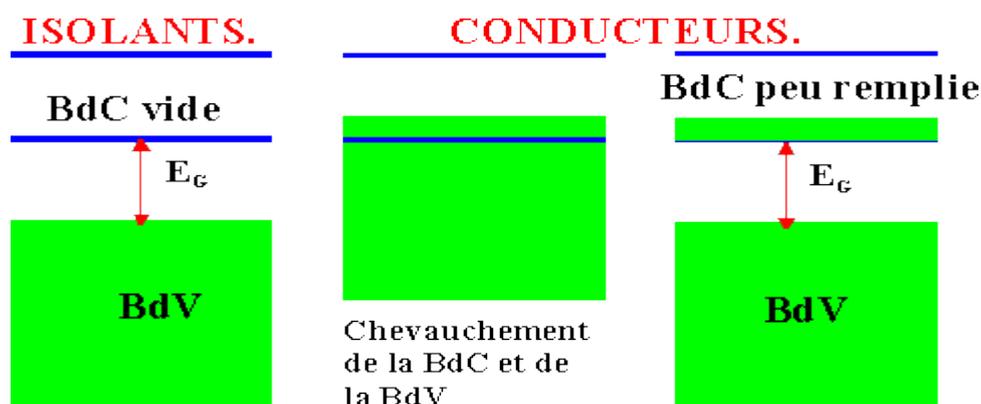
E_{g0} : Hauteur de la **BI** à 0°K , T température en $^\circ \text{K}$, A et B sont des constantes.

Variation de la hauteur de la BI en fonction de T			
	E_{g0}	A	B
	(eV)	(eV/K ²)	(K)
<i>Si</i>	1.170	$4.73 \cdot 10^{-4}$	636
<i>Ge</i>	0.7437	$4.77 \cdot 10^{-4}$	235
<i>GaAs</i>	1.519	$5.405 \cdot 10^{-4}$	204

Tableau (II-1): Variation de la BI en fonction de température [13].

II-3 Isolant – Conducteur :

Les phénomènes de transport électrique se produisent dans les bandes supérieures. Les électrons se trouvant dans les bandes inférieures sont trop liés aux noyaux pour pouvoir se déplacer dans le cristal.



II-3-1 Isolants :

- La **BdV** est totalement pleine (bande saturée).
- La **BdC** est totalement vide.
- E_g est telle (plusieurs eV) que ni un champ électrique, ni la température ne peuvent faire passer un électron de la **BdV** à la **BdC** [13].

II-3-2 Conducteurs :

Il y a un nombre impair d'électrons par atome ou il y a un nombre pair d'électrons mais il existe un chevauchement de la **BdV** avec la **BdC**. Le nombre total d'électrons libres est constant, il est proportionnel au nombre d'atomes du métal et à

la **valence** (le nombre d'électron libéré par chaque atome au moment de la constitution du métal) [13].

II-4 Population des bandes permises.

➤ A $T = 0^\circ K$, la bande de conduction est remplie jusqu'à un niveau maximum E_F .

Niveau de remplissage à $0^\circ K$				
Atomes		Nombre Atomes (/m ³)	Valence	E_F (eV)
Lithium	<i>Li</i>	$4.6 \cdot 10^{28}$	1	4.7
Sodium	<i>Na</i>	$2.5 \cdot 10^{28}$	1	3.1
Cuivre	<i>Cu</i>	$8.45 \cdot 10^{28}$	1	7.0
Or	<i>Au</i>	$5.9 \cdot 10^{28}$	1	5.5
Beryllium	<i>Be</i>	$12.3 \cdot 10^{28}$	2	14.3
Calcium	<i>Ca</i>	$2.0 \cdot 10^{28}$	2	4.3
Aluminium	<i>Al</i>	$6.0 \cdot 10^{28}$	3	11.6

Tableau (II-2) : Niveau de remplissage des atomes à $0^\circ K$ [13].

II-4-1 Densité d'états permis :

On nomme densité un nombre par unité de volume : Densité d'états quantiques = nombre d'états quantiques par unité de volume. L'unité de volume légale est le m^3 , pratiquement c'est le cm^3 qui est le plus employé. Dans un cristal, on montre que la densité d'états à l'énergie E dans la bande de conduction est :

$$D_n(E) = \frac{2}{h^3 \sqrt{\pi}} (2\pi m_e)^{3/2} (E - E_c)^{1/2} \quad (\text{en } cm^{-3}) \quad (II - 3)$$

La densité d'états quantiques à l'énergie E dans la bande de valence est :

$$D_p(E) = \frac{2}{h^3 \sqrt{\pi}} (2\pi m_h)^{3/2} (E_v - E)^{1/2} \quad (\text{en cm}^{-3}) \quad (\text{II-4})$$

En première approximation m_e et m_h sont les masses effectives des électrons et des trous. Dans les cas des masses effectives anisotropiques, un tenseur de masse effective est introduit. Les densités d'états quantiques évoluent en racine carrée de l'énergie cinétique ($E - E_c$) pour les électrons, ($E_v - E$) pour les trous.

On parle d'état quantique disponible, c'est à dire de 2 places pour un électron de spin $+1/2$ et un électron de spin $-1/2$ [13].

II-4-2 Fonction de FERMI DIRAC :

La probabilité d'occupation à la température T d'un niveau d'énergie E par un électron est donnée par la fonction de FERMI-DIRAC :

$$F(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{k_B T}\right)} \quad (\text{II-5})$$

E_F est le niveau de FERMI ; k_B est la constante de BOLTZMANN : $1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$.

T est la température toujours exprimée en degrés KELVIN

A T_0 : la température ambiante ($300 \text{ }^\circ\text{K}$) : $k_B T_0 \cong 4.04 \cdot 10^{-21} \text{ J} \cong 0.025 \text{ eV}$.
La quantité $k_B T/q$ a comme dimension le volt. On l'appelle parfois le potentiel thermique. Pour la température ambiante : $k_B T_0/q \cong 25 \text{ mV}$.

$F(E)$ est une probabilité donc : $0 < F(E) < 1$.

Si $T = 0 \text{ }^\circ\text{K}$, $F(E) = 1$ pour $E < E_F$, $F(E) = 0$ pour $E > E_F$. Tous les états d'énergie en dessous du niveau de FERMI sont occupés, tous les états situés au dessus sont vides.

Un niveau d'énergie situé à plus de $3 k_B T$ au dessus de E_F possède une probabilité d'occupation < 0.05 donc faible.

Un niveau d'énergie situé à plus de $3 k_B T$ en dessous de E_F possède une probabilité d'occupation < 0.95 donc très voisine de l'unité.

$E - E_F$ est de l'ordre de plusieurs $k_B T$, 1 est négligeable de l'exponentielle, la fonction de FERMI se ramène à une distribution de BOLTZMANN :

$$F(E) \cong \exp\left[-\frac{(E - E_F)}{k_B T}\right] \quad (II-6)$$

La probabilité pour qu'un état quantique situé à l'énergie E ne soit pas occupé est donnée par le complément à 1 de $F(E)$.

$$F_p(E) = 1 - F(E) \quad (II-7)$$

Est la probabilité d'avoir un trou à l'énergie E [13].

II-4-3 Densité des porteurs :

On appelle porteur une particule mobile pourvue d'une charge électrique. Un électron de la **BdC** est un porteur négatif, un trou de la **BdV** est un porteur positif.

II-4-3-1 Densité des électrons dans la Bande de Conduction :

Pour effectuer ce calcul, on pose les hypothèses suivantes :

1. l'expression de la densité d'états $D_n(E)$ reste valable $\forall E$
2. la **BdC** commence à E_c et se termine pour $E = +\infty$ car) $F(E) \geq 0$ quand E augmente.

n : la densité des électrons dans la **BdC** est donc l'intégrale de E_c à l'infini de n . En remplaçant $D_n(E)$ et $F(E)$ par leurs expressions, l'intégration s'effectue facilement que dans le cas où :

A) $E_c - E_F > k_B T$ (E_F est en dessous de E_c)

$$n = N_c \exp\left[-\frac{E_c - E_F}{k_B T}\right] \quad (cm^{-3}) \quad (II-8)$$

avec N_c la densité équivalente d'états dans la Bande de Conduction

$$N_c(T) = \frac{2}{h^3} (2\pi m_e k_B T)^{3/2} = 2.510^{19} \left(\frac{m_e}{m_0}\right)^{3/2} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{3/2} \quad (cm^{-3}) \quad (II-9)$$

Tout se passe comme si tous les électrons se trouvaient sur N_c places toutes situées à l'énergie E_c . L'hypothèse $E_c - E_F > k_B T$ entraîne $n \ll N_c$. Il y a beaucoup moins de porteurs que de places disponibles. Le gaz de porteur est non dégénéré. A partir de la densité des électrons dans la **BdC** on peut déduire la position du niveau de FERMI :

$$E_F = E_c - k_B T \log(N_c / n) \quad (II-10)$$

Plus la densité des électrons dans la bande de conduction augmentent, plus le niveau de FERMI se rapproche du minimum de la **BdC**. Dans le cas du comportement non dégénéré, la fonction de FERMI devient :

$$F(E) \cong \exp\left[-(E - E_F) / k_B T\right] \quad (II-11)$$

Les électrons de conduction constituent un gaz d'électrons de **MAXWELL-BOLTZMANN**.

B) $E_F - E_c > k_B T$ (E_F est au dessus de E_c)

Dans ce cas le calcul de n ne peut se faire que numériquement. La densité $n \gg N_c$ et le niveau de FERMI se trouve à l'intérieur de la **BdC**. Les électrons de la **BdC** obéissent à une statistique de FERMI-DIRAC, ils constituent un gaz dégénéré [13].

II-4-3-2 Densité des trous dans la Bande de Valence.

Pour effectuer ce calcul, on pose les hypothèses suivantes :

1. l'expression de $D_p(E)$ reste valable $\forall E$.
2. la BdV commence à $-\infty$ et se termine pour $E = E_v$ car $1 - F(E) \geq 0$ quand E diminue (la probabilité d'avoir un trou dans le bas de la BdV est nulle).

p : la densité des trous dans la **BdV** est donc l'intégrale de $-\infty$ à E_v de n . En remplaçant $D_p(E)$ et $F(E)$ par leurs expressions, l'intégration s'effectue que dans le cas où :

A) $E_F - E_v > k_B T$ (E_F est au dessus de E_v) :

$$p = N_v \exp\left[-\frac{E_F - E_v}{k_B T}\right] \quad (cm^{-3}) \quad (II-12)$$

avec N_v : densité équivalente d'états dans la Bande de Valence :

$$N_v(T) = \frac{2}{h^3} (2\pi m_h k_B T)^{3/2} = 2.510^{19} \left(\frac{m_h}{m_0}\right)^{3/2} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{3/2} \quad (cm^{-3}) \quad (II-13)$$

Tout se passe comme si tous les trous se trouvaient sur N_v places toutes situées à l'énergie E_v . L'hypothèse $E_F - E_v > k_B T$ entraîne $p \ll N_v$. Il y a beaucoup moins de

porteurs que de places disponibles. Le gaz de porteurs est non dégénéré. A partir de la densité des trous dans la BdV on peut déduire la position du niveau de FERMI :

$$E_F = E_v + k_B T \log(N_v / p) \quad (II-14)$$

Plus la densité des trous dans la bande de valence augmentent, plus le niveau de FERMI se rapproche du maximum de la **BdV**. Dans le cas du comportement non dégénéré, la fonction de FERMI devient :

$$F_p(E) \cong \exp\left| (E - E_F) / k_B T \right| \quad (II-15)$$

Les trous constituent un gaz de porteurs positifs de MAXWELL-BOLTZMANN.

B) $E_v - E_F > k_B T$ (E_v est au dessus de E_F)

Dans ce cas le calcul de p ne peut se faire que numériquement. La densité $p \gg N_v$ et le niveau de FERMI se trouve à l'intérieur de la **BdV**. Les trous de la **BdV** obéissent à une statistique de FERMI-DIRAC, ils constituent un gaz dégénéré [13].

II-4-4 Semi-conducteurs

Un semi-conducteur est un matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant, mais pour lequel la probabilité qu'un électron puisse contribuer à un courant électrique, quoique faible, est suffisamment importante. La largeur de la bande interdite est faible, elle varie entre 1 et 2 eV [8].

II-4-4-1 Semi-conducteur intrinsèque :

Il est un semi-conducteur pur sans défaut de structure. Dans un semi-conducteur intrinsèque, à chaque électron de la **BdC** correspond un trou dans la **BdV**

donc :

$$n = p = n_i \quad (II-16)$$

En remplaçant n et p par leur expression on trouve :

$$E_{Fi} = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{k_B T}{2} \text{Log}\left(\frac{N_V}{N_C}\right) \quad (II-17)$$

E_{Fi} : position du niveau de **FERMI** dans un semi-conducteur intrinsèque.

A $T = 0 \text{ K}$, le niveau de FERMI dans un semi-conducteur intrinsèque est exactement au milieu de la bande interdite. Lorsque T augmente, le niveau *de FERMI* s'éloigne légèrement du milieu sauf si $m_e = m_h$. Il est possible en introduisant les notions de nombre intrinsèque et de niveau de *FERMI* d'écrire [13] :

$$n = n_i \exp - \frac{E_F - E_{Fi}}{k_B T} \quad \text{et} \quad p = n_i \exp - \frac{E_{Fi} - E_R}{k_B T} \quad (\text{II-18})$$

II-4-5 Conductivité électrique :

Soit un cristal présentant une densité de n électrons libres de mobilité μ_n et de p trous de mobilité μ_p soumis à un champ électrique E. Un élément de surface dS normal au champ électrique est traversé pendant chaque unité de temps par $n v_{dn} dS$ charges négatives et par $p v_{dp} dS$ charges positives. Il en résulte une densité J_c (par unité de surface) de **courant de conduction, (courant de dérive)** [13]:

$$J_c = q p v_{dp} + (-q) n v_{dn} \quad (\text{A/cm}^2) \quad (\text{II-19})$$

On définit la **conductivité** du matériau σ ($\Omega \cdot \text{cm}$)⁻¹ par la relation :

$$J_c = \sigma E$$

En exprimant les vitesses de dérive v_{dp} et v_{dn} en fonction du champ électrique on trouve :

$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p) \quad (\text{II-20})$$

La conductivité σ ($\Omega \cdot \text{cm}$)⁻¹ est l'inverse de la résistivité ρ ($\Omega \cdot \text{cm}$).

Le courant de conduction dans un semi-conducteur est la somme de 2 composantes :

- l'une créée par le déplacement des électrons libres de la BdC;
- l'autre créée par le déplacement des trous de la BdV [13].

II-4-5-1 Conductivité d'un semi-conducteur intrinsèque.

Dans un semi-conducteur intrinsèque : $n = p = n_i$ donc :

$$\sigma_i = q n_i (\mu_n + \mu_p) \quad (\text{II-21})$$

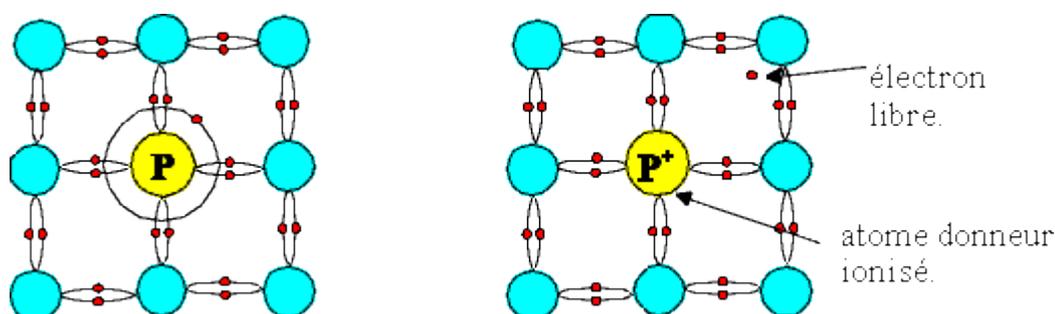
Les mobilités diminuent en fonction de la température, mais n_i augmente exponentiellement donc la mobilité σ_i augmente très fortement quand la température augmente. La résistance

d'un échantillon de semi-conducteur intrinsèque diminue quasi exponentiellement quand la température augmente [13].

II-4-6- Semi-conducteur de type "N" :

II-4-6-1 Ionisation des impuretés :

Dopage : introduire volontairement des impuretés dans un semi-conducteur ultra purifié. Il est nécessaire que la concentration des atomes étrangers non éliminés soit nettement inférieure à celle des atomes introduits. Les atomes introduits viennent se placer en position de substitution dans le réseau. Dans un semi-conducteur de la colonne IV (*Si*), on introduit une impureté de la V colonne (Phosphore : *P*), le cinquième électron se retrouve avec une énergie de liaison très faible (5 à 25 *mev*). Il est localisé sur l'atome pentavalent uniquement aux très basses températures [13].



A la température ambiante, cet électron est libéré dans le réseau et l'atome d'impureté qui était neutre devient une charge positive fixe selon la relation (cas du phosphore) :



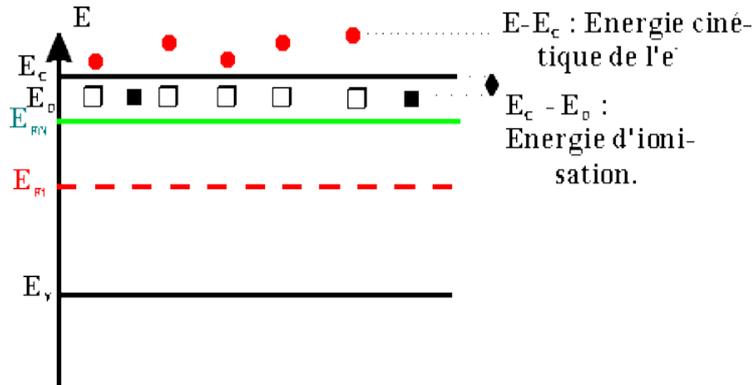
P^0 : phosphore neutre, P^+ : phosphore ionisé positif. Cet atome de la cinquième colonne a engendré un électron libre dans le cristal de silicium, on l'appelle un atome donneur et sa densité sera notée N_D .

Aux très basses températures, (typiquement $< 200 \text{ }^\circ\text{K}$), l'énergie thermique n'est plus suffisante pour ioniser l'ensemble des impuretés introduites : on est dans la gamme des températures d'ionisation partielle (partial ionization range). Pour une

densité de donneur N_D tous à un niveau E_D , la densité des donneurs ionisés est donnée par la relation :

$$N_D^+ = \frac{N_D}{1 + 2 \exp\left(\frac{E_F - E_D}{k_B T}\right)} \quad (II-22)$$

Le facteur 2 devant l'exponentielle tient compte du fait que l'on peut placer 2 électrons de spins opposés sur chaque niveau.



II-4-6-2 Densité des porteurs libres :

A l'équilibre thermodynamique, la densité des porteurs libres d'un semi-conducteur dopé par N_D atomes donneurs (supposés tous ionisés) est déterminée par 2 lois fondamentales [13] :

- la loi d'action de masse : $n p = n_i^2$
- la neutralité électrique de l'échantillon (la somme algébrique des charges est nulle ($-q n + q p + q N_D = 0$))

En associant ces 2 relations et en ne tenant compte que de la solution physique (n est toujours positif) on trouve :

$$n = \frac{N_D + \sqrt{N_D^2 + 4n_i^2}}{2} \quad (\text{cm}^{-3}) \quad (II - 23)$$

Le terme N_D est indépendant de la température, alors que n_i^2 évolue très rapidement, on obtient 2 cas limites :

1^{er} cas : $N_D^2 \gg n_i^2$

$n_n = N_D$	Porteurs majoritaires	(cm^{-3})
$p_n = n_i^2/N_D$	Porteurs minoritaires	(cm^{-3})

L'expression de n se simplifie et les porteurs négatifs sont beaucoup plus nombreux que les porteurs positifs, le semi-conducteur est de type "N" (repéré par *indice n*) Plus un semi-conducteur est dopé N , plus la différence entre la densité des porteurs majoritaires négatifs et la densité des porteurs minoritaires positifs (trous) est importante. La densité des porteurs négatifs est constante et égale à la densité des atomes d'impuretés. Ce mode de fonctionnement est appelé "régime d'épuisement des donneurs" [13].

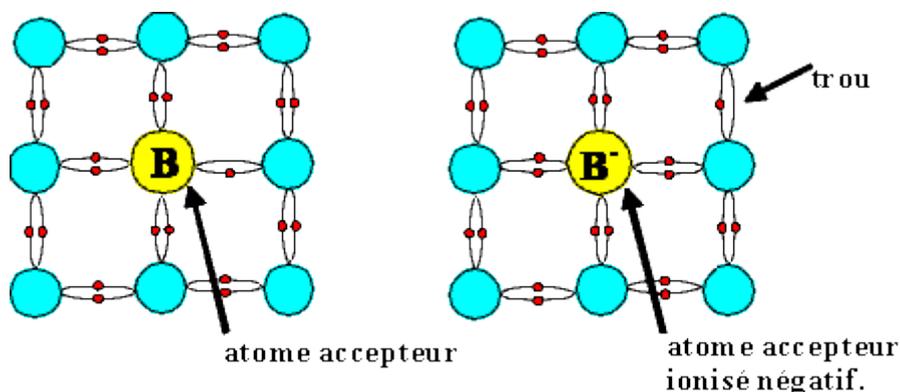
2^{ème} cas : $N_D^2 \ll n_i^2$

On retrouve : $n = p = n_i \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ (II-24)

II-4-7- Semiconducteur de type "P" :

II-4-7-1 Ionisation des impuretés :

Dans un semi-conducteur de la colonne *IV* (*Si*), on introduit une impureté de la III colonne (*Bore* : *B*). Cet atome trivalent ne possède que 3 électrons périphériques. Il existe une liaison insatisfaite, localisée sur l'atome introduit, uniquement aux très basses températures



A la température ambiante, l'énergie thermique est suffisante pour transférer un électron d'un atome de silicium voisin et le fixer sur l'atome de Bore. L'atome d'impureté qui était neutre devient une charge négative fixe selon la relation (cas du bore) :



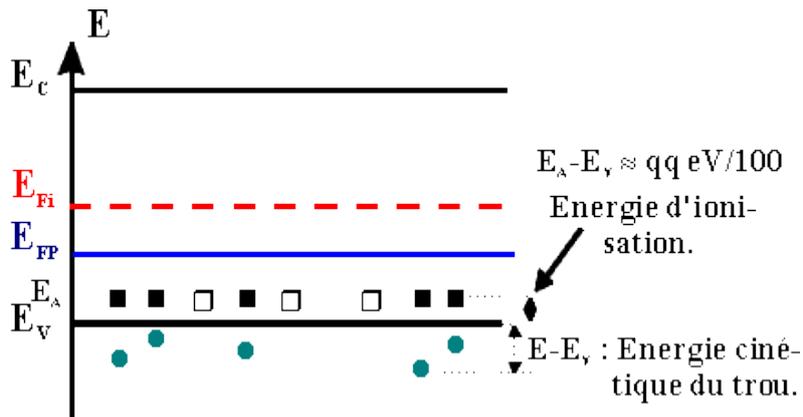
B^0 : Bore neutre, B^- bore ionisé négatif.

Cet atome de la troisième colonne a engendré un porteur positif (trou) dans le cristal de silicium en capturant un électron d'une liaison de valence, on l'appelle un atome accepteur et sa densité sera notée N_A .

Aux très basses températures, (typiquement $< 200 \text{ }^\circ\text{K}$), l'énergie thermique n'est pas suffisante pour ioniser l'ensemble des impuretés introduites : on est dans la gamme des températures d'ionisation partielle (partial ionisation range). Pour une densité de donneur N_A tous à un niveau E_A , la densité des donneurs ionisés est donnée par la relation :

$$N_A^- = \frac{N_A}{1 + 4 \exp\left(\frac{E_A - E_F}{k_B T}\right)} \quad (\text{II} - 30)$$

Un facteur 2 devant l'exponentielle tient compte du fait que l'on peut placer 2 électrons de spins opposés sur chaque niveau et un autre facteur 2 tient compte de la dégénérescence de la bande de valence pour *Ge*, *Si* et *GaAs* [13].



Les états électroniques correspondants à ces impuretés sont répartis de façon discrète dans la bande interdite. Pour une densité de N_A atomes accepteurs, il existe N_A états dans la bande interdite situés à une énergie voisine de E_V [13].

II-4-7-2 Densité des porteurs libres.

A l'équilibre thermodynamique, la densité des porteurs libres d'un semi-conducteur dopé par N_A atomes accepteurs (supposés tous ionisés) est déterminée par 2 lois fondamentales :

- la loi d'action de masse : $n p = n_i^2$
- la neutralité électrique de l'échantillon (la somme algébriques des charges est nulle ($-q n + q p - q N_A = 0$))

En associant ces 2 relations et en ne tenant compte que de la solution physique (p est toujours positif) on trouve :

$$p = \frac{N_A + \sqrt{N_A^2 + 4n_i^2}}{2} \quad (cm^{-3}) \quad (II-25)$$

Le terme N_A est indépendant de la température, alors que n_i^2 évolue très rapidement, on obtient 2 cas limites :

1^{er} cas : $N_A^2 \gg n_i^2$

$$\begin{aligned} p_p &= N_A && \text{Porteurs majoritaires} && (cm^{-3}) \\ n_p &= n_i^2/N_A && \text{Porteurs minoritaires} && (cm^{-3}) \end{aligned}$$

L'expression de p se simplifie et : $p = N_A$

Les porteurs positifs sont beaucoup plus nombreux que les porteurs négatifs, le semi-conducteur est de type "P" (repéré par indice p). Plus un semi-conducteur est dopé P, plus la différence *entre* la densité des porteurs majoritaires positifs (trous) et la densité des porteurs minoritaires négatifs est importante [13].

- La densité des trous est constante et égale à la densité des atomes d'impuretés.
- Ce mode de fonctionnement est appelé "régime d'épuisement des accepteurs".

2^{ème} cas $N_A^2 \ll n_i^2$: On retrouve

$$n = p = n_i \quad (cm^{-3}) \quad (II-26)$$

II-4-8 Semi-conducteur homogène hors équilibre :

Un électron se détache d'un atome (si l'énergie suffisante lui est fournie), il passe d'un état de la bande de valence (**BdV**) à un état de la bande de conduction (**BdC**), il est devenu électron libre (électron délocalisé) et il donne naissance à un trou dans la **BdV** : c'est le phénomène de génération d'une paire électron-trou. Un électron

libre passe d'un état de la **BdC** à un état vide de la **BdV** (disparition d'un trou), il perd de l'énergie : c'est le phénomène de recombinaison.

A l'équilibre thermodynamique (thermal equilibrium): la génération et la recombinaison se compensent exactement. La densité des trous (p_0) et des électrons (n_0) sont indépendantes du temps (stationnaires) et suivent la loi d'action de masse :

$$n_0 p_0 = n_i^2 \quad (cm^{-6}) \quad (II-27)$$

Hors équilibre *thermodynamique* la densité des électrons est : $n = n_0 + D_c$ (D_c : écart par rapport à l'équilibre) la densité des trous est : $p = p_0 + D_c$ (D_c : écart par rapport à l'équilibre) et

$$n p \neq n_i^2 \quad (cm^{-6}) \quad (II-28)$$

Deux cas peuvent se présenter :

- $p \cdot n < n_i^2$, il a moins de porteurs qu'à l'équilibre thermodynamique. C'est un phénomène d'**extraction** (désertion appauvrissement).
- $p \cdot n > n_i^2$, il y a plus de porteurs qu'à l'équilibre thermodynamique. C'est un phénomène d'injection (génération, accumulation) [13].

II-5 Equations de continuité et des courants de diffusion et de conduction

II-5-1 Courant de conduction

La densité de courant de conduction créé sous l'action d'un champ électrique pour chaque type de porteurs:

$$\vec{J}_{c,n} = q\mu_n n \vec{\xi} \quad \text{et} \quad \vec{J}_{c,p} = q\mu_p p \vec{\xi} \quad (II-29)$$

D'où μ_n, μ_p : mobilités des électrons et des trous respectivement[8].

II-5-2 Courant de diffusion (porteurs minoritaires)

Les courants de trous dans la région de type n et d'électrons dans la région de type p sont des courants de diffusion. Ils sont par conséquent donnés par :

$$J_{d,p} = -qD_p \frac{dp(x)}{dx} \quad (II-30)$$

$$J_{d,n} = qD_n \frac{dn(x)}{dx} \quad (II-31)$$

La densité de courant total [A/cm^2] :

$$J_n = J_{c,n} + J_{d,n} = q\mu_n n \xi + qD_n \frac{dn(x)}{dx} \quad (II-32)$$

$$J_p = J_{c,p} + J_{d,p} = q\mu_p p \xi - qD_p \frac{dp(x)}{dx} \quad (II-33)$$

D' où D_n , D_p Constantes de diffusion des électrons et des trous respectivement[8].

II-5-3 Equations de continuité

L'équation de continuité s'applique donc aux porteurs minoritaires (régime de faible injection) dont les durées de vie sont déterminées par les mécanismes de recombinaison :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G_n - U_n + \frac{1}{q} \frac{\partial J_n}{\partial x} \quad (II-34)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G_p - U_p - \frac{1}{q} \frac{\partial J_p}{\partial x} \quad (II-35)$$

En explicitant J_n et J_p dans les équations de continuité on trouve :

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = G_n - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} + n_p \mu_n \frac{\partial \xi}{\partial x} + \mu_n \xi \frac{\partial n_p}{\partial x} + D_n \frac{\partial^2 n_p}{\partial x^2} \quad (II-36)$$

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = G_p - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} - p_n \mu_p \frac{\partial \xi}{\partial x} - \mu_p \xi \frac{\partial p_n}{\partial x} + D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} \quad (II-37)$$

Où G_n et G_p sont les taux de génération des électrons et des trous respectivement [8].

II-6 Définition de la jonction PN

Une jonction pn est constituée par la juxtaposition de deux régions de types différents d'un même monocristal de semi-conducteur. Seuls le taux et la nature des impuretés varient d'un point à un autre. Il est possible d'obtenir des jonctions constituées de corps semi-conducteurs différents qu'on appelle des "Hétérojonctions". La jonction **pn** joue un rôle important dans la physique des composants électroniques, ses propriétés sont exploitées dans les diodes à jonction. La diode est un composant électronique, non-linéaire et polarisé qui ne laisse passer le courant électrique que dans un sens [12].

II-6-1 Formation de la jonction pn

Si un cristal de silicium a reçu des impuretés pentavalentes (arsenic) il devient un semi-conducteur de type **n**. Un cristal de silicium dopé par des impuretés trivalentes (bore) devient un semi-conducteur **P** (opération appelée dopage). En chauffant le cristal à une température suffisante, comprise entre la température de fusion du corps déposé et celle du monocristal, les atomes des deux corps déposé pénètrent dans le cristal par diffusion et créent les zones **p** et **n** (figure II-3).

Les trous de la zone p vont neutraliser les électrons libres de la zone **n** (il y a diffusion des charges). Ce phénomène va s'arrêter quand le champ électrique E_{int} créé

par les atomes donneurs ou accepteurs (qui vont devenir respectivement des charges + et -) va être suffisant pour contrarier le mouvement des charges mobiles. Ceci constitue une barrière de potentiel pour les porteurs majoritaires. Par contre, cette barrière de potentiel va favoriser le passage des porteurs minoritaires (conduction électrique), d'où le courant de fuite à l'équilibre thermodynamique.

Notons que la surface de séparation entre les deux régions est supposée plane [8].

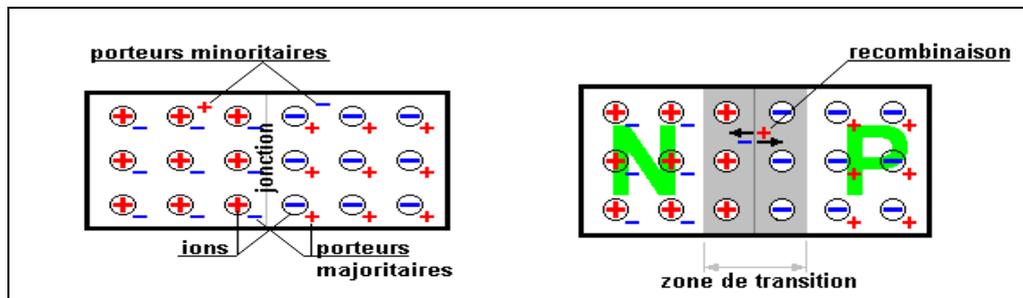


Figure II-3: Formation d'une jonction pn

Dans le modèle de la jonction abrupte la différence des densités de donneurs et d'accepteurs $N_d - N_a$ passe « brusquement » d'une valeur négative pour la région p à une valeur positive pour la région n . On considère que la température est uniforme (figure II-4)[8].

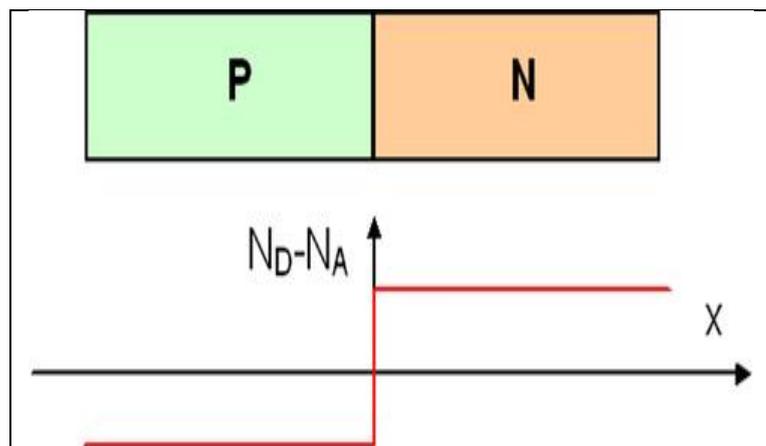


Figure II-4 : Variation de la différence de densités de donneurs et d'accepteurs pour une jonction abrupte

Les densités de porteurs libres dans chacune des régions sont alors données par la loi de la conservation de masse :

$$n_n = N_d; \quad p_n = n_i^2 / N_d \quad (II-38)$$

$$p_p = N_a; \quad n_p = n_i^2 / N_a \quad (II-39)$$

Où n_i : est la concentration intrinsèque à température donnée du SC.

n_{no} et p_{no} : la concentration des électrons et des trous dans la région N , loin de la zone de charge.

n_{Po} et p_{Po} : les concentrations des électrons et des trous dans la région P , loin de la zone de charge.

N_d, N_a : L'excès de la concentration des donneurs et des accepteurs dans la région N et P respectivement [8].

II-6-2 Zone de charge d'espace :

La double couche d'atomes ionisés qui forme une charge d'espace au voisinage de la jonction comprise entre $-Xp$ et Xn . Hors de cette zone, la charge d'espace est nulle. En supposant tous les donneurs et accepteurs ionisés, la charge d'espace $\rho(x) = [C. cm^{-3}]$ dans chacune des régions de la jonction s'écrit :

$$\rho(x) = q[N_d^+ - N_a^- + p(x) - n(x)] \quad (II-40)$$

à une température $T \neq 0$, à température ambiante, on suppose que tous les atomes donneurs et accepteurs sont ionisés, ie que [8] : $N_d^+ \approx N_d$ et $N_a^- \approx N_a$

II-7 Détermination du potentiel de diffusion et le champ électrique

II-7-1- Equation de poisson

D'après l'intégration de l'équation de poisson, on détermine la distribution du champ électrique. L'équation de poisson à une dimension est :

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = -\frac{\partial \xi}{\partial x} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon} \quad (II-41)$$

Avec : $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$

ϵ : la constante diélectrique

ϵ_0 : permittivité dans le vide

ϵ_r La constante diélectrique relative au matériau.

II-7-2 Potentiel de diffusion et champ électrique dans la ZCE de la jonction abrupte

La présence d'une charge d'espace entraîne l'existence d'un champ électrique et donc d'une variation de potentiel. Le potentiel électrostatique varie brusquement dans

la zone de la jonction et la $d.d.p.V_d$, appelée tension de diffusion, ou encore V_{bio} 'built-in' à l'équilibre thermodynamique [8].

$$V_d = V_{bio} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right) \quad (II-42)$$

Pour $-x_p < x < 0$, le Potentiel V s'écrit [8] :

$$V(x) = \frac{qN_a}{2\varepsilon} (x + x_p)^2 + V_p \quad (II-43)$$

Pour $0 < x < x_n$ le Potentiel V_{bio} s'écrit :

$$V(x) = \frac{qN_d}{2\varepsilon} (x - x_n)^2 + V_n \quad (II-44)$$

Le champ électrique est dirigé suivant x et donné par $\xi = -\frac{\partial V}{\partial x}$, soit :

$$\text{Pour : } -x_p < x < 0 \quad \xi = -\frac{qN_a}{\varepsilon} (x + x_p) \quad (II-45)$$

$$\text{Et pour : } 0 < x < x_n \quad \xi = +\frac{qN_d}{\varepsilon} (x - x_n) \quad (II-46)$$

E_{max} peut être retrouvé des expressions de $E(x)$ en valeur absolue.

$|E_{max}| = |E(x=0)|$ donc :

$$E_{MAX} = \frac{qN_a}{\varepsilon} x_p \quad (II-47)$$

$$E_{MAX} = \frac{qN_d}{\varepsilon} x_n \quad (II-48)$$

II-8 Largeur de la zone de charge d'espace

La continuité en $x = 0$, de la composante normale du vecteur déplacement $D = \varepsilon\xi$, permet d'établir une relation entre x_n et x_p . Écrivons $\varepsilon E_{0-} = \varepsilon E_{0+}$, soit : $q N_a X_p = -q N_d X_n$ En posant $W_p = |X_p| = -x_p$ et $W_n = |X_n| = X_n$ La relation s'écrit :

$$N_a W_p = N_d W_n \quad (II-49)$$

En utilisant la relation (II-49) et la continuité du potentiel en $x = 0$, on peut définir les relations de la largeur de Z.C.E W_p et W_n :

$$W_p = 2L_{Dp} \left(\frac{1}{1+N_a/N_d} \ln \frac{N_d N_a}{n_i^2} \right)^{1/2} \quad (II-50)$$

$$W_n = 2L_{Dn} \left(\frac{1}{1+N_d/N_a} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} \right)^{1/2} \quad (II-51)$$

Avec :

$$L_{Dn} = \left(\frac{\varepsilon KT}{2q^2 N_d} \right)^{1/2} \quad L_{Dp} = \left(\frac{\varepsilon KT}{2q^2 N_a} \right)^{1/2} \quad (II-52)$$

L_{Dn} et L_{Dp} sont les longueurs de debye (de diffusion) dans les régions n et p respectivement. Ce sont les longueurs dans la **ZCE** pour lesquels les concentrations des porteurs minoritaires $n(x)$ et $p(x)$ passent des valeurs la limite de la zone de charge d'espace à des valeurs égales à celles aux limites de la **ZCE** divisées par e (l'exponentiel 2,...) [8].

II-9 Jonction PN graduelle linéaire

$\rho(x) = q \cdot a \cdot x$, avec a : le gradient de concentration du dopage et $q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{c}$.

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = -\frac{\partial \xi}{\partial x} = -\frac{qax}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (II-53)$$

En intégrant l'équation (II-53) on trouve $\xi(x)$: $\xi = \frac{qax}{\epsilon_0 \epsilon_r} \frac{x^2}{2} + \text{cte}$.

Appliquant les conditions aux limites pour trouver la constante, sachant que le champ est nul hors la ZCE, on trouve : $\xi(x = -\frac{w}{2}) = \xi(x = \frac{w}{2}) = 0$, la distribution graduelle de la concentration est symétrique : $\xi(\frac{w}{2}) = 0 \Rightarrow \frac{qa}{\epsilon_0 \epsilon_r} \frac{(w/2)^2}{2} + \text{cte} = 0$, donc : $\text{Cte} = -\frac{qa}{2\epsilon_0 \epsilon_r} (\frac{w}{2})^2$ Le champ pour un gradient linéaire s'écrit:

$$\xi(x) = \frac{qax}{2\epsilon_0 \epsilon_r} \left[x^2 - (\frac{w}{2})^2 \right] \quad (II-54)$$

Et puisque le champ est maximum au niveau de la jonction métallurgique, donc au point $x = 0$ on trouve :

$$\xi_{Max} = \xi(0) = \frac{q \cdot a \cdot w^2}{8\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (II-55)$$

En intégrant l'équation (II-55) du champ à travers la ZCE on trouve le potentiel :

$$V(x) = - \int \xi(x) dx$$

$$V(x) = -\frac{qa}{2\epsilon_0 \epsilon_r} \int x^2 dx + \frac{qa}{2\epsilon_0 \epsilon_r} (\frac{w}{2})^2 \int dx \Rightarrow V(x) = -\frac{qa}{2\epsilon_0 \epsilon_r} \left[\frac{x^3}{3} - (\frac{w}{2})^2 x \right] + \text{cte}$$

$$\text{Les conditions aux limites sont : } \begin{cases} V(-\frac{w}{2}) = 0 \\ V(\frac{w}{2}) = V_{bi} \end{cases}$$

donc :

$$V(x) = \frac{q \cdot a}{2\epsilon_0 \epsilon_r} \left[-\frac{x^3}{3} + \frac{w^2}{4} x + \frac{w^3}{12} \right] \quad (II-56)$$

Le potentiel V_{bi} est le potentiel au point $x = \frac{w}{2}$ et s'écrit :

$$V_{bio} = \frac{q \cdot a \cdot w^3}{12\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (II-57)$$

On peut en tirer la largeur de la zone de charge d'espace

$$w = \left(\frac{12\varepsilon_0\varepsilon_r V_{bio}}{q.a} \right)^{1/3} \quad (II-58)$$

II-10 Déformation des bandes d'énergie

Pour la jonction et à l'équilibre thermodynamique, le niveau de Fermi coté dopé p et coté dopé n est identique. Le diagramme d'énergie de la jonction pn comporte donc une courbure des bandes de conduction et de valence (figure II-5). Cette courbure fait apparaître une différence d'énergie potentielle électrostatique de qV_{bio} , avec $V_d=V_{bio}$ est le potentiel de diffusion [8].

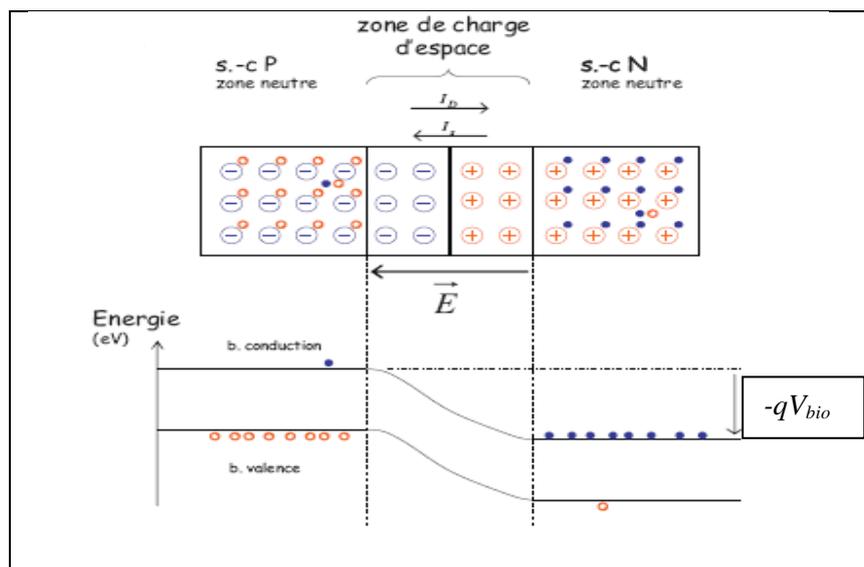


Figure II-5: Diagramme d'énergie d'une jonction pn à l'équilibre thermodynamique

II-10-1 Représentation des schémas

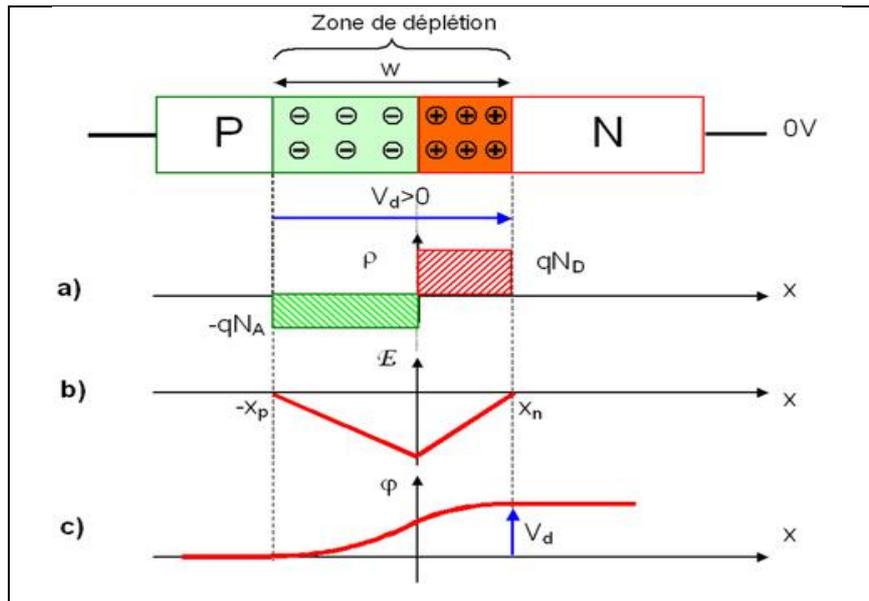


Figure II-6 : Jonction PN à l'équilibre thermodynamique [8].

- a) Charge d'espace,
- b) Champ électrique,
- c) Potentiel électrostatique

II-10-2 Jonction sous polarisation

L'application d'une différence de potentiel électrique extérieure modifie le profil du potentiel électrique interne et celui des bandes d'énergie.

- La charge d'espace de la zone de transition.
- Les concentrations des porteurs de charge hors de la zone de transition et provoquent le passage d'un certain courant à travers la jonction.

II-10-2-1 Polarisation en direct

La barrière de potentiel interne empêche toute circulation de courant. Si on applique un champ externe à l'aide d'un générateur en branchant le pôle + sur la zone p et le pôle - sur la zone n, on peut annuler les effets du champ interne et permettre au courant de circuler. La barrière sera abaissée ($V = V_p - V_n = V_d - V_F$) avec V_F la polarisation en direct, donc cette modification permet un transfert de porteurs majoritaires (diffusion) : transfert à travers la zone de charge d'espace, neutralisant une partie de la charge d'espace de chaque côté de la jonction.

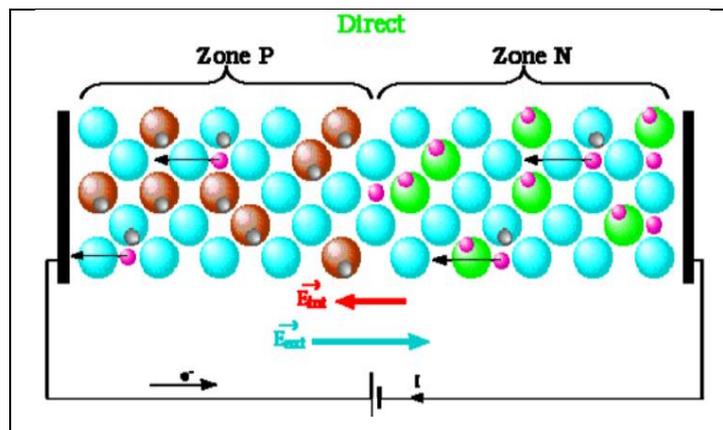


Figure II-7: Jonction PN soumise à un champ électrique extérieur :
Passage du courant

II-10-2-2 Polarisation en inverse

La diode est polarisée dans le sens inverse ($V = V_p - V_n = V_d + V_R$) avec V_R la polarisation en inverse, l'évacuation de la zone de charge d'espace vers la zone p et n pour accroître la charge d'espace (zone de déplétion). La diffusion des porteurs majoritaires est bloquée, seuls les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace passent dans la région opposée, propulsés par le champ électrique, le courant inverse circule de la région n vers la région p . En raison des différences de densités entre les porteurs majoritaires et les porteurs minoritaires, le courant inverse est considérablement plus faible que le courant direct

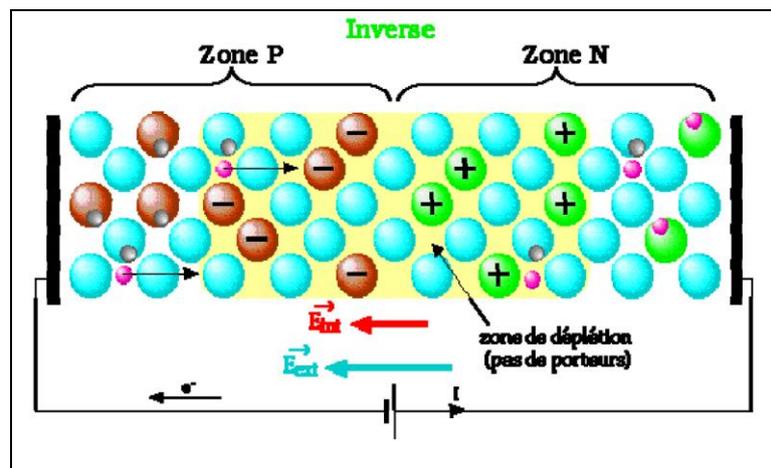


Figure II-8: Jonction PN soumise à un champ électrique

CHAPITRE III

CELLULE

PHOTOVOLTAÏQUE

ET SES

CARACTÉRISTIQUES

III-1 Introduction :

La conversion photovoltaïque est la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement) en énergie électrique de type continu directement utilisable. L'élément de base dans cette conversion est la cellule solaire. [12]

III-2 Cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque est un dispositif électronique destiné à transformer la lumière en électricité, sa structure à fonction *PN* c'est-à-dire est composée de deux couches : une couche *P* et une couche *N*.

La cellule solaire est basée sur un semi-conducteur qui est en silicium, c'est un convertisseur instantané qui fournit de l'énergie électrique s'il reçoit une énergie solaire sous forme de rayonnement. Elle se comporte alors comme un générateur de courant continu. [12]

III-3 Fonctionnement d'une cellule solaire :

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur trois mécanismes suivants :

- ❖ Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au *gap*) par le matériau constituant le dispositif.
- ❖ Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur :
- ❖ Collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque. Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électron/trou créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction *PN* d'autres structures, comme les hété-jonctions et les Schottky peuvent également être utilisées. Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure.

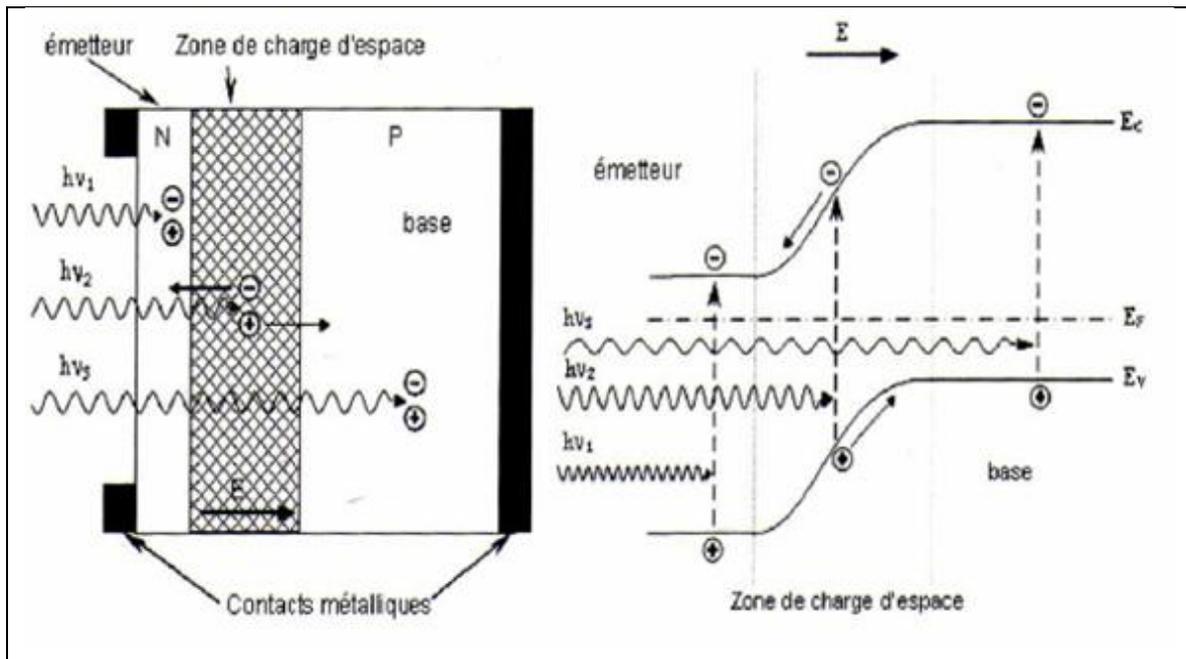


Figure (III-1) : Structure (gauche) et diagramme de bande (droit) d'une cellule solaire photovoltaïque. (Les dimensions respectives des différentes zones ne sont pas respectées)

- ❖ Les photons incidents créent des porteurs dans la zone Net P et dans la zone de charge d'espace. [12]

III-4 Caractéristiques électriques d'une cellule solaire :

La variation du courant « I » en fonction de la tension « V » à l'obscurité et en particulier sous éclairage, permet d'évaluer la performance de la cellule solaire ; la figure montre deux exemples de caractéristiques $I - V$ de cellule solaire sans et avec éclairage [1].

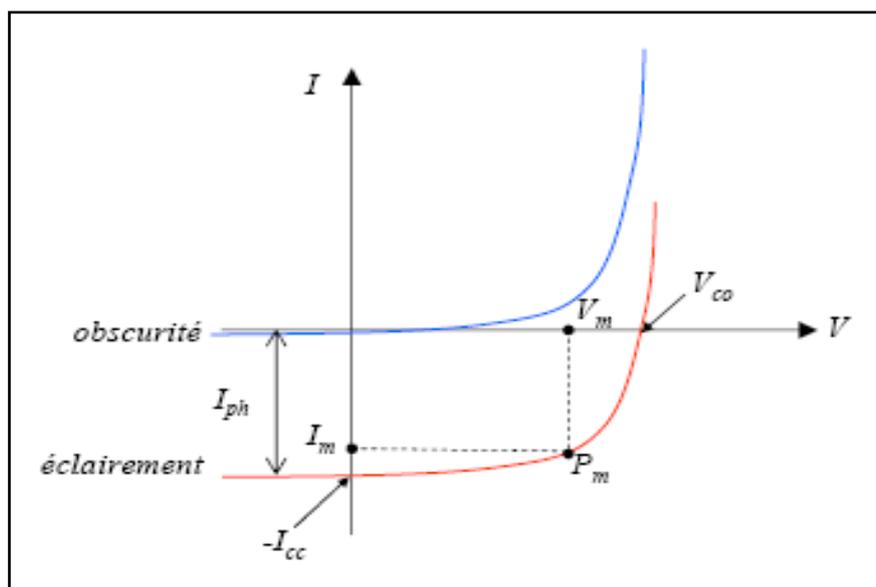


Figure (III-2) : Caractéristique I - V d'une cellule solaire; à l'obscurité et sous éclairage [1].

III-5 Circuit électrique équivalent :

Le circuit équivalent d'un système électrique est fréquemment utilisé afin de décrire son comportement électrique à l'aide de composants électriques élémentaires (source, résistance, diode, bobine, condensateur, etc.).

L'expérience montre qu'à l'obscurité; une cellule solaire suit le comportement d'une diode classique, elle commence à conduire lorsque la tension appliquée est supérieure à la tension de seuil V_s . Dans le cas d'une cellule idéale à l'obscurité, caractéristique I - V peut être représenté par la relation suivant :

$$I_{obs} = I_s \left[\exp\left(\frac{V}{nV_{th}}\right) - 1 \right] \quad (III.1)$$

Où

I_s : le courant de saturation en Ampère (A).

n : le facteur de qualité de la diode; sans dimension.

V_{th} : Le potentiel thermique en Volt (V) ; il est donné par :

$$V_{th} = \frac{KT}{q} \quad (III.2)$$

Où

K : la constante de Boltzmann ($1.38066 \times 10^{-23} \text{ J/K} = 8.61400 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$).

T : la température absolue en Kelvin (K).

q : la charge absolue d'un électron en coulomb ($1.60281 \times 10^{-19} \text{ C}$).

Sous éclairage, un terme I_{ph} , tenant compte du photo-courant généré est rajouté, On obtient le circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale sous éclairage qui est représenté par l'équation suivante [14] :

$$I = I_{ph} - I_{obs} = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V}{nV_{th}}\right) - 1 \right] \quad (III-3)$$

Dans le cas d'une cellule photovoltaïque réelle, d'autres paramètres tenant compte des effets résistifs et des fuites vers les bords; qu'ils doivent être pris en considération et l'équation de la caractéristique I - V devient alors [14] :

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V+IR_s}{nV_{th}}\right) - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (III-4)$$

Et par conséquent le schéma équivalent d'une cellule solaire réelle est représenté sur la figure (III-3) par un générateur de courant (I_{ph}), une diode et deux résistances parasites (R_s) et (R_{sh}). Elle est liée à l'impédance des électrodes et du matériau; il en résulte que la tension V aux bornes de la cellule est différente de la tension aux bornes de la jonction Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule. [12]

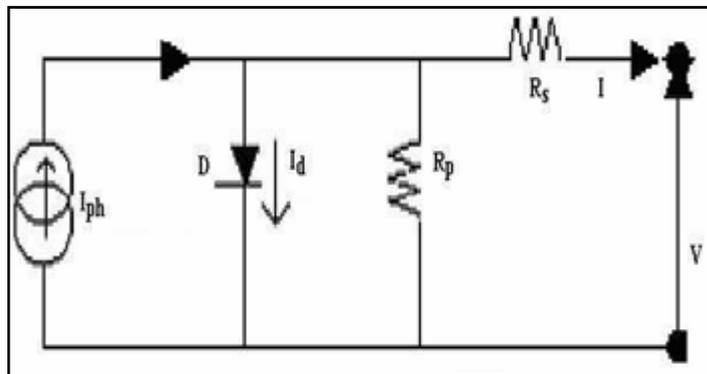


Figure (III-3) : Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire.

- ❖ Le générateur du courant (I_{ph}): il délivre le courant I_{ph} correspondant au courant photogène.

- ❖ La diode (**D**) : modélise la jonction P-N.
- ❖ La résistance série **R_s**: modélise les pertes résistives au sein de la photopile.
- ❖ La résistance parallèle **R_p**(résistance shunt **R_{sh}**) : correspond à une résistance de fuite entre les deux zones **N** et **P** de la jonction; il en résulte qu'une partie du courant **I_{ph}** sera dérivée par cette résistance et ne pourra être délivrée à la charge. Cette résistance devra être la plus élevée possible.[12]

III-6 Caractéristiques d'une cellule solaire :

Les caractéristiques d'une cellule solaire photovoltaïque sont caractérisées par un certain nombre de paramètres extrait de caractéristique courant-tension [15] :

III-6-1 Tension en circuit ouvert **V_{co}** :

C'est la tension mesurée aux bornes de la cellule et pour laquelle le courant débité par la cellule solaire est nul, elle est donnée par la relation :

$$V_{co} = nV_{th} \log \left(1 + \frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (III-5)$$

III-6-2 Courant de court circuit **I_{cc}** :

En court circuit **V=0** :

D'où
$$I_{cc} = I_{ph} \quad (III-6)$$

III-6-3 Point du fonctionnement **P_m (V_m, I_m)** :

La puissance maximale d'une cellule photovoltaïque éclairée est la grandeur essentielle pour évaluer sa performance; elle est donnée par la relation :

$$P_m = V_m * I_m \quad (III-7)$$

Elle traduit sur la caractéristique **I-V** le point du fonctionnement **P_m (V_m, I_m)** qui est situé au coude de la caractéristique **I-V** et dit point de puissance maximale où les valeurs de tension **V_m** et du courant **I_m** appelées également tension et courant maximums respectivement [15].

III-6-4 Facteur de forme FF :

A l'aide de la caractéristique courant-tension d'une cellule dans l'obscurité et sous éclairage, il est possible d'évaluer les performances et le comportement électrique de la cellule photovoltaïque, donc le facteur de forme (**FF**) « en anglais : Fill Factor » est défini comme le rapport entre la puissance maximale et le produit (I_{cc}, V_{co}); d'où il est donné par la relation :

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} \times V_{co}} = \frac{I_m \times V_m}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (III-8)$$

Ce paramètre compris entre 0 et 1, on l'exprime en % qualifie la forme plus ou moins rectangulaire de la caractéristique $I-V$ de la cellule solaire. Si celle-ci était carrée le facteur de forme serait égale à 1, la puissance **Pm** sera égale à (I_{cc}, V_{co}). Mais, généralement le facteur de forme prend des valeurs entre 0.6 et 0.85.[15]

III-6-5 Rendement η :

Il est défini comme le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule. Si **S** est la surface de la cellule (en m^2) et **E** est l'éclairement-irradiante (en W/m^2). Le rendement énergétique s'écrit [12] :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{inc} S} \quad (III-9)$$

P_{inc} : Puissance incident ; S : surface de la cellule photovoltaïque

Ou d'après : $P_m = FF \times I_{cc} \times V_{co}$

$$\eta = \frac{FF \times I_{cc} \times V_{co}}{P_{inc} S} \quad (III-10)$$

III-7-1 Cellules mise en série :

Une association de N_s cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (**GPV**). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, figure III-4. L'équation (III-11) résume les caractéristiques électriques d'une association série de N_s cellules.

$$V'_{co} = N_s \cdot V_{co} \quad (III-11)$$

V_{co} : la tension du circuit ouvert

Ce système d'association est généralement le plus communément et utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce. Comme la surface des cellules devient de

plus importante, le courant par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible.

L'association en série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble. Les panneaux commerciaux constitués de cellules de première génération sont habituellement réalisés en associant 36 cellules en série ($V_{cons} = 0.6 \text{ V} * 36 = 21.6 \text{ V}$) afin d'obtenir une tension optimale du panneau V_{op} proche de celle d'une tension de batterie [17].

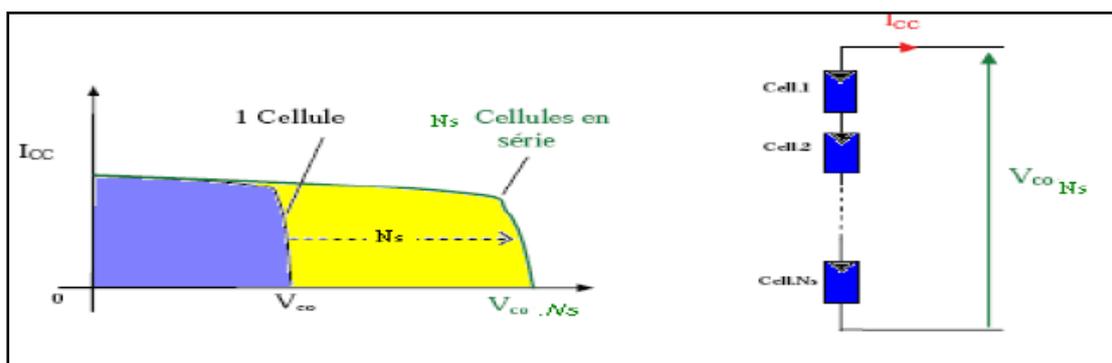


Figure (III-4): Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_s cellules en série.

III-7-2 Cellules Mise en parallèle :

D'autre part, une association parallèle de N_p cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie de générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants, **Figure (III-5)**. L'équation (III-12) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de N_p cellules.

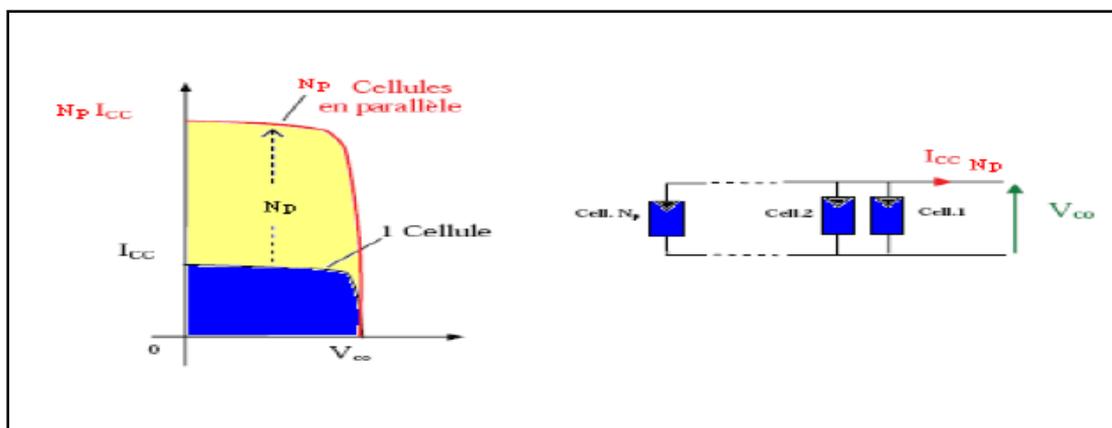


Figure (III-5): Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_p cellules en parallèle.

$$I'_{CC} = N_p \cdot I_{CC} \quad (III-12)$$

Avec I_{CC} : le courant de court circuit

Si l'on désire avoir un générateur PV ayant un courant de sortie plus intense, on peut soit faire appel à des cellules PV de plus grande surface et de meilleur rendement, soit associer en parallèle plusieurs modules PV de caractéristiques similaires. Pour qu'un générateur PV ainsi constitué puisse fonctionner de façon optimal, il faut que les (N_s , N_p) cellules se comportent toutes de façon identique. Elles doivent pour cela être issues de la même technologie, des mêmes conditions de fonctionnement (éclairage, température, vieillissement et inclinaison).

III-8 Différents types de cellules solaires

Sur le plan technologique; plusieurs types de cellules solaires sont distingués :

III-8-1 Cellules solaires au silicium :

Le silicium est le matériau de base des photopiles. C'est le deuxième élément en terme la nature (le sable et le quartz en contiennent). Il existe trois catégories principales de photopiles au silicium :

❖ Cellules monocristallines :

Elles sont considérées comme la première génération de photopile, elles ont un taux de rendement excellent [2] (12 – 16% et jusqu'à 24 % en laboratoire) mais leur méthode de production est laborieuse et délicate, et donc, très chère; il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur.

❖ Cellules poly-cristallines :

Elles ont un coût de production moins élevé et un rendement qui varie entre 11 – 13% (autour de 18 % en laboratoire) [2].

❖ Cellules amorphes :

Leur coût de production bien plus bas, mais malheureusement aussi, ont un rendement plus bas qui varie entre 8 – 10 % (autour de 13 % en laboratoire pour une cellule non dégradée) [2].

Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium de 0.3 à 1.0 nanomètre seulement (500 nanomètres pour les deux autres types). On peut donc appliquer de très fines couches de silicium amorphe sur des vitres, du métal, voir du plastique souple par un procédé de vaporisation sous vide. C'est le silicium amorphe

que l'on trouve le plus souvent dans les petits produits de consommation comme les calculatrices, les montres,...

Les panneaux amorphes ont besoin d'environ deux fois plus de surface (comparé aux panneaux cristallin) pour produire la même quantité d'électricité, et semblent se dégrader plus rapidement, mais ils ont l'avantage de mieux réagir à la lumière diffuse et à la lumière fluorescente et d'être plus performants à des températures élevées [2].

III-8-2 Cellules solaires à couche mince :

On distingue plusieurs technologies parmi les quelles :

❖ Cadmium-tellure (CdTe) :

Rendement 10.5 % (15.8 % en laboratoire). Haute absorption, mais n'oublions pas que le cadmium est très toxique [10].

❖ Gallium Arsenic (Cuivre-indium-di sélénium (CIS) ou cuivre-indium-gallium sélénium (CIGS) :

Leur rendement est égal à 11 % (17.1 % au laboratoire). 99 % d'absorption, dégradation minime, mais fabrication très délicate [10].

❖ (GaAs): leur rendement dépasse les 25 % en laboratoire [10].

Ces cellules, dont le prix est très élevé, sont très appréciées dans l'aérospatiale.

Leurs principaux avantages sont :

- ✚ une absorption très élevée. Ces cellules ne pas épaisses, ce qui traduit un gain en volume et en masse pour les sondes sur les quelles le moindre gramme superflu est traqué.
- ✚ leur puissance est, par rapport aux cellules simples au silicium, peu affectée par les augmentations de température que les sondes peuvent rencontrer.

III-8-3 Cellules solaires organiques :

Le solaire organique est considéré comme une nouvelle technologie basée sur les colorants et leurs propriétés physiques et en particulier optiques [10].

III-9 Solutions pour protégé une cellule solaire :

- Les panneaux (ensembles des cellules solaire) sont protégés dans leur face extérieure avec verre tempéré qui permet de supporter des conditions météorologiques très dures comme la glace, les changements brusques de température.
- Le vitre de protection réduit un peu la production du panneau solaire, il est collé ça permet au panneau de se refroidir par conduction par la face avant à peu près aussi bien que sans la vitre supplémentaire ; mais n'est pas la solution simple.

➤ Système de refroidissement :

La température intérieure d'un panneau solaire peut facilement atteindre 150°. En conséquence, la température intérieure du panneau ne passe jamais 75°C même si le système est éteint.

Le système de refroidissement est automatique, avec des ventilateurs qui nous permettent de placer la cellule PV à l'intérieur du panneau, placée derrière une couche plastique robuste qui protège contre les jets de pierre, la cellule PV produit sa propre chaleur, ce qui augmente le rendement du panneau [16].

CHAPITRE IV

MODÉLISATION

D'UN PANNEAU

SOLAIRE

IV-1 Introduction:

Le logiciel Matlab constitue d'un système interactif et convivial de calcul numérique et de visualisation graphique, destiné aux ingénieurs, aux techniciens et aux scientifiques. C'est un outil très utilisé, dans les universités comme dans le monde industriel, qui intègre centaines de fonctions mathématiques et d'analyse numérique (calcul matriciel [le MAT de Matlab], traitement de signal, traitement d'images, visualisations graphiques, etc.). Notons que d'autres logiciels compatibles avec Matlab existent ; citons par exemple OCTAVE [sous Linux] ou encore SCILAB, développé en France par l'INRIA, qui sont tout les deux très performants et de plus gratuits (téléchargement libre).

IV-2 Modélisation du panneau photovoltaïque :

IV-2-1 Description du modèle utilisé :

IV-2-1-1 Modèle d'une cellule photovoltaïque :

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

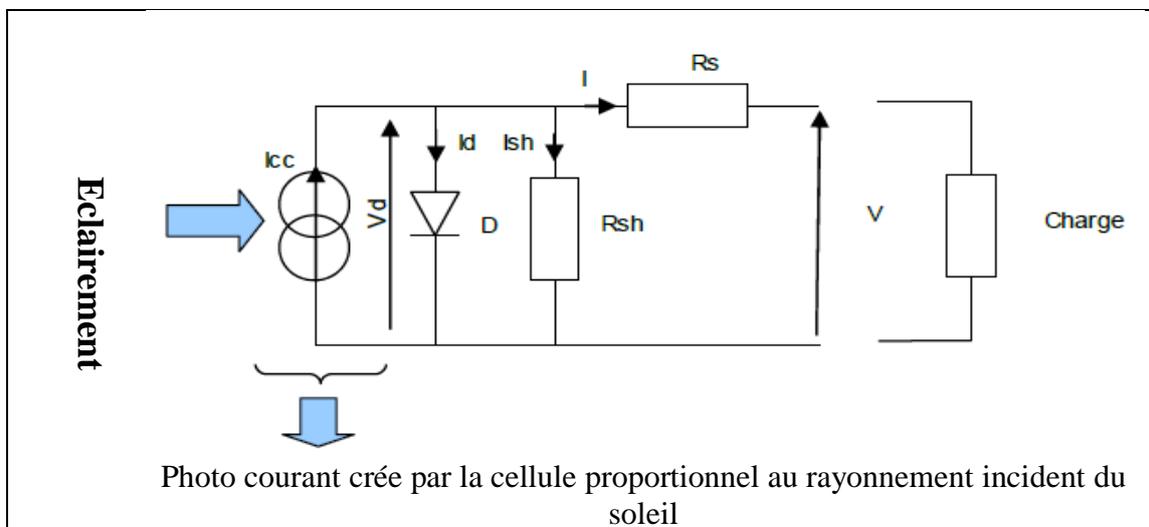


Figure (IV-1) : Modèle d'une cellule photovoltaïque

IV-2-1-2 Equations associées au modèle :

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

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

$$\begin{cases} I_d = I_s \times [\exp(qV_d/nKT) - 1] \\ V_d = V + R_s \times I \end{cases} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} - n : \text{facteur d'idéalité de la diode} \\ - q : \text{charge de l'électron} \rightarrow 1,602 \times 10^{-19} \text{ C} \\ - K : \text{constante de Boltzmann} \rightarrow 1,38 \times 10^{-23} \\ - T : \text{température de la cellule en degré kelvin} \\ - I_s : \text{courant de saturation} \end{cases}$$

On caractérise 3 points de fonctionnement:

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

IV-2-1-3 Valeur de R_s :

On a : $I_{cc} = I_s \times [\exp(qV_d/nKT) - 1] + I$

En circuit ouvert on a : $I = 0 \rightarrow I_{cc} = I_s \times [\exp(qV_{co}/nKT) - 1]$.

On en déduit

$$I_s = I_{cc} / [\exp(qV_{co}/nKT) - 1] = I_{cc} / \exp(qV_{co}/nKT) \quad \text{Avec : } \exp(qV_{co}/nKT) \gg 1.$$

Le facteur d'idéalité va être utilisé pour définir le nombre de cellules du panneau photovoltaïque que l'on souhaite modéliser ($n = \text{nombre de cellules}$). Lorsque l'on se trouve au point de fonctionnement de la puissance maximale (V_{pm}, I_{pm}), on peut écrire l'équation $I_{cc} = I_d + I_{pm}$. Sachant que (V_{pm}, I_{pm}) est un couple de valeurs connues. A partir de cette équation, on en déduit :

$$I_{cc} = I_s \times \exp(q(V_{pm} + R_s \times I_{pm})/nKT) + I_{pm}.$$

En posant $V_t = KT/q$ ———> on a : $I_{cc} = I_s \times \exp((V_{pm} + R_s \times I_{pm})/n \times V_t) + I_{pm}$.

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

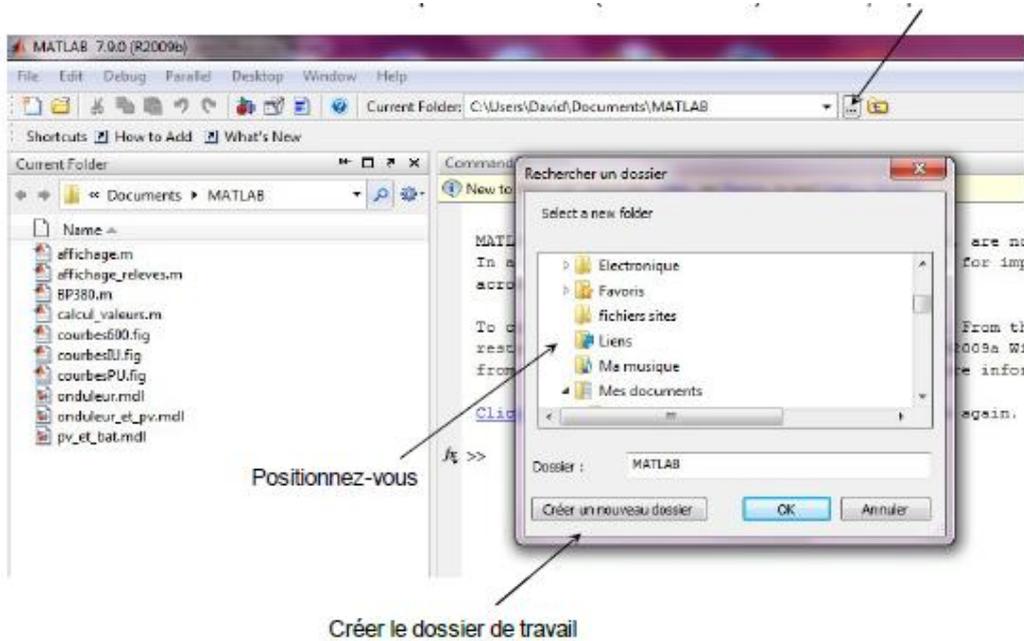
La valeur de R_s se déduit de l'équation :

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

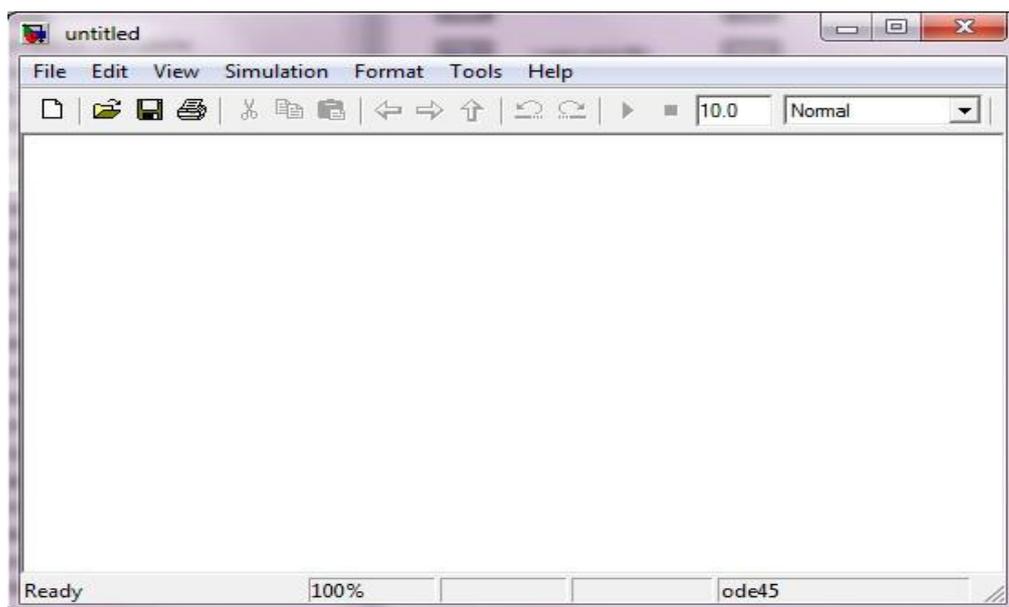
IV-3 Création du modèle du panneau photovoltaïque sous Matlab/Simulink

IV-3-1 Création de la « boîte noire »

- Lancer Matlab et créer le répertoire de travail. Pour cela, cliquer sur :



- Lancer simulink.
- Aller dans **File** puis **new model**. Une fenêtre doit apparaître et elle va nous permettre de créer notre modèle de panneau photovoltaïque.

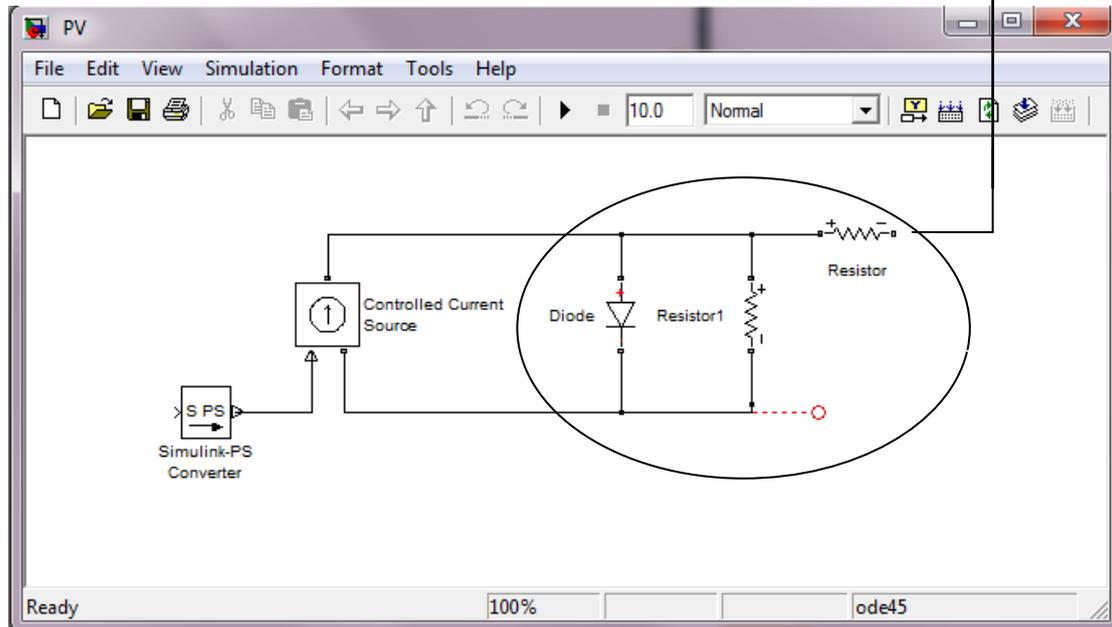


- Enregistrer le modèle vide sous le nom PV. Le modèle sera automatiquement enregistré dans le current folder défini auparavant. On doit voir apparaître ce modèle dans la fenêtre current folder dans l'environnement Matlab.

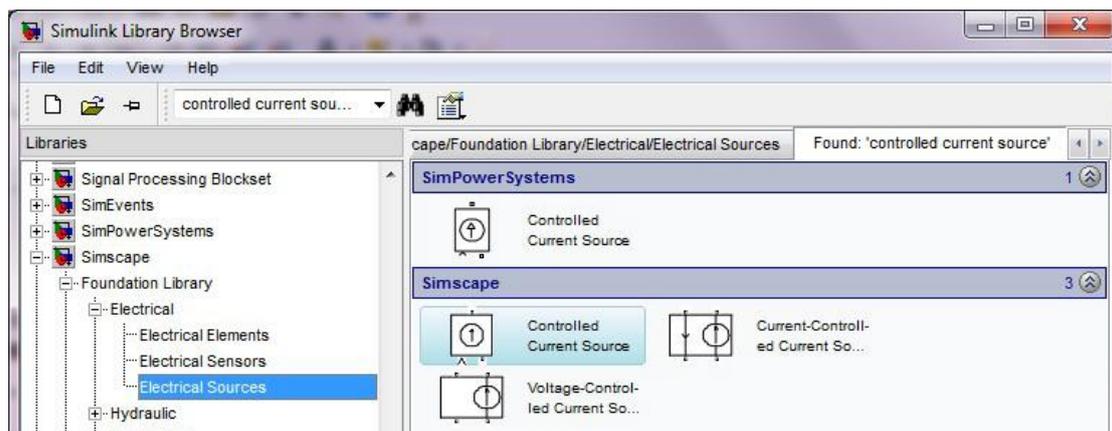
Pour créer notre modèle, on va travailler avec les composants disponibles dans la library Simscape/SimElectronics. Pour modéliser notre panneau photovoltaïque nous avons besoin de:

- Diode → on la trouve dans Simscape/SimElectronics/Semiconductor Devices
- Resistance → on les trouve dans Simscape/SimElectronics/Passive Devices

➤ Créer sous simulink (dans la fenêtre PV), le modèle donne :

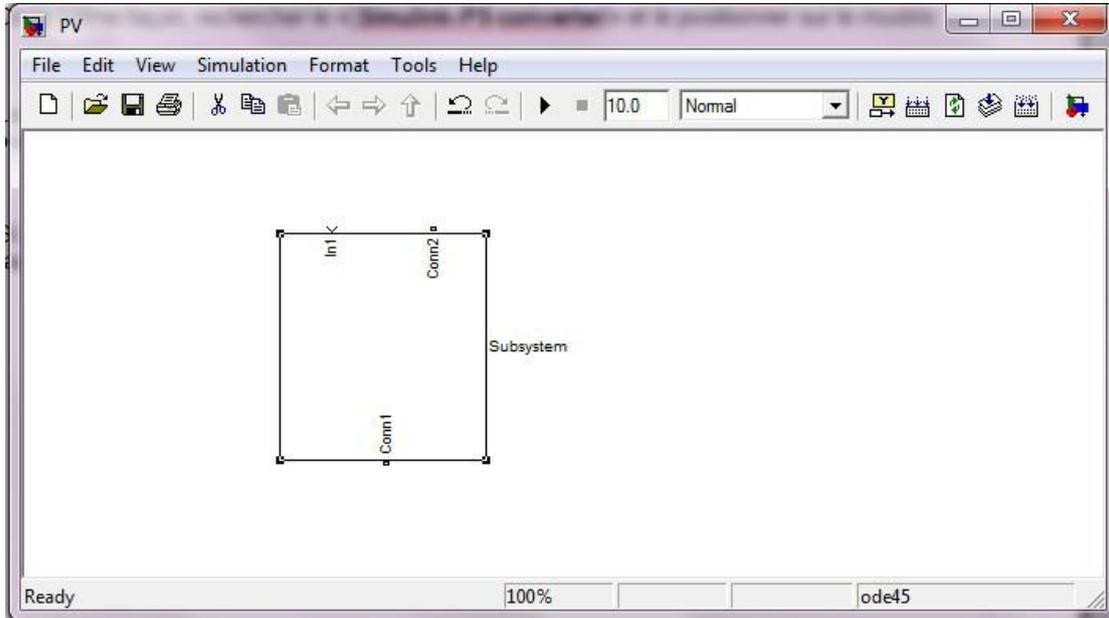


Il faut intégrer au modèle, le générateur de courant. Ce générateur doit être commandé en fonction de l'éclairement du panneau photovoltaïque. Pour cela, on va utiliser un « Controlled current source » de la library Simscape/Foundation Library/Electrical/Electrical Sources. Pour trouver rapidement ce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

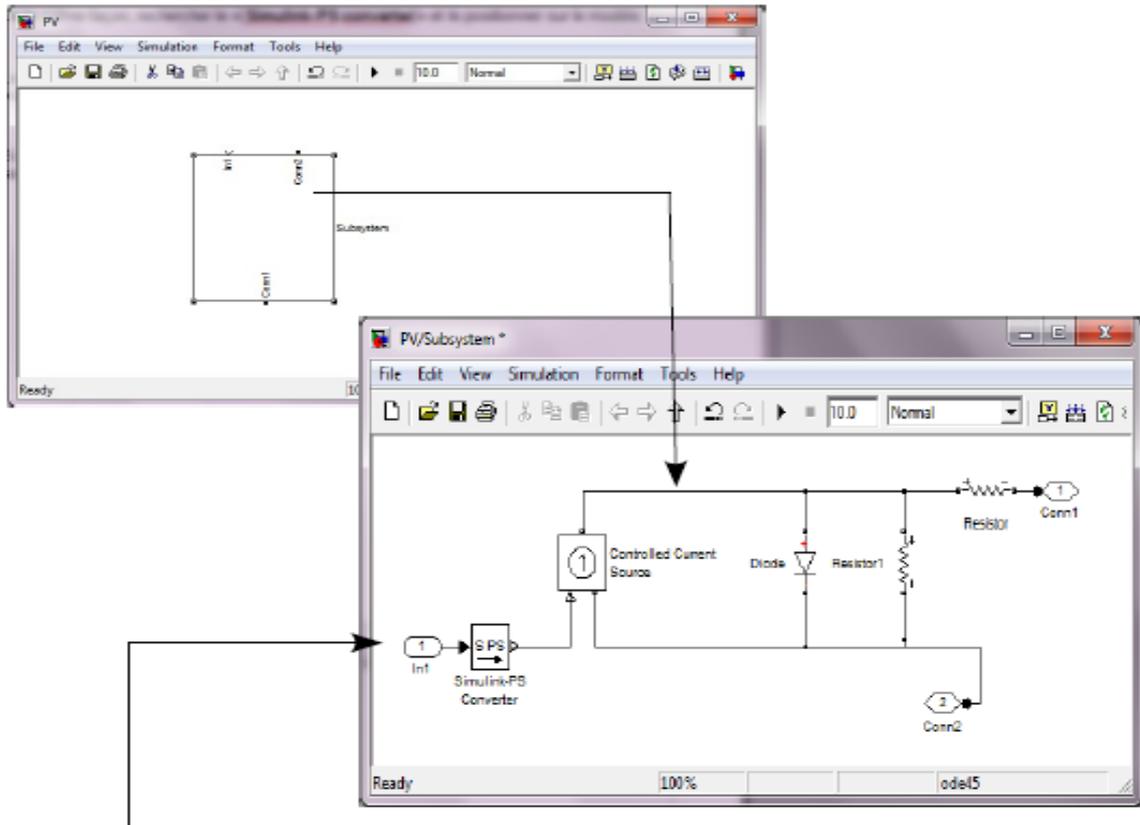


De la même façon, rechercher le « Simulink-PS convertir » et le positionner sur le modèle.

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

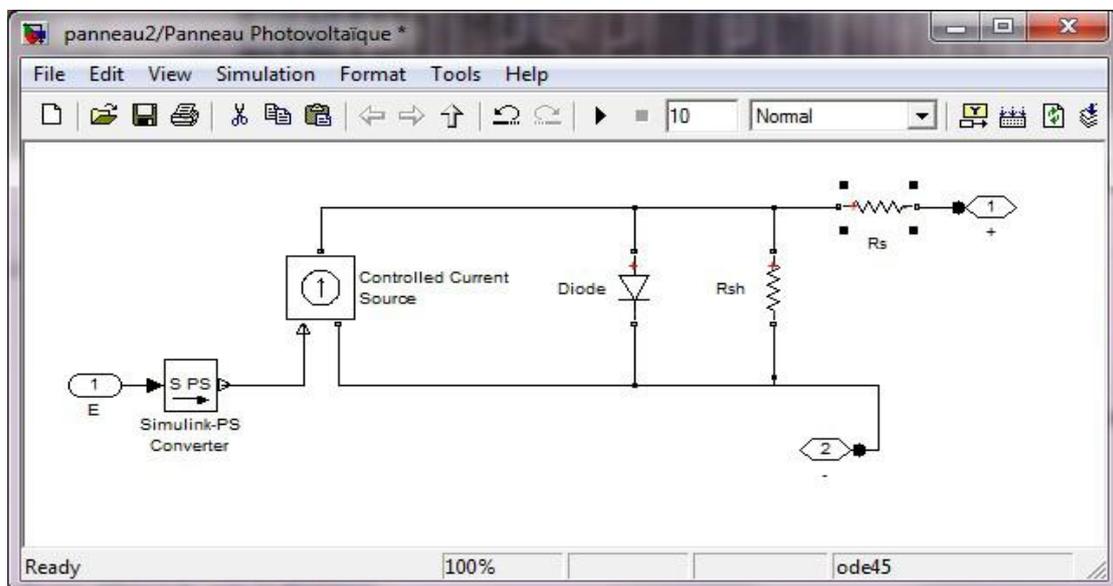


Si on double clique sur la boîte noire, on doit voir apparaître dans une fenêtre le modèle qui a été élaboré auparavant.



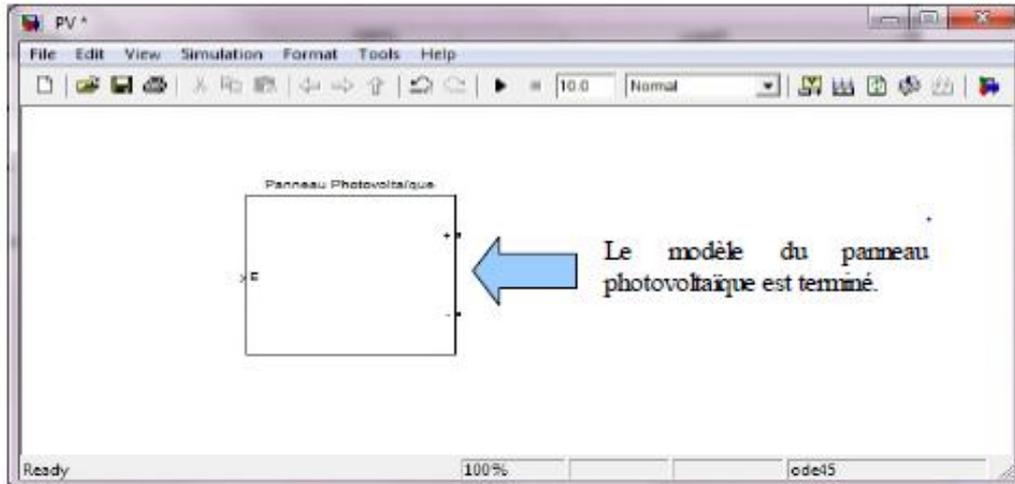
- Cliquer sur *In1*, et modifier le texte en tapant E, faites de même pour Conn1 Conn2 en les renommant + et - . Sauvegarder les modifications.
- Double cliquer sur la sortie + (Conn1) et vérifier que Right est sélectionnée.
- Double cliquer sur la sortie - (Conn2) et vérifier que Right est sélectionnée.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

Vous devez obtenir la vue ci-dessous:



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

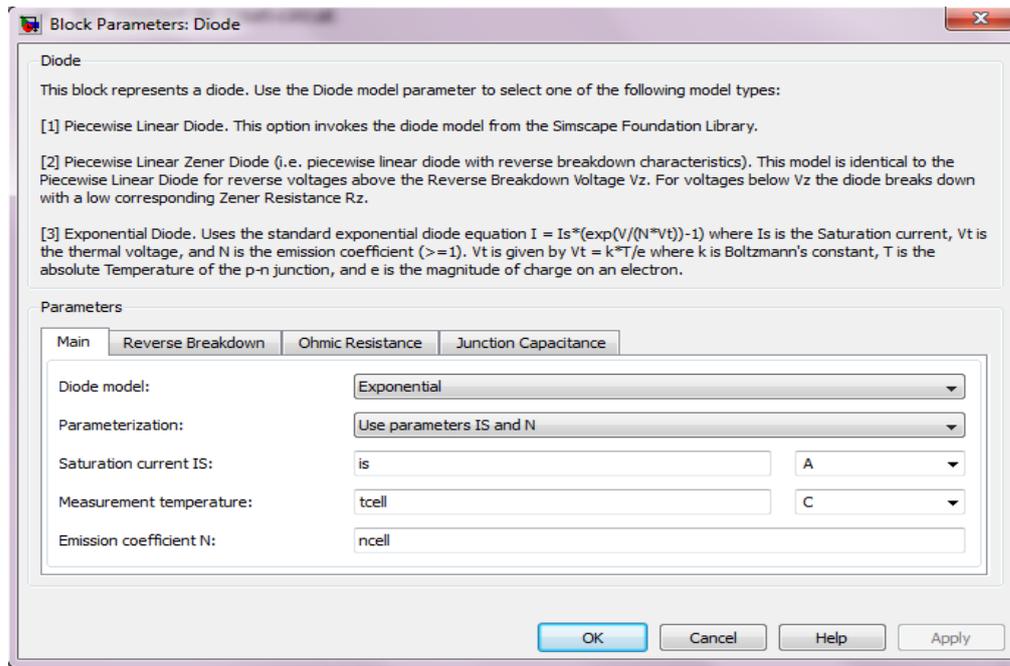
Vous devez obtenir la vue ci-dessous:



IV-3-2 Paramétrage du modèle

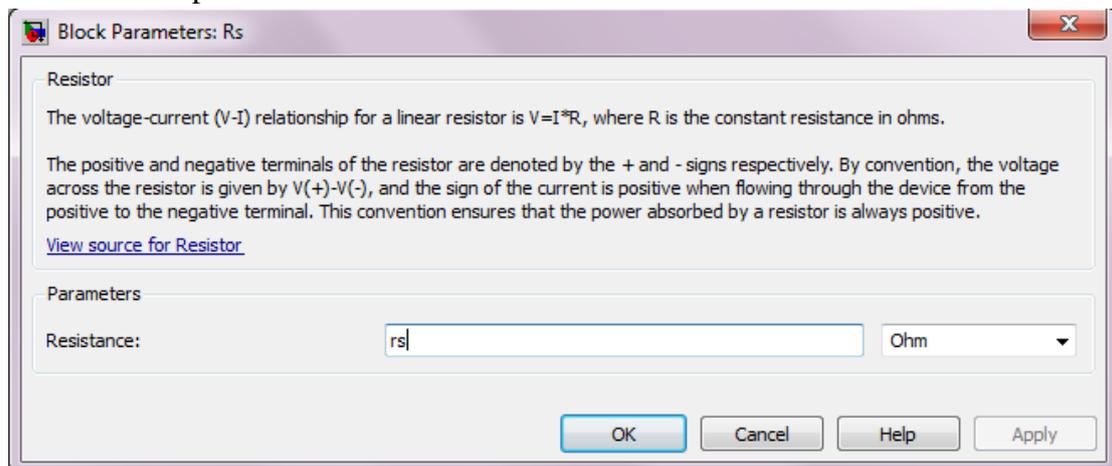
Le paramétrage s'effectue à partir des données que l'on peut extraire des documents techniques du panneau photovoltaïque que l'on souhaite simuler. Ces paramètres sont:

- V_{co} : tension de circuit ouvert.
 - I_{cc} : courant de court-circuit.
 - V_{pm} : tension de puissance maximale.
 - I_{pm} : courant de puissance maximale.
 - N_{cell} : nombre de cellule composant le panneau.
 - T_{cell} : température des cellules.
- Double cliquer sur le modèle (boîte noire) du panneau photovoltaïque afin de faire apparaître le modèle avec les composants le constituant.
 - Double cliquer sur la diode afin de faire apparaître la fenêtre de paramétrage.



Paramétrer la diode comme le montre la figure ci-dessus. On voit apparaître les variables T_{cell} et N_{cell} .

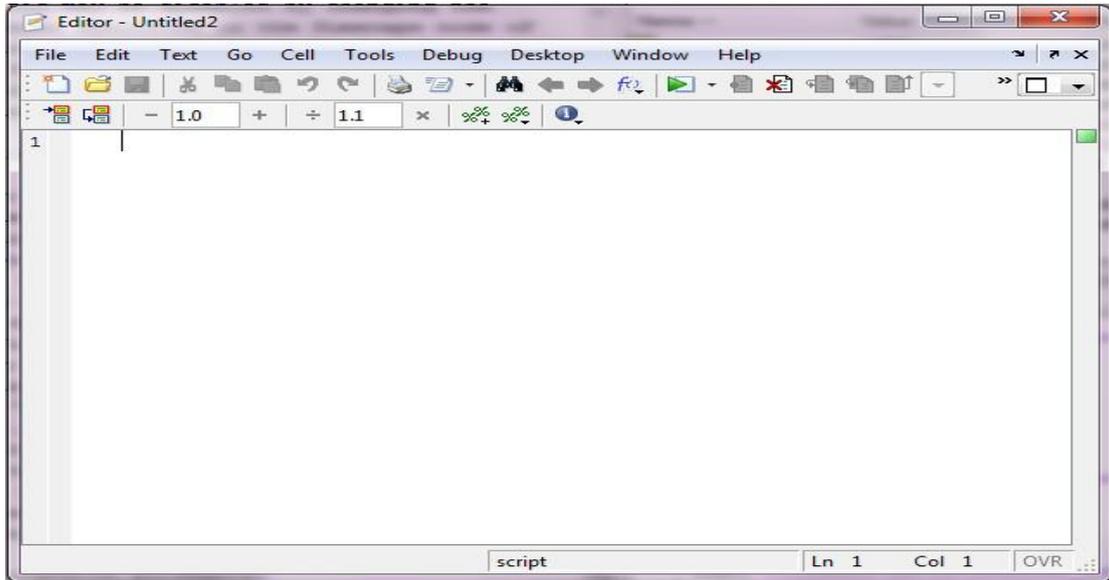
- Double cliquer sur la résistance série [R_s] du modèle et compléter comme ci-dessous le paramètre de la résistance.



- Double cliquer sur la résistance shunt [R_{sh}] du modèle et mettre une valeur de 1 Méga-Ohm.

IV-3-3 Création d'un script contenant les valeurs des paramètres du modèle :

Dans la barre principale de Matlab, cliquer sur file et sélectionner new puis Blank M-File. Une fenêtre doit apparaître.



- Taper dans cette fenêtre le script suivant:
- Sauvegarder ce fichier sous le nom calcul-valeurs. Vérifier qu'il apparaît dans le current folder.

IV-4 Simulation du modèle

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

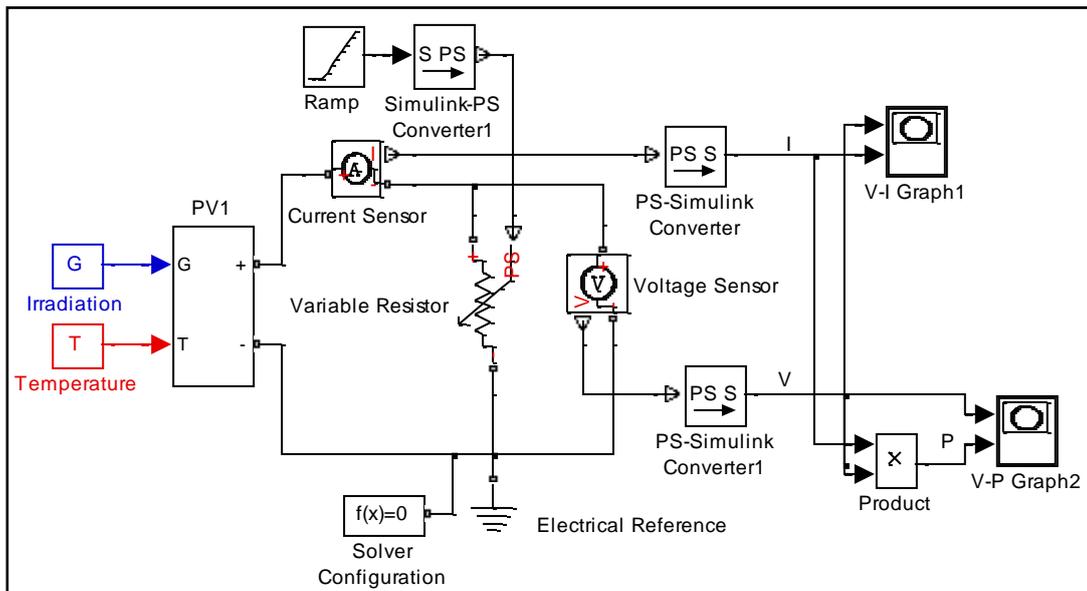
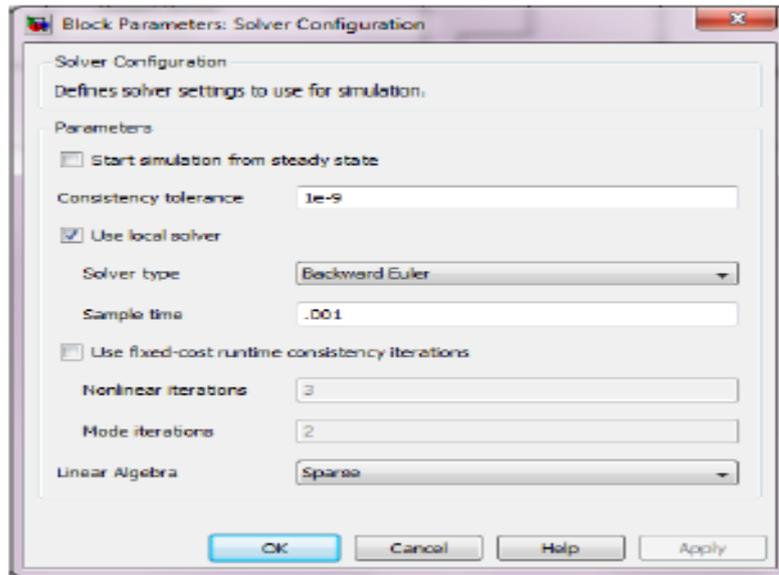


Figure (IV-2) : Modèle de simulation pour un panneau photovoltaïque (PV).

- Double cliquer sur le solver et configurer le comme le montre la figure ci-dessous.



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

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

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

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

```

1 - k=1.38e-23;
2 - q=1.6e-19;
3 - t=273;
4
5 - Icc = 4,95;
6 - Vco = 21,9;
7 - Vpm = 17,5;
8 - Ipm = 4,57;
9 - Ncell = 36;
10 - Tcell= 58,75;
11
12 - vt = (k*(t+tcell))/q;
13 - is=icc/exp(vco/(ncell*vt));
14
15 - rs = ncell*vt*log((icc-ipm)/is)/ipm-vpm/ipm;
16
17

```

- Paramétrer la valeur du bloc constant a **4.95** (correspond a une irradiante de **1000W/m²**).
- Sauvegarder le fichier sous le nom «<< panneau1 >>».
- Dans la fenêtre command windows de Matlab, taper calcul_valeurs ou bien faite glisser du current folder le fichier calcul_valeurs dans la fenetre command windows.
- Paramétrer la simulation sur **10 s**.

On définit **3** variables: courant, tension et puissance. On va pouvoir utiliser ces variables sous Matlab et ainsi valider notre modèle par rapport aux caractéristiques du panneau photovoltaïque que l'on a souhaite modéliser.

- Lancer la simulation.
- Dans la fenêtre command Windows de Matlab, taper l'instruction plot(tension,puissance).
- Une figure doit apparaitre montrant l'évolution de la puissance. Cliquer sur Tools → Data Statistics et sélectionner **Y_{max}** (Puissance max).

IV-4-1 Influence de température et l'irradiation sur un panneau PV :

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

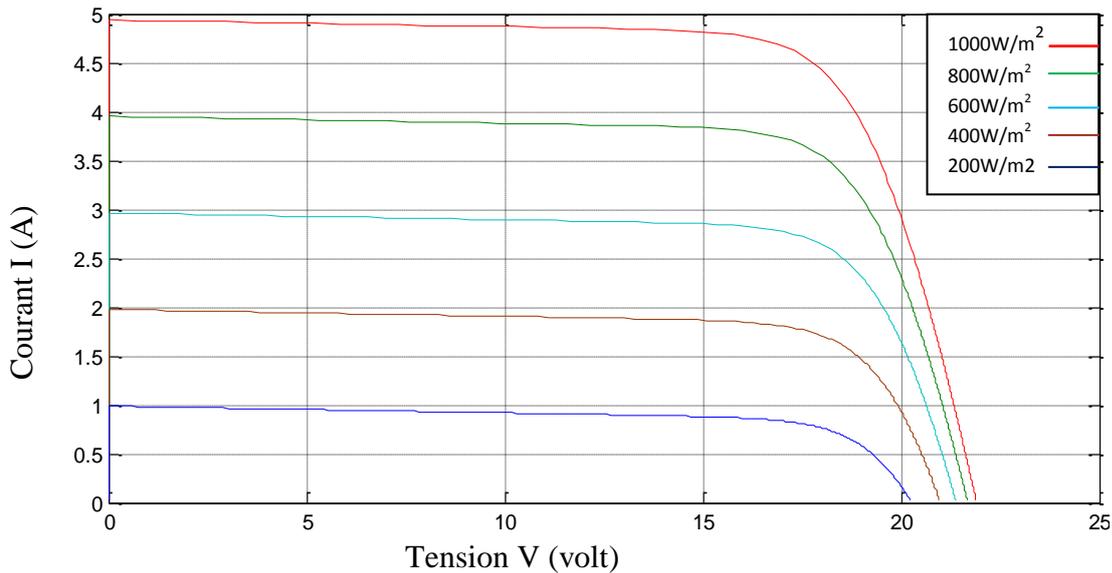


Figure (IV-3) : Influence de l'irradiation sur la caractéristique I(V) pour un panneau PV à $T=25^{\circ}\text{C}$ ($1000\text{W}/\text{m}^2$; $800\text{W}/\text{m}^2$; $600\text{W}/\text{m}^2$; $400\text{W}/\text{m}^2$; $200\text{W}/\text{m}^2$).

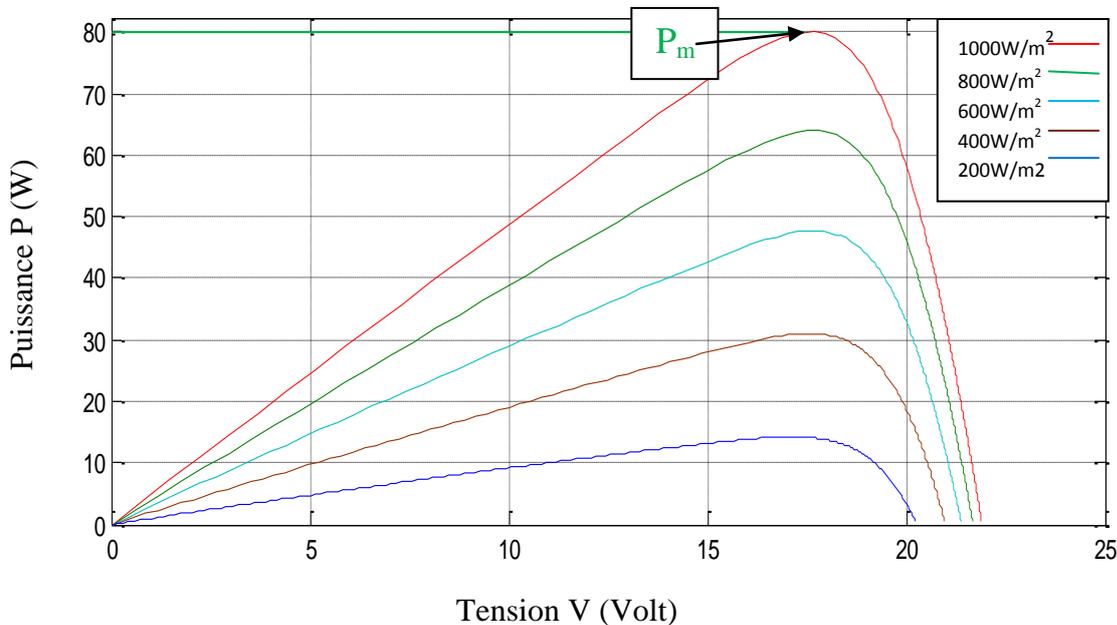


Figure (IV-4) : Influence de l'irradiation sur la caractéristique P(V) pour un panneau PV à $T=25^{\circ}\text{C}$ ($1000\text{W}/\text{m}^2$; $800\text{W}/\text{m}^2$; $600\text{W}/\text{m}^2$; $400\text{W}/\text{m}^2$; $200\text{W}/\text{m}^2$).

Par contre, lorsque nous avons maintenu une irradiation constant pour différentes températures. figure (IV-5) représente les différentes allures $I(V)$ selon la température. La tension à vide V_{CO} diminue avec l'augmentation de la température. La variation de tension à vide est pratiquement compensée par la variation du courant de court-circuit I_{CC} . Figure (IV-6) représente la puissance nominale fournie par un panneau qui varie très légèrement avec la température et la tension diminue.

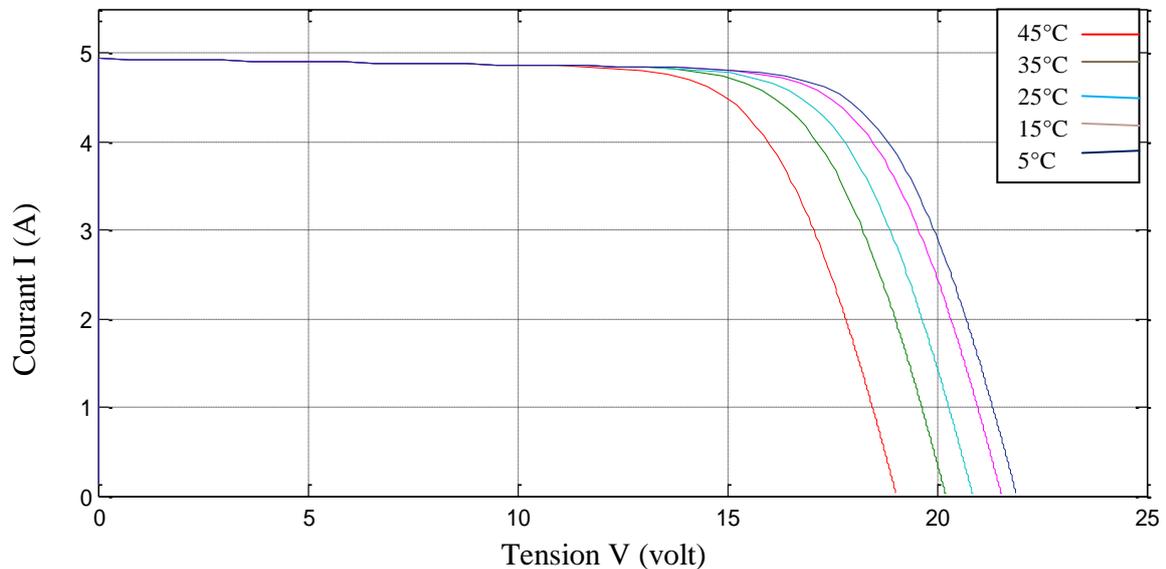


Figure (IV-5) : Influence de la température sur la caractéristique $I(V)$ pour un panneau PV à $E=1000W/m^2$ (5 °C;15 °C ; 25°C ; 35 °C ; 45 °C).

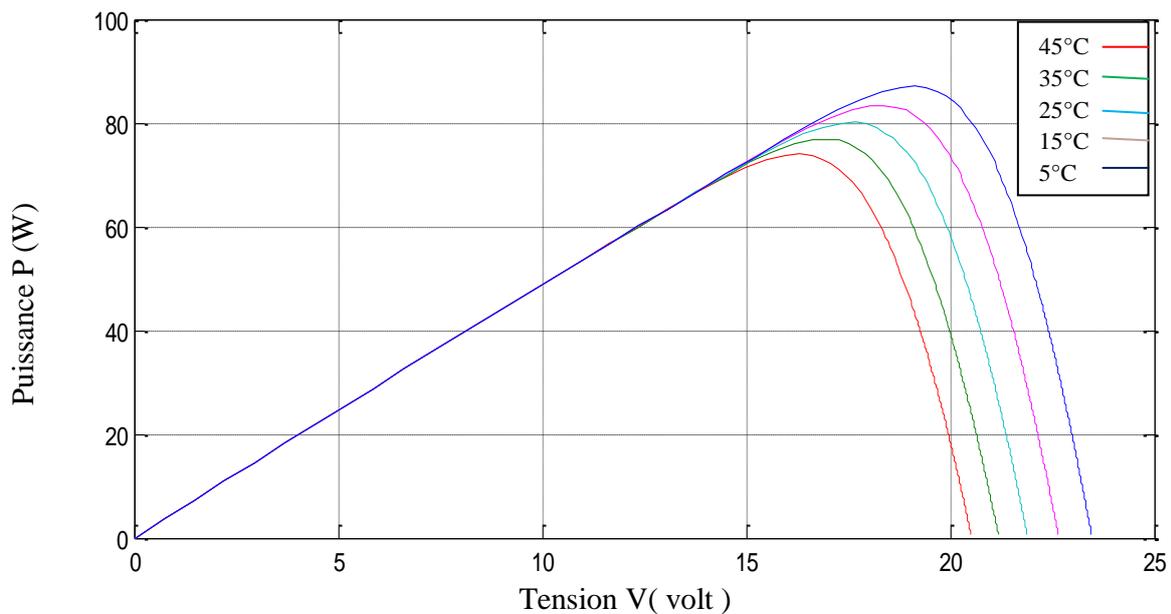


Figure (IV-6) : Influence de la température sur la caractéristique $P(V)$ pour un panneau PV à $E=1000W/m^2$ (5 °C;15 °C ; 25°C ; 35 °C ; 45 °C).

IV-4-1-1 Influence de température et d'irradiation sur le rendement de conversion et le facteur de forme :

A- Effet de l'irradiation :

Nous avons maintenu une température constante 25 °C à différents irradiations, dans ces figures (IV-3) et (IV- 4) on prend la valeur de tension de circuit-ouvert V_{co} , le courant de court-circuit I_{cc} et la puissance maximale P_m qui sont présentés dans le tableau suivant :

Irradiation (W /m²)	V_{co} (volt)	I_{cc} (A)	P_m (w)
1000	22	5	80
800	21,8	4	65
600	21,5	3	48
400	21	2	31
200	20	1	14

Tableau (IV-2) : Valeurs de tension de circuit-ouvert V_{co} , le courant de court-circuit I_{cc} et la puissance maximale P_m aux différentes irradiations et à la température 25°C .

En utilisant la relation (III- 8) et le tableau (IV-2),en peut calculer le facteur de forme FF pour différents irradiations :

$$\text{Pour } 1000\text{W/m}^2 \longrightarrow FF_1 = \frac{80}{5 \times 21.8} = 0,75 = 75\%$$

$$\text{Pour } 800\text{W/m}^2 \longrightarrow FF_2 = \frac{65}{4 \times 21,6} = 0.75 = 75\%$$

$$\text{Pour } 600\text{W/m}^2 \longrightarrow FF_3 = \frac{48}{3 \times 21.5} = 0.74 = 74\%$$

$$\text{Pour } 400\text{W/m}^2 \longrightarrow FF_4 = \frac{31}{2 \times 21} = 0.74 = 74\%$$

$$\text{Pour } 200\text{W/m}^2 \longrightarrow FF_5 = \frac{14}{1 \times 20} = 0.7 = 70\%$$

Rendement de conversion (η): c'est le rapport entre l'énergie fournie et la puissance lumineuse incidente P_i (puissance d'éclairément reçue par unité de surface ; S : surface de la cellule photovoltaïque).

$$\eta = \frac{V_m I_m}{P_i S} = \frac{FF V_{co} I_{cc}}{P_i S}$$

Dimension de notre panneau photovoltaïque du type Suntech STP080 12/B6 monocristallin est (1195mm × 541 mm) → (1.195m × 0.541m = 0.646 m²).

Donc on calcule le rendement de conversion(η):

$$\eta_1 = \frac{FF_1 V_{cc1} I_{cc1}}{P_i S} = \frac{80}{1000 \times 0.646} = 17.67\%$$

$$\eta_2 = \frac{65}{800 \times 0.646} = 12.56\%$$

$$\eta_3 = \frac{48}{600 \times 0.646} = 12\%$$

$$\eta_4 = \frac{48}{400 \times 0.646} = 11.98\%$$

$$\eta_5 = \frac{65}{800 \times 0.646} = 10.83\%$$

➤ Alors, on résume les résultats obtenus, dans le tableau suivant :

Irradiation W/m ²	200	400	600	800	1000
FF (%)	70	74	74	75	75
η (%)	10.83%	11.98%	12%	12.56%	17.67%

Tableau (IV-3) : Influence d'irradiation sur le rendement η de conversion et sur le facteur de forme FF aux différentes irradiations et à la température 25°C.

A partir de ces résultats, On peut conclure que le rendement de conversion d'un panneau solaire augmente avec l'augmentation d'irradiation incidente de même pour son facteur de forme.

B- Effet de la température

Pour l'influence de température sur les caractéristiques I-V, le courant de court-circuit I_{cc} reste constant et la tension de circuit-ouvert V_{co} est changée, nous avons maintenu une irradiation constante 1000 W/ m² à différents températures. Dans ces figures (IV-5) et (IV- 6), on a pris la valeur de tension de circuit-ouvert V_{co} , le courant de court-circuit I_{cc} et la puissance maximale P_m . Ces résultats sont dans le tableau suivant :

Température (C°)	V _{co} (volt)	I _{cc} (A)	P _m (W)
45	21.8	5	86
35	21.6	5	82
25	21	5	80
15	20	5	78
05	19	5	73

Tableau (IV-4) : Les valeurs de tension de circuit-ouvert V_{co}, le courant de court-circuit I_{cc} et la puissance maximale P_m aux différentes températures et à l'irradiation 1000 W/m².

En utilisant la relation (III- 8) et le tableau (IV-4) , en peut calculer les relations de facteur de forme :

$$\text{Pour } 5^{\circ}\text{C} \longrightarrow FF_1' = \frac{P_{m1}'}{V_{col}' I_{ccl}'} = \frac{86}{5 \times 21.8} = 78.89\%$$

$$\text{Pour } 15^{\circ}\text{C} \longrightarrow FF_2' = \frac{82}{5 \times 21.6} = 76\%$$

$$\text{Pour } 25^{\circ}\text{C} \longrightarrow FF_3' = \frac{80}{5 \times 21} = 76.19\%$$

$$\text{Pour } 35^{\circ}\text{C} \longrightarrow FF_4' = \frac{76}{5 \times 20} = 76\%$$

$$\text{Pour } 45^{\circ}\text{C} \longrightarrow FF_5' = \frac{73}{5 \times 19} = 76\%$$

On a la valeur de P_{inc} . S la surface est constante ($P_{inc} S = 1000 \text{ W/m}^2 \times 0.646 \text{ m}^2 = 452.71 \text{ W}$), Donc en utilisant la relation (III-10), et le tableau (IV-4) en peut calculer le rendement de conversion(η) :

$$\eta_1' = \frac{86}{452.71} = 18.99\%$$

$$\eta_2' = \frac{82}{452.71} = 18.11 \%$$

$$\eta_3' = \frac{80}{452.71} = 17.67 \%$$

$$\eta_4' = \frac{78}{452.71} = 17.23\%$$

$$\eta_5' = \frac{73}{452.71} = 16\%$$

➤ Alors on résume les résultats obtenus dans le tableau suivant :

Température °C	05	15	25	35	45
FF (%)	78.89	76	76.19	76	76
η (%)	18.99	18.11	17.67	17.23	16

Tableau (IV-5) : Influence de température sur le rendement η de conversion et le facteur de forme FF à différentes températures.

✚ **Remarque :** on voit que le rendement de conversion (η) d'un panneau photovoltaïque diminue avec l'augmentation de la température, de même pour le facteur de forme qui diminue aussi légèrement.

IV-4-2 Influence de température et l'irradiation sur des panneaux PV en série :

Modifier le fichier de simulation afin de le faire correspondre à la figure ci-dessous. Cette figure montre la connexion des panneaux en série. Cette simulation nous permet de vérifier les valeurs de V_{co} et I_{cc} de l'association des 4 panneaux photovoltaïques.

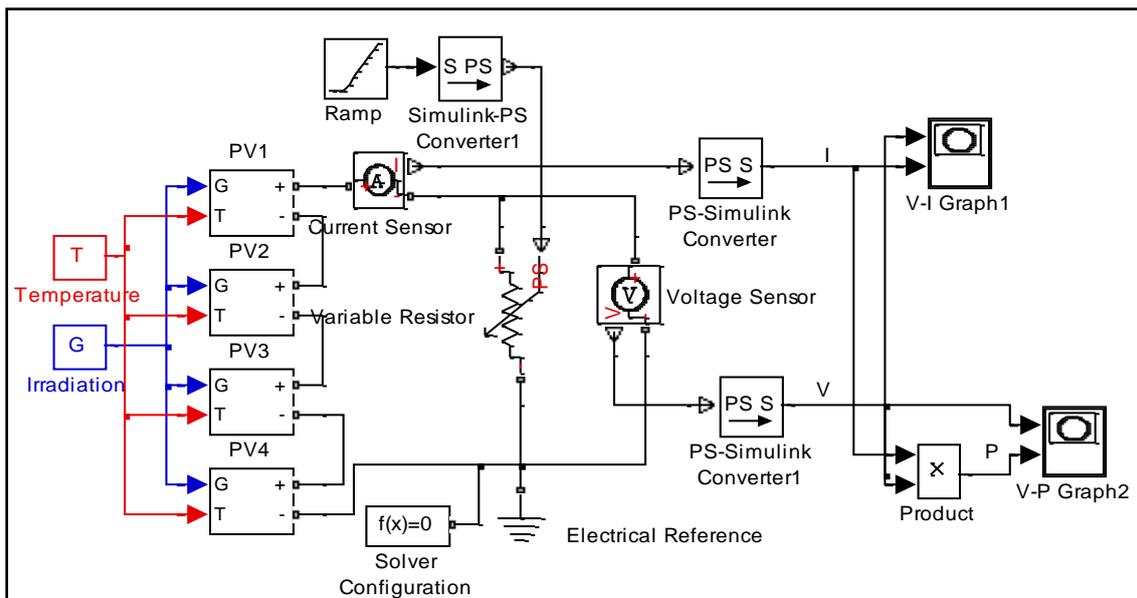


Figure (IV-7) : Modèle de simulation pour 4 panneaux photovoltaïque (PV) en série.

Les variations du courant et de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairements à température maintenue constante 25°C , figure (IV-9), montrent clairement l'existence de maxima sur les courbes de puissance correspondant aux Points de puissance maximale P_{max} . Lorsque l'irradiation varie

pour une température donnée, la puissance figure (IV-8) le courant de court-circuit I_{cc} varie proportionnellement à l'irradiation, dans même temps, la tension de circuit ouvert V_{co} varie légèrement.

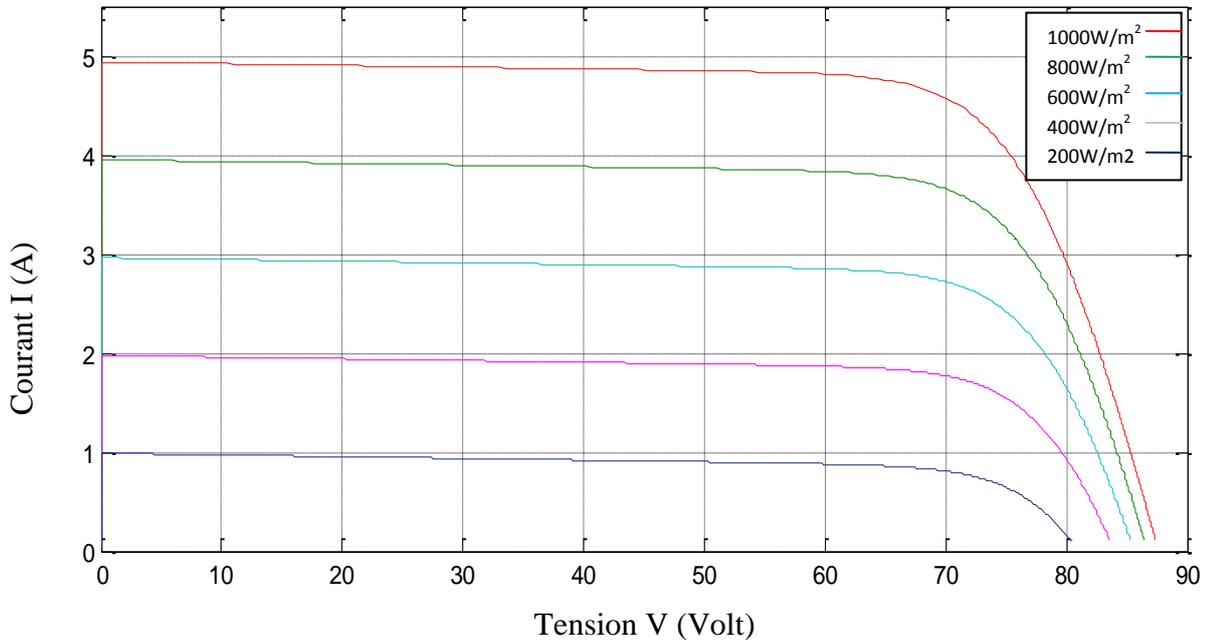


Figure (IV-8) : Influence de l'irradiation sur la caractéristique I(V) des panneaux PV en série à $T=25^{\circ}\text{C}$ ($1000\text{W}/\text{m}^2$; $800\text{W}/\text{m}^2$; $600\text{W}/\text{m}^2$; $400\text{W}/\text{m}^2$; $200\text{W}/\text{m}^2$).

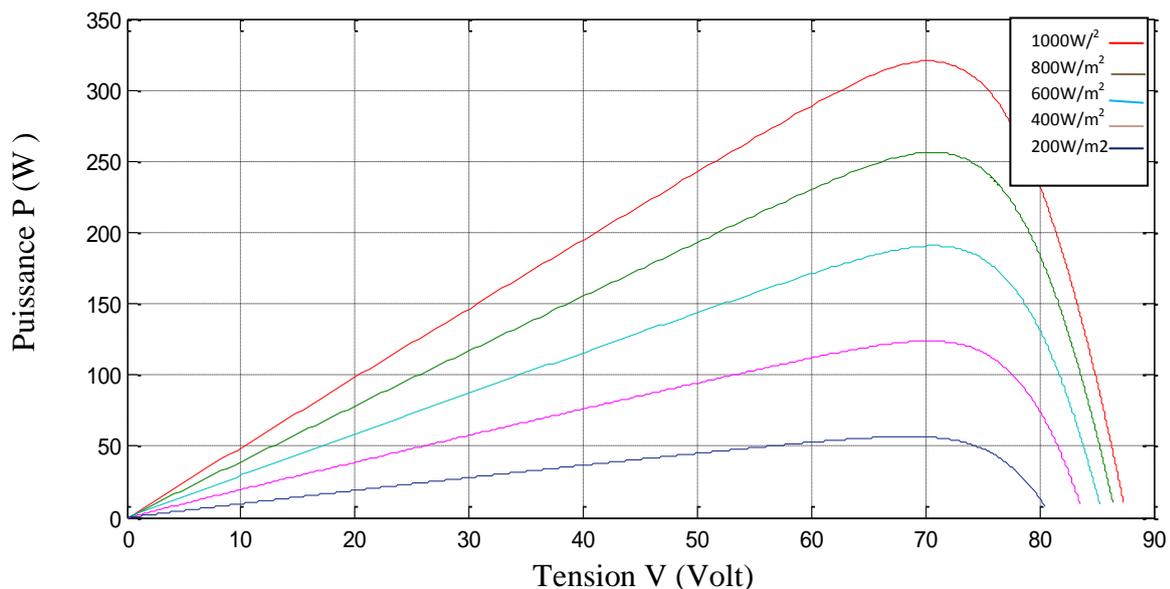


Figure (IV-9) : Influence de l'irradiation sur la caractéristique P(V) des panneaux PV en série à $T=25^{\circ}\text{C}$ ($1000\text{W}/\text{m}^2$; $800\text{W}/\text{m}^2$; $600\text{W}/\text{m}^2$; $400\text{W}/\text{m}^2$; $200\text{W}/\text{m}^2$).

La température a également une influence sur la caractéristique d'un panneau PV. La figure (IV-10) présente la variation des caractéristiques des cellules PV associées en série en fonction de la température, à une irradiation donnée. L'irradiation

est ici fixé à 1000 W.m^{-2} . La tension V_{co} décroît avec la température. Le courant de court-circuit I_{cc} et la puissance augmentent avec l'augmentation de température. L'influence de la température sur I_{cc} et sur P (la puissance) peut être négligée.

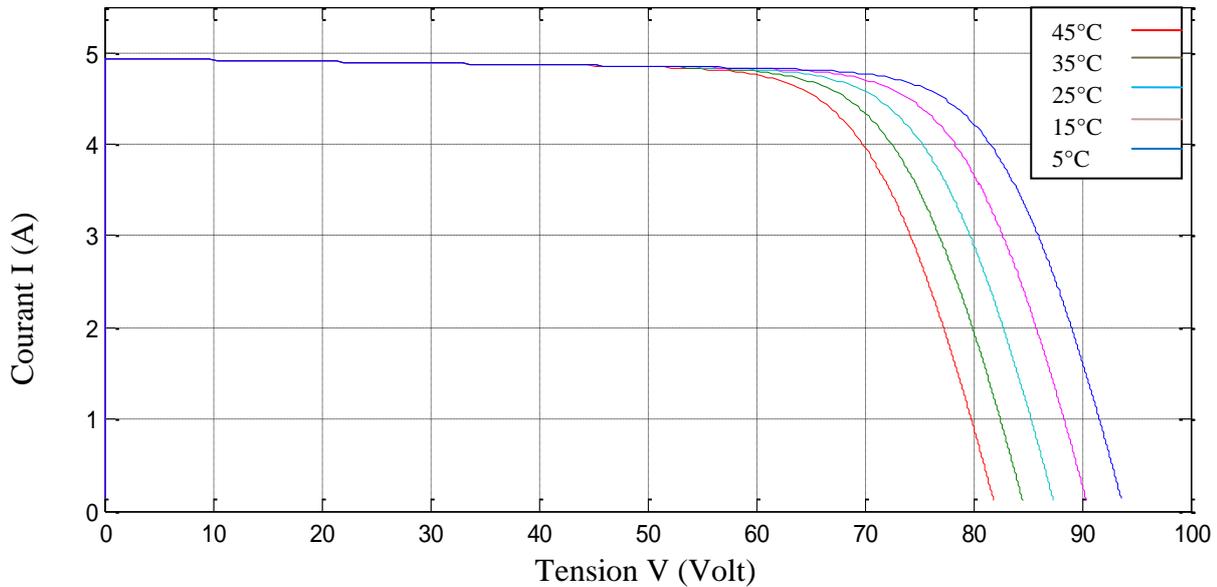


Figure (IV-10) : Influence de la température sur la caractéristique I(V) des panneaux PV en série à $E=1000\text{W/m}^2$ (5 °C;15 °C ; 25°C ; 35 °C ; 45°C).

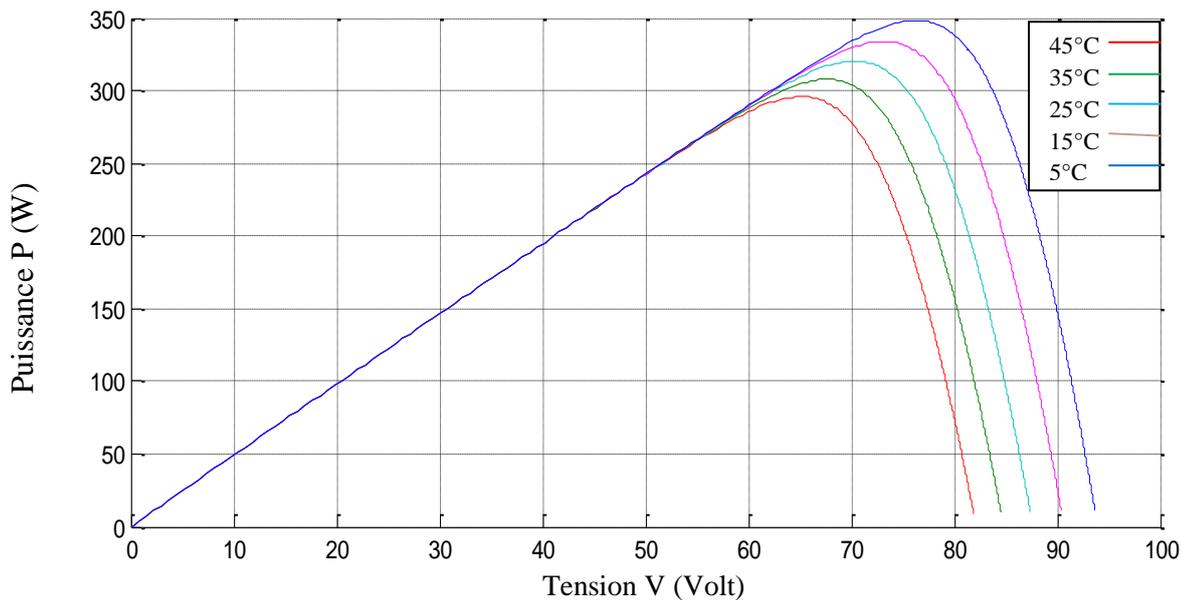


Figure (IV-11) : Influence de la température sur la caractéristique P(V) des panneaux PV en série à $E=1000\text{W/m}^2$ (5 °C;15 °C ; 25°C ; 35 °C ; 45°C).

✚ **Remarque :** Dans notre résultat on trouve que la tension V_{co} des panneaux photovoltaïques, associés en série, dépend linéairement de leur nombre, mais le courant de court circuit I_{cc} reste constant.

IV-4-3 Influence de température et l'irradiation sur des panneaux PV en parallèle :

Modifier le fichier de simulation afin de le faire correspondre a la figure ci-dessous. Cette figure montre la connexion des différents panneaux (parallèle)

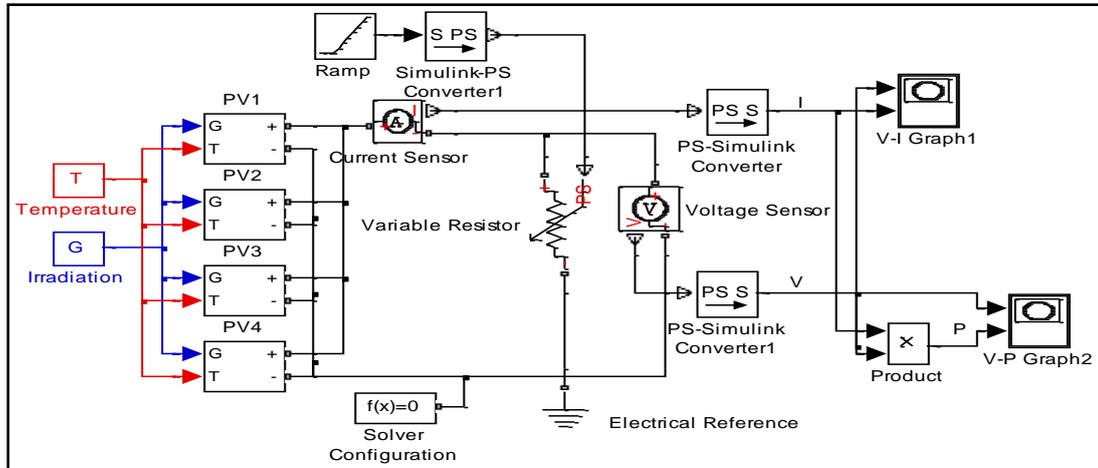


Figure (IV-12) : Modèle de simulation pour 4 panneaux photovoltaïques (PV) en parallèle

La figure (IV-13), montre des caractéristiques ($I-V$) mesurées à différentes irradiations à température constant ($25^{\circ}C$), on remarque l'influence de l'irradiation sur le courant de circuit ouvert I_{CC} croi avec une irradiation croissante, la figure (IV-14) la puissance nominale fournie par des panneaux PV (en parallèle) va donc augmente avec l'irradiation et la tension de courte circuit V_{co} varie légèrement.

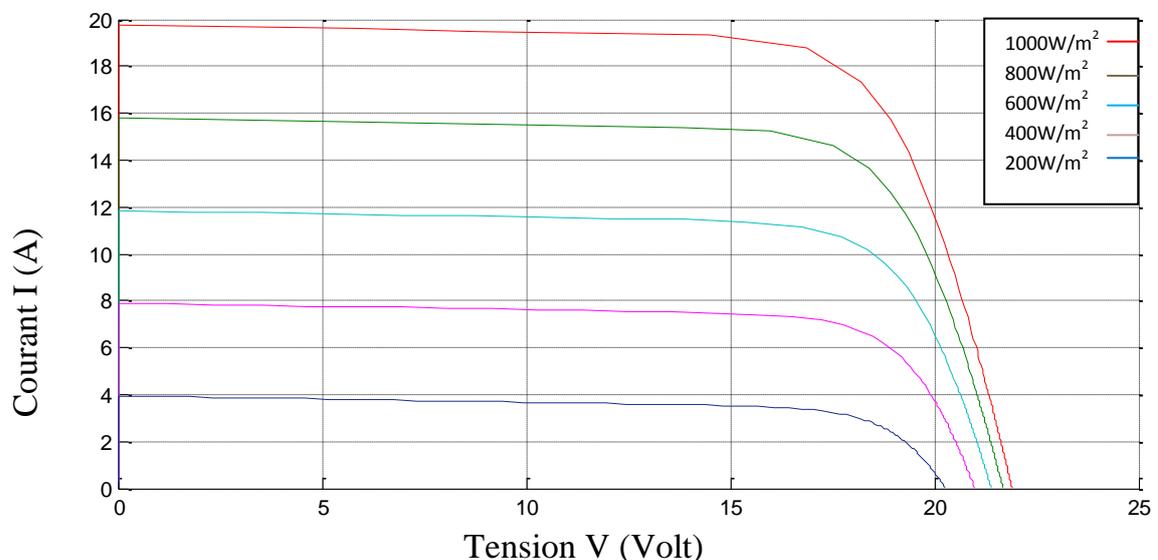


Figure (IV-13) : Influence de l'irradiation sur la caractéristique I(V) des panneaux PV en parallèle à $T=25^{\circ}C$ ($1000W/m^2$; $800W/m^2$; $600W/m^2$; $400W/m^2$; $200W/m^2$).

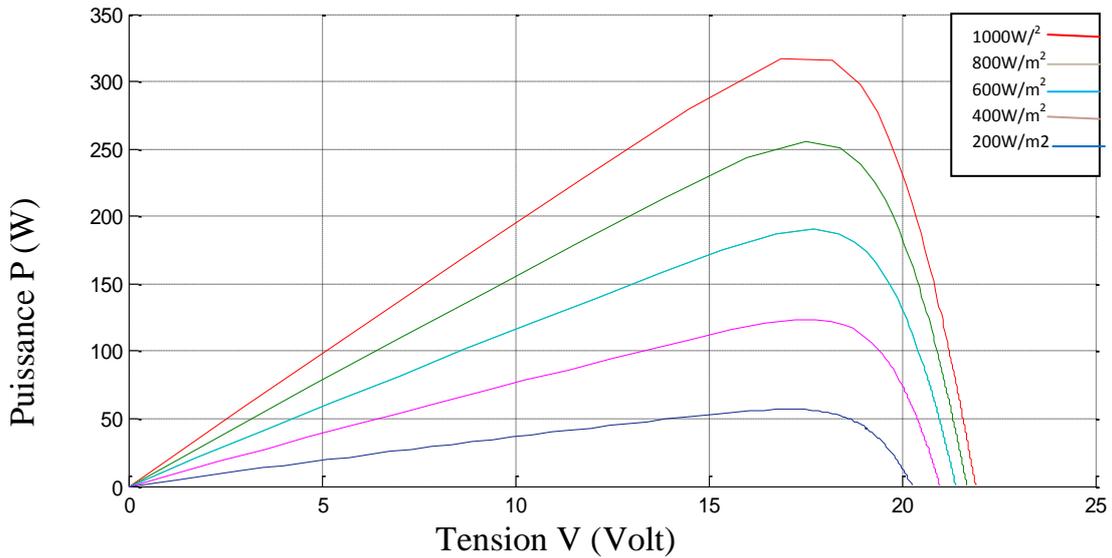


Figure (IV-14) : Influence de l'irradiation sur la caractéristique P(V) des panneaux PV en parallèle à T=25°C (1000W/m² ; 800W/m² ; 600W/m² ; 400W/m² ; 200W/m²).

Alors, la figure (IV-15) montre l'influence de la température sur la caractéristique $I(V)$ du 4 panneaux photovoltaïques en parallèle à une irradiation constante (1000W/m²). On remarque que la tension de court circuit V_{co} diminue avec l'augmentation de la température et que l'influence de la température sur le courant de court circuit I_{CC} est négligée. Figure (IV-16) montre l'influence de la température sur la puissance qui croit avec la température et la tension de circuit ouvert diminue avec température croissante.

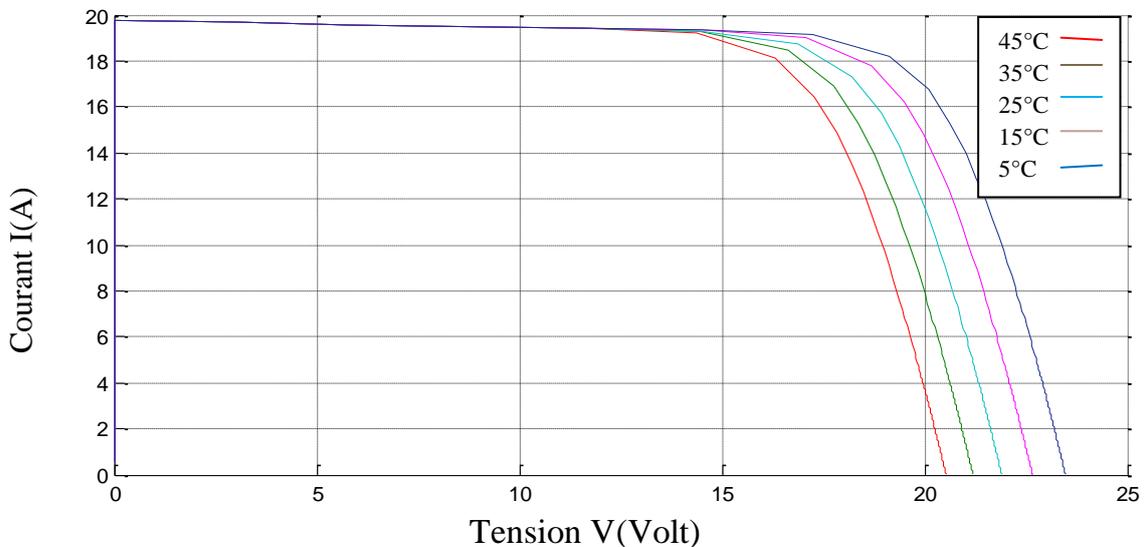


Figure (IV-15) : Influence de la température sur la caractéristique I(V) des panneaux PV en parallèle à E=1000W/m² (5 °C ; 15 °C ; 25 °C ; 35 °C ; 45 °C).

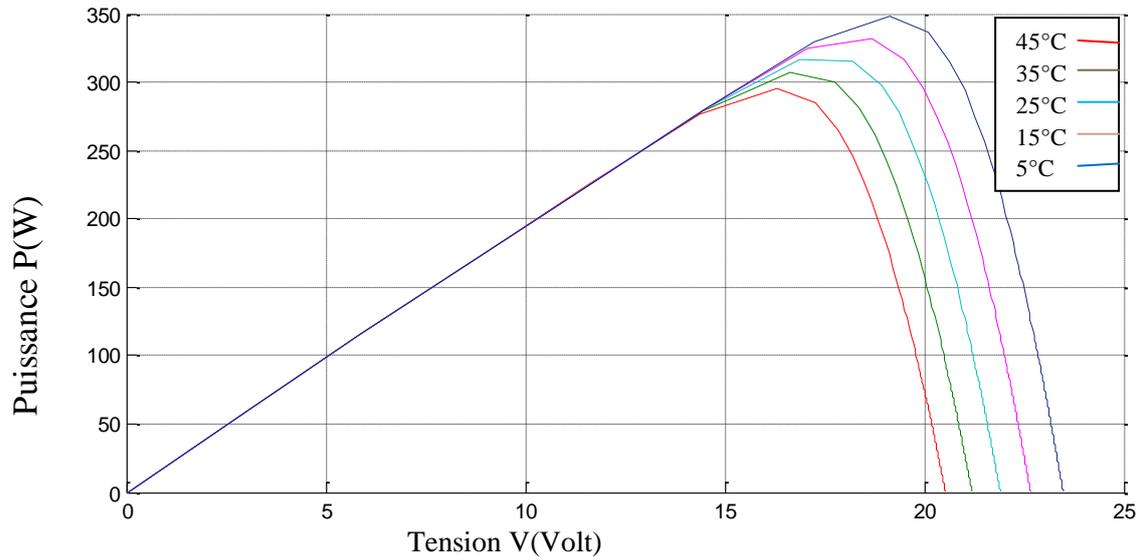


Figure (IV-16) : Influence de la température sur la caractéristique P(V) de panneaux PV en parallèle à $E=1000\text{W/m}^2$ (5°C ; 15°C ; 25°C ; 35°C ; 45°C)

✚ **Remarque :** Dans nos résultats, on trouve que le courant de court circuit I_{cc} des panneaux photovoltaïques, associés en parallèle, dépend linéairement de leur nombre, mais la tension V_{co} reste constante.

CONCLUSION

GÉNÉRALE

Conclusion générale

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

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

On a rappelé, en premier lieu des généralités sur la source fondamentale de l'énergie photovoltaïque; le soleil, son pouvoir énergétique et les propriétés de son rayonnement puis en suite, on a décrit la cellule photovoltaïque, ses caractéristiques $I-V$ et $P-V$, son circuit électrique équivalent et ses principaux grandeurs caractéristiques ainsi que l'étude de l'influence des paramètres (l'irradiation solaire, la température) sur ses caractéristique puis on a abordé l'association des cellules en série, en parallèle.

Dans le traitement des effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires, on a commencé par illustration de l'effet de la température sur les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ modélisés, ensuite on a extrait les différents paramètres caractéristiques aux différentes températures et sous même irradiation solaire. De même, pour étudier l'effet d'irradiation, on a effectué le calcul aux différentes intensités d'irradiation sous même température.

Conclusion générale

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

Bibliographie

- [1] A. Labouret, M. Viloz, Energie solaire photovoltaïque, 3ème édition, DUNOD, Paris, 2006.
- [2] J. Bernard, Energie solaire calcul et optimisation, 1ère édition, ELLIPES, Paris, 2004.
- [3] B. Brousse, Réalisation et caractérisation de cellules photovoltaïques organiques obtenues par dépôt physique, Thèse de doctorat, faculté de sciences et technique, spécialité : électronique des hautes fréquences et optoélectronique, université de Limoges (France), 2004.
- [4] B. Pire, "Bethe Hans Albrecht", ENCYCLOPEDIE UNIVERSALIS, version 12.00, logiciel et moteur de recherche OPTI Media, Paris 2007.
- [5] H. Lacombe, Les énergies de la mer, 1ère édition, presse universitaires de France, Paris, 1968.
- [6] CRDP de Basse-Normandie - thé@m@doc - Les énergies renouvelables, c'est quoi? Énergie solaire. [En ligne] :<http://www.crdp.ac-caen.fr/energies/Soleil.htm>.
- [7] B. Fleche, D. Delagnes, Energie solaire photovoltaïque, [En ligne] : [http://www.iufmrese.cict.fr/catalogue/2006/Toulouse/PV/A Introduction PV/Energie solaire photovoltaïque.pdf](http://www.iufmrese.cict.fr/catalogue/2006/Toulouse/PV/A%20Introduction%20PV/Energie%20solaire%20photovoltaique.pdf)
- [8] Henry Mathieu et Hervé Fanet, Physique des semiconducteurs et des composants électroniques, 6^e édition, Dunod, Paris, 2009.
- [9] A. Labouret, M. Viloz, Energie solaire photovoltaïque, 3ème édition, DUNOD, Paris, 2006.
- [10] A. Ricaud, Photopiles solaires, 1ère édition, presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1997.
- [11] K. Bouzidi, Etude comparatives des méthodes d'extraction des paramètres des cellules solaires, Mémoire de magister, département de physique, faculté des sciences, université de Sétif (Algérie), 2007.
- [12] Nichapour Oleksiy (simulation, fabrication et analyse de cellule photovoltaïque à contacte arrières interdigités) Thèse de doctorat. L'institut national des sciences appliquées de Lyon 2005.
- [13] <Http://www.polytech-lille.fr/cours-atome-circuit-integre/>
- [14] O. Harici et A. Othmane (Etude et évaluation des performances des concentrateurs et poursuit solaires) Mémoire d'ingénieria, Juin 2005.

[15] Medjelled Yamina (Effet de la Résistance Série sur les Performances d'une Cellule Photovoltaïque à Multi jonction sous concentration solaire. Approximation de forte injection) Mémoire de Magister, 2012.

[16] http://en.wikipedia.org/wiki/Concentrating_solar_power 32.11.2010.

[17] Petibon stépheane « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques ». Thèse doctorat, université de Toulouse, 2009.