

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Ibn Khaldoun – Tiaret



Faculté des Sciences de la Matière
Département de Physique

Mémoire

Présenté par :

Melle Boulkaboul Nawel

Pour obtenir le diplôme de

Master

Filière : Physique

Spécialité: Technologie et physique des couches minces nano structurées

Sujet :

Étude et Modélisation d'un Panneau Solaire Photovoltaïque

Soutenu le : 01 juin 2015

Devant le jury:

- | | | | |
|---|-------------------------|------------|------------------|
| • | Mr. R. BAGHDAD | Pr | Président |
| • | Mr A. BENMEDJADI | MCA | Examineur |
| • | Mr .M. HASSAN | MCA | Encadreur |

REMERCIEMENTS

En préambule à ce mémoire,

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à Mr **HASSAN Madani** pour m'avoir fait confiance. En tant que directeur de thèse, il m'a guidé tout au long de la rédaction de ce mémoire. Il m'a laissé une grande liberté en me faisant l'honneur de mettre mes propres empreintes. Ses suggestions et remarques ont amélioré la qualité de ce mémoire.

J'exprime ma reconnaissance aux membres du jury

qui ont accepté de juger ce travail:

En particulier à Monsieur le Professeur **BAGHDAD Rachid**

qui a accepté de présider le jury.

Je remercie également Mr **A. Benmedjadi** pour m'avoir fait l'honneur de participer au jury et d'examiner ce travail.

Je tiens à remercier grandement Mr **BOUZID Mohamed Amine** du Laboratoire ICEPS (Intelligent Control & Electrical Power Systems), Faculté de Technologie-Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes, pour sa grande disponibilité; le temps qu'il m'a consacré a fait preuve de sa patience malgré ses charges.

J'en pense particulièrement à **Mr A. Ammari** du Laboratoire de Stockage et Valorisation des Energies Renouvelables, USTHB-Alger, pour m'accorder un peu de son temps, volontairement sans même lui demander, afin de discuter sur quelques points de ce mémoire.

Je remercie énormément **Mr R. Baghdad** pour ses conseils, encouragement et assistance morale.

J'adresse mes gratitudee à ma petite frangine **Amina** qui m'a accompagné, aidé, soutenu et encouragé tout au long de la réalisation de ce mémoire. Sans elle, le travail accompli n'aurait pas la même saveur.

Je souhaitais adresser mes remerciements à toute personne qui a contribué du loin ou du près à l'élaboration de ce mémoire.





DÉDICACES

JE dédie ce modeste travail à:

MES très chers parents pour leur sacrifice, rien ne vaut leur effort sans égal mené à mon éducation et ma formation, que Allah me les garde.

MES amies : Amina, Djamila, Khalida, Sabrina, Chikha, Setti et Keltoum pour leur soutien, et toutes mes camarades de la promotion Technologie et physique des couches minces, ainsi que la petite Afifa, Hanane et Souad.

AVEC mes vœux de bonheurs et de réussites

Mawal

Sommaire

Sommaire.

Liste des symboles utilisés.

Liste des figures.

Liste des tableaux.

Introduction générale..... 02

Chapitre I : L'énergie solaire

I-1 Introduction..... 05

I-2 Le rayonnement solaire..... 05

I-3 Le spectre solaire..... 06

I-4 Notion de la masse d'air..... 07

Bibliographie du chapitre I..... 09

Chapitre II : La conversion photovoltaïque

II-1 Introduction..... 11

II-2 Les différentes technologies solaires 11

II-3 Solaire photovoltaïque..... 11

II-4 Les filières technologiques 12

II-4-1 La filière silicium 12

a- Silicium monocristallin..... 13

b- Silicium polycristallin..... 14

II-4-2 Les couches minces..... 14

II-4-3 Cellules organiques et plastiques..... 15

II-5 L'effet photovoltaïque. 16

II-5-1 L'effet photoélectrique..... 16

II-5-1-1 Introduction..... 16

II-5-1-2 Définition..... 17

II-5-1-3 Historique et motivation..... 17

II-5-1-4 Mécanisme..... 18

▪ Du point de vue classique..... 18

II-5-2 Dualité onde corpuscule..... 18

II-5-3 Les semiconducteurs..... 19

II-5-3-1 Définition.....	19
II-5-3-2 Description.....	19
a- Bandes d'énergie.....	19
b- Semiconducteur intrinsèque.....	21
c- Semiconducteur extrinsèque.....	21
d- Jonction p-n.....	21
Bibliographie du chapitre II.....	22
Chapitre III : Les cellules photovoltaïques	
III-1 Introduction.....	24
III-2 Définition.....	24
III-3 Principe de fonctionnement.....	24
III-4 Processus.....	25
III-5 Architecture.....	26
III-6 Techniques de fabrication.....	28
III-7 Caractéristique courant-tension et paramètres des cellules solaires.....	29
III-7-1 Caractéristique courant-tension $I(V)$	29
III-8 Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	30
III-8-1 Circuit électrique équivalent.....	30
III-8-2 Courant de court-circuit I_{cc}	32
III-8-3 Tension à circuit ouvert V_{co}	32
III-8-4 Le point du fonctionnement $P_{max}(V_{pm}, I_{pm})$	34
III-8-5 Le facteur de forme FF	35
III-8-6 Influence des différents paramètres sur la caractéristique (V).....	37
III-8-6-1 Influence de l'éclairement et de la température.....	37
III-8-6-2 Influence de la résistance série.....	39
III-8-6-3 Influence de la résistance parallèle.....	40
Bibliographie du chapitre III.....	42
Chapitre IV : Les modules photovoltaïques	
IV-1 Introduction.....	44
IV-2 Modules photovoltaïques.....	44
IV-3 Montage des modules photovoltaïques.....	45
IV-3-1 Montage en série.....	45

IV-3-2 Montage en parallèle.....	46
IV-3-3 Montage hybride (série-parallèle).....	46
IV-4 Zone de fonctionnement du module photovoltaïque.....	49
Bibliographie du chapitre IV.....	50
Chapitre V : Stockage de l'énergie solaire	
V-1 Introduction.....	53
V-2 Stockage de l'énergie solaire.....	53
V-3 Technologies de stockage.....	53
V-4 Principe de fonctionnement d'une batterie.....	55
V-5 Principales caractéristiques des accumulateurs.....	56
V-5-1 Capacité en Ampère heure.....	56
V-5-2 Rapports de chargement et déchargement.....	56
V-5-3 Température.....	56
V-5-4 La durée de vie.....	56
V-5-5 Profondeur de décharge.....	57
V-5-6 La tension d'utilisation.....	57
V-5-7 Le rendement.....	57
V-5-8 Le taux d'autodécharge.....	57
V-6 Connexion d'une batterie.....	57
V-7 Principe de fonctionnement d'un système photovoltaïque avec batterie.....	58
V-7-1 Modes de fonctionnement.....	59
a- Premier mode : Déconnexion de la charge.....	59
b- Deuxième mode : Excédent de courant.....	59
c- Troisième mode : Courant nul.....	60
d- Quatrième mode : courant déficitaire.....	60
e- Cinquième mode : nuit.....	61
V-8 Contrôle de charge.....	61
V-8-1 Les diodes anti-retour.....	61
V-8-2 Le régulateur de charge.....	62
Bibliographie du chapitre V.....	66
Chapitre VI : Simulation des modules photovoltaïques	
VI-1 Introduction.....	68
VI-2 Représentation électrique de la cellule PV.....	68

VI-3 Création du modèle de la cellule sous MatLab/Simulink.....	69
VI-3-1 Détermination des paramètres inconnus.....	70
a- Détermination de I_{ph}	70
b- Détermination de I_s	71
c- Détermination de R_s et R_{sh}	72
▪ 1 ^{er} Cas : Calcul de R_s en posant $R_{sh} \gg$	72
▪ 2 ^{ème} Cas : Calcul de R_s et R_{sh}	72
VI-3-2 Modules photovoltaïques choisis.....	74
a- Simulation avec le modèle R_s	75
b- Simulation avec le modèle R_{sh}	76
VI-3-3 Création du modèle de panneau PV.....	77
VI-4 Résultats de la simulation.....	79
VI-4-1 Courbes obtenues pour le modèle R_s	79
VI-4-2 Courbes obtenues pour le modèle R_{sh}	80
VI-5 Influence des différents paramètres sur le comportement du panneau.....	83
VI-5-1 Effet de l'irradiation sur le module PV.....	85
VI-5-2 Effet de la température sur le module PV.....	86
VI-5-3 Effet de la résistance R_s sur le module PV.....	87
VI-5-4 Effet de la résistance R_{sh} sur le module PV.....	89
Conclusion générale.....	92
Annexe.	

LISTES DES SYMBOLES UTILISES

<i>Symbole</i>	<i>Description</i>
AM	<i>La masse d'air</i>
θ	<i>Angle de pénétration (°)</i>
$S.T.C$	<i>Conditions standards</i>
E	<i>Energie de photon (eV)</i>
h	<i>Constante de Planck (J.s)</i>
ν	<i>Fréquence de la lumière (s⁻¹)</i>
λ	<i>Longueur d'onde (m)</i>
ϕ	<i>Travail d'extraction (eV)</i>
eV_a	<i>Le potentiel d'arrêt (V)</i>
E_C	<i>L'énergie de la bande de conduction (eV)</i>
E_v	<i>L'énergie de la bande de valence (eV)</i>
E_g	<i>L'énergie de la bande interdite (eV)</i>
a	<i>Le facteur d'idéalité de la jonction</i>
q	<i>La charge absolue de l'électron (C)</i>
K	<i>La constante de Boltzmann (J/K)</i>
T	<i>Température de jonction (K)</i>
V_{th}	<i>Le potentiel thermique (V)</i>
I_{ph}	<i>Le photocourant (A)</i>
I_D	<i>Courant de la diode (A)</i>
I_s	<i>Courant de saturation (A)</i>
R_{sh}	<i>Résistance shunt (Ω)</i>
R_s	<i>Résistance série (Ω)</i>
I_{cc}	<i>Le courant de court-circuit (A)</i>
V_{co}	<i>La tension de circuit ouvert (V)</i>
P_{max}	<i>La puissance maximale produite par la cellule (W)</i>
I_{pm}	<i>Courant à puissance maximal (A)</i>
V_{pm}	<i>Tension à puissance maximale de la cellule (V)</i>
FF	<i>Facteur de forme (%)</i>
η	<i>Le rendement de conversion</i>

S	<i>La surface de la cellule solaire (cm^2)</i>
E	<i>L'ensoleiment (W/m^2)</i>
K_v	<i>Le coefficient de température (mV/K)</i>
n_s	<i>Nombre de cellules montées en série</i>
n_p	<i>Nombre de cellules montées en parallèle</i>
K_i	<i>Coefficient du courant de court-circuit (mA/K)</i>

PRINCIPALES CONSTANTES

<i>La charge électrique d'un électron (en valeur absolue)</i>	$q=1.60281 \times 10^{-19} \text{ C}$
<i>La constante de Boltzmann</i>	$K=1.38066 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
<i>La vitesse de la lumière dans le vide</i>	$C=2.99792 \times 10^8 \text{ m/s}$

LISTE DES FIGURES:

Figure I-1 : Eclairage solaire.....	6
Figure I-2 : Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM.....	8
Figure II-1 : Expéditions annuelles de modules PV, 1990-2008 (MWc)	12
Figure II-2 : Répartition des matériaux sur le marché mondial du photovoltaïque.....	13
Figure II-3 : Cellules monocristalline (a), polycristalline (b) et en couche mince	15
Figure II-4 : (a) cellule solaire OPV, (b) panneau photovoltaïque souple.....	16
Figure II-5 : Processus de l'effet photoélectrique.....	17
Figure II-6 : Diagramme des bandes d'énergie des semi-conducteurs.....	20
Figure II-7 : Diffusion des porteurs (a) et apparition de la zone de déplétion (b).....	21
Figure III-1 : Processus d'absorption de la lumière par un matériau.....	25
Figure III-2 : Surface d'une couche de silicium texturée en forme de pyramides obtenue par imagerie MEB	27
Figure III-3 : Architecture d'une cellule PV avec une jonction p-n	27
Figure III-4 : Procédure de la fabrication d'une cellule photovoltaïque.....	29
Figure III-5 : Caractéristique I(V) d'une cellule solaire; à l'obscurité et sous éclairage.....	30
Figure III-6 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	31
Figure III-7 : Schémas équivalents- Courant de court-circuit I_{cc} (a) Tension à circuit ouvert V_{co} (b).....	33
Figure III-8 : Différents régimes d'après la puissance d'irradiation.....	34
Figure III-9 : Le point du fonctionnement P_{max} de la caractéristique I(V).....	35
Figure III-10 : Notion de facteur de forme FF pour une cellule PV.....	36
Figure III-11 : Evolution de la caractéristique I(V) et P(V) en fonction de l'éclairage.	38

Figure III-12 : Evolution de la caractéristique I(V) en fonction de la température.....	39
Figure III-13 : Effet de la résistance série R_s sur la pente de la caractéristique I(V).....	40
Figure III-14 : Effet de la résistance série R_{sh} sur la pente de la caractéristique I(V).....	41
Figure IV-1 : Module photovoltaïque.....	44
Figure IV-2 : Caractéristique I(V) (a) et circuit équivalent (b) résultants d'un groupement de n_s cellules en série	45
Figure IV-3 : Caractéristique I(V) (a) et circuit équivalent (b) résultants d'un groupement de n_p cellules en parallèle	46
Figure IV-4 : Caractéristique globale d'une installation.....	47
Figure IV-5 : Panneau photovoltaïque (protection par diode by-pass)	47
Figure IV-6 : Cellule solaire avant et après l'effet de l'ombre avec une diode de bypass...48	
Figure IV-7 : Effet des diodes de protection sur la caractéristique I(V).....	48
Figure IV-8 : Les différentes zone de la caractéristique I(V) d'un module PV.....	50
Figure V-1 : Processus de fonctionnement d'une batterie.....	55
Figure V-2 : Connexion des batteries.....	58
Figure V-3 : Schéma de principe d'un système PV avec batterie.....	58
Figure V-4 : 1 ^{er} Mode _Charge déconnectée.....	59
Figure V-5 : 2 ^{ème} Mode _Batterie chargée par le courant excédentaire.....	60
Figure V-6 : 3 ^{ème} Mode _Courant nul dans la batterie.....	60
Figure V-7 : 4 ^{ème} Mode _Décharge de la batterie dans le circuit.....	61
Figure V-8 : 5 ^{ème} Mode _Courant d'utilisation fourni par la batterie.....	61
Figure V-9 : Principe d'une diode antiretour.....	62
Figure V-10 : Principe de fonctionnement d'un régulateur charge/décharge.....	63

Figure V-11: Régulateur charge/décharge.....	65
Figure VI-1 : Circuit équivalent d'une cellule PV.....	69
Figure VI-2 : Circuit équivalent de la cellule PV modélisée.....	69
Figure VI-3 : Diagramme de l'algorithme correspondant.....	73
Figure VI-4 : Rendement des panneaux SunPower comparé aux autres technologies.....	74
Figure VI-5: Schéma de la cellule photovoltaïque simulée.....	77
Figure VI-6: Simulation de la caractéristique P(V), (T=25°C, G=1000W/m ²) correspondante au module SPR-333NE-WHT-D (modèle Rs)	79
Figure VI-7: Simulation de la caractéristique P(I), (T=25°C, G=1000W/m ²) correspondante au module SPR-333NE-WHT-D (modèle Rs)	79
Figure VI-8: Simulation de la caractéristique P(V), (T=25°C, G=1000W/m ²) correspondante au module SPR-333NE-WHT-D (modèle Rsh)	80
Figure VI-9: Simulation de la caractéristique P(I), (T=25°C, G=1000W/m ²) correspondante au module SPR-333NE-WHT-D (modèle Rsh)	80
Figure VI-10: Création d'un module composé de 96 cellules en série à partir du bloc « Solar Cell ».....	82
Figure VI-11 : Simulation de l'effet de l'éclairement sur le module E20-245 (245W).....	84
Figure VI-12: Fluctuation de la caractéristique P(V) correspondante au module E20-245, pour T constante (T=25°C), et G variable.....	85
Figure VI-13: Fluctuation de la caractéristique I(V) correspondante au module E20-245, pour T constante (T=25°C), et G variable.....	85
Figure VI-14: Fluctuation de la caractéristique P(V) correspondante au module E20-245, pour G constante (G=1000 W/m ²), et T variable.....	86
Figure VI-15: Fluctuation de la caractéristique I(V) correspondante au module E20-245, pour G constante (G=1000 W/m ²), et T variable.....	86

Figure VI-16: Caractéristique P(V) correspondante au module E20-245, pour différentes valeurs de R_s	87
Figure VI-17: Caractéristique I(V) correspondante au module E20-245, pour différentes valeurs de R_s	88
Figure VI-18: Caractéristique P(V) correspondante au module E20-245, pour différentes valeurs de R_{sh}	89
Figure VI-19: Caractéristique I(V) correspondante au module E20-245, pour différentes valeurs de R_{sh}	90

LISTE DES TABLEAUX:

Tableau III-1: Rendement des différentes technologies de cellules photovoltaïques	37
Tableau V-1: Technologie des accumulateurs et leurs caractéristiques.....	54
Tableau VI-1: Caractéristiques des trois modules modélisés.....	75
Tableau VI-2: Paramètres pour le modèle Rs.....	76
Tableau VI-3: Paramètres pour le modèle Rsh.....	76
Tableau VI-4: Description des éléments intégrés au panneau.....	78
Tableau VI-5 : Comparaison des paramètres de la simulation avec les paramètres expérimentaux.....	81
Tableau VI-6 : Comparaison des paramètres de la simulation avec les paramètres expérimentaux en utilisant un module composé de 96 cellules en série à partir du bloc « Solar Cell ».....	83

Résumé

Les modules PV sont des dispositifs permettant de convertir directement la lumière en électricité. L'optimisation de ces systèmes est d'une grande utilité pour les concepteurs de photovoltaïque, les convertisseurs de puissance et les développeurs qui ont besoin de simulateur de modèle à circuit simple, rapide et précis pour le module PV. Le présent travail est une modélisation détaillée et une simulation des modules PV. Le modèle choisi est le modèle à une seule diode où les deux résistances série et parallèle sont introduites et calculée par itération afin de permettre une meilleure précision. Ce modèle a été implémenté dans l'environnement Simulink de MATLAB et les résultats ont été comparés avec les valeurs expérimentales et les caractéristiques $P(V)$, $I(V)$ de trois modules PV commercialisés, aux conditions standards de test (CST). Les résultats obtenus sont en bon accord avec les valeurs expérimentales fournies par les fabricants.

Mots clés : Modules PV, optimisation, modélisation, simulation, Simulink, MATLAB, caractéristiques $P(V)$, $I(V)$.

Abstract

The PV modules are devices that convert light into electricity. Optimizing these systems has a great importance for photovoltaic concepts, power converters and developers that require simulations of a simple, fast and precise circuit model. The presented work is a detailed modeling and simulation of PV modules. The chosen model is the single-diode model where both series and parallel resistors are included and calculated iteratively for more accuracy. This model was implemented in MATLAB/Simulink software and the results have been compared with the experimental data sheet values and the $P(V)$, $I(V)$ characteristics of three commercial PV modules, in Standard Test Conditions (STC). The results obtained are in good agreement with the experimental data provided by manufacturers.

Keywords: PV modules, optimizing, modeling, simulation, MATLAB/Simulink, $P(V)/I(V)$ characteristics.



INTRODUCTION

Une personne qui n'a jamais commis d'erreurs n'a jamais tenté d'innover.

ALBERT EINSTEIN

Introduction Générale

L'énergie solaire photovoltaïque (PV), qui est la conversion directe de la lumière en électricité grâce à des cellules solaires, représente une alternative intéressante et bien adaptée à des besoins limités. Malgré sa facilité de mise en œuvre, son faible impact environnemental et le peu d'entretien qu'il nécessite, un système photovoltaïque n'est plus concurrentiel lorsque la demande augmente. Ainsi une étude assez rigoureuse est nécessaire pour faire le meilleur choix et le plus performant avec le moindre coût possible.

Un système PV peut ainsi alimenter de petits équipements portables (montres, calculatrices, ...), des applications en site isolé (habitations éloignées du réseau électrique, équipements de télécommunication, électrification rurale), ou être raccordé au réseau électrique.

L'objectif principal de cette étude est de simuler les performances d'une seule composante du système PV, à savoir le panneau (ou le module) PV. Les méthodes d'optimisation sont d'une grande utilité pour les fabricants n'ayant pas des informations détaillées sur les futurs sites d'implémentation de leurs produits.

Pour atteindre notre objectif, nous avons simulé le fonctionnement d'un modèle simple et fiable, avec une précision acceptable pour prévoir les performances d'un générateur PV dans les conditions climatiques favorables. Les données de cette simulation sont ensuite comparées à celles obtenues à partir des modèles de panneaux PV fabriqués et commercialisés actuellement.

Pour cet objectif, six chapitres principaux sont proposés.

Le premier chapitre est consacré à la description du rayonnement solaire et son spectre.

Dans le deuxième chapitre, les concepts et les principes physiques de la conversion photovoltaïque sont détaillés, à savoir, les différentes filières et technologies utilisées ainsi que le mécanisme basé sur l'effet photoélectrique.

Le troisième chapitre, consacré aux cellules photovoltaïques, décrit leur principe de

fonctionnement, les différents processus qui interviennent ainsi que leur architecture et les techniques de leur fabrication. De même, les paramètres et les caractéristiques courant-tension sont exploités pour modéliser ces cellules à travers un circuit électrique équivalent.

Le quatrième chapitre consacré aux modules photovoltaïques, illustre les différents montages possibles et leurs caractéristiques notamment leur zone de fonctionnement.

Dans le cinquième chapitre, et pour compléter notre étude, le stockage de l'énergie solaire est développé à travers le principe de fonctionnement des batteries et les caractéristiques des accumulateurs.

Le sixième chapitre, constitue l'axe principal de notre travail, et ce, par la réalisation de la simulation du fonctionnement des panneaux solaires photovoltaïques, en particulier, les estimations de leurs caractéristiques électriques et l'influence des variations de l'irradiation et de la température sur ces paramètres. Dans cette simulation, l'utilisation de l'outil Simulink de Matlab nous a permis de reproduire les différents schémas équivalents et les différentes caractéristiques relatives au fonctionnement des panneaux solaires photovoltaïques.



CHAPITRE I

- **L'énergie solaire**

A l'échelle astronomique, la lumière se progresse à pas de tortue. Les nouvelles qu'elle nous apporte ne sont plus fraîches du tout !

I-1- Introduction :

Etant l'une des étoiles de la voie lactée, la galaxie qui est la nôtre, le soleil l'immense astre incandescent fournit une puissance de l'ordre de 3.9×10^{26} watts, générée par des réactions thermonucléaires transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions de tonnes d'hélium au cœur de son noyau. D'après des estimations théoriques être capable de capter 0,01% de l'énergie solaire envoyée sur Terre pourrait mettre fin à la production de toute sorte d'énergie fossile.

Dans ce premier chapitre, on aborde quelques notions indispensables sur le rayonnement solaire. A savoir la composition du spectre solaire, les différentes interactions qu'il subit, et la notion de la masse d'air.

I-2- Le rayonnement solaire :

Le soleil présente une source d'énergie quasiment inexhaustible et son rayonnement envoyé vers la Terre est environ 15000 fois la consommation énergétique de l'humanité, chaque année. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (kW_c/m^2)¹ engendrant tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge [1].

Malgré l'atténuation marquante de cette énergie lorsqu'elle traverse l'atmosphère, une quantité bien considérable peut atteindre la surface du sol. Dans le cas où la pollution en poussière ou en eau de l'atmosphère est faible, cette énergie varie de $1000 W/m^2$ jusqu'à $1400 W/m^2$ dans les zones tempérées. Ainsi le flux reçu sur la Terre dépend de plusieurs paramètres :

- L'orientation, l'inclination et la nature de la surface terrestre,
- La latitude, l'altitude du lieu de recueil et son degré de pollution,
- La variation saisonnière,
- Le moment considéré de la journée,
- La couverture nuageuse.

¹ On parle de watts-crête (W_c) lorsque la puissance maximale est obtenue dans les conditions normalisées d'ensoleillement STC ($1\ 000 W/m^2$, $25\ ^\circ C$, spectre solaire AM 1,5).

I-3- Le spectre solaire :

Le rayonnement solaire est l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le soleil, couvrant une gamme d'énergie allant de l'ultraviolet ($0.2\mu\text{m}$) à l'infrarouge lointain ($2.5\mu\text{m}$) tout en passant par la lumière visible. Ce rayonnement est composé de « grains » de lumière appelés photons dont l'énergie est directement liée à la longueur d'onde λ .

L'émission du rayonnement extraterrestre est convenablement modélisée par un corps noir¹ à 5 800 kelvins, et peut donc être décrite par la loi de Planck [2].

La figure I-1 représente la courbe d'énergie du corps noir à 5250°C , le rayonnement solaire hors atmosphère et celui au niveau de la mer en fonction de la longueur d'onde.

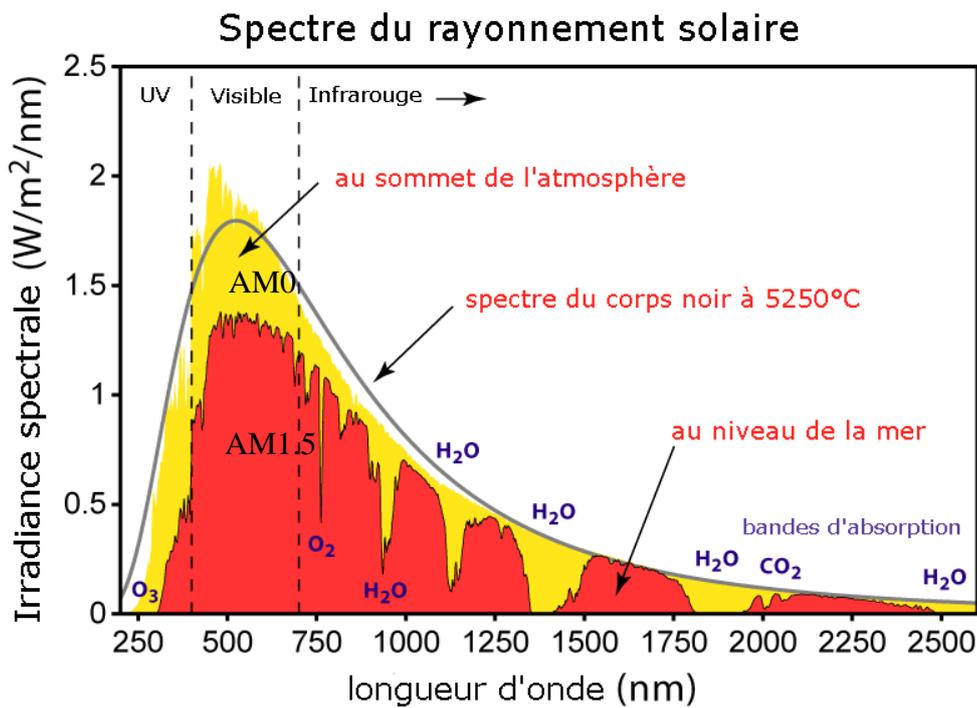


Figure I-1 : Eclairage solaire [1].

D'après la courbe, on voit bien que 9% de l'énergie du spectre se situe dans l'ultraviolet, 43% dans le visible et 48% dans l'infrarouge.

¹ Un corps noir est par définition un corps idéal parfaitement absorbant pour la lumière et parfaitement émissif pour le rayonnement thermique [3].

I-4- Notion de la masse d'air :

Lors de la traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire subit une atténuation de son spectre où il peut être réfléchi vers l'espace, diffusé en interagissant avec des molécules d'air, des aérosols et des particules de poussière (c'est ce rayonnement diffus qui est à l'origine de la couleur bleue du ciel clair) [3], ou bien absorbé par la vapeur d'eau, le gaz carbonique et l'ozone de l'atmosphère. Le reste du rayonnement atteint directement la surface.

La valeur réelle du spectre est influencée par les conditions climatiques et les particules en présence.

En tenant compte de ces variances, afin de pouvoir calibrer les cellules étalons destinées à déterminer les performances des dispositifs photovoltaïques et caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise, on introduit la notion AMx^1 pour *Air Mass* [4] dont l'expression est :

$$x \approx \frac{1}{\sin\theta} \quad (\text{I-1})$$

Où θ est l'angle que fait le soleil avec son zénith² comme le montre la figure I-2.

La valeur de la masse atmosphérique dépend de la pression, de l'altitude et de l'angle d'incidence des rayons lumineux. L'intégration de l'irradiation sur la totalité du spectre permet d'obtenir la puissance P (en W/m^2) fournie par le rayonnement. Pour plus de simplicité et de clarté, les notions suivantes sont utilisées :

- ❖ $AM0$: Hors atmosphère (applications spatiales). $P \approx 1.36 \text{ kW}/m^2$
- ❖ $AM1$: Le soleil est au zénith du lieu d'observation (à l'équateur).
- ❖ $AM1.5G$: Spectre standard, le soleil est à 41.8° . $P \approx 1 \text{ kW}/m^2$

Le nombre « 1.5 » indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith (correspondant à une inclinaison du soleil d'approximativement 41.8° par rapport au zénith).

¹ L'extinction unitaire correspondant à une masse d'air optique de 1 représente l'extinction du rayonnement extraterrestre ayant traversé verticalement l'atmosphère jusqu'à un point situé au niveau de la mer, pour une pression atmosphérique de 1 013 mb.

² En astronomie, le zénith est un point d'intersection de la verticale d'un lieu donné et de la sphère

Le « G » représente le rayonnement « global » incluant rayonnement direct et rayonnement diffus [5].

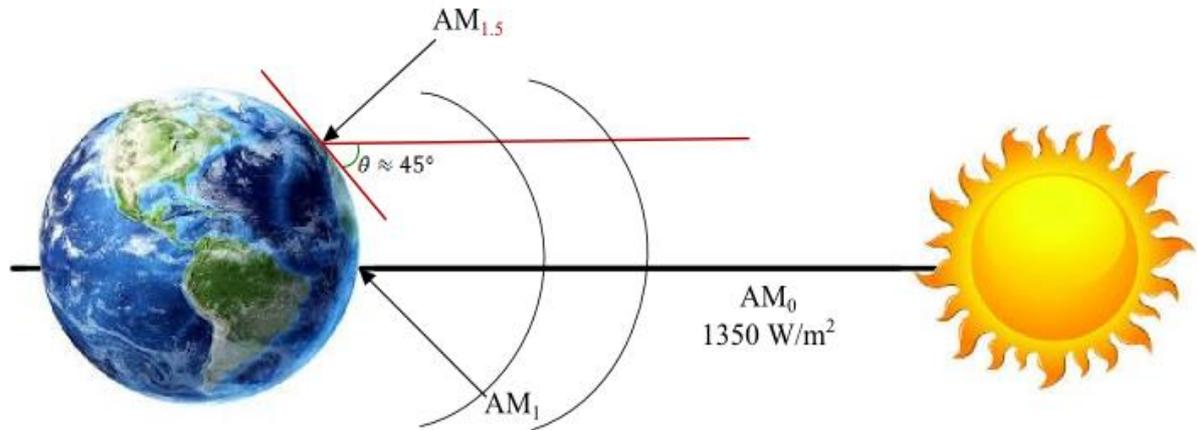


Figure I-2 : Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM.

Références bibliographiques

- [1] SOLTANE BELAKHEL « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables ». Thèse de Doctorat, Université de CONSTANTINE 2010.
- [2] « La loi de Planck », Université Paris Sud 11 _ Option Photonique et mécanique quantique avancée _ L3 PAPP.
- [3] « Gisement solaire et transferts énergétiques », Master Energies Renouvelables, Université de CERGY-PONTOISE, ALAIN RICAUD, Jan 2011.
- [4] MEZIANI ZAHRA « Modélisation de Modules Photovoltaïques ». Mémoire de Magister, Université de BATNA, 2012.
- [5] Une technologie dévoilée, EDF R&D Juin 2012 INNOVATION.EDF.COM.

Figures :

- [1] « L'ensoleillement » <http://www.energieplus-lesite.be>



CHAPITRE II

- **La conversion photovoltaïque**

Tout physicien pense qu'il sait ce qu'est un photon. J'ai passé ma vie à chercher à savoir ce qu'il était et je ne le sais toujours pas.

ALBERT EINSTEIN

II-1- Introduction :

Exploiter une part infime de potentiel photovoltaïque pour produire de l'électricité est devenu un défi majeur relevé par la filière solaire qui connaît partout dans le monde une progression considérable dans le domaine de l'immobilier : solaire thermique passif, solaire thermique actif, solaire thermodynamique, solaire photovoltaïque et éclairage naturel.

Ce chapitre décrit brièvement le concept de la conversion photovoltaïque engendrant les différentes technologies et illustre les filières technologiques compétitives dont les cellules photovoltaïques est le principal acteur.

En gros, ce chapitre s'intéresse à l'étude théorique de l'effet photoélectrique, sa découverte et son historique. Les interprétations de son mécanisme fournis par les deux voies classique et quantique seront également évoquées.

II-2- Les différentes technologies solaires :

Les techniques pour capter directement une partie de l'énergie solaire restent toujours disponibles et en cours d'amélioration. Elles s'appuient sur trois piliers : le solaire thermique, le solaire thermodynamique et le solaire photovoltaïque.

II-3- Solaire photovoltaïque :

La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire ou transformation du rayonnement solaire en énergie électrique connaît depuis quelques années un progrès prodigieux. Cette technologie se base sur le fait que les quanta d'énergie (photons) du rayonnement solaire communiquent une partie de leur énergie aux électrons au sein d'un semiconducteur constituant une cellule solaire qui est capable de convertir le rayonnement en électricité.

Cette section sera détaillée dans le chapitre III.

De pratiquement négligeable il y a moins de 10 ans, et à raison de taux de croissance de près 40 % par an, la production de modules photovoltaïques commence à apparaître dans l'approvisionnement énergétique [1]. Aujourd'hui, elle offre 0,1 % de la production totale d'électricité mondiale et elle pourrait atteindre 5% en 2030, fournir 11% en 2050, et poursuivre encore sa progression au cours des décennies suivantes, en faisant une des sources principales d'énergie renouvelable [2].

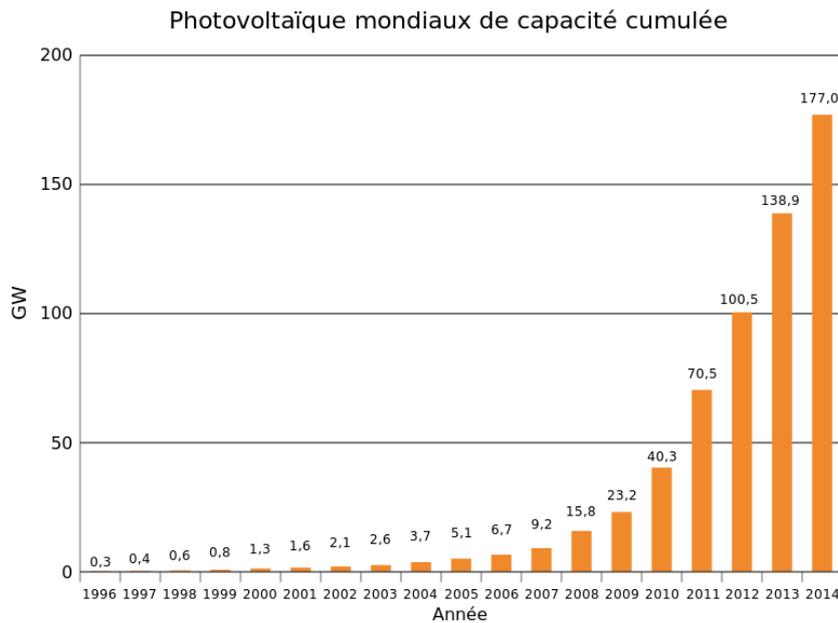


Figure II-1 : Puissance installée mondiale en photovoltaïque [3].

II-4- Les filières technologiques :

La production mondiale de modules photovoltaïques a évolué de 5.1 GW en 2005 à 40.3 GW en 2010, pour accéder 177 GW en 2014, permettant d’approcher la barre des 38.7 GW de la puissance totale annuelle installée dans le monde [3].

A l’heure actuelle, les modules PV¹ qui présentent les meilleurs rendements de photoconversion reposent sur l’utilisation des plaquettes à base de silicium cristallin et films minces à base de silicium amorphe (a-Si), diséléniure de cuivre et d’indium (CIS), et tellure de cadmium (CdTe)².

II-4-1- La filière silicium :

L’un des éléments les plus abondants sur Terre, ayant une stabilité parfaite et ne possédant aucune toxicité, le silicium représente près de 90 % du marché mondial et permet d’atteindre les meilleurs rendements commerciaux.

¹ Abréviation simplificatrice signifie « photovoltaïque ».

² Le cadmium est dangereux à manipuler lors de la fabrication et du recyclage des panneaux, mais une fois fixé dans un panneau solaire il ne présente pas de risque pour les installateurs ou les utilisateurs.

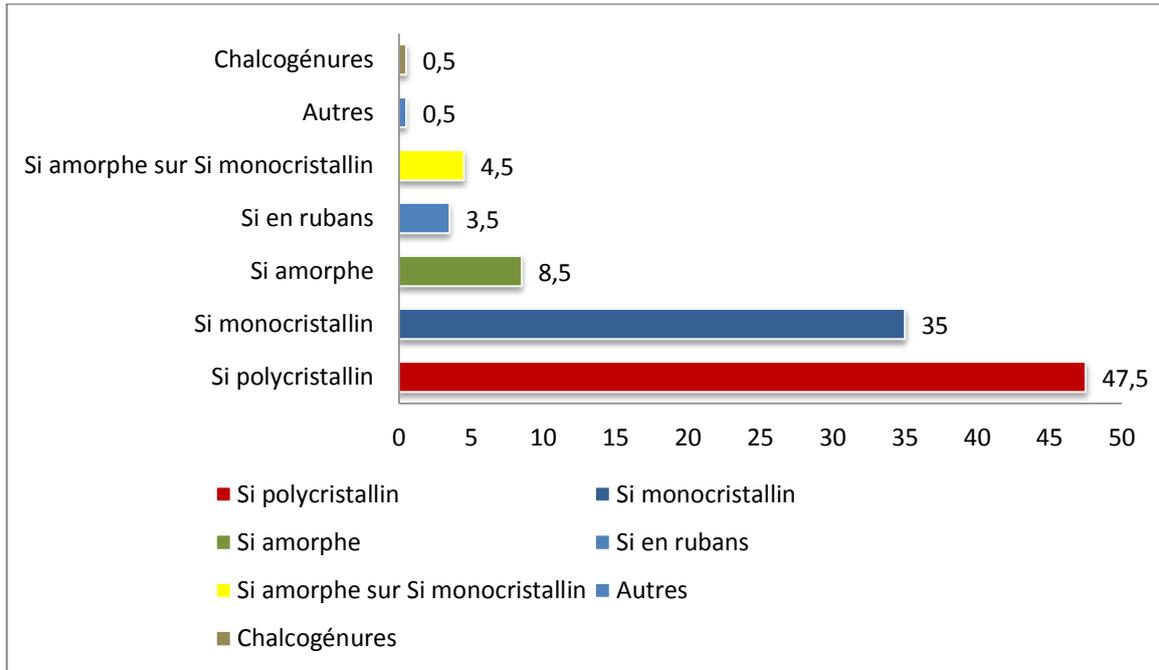


Figure II-2 : Répartition des matériaux sur le marché mondial du photovoltaïque.

Cette filière comporte deux catégories : le silicium monocristallin et le silicium polycristallin.

a- Silicium monocristallin :

C'est la première génération de photopiles dont le silicium monocristallin de qualité microélectronique est obtenu par deux méthodes qui exigent des énergies considérables proches du MWh. Le silicium obtenu par procédé de purification et de solidification est appelé Cz (méthode Czochralski) et FZ (« Float Zone »), et possède un rendement variant entre 15 et 18 % [4,5]. Son procédé de fabrication est médiocre en ce qui concerne le temps et le coût. Cependant, il est plus efficace que celui de silicium polycristallin.

b- Silicium polycristallin :

Le silicium polycristallin est produit, quant à lui, par des techniques de croissance en structure colonnaire hétérogène composée de cristaux multiples, afin d'assurer que les effets néfastes des joints de grain qui tendent à affaiblir le rendement des cellules (14 à 16 %) soient limités. Au niveau du marché de photovoltaïque, cette technologie est la plus répandue car elle rassemble deux aspects à la fois : les rendements élevés de conversion avec le faible coût de production par rapport à la filière silicium monocristallin.

II-4-2- Les couches minces :

Cette génération de cellules repose sur la déposition de matériaux semiconducteurs en couches minces. Cette technologie qui vise à diminuer l'épaisseur des cellules (quelques nanomètres à des dizaines de micromètres) fait appel à des procédés de déposition sur substrat (verre, plastique souple ou métal) tels que PE-CVD (*Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition*).

Le silicium amorphe (Si-a) est le matériau le plus commun dans cette technologie, représentant plus de 7% du marché mondial en 2008. Son faible prix l'en a fait un agent compétitif avec les cellules cristallines de la première génération ; en revanche, le rendement d'une telle cellule ne peut dépasser 7%. Puisque les cellules amorphes peuvent se dégrader facilement, l'utilisation d'une isolation galvanique entre les modules et le réseau est indispensable. L'explication physique de ce phénomène ambigu reste encore en obscurité.

D'autres familles de matériaux trouvent également leur place dans les technologies en couches minces exploitées à l'échelle industrielle du fait qu'elles possèdent de bons rendements qui peuvent atteindre 19%, le tellure de cadmium (CdTe) dont l'allemand *First Solar* en est le leader mondial, le diséléniure de cuivre et d'indium (CIS) et de gallium (CIGS) qui partagent des qualités optiques procurant une très bonne absorption de la lumière, même en faible quantité [6].

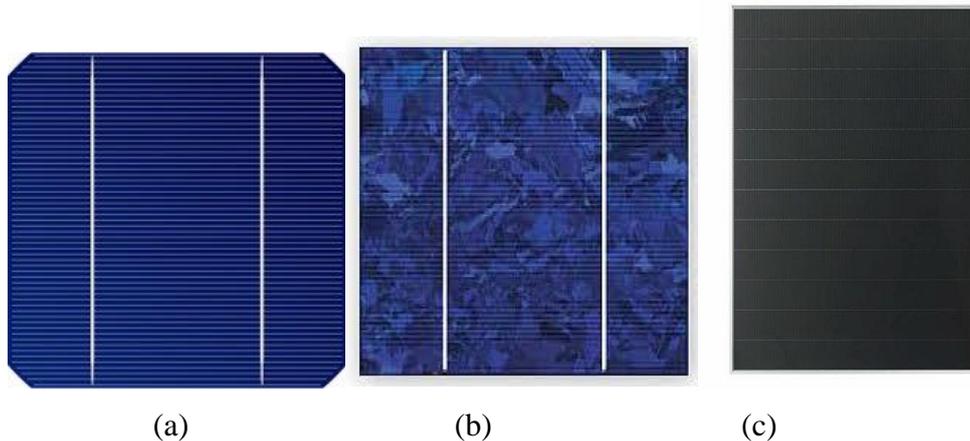


Figure II-3: Cellules monocristalline (a), polycristalline (b) et en couche mince (c).

II-4-3- Cellules organiques et plastiques :

La filière photovoltaïque organique (OPV), pour *Organic Photovoltaics*, sur couches minces utilise comme semiconducteurs non plus du silicium, du CIGS ou du CdTe (utilisés encore pour la fabrication des cellules souples) mais des polymères transparents ou une macromolécule organique, comme un colorant organique. Présentant un coefficient d'absorption très élevé, les composants organiques peuvent être étendus sur de très faibles épaisseurs et des supports flexibles [6]. Le dépôt du polymère sur la cellule est réalisé soit par la voie des cellules dites « humides » soit par la voie des cellules polymères organiques dites cellules « plastiques ». La technologie relève à présent deux défis principaux : l'augmentation du rendement des cellules et l'allongement de leur durée de vie (environ 1 000 heures) [6] mais sans oublier qu'elle a un coût de fabrication plus économique car la matière première est-elle même bon marché et les quantités utilisées sont très faibles (rapport 1/1000 par rapport au silicium cristallin).

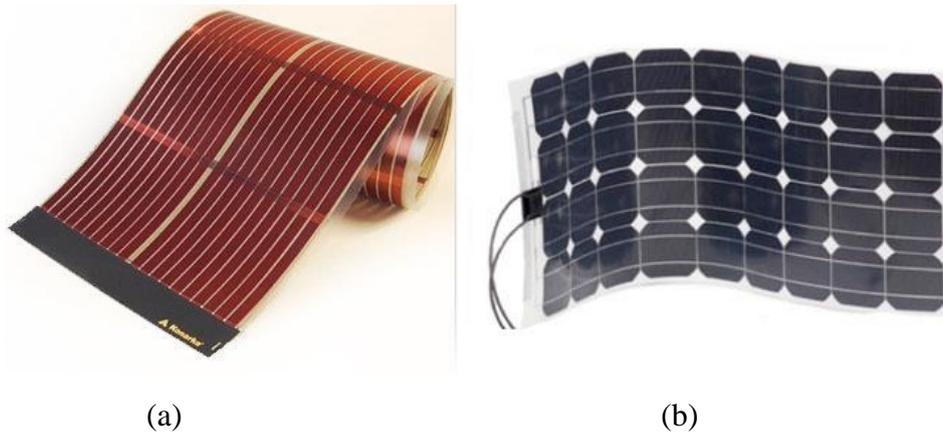


Figure II-4 : (a) cellule solaire OPV, (b) panneau photovoltaïque souple.

De nombreux chercheurs et industriels estiment que l'OPV constitue, au même titre que les technologies DSSC (*Dye Sensitized Solar Cells* ou cellules de Grätzel¹) [7], les solutions d'avenir.

II-5- L'effet photovoltaïque :

II-5-1- L'effet photoélectrique :

II-5-1-1- Introduction :

Il n'est pas surprenant que, si la physique devrait être bouleversée, elle l'ait été en essayant de comprendre la nature de la lumière. Le concept du quantum d'énergie qui a débuté avec la théorie du rayonnement du corps noir, resta inaperçu pendant presque cinq ans [8]. Il resta perdu dans les oubliés jusqu'à la reformulation de la théorie par Einstein. En se basant sur les principes de la physique statistique quantique déjà publiés dans ses trois articles (1902-1904), Einstein publia en 1905 un article intitulé « Sur un point de vue heuristique concernant la production et la conversion de la lumière » dans lequel il montrait que l'énergie de l'onde électromagnétique se comporte comme une collection de particules appelées quanta de lumière, chacune ayant une énergie E telle que :

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

¹ un système photo- électrochimique inspiré de la photosynthèse végétale qui, exposé à la lumière (photons), produit de l'électricité.

Mais son hypothèse n'a été acceptée qu'après que Millikan l'a corroboré par expérience en 1916.

II-5-1-2- Définition :

L'effet photoélectrique est l'observation que plusieurs métaux émettent des électrons lorsqu'ils sont irradiés par la lumière. L'électron éjecté est appelé photoélectron.

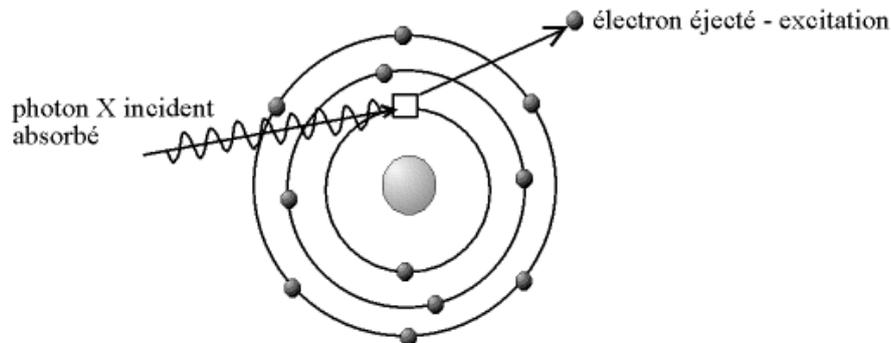


Figure II-5 : Processus de l'effet photoélectrique.

II-5-1-3- Historique et motivation :

L'effet photoélectrique a été observé pour la première fois en 1887 par le physicien allemand Heinrich Hertz (1857–1894) tandis qu'il opérait une série d'expériences qui affirmait l'existence d'ondes électromagnétiques. Il constata par coïncidence que l'étincelle entre deux sphères de métal devenait plus brillante lorsqu'une des sphères était irradiée par une lumière ultraviolette.

En 1902, Philipp Lenard lors d'une expérience où il plaça deux plaques de métal dans un tube de verre tout en purifiant l'air entourant, en reliant les plaques à un accumulateur, il remarqua le passage d'un courant lorsqu'une des plaques était éclairée à la lumière ultraviolette. L'effet photoélectrique s'expliquait par l'émission d'électrons à partir de la surface métallique irradiée. Projeter une lumière ultraviolette sur la plaque donnait à certains électrons assez d'énergie pour s'arracher à la surface métallique et franchir l'intervalle entre les deux plaques, fermant ainsi le circuit pour produire un «courant photoélectrique». Toutefois, Lenard découvrit aussi des faits dérangeants qui contredisaient la physique connue, en ouvrant ainsi les portes à Einstein pour entrer en scène avec son quantum de lumière [9].

II-5-1-4- Mécanisme :

Du point de vue classique :

D'après la théorie ondulatoire classique, l'effet photoélectrique peut contribuer au transfert de l'énergie lumineuse à un électron au sein d'un métal. A cet esprit, toute modification en amplitude ou en longueur d'onde va altérer le taux d'émission des électrons du métal. De plus, cette théorie stipule qu'une lumière extrêmement faible provoque un décalage de temps entre l'arrivée du rayonnement initial et l'émission consécutive de l'électron. Néanmoins, Les investigations expérimentales ont été en contradiction avec les deux prédictions faites par la théorie :

- La photoémission n'a pas lieu si est seulement si la fréquence de la lumière incidente est supérieure ou égale à une certaine valeur critique sans tenir compte de l'amplitude ou la durée temporelle d'exposition sous lumière.
- L'intensité du courant photoélectrique de saturation est proportionnelle au flux de la radiation incidente.
- L'énergie cinétique des photoélectrons est linéairement dépendante de la fréquence de la radiation incidente et indépendante de son intensité. Mais ceci est étonnant, comment la fréquence pourra-elle affecter l'énergie alors que celle-ci doit dépendre seulement de l'énergie d'incidence ?
- L'effet photoélectrique est quasiment instantané ($\sim 10^{-9}$ s), ce qui est impossible dans le cadre de cette théorie.

Aussi déconcertants que soient ces observations, elles ont brusquement entraîné la chute de la vision classique des ondes électromagnétiques qui a donné la parole par la suite à la vision quantique.

II-5-2- Dualité onde-corpuscule :

Pour donner un sens au fait que la lumière peut éjecter des électrons même si son intensité est faible, Albert Einstein a proposé que le faisceau lumineux n'est plus une onde qui se propage dans l'espace, mais plutôt une collection d'un paquet d'ondes (photons), chacun avec une énergie $h\nu$.

Un photon qui entre en collision avec un électron dans un métal, il lui cède son énergie. Ainsi, ce dernier peut se libérer de la surface du métal à condition que le photon individuel soit suffisamment énergétique. Cela peut arriver dès que l'impact du faisceau

avec le métal ; il n'y a aucun retard de temps. Augmenter l'intensité du faisceau implique augmenter le nombre de photons (sans augmenter leur énergie) ceci sert à augmenter le courant à proportion. Pour un électron près de la surface, l'énergie nécessaire pour le libérer est un minimum appelé travail d'extraction ϕ . L'énergie de photon sert donc à libérer l'électron et à lui transmettre une énergie cinétique. La relation entre les trois énergies est donnée par :

$$h\nu = E_{c_{max}} + \phi \quad (\text{II-2})$$

Cette expression est connue sous le nom d'équation d'Einstein de l'effet photoélectrique. Puisque $E_{c_{max}} = h\nu - \phi$, l'énergie cinétique maximale reste inchangée même si on augmente l'intensité de la lumière. Le seul paramètre qui suffit à modifier $E_{c_{max}}$ (ou le potentiel d'arrêt eV_a) est bien la fréquence ν (il faut noter que travail d'extraction ϕ est une propriété intrinsèque au matériau considéré).

Il s'ensuit que l'équation (II.2) devient :

$$eV_a = h\nu - \phi \quad (\text{II-3})$$

La fréquence correspondante au déclenchement de l'émission pour $E_{c_{max}} = 0$ est appelée fréquence de seuil et notée ν_0 . C'est la fréquence au-dessous de laquelle le courant photoélectrique ne se produit plus.

II-5-3- Les semiconducteurs :

II-5-3-1- Définition :

Un semi-conducteur est un matériau possédant 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. En d'autres termes, la conductivité électrique d'un semi-conducteur est intermédiaire entre celle des métaux (conducteurs) et celle des isolants.

II-5-3-2- Description :

a- Bandes d'énergie :

Tandis que les électrons d'un atome isolé aient des niveaux d'énergie permis bien déterminés, le comportement de ces électrons dans un réseau cristallin périodique est

totalemment distinct. Lorsque les électrons périphériques dits de valence sont dans leur configuration d'énergie la plus basse, l'atome dans son ensemble est dans son état d'énergie le plus bas appelé état fondamental.

Si les atomes sont assez proches, comme dans le cas du réseau cristallin du silicium, ceci génère une sorte d'interaction entre les niveaux permis de chaque atome qui tend à modifier ces niveaux. Cela entraîne une multitude quasi continue d'états autour de chaque niveau permis de l'atome individuel. Puisque dans un solide, le nombre d'atomes en interaction est très important, les niveaux d'énergie altérés sont si nombreux et si proches l'un de l'autre, qu'ils contribuent à la formation des bandes d'énergie avec des densités d'états associées.

Les niveaux d'énergie des électrons de valence et le niveau d'énergie d'ionisation donnent naissance à deux bandes d'énergies permises particulièrement intéressantes, la bande de valence et la bande de conduction, scindées par une bande dépourvue de niveaux permis, nommée bande interdite, qui est de l'ordre de 1.1 eV dans le cas du silicium, figure II-6. La particularité de ces bandes tient au fait que les électrons peuvent circuler librement dans toute la maille cristalline et ainsi générer des courants de conduction électrique (s'agissant d'électrons partagés par les atomes du réseau cristallin) [10].

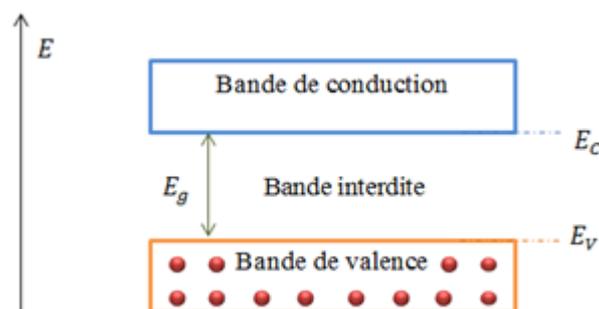


Figure II-6 : Diagramme des bandes d'énergie des semi-conducteurs.

Chaque type de matériau a une hauteur de bande interdite qui lui est propre, ce qui permet de distinguer les matériaux isolants, semi-conducteurs et conducteurs. Selon la théorie des bandes d'énergie, un matériau semi-conducteur possède une bande interdite suffisamment étroite pour que des électrons de la bande de valence puissent aisément la surpasser vers la bande de conduction. Lors de l'application d'un potentiel électrique aux

bornes du matériau, un faible courant électrique est créé, provoqué à la fois par le déplacement des électrons et par celui des « trous » qu'ils laissent dans la bande de valence.

b- Semiconducteur intrinsèque :

Tout semiconducteur dépourvu de toute sorte d'impureté susceptible d'altérer la densité des porteurs de charge est considéré comme semiconducteur intrinsèque ou pur dont les concentrations en électrons et en trous sont identiques ($n = p = n_i$), n_i étant la densité intrinsèque liée au matériau. Dans tel semiconducteur, les porteurs de charge ne sont créés que par des défauts cristallins et par excitation thermique.

c- Semiconducteur extrinsèque :

La conductivité d'un matériau peut être améliorée par l'incorporation volontaire dans le réseau cristallin d'un petit nombre (de l'ordre de 1 par 10^6) d'atomes étrangers appelés impuretés. On parle alors d'un semiconducteur extrinsèque et le processus qui sert donc à augmenter la densité des porteurs est connu sous le nom dopage.

d- Jonction p-n :

L'un des montages le plus pratique des semiconducteurs est la jonction p-n. Elle est créée par l'accolement d'une région dopée n et d'une région dopée p. Lors de cet assemblage les électrons de la région n, proches de l'interface, diffusent vers la région p. En effet comme les électrons sont plus nombreux dans n que dans p, ils vont avoir tendance à diffuser pour établir l'équilibre (est de même pour les trous proches de l'interface qui vont diffuser de p vers n) [11]. La région du type n devient alors positive à cause du déficit d'électrons et la région du type p devient négative à cause de l'excès d'électrons. Il en résulte une différence de potentiel qui arrête tout transfert supplémentaire de charges, ménageant une région centrale dépourvue de porteurs de charge. Cette région, appelée couche de déplétion, constitue ainsi une région isolante et la jonction ressemble à un condensateur chargé [8] (figure II-7). Les électrons peuvent passer de la zone p vers la région n mais pas en sens inverse et vice versa pour les trous. Le champ électrique créé permet donc la séparation des électrons entraînés d'un côté et des trous, entraînés de l'autre côté [12].

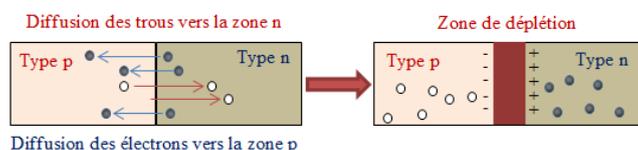


Figure II-7: Diffusion des porteurs (a) et apparition de la zone de déplétion (b).

Références bibliographiques

- [1] DANIEL LINCOT, « Chimie et conversion photovoltaïque de l'énergie solaire ». Institut de recherche et développement sur l'énergie photovoltaïque (IRDEP) EDF R&D, 6 Quai Watier, 78401 Chatou.
- [2] LAURENT ADONIS BEKALE, « Elaboration de cellules solaires organiques à base de TTB-ZnPc, université du QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES, Mai 2012.
- [3] JOSE MIGUEL NAVARRO « Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible », Thèse de Doctorat, université de TOULOUSE, 23 octobre 2008.
- [4] J. ZHAO, A. WANG, M.A. GREEN ET F. FERRAZZA, Applied Physics Letters 1998, 73, 1991.
- [5] M.A. GREEN, K. EMERY, Y. HISHIKAWA ET W. WARTA, Progress in Photovoltaics: Research and Applications 2008, 16, 61.
- [6] « L'énergie solaire », La Recherche | novembre 2012 • n° 469.
- [7] BOUGHNIM NAHED, TRIPOUL DAVID, AUDIBERT JONATHAN « Cellule photovoltaïque de Grätzel », Université de Nice Sophia-Antipolis.
- [8] EUGENE HECHT « Physique » Traduction : T.BECHERRAWY, Editions De Boeck, 2012.
- [9] MANJIT KUMAR « Le Grand Roman de la Physique Quantique Einstein, Bohr...et le débat sur la nature de la réalité», éditions Jean-Claude Lattès (traduction française), 2011.
- [10] BENAHMED BENABDALLAH NADIA « Propriétés physiques des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et Simulation des cellules solaires à base de Si et SiGe », Thèse de Magister, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID-TLEMEN, Juillet 2006.
- [11] PHILIPPE ROUX, « Théorie générale simplifiée des semi-conducteurs _ Jonction PN au Silicium_ Effet transistor bipolaire », 2008.
- [12] MOHAMED ANSOUMANE CAMARA, « Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par Supercondensateurs », 2012.



CHAPITRE III

• Les cellules photovoltaïques

Le progrès technique est comme une hache qu'on aurait mise dans les mains d'un psychopathe.

ALBERT EINSTEIN

III-1- Introduction:

Inventées aux laboratoires Bell aux Etats-Unis en 1954, utilisées pour l’approvisionnement en énergie des appareils au bord des satellites à cette époque, les cellules solaires ont connues un saut bien évolutif motivé par la conquête spatiale au cours de leur développement en termes de techniques de fabrication, d’efficacité et de coût. A présent, les cellules photovoltaïques sont devenues plus légères, moins chères, de nombreuses cellules solaires (transparents, à boîtes quantiques, blancs uniformes, souples...) seront bientôt dévoilées et perceront la manière dont la lumière est convertie en électricité en exploitant au mieux la lumière du Soleil à travers de panneaux solaires d’une part et en fournissant une solution plus économique en matière de coûts de fabrication d’autre part, y compris, les modules DisaSolar actuellement mis au point en laboratoire à Limoges et qui présentent plusieurs avantages : ils sont très fins (l’épaisseur d’une feuille de papier), ils se fixent partout et leur couleur peut être choisie à dessein selon l’usage final. Afin d’en répondre à ces besoins, silicium, terres rares ou plastiques et même pérovskite sont employés.

La cellule photovoltaïque, son principe de fonctionnement sera tout d’abord décrit en détail, puis son architecture, son procédé de fabrication seront passés en revue mais aussi ses caractéristiques électriques n’auront bientôt plus aucun secret pour vous. Parce que notre troisième chapitre les divulgue.

III-2- Définition:

Réalisées à l’aide de matériaux semiconducteurs, les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques ayant la faculté de capter directement l’énergie solaire et la convertir en énergie électrique grâce à l’effet photoélectrique. Ces sont les éléments les plus petits de l’installation photovoltaïque.

III-3- Principe de fonctionnement :

L’effet photovoltaïque est mis en œuvre dans les cellules solaires qui permettent de convertir directement l’énergie lumineuse du rayonnement solaire en électricité par le biais du phénomène de transport dans un matériau semiconducteur, traduit par le déplacement des porteurs de charge négative et positive (électrons/trous) sous l’action de la lumière.

III-4- Processus :

Lorsqu'un photon est absorbé, son énergie est transférée à un électron en lui permettant de passer d'un niveau d'énergie inférieur vers un niveau d'énergie plus élevé, laissant derrière une place vacante appelée trou. Ainsi, une paire électron-trou de même énergie électrique est créée (figure III.1). D'une manière générale, cette paire électron-trou tend à établir l'équilibre à nouveau, tout en perdant son énergie électrique sous forme d'une radiation ou bien d'énergie thermique qui sert à chauffer le matériau¹.

Récupérer toute ou fraction de cette énergie sous forme électrique est à juste titre l'objectif de la conversion photovoltaïque, alors comment faire ? Tout simplement en séparant les paires électron-trou créées et en les contraignant à passer dans un circuit extérieur. Cela a été rendu possible grâce au fait que les électrons et les trous ont des charges de signes opposés ($-e$; $+e$) et donc que si elles sont soumises à un champ électrique, les forces qui s'exerceront seront de sens opposé et devraient permettre la séparation [1]. La clé de l'effet photovoltaïque, est là ! Et cela fonctionne, grâce aux cellules solaires constituées en associant deux semiconducteurs l'un de type n, comme le silicium dopé phosphore, et l'autre de type p, comme le silicium dopé bore. Cette association est dénommée comme jonction p-n (ou n-p).

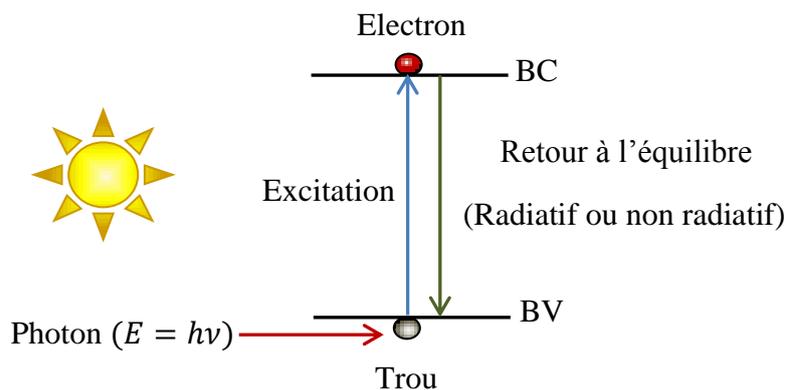


Figure III-1 : Processus d'absorption de la lumière par un matériau.

¹ Quand le bas de la BC et le haut de la BV coïncident dans l'espace des k, le gap est direct. Les transitions inter-bandes s'effectuent verticalement, et sont donc radiatives. Dans le cas où le gap est indirect : les transitions électroniques entre les extrema des bandes sont obliques, donc non radiatives puisqu'elles impliquent un changement du vecteur d'onde de l'électron.

Les niveaux d'énergie concernés pour l'absorption des photons sont le niveau du haut de la bande de valence E_V et le niveau du bas de la bande de conduction E_C . La région qui les sépare est surnommée la bande interdite dont l'énergie est notée E_g . Seuls les photons ayant une énergie supérieure ou égale à E_g sont absorbés.

Entre ces deux zones, un champ électrique assez fort est généré d'une manière permanente, provoquant ainsi la circulation d'un courant électrique (photo-courant) dans le circuit extérieur sous une tension non nulle dont la puissance est simplement $P = VI$. Une cellule solaire qui possède une caractéristique courant-tension est donc obtenue [1].

III-5- Architecture :

La cellule photovoltaïque est donc une plaquette de matériau semiconducteur généralement à base de silicium (Si) ou tellure de cadmium (CdTe) où la jonction p-n qui peut être du même matériau (homojonction) ou de matériaux différents (hétérojonction) représente le générateur du dispositif. De chaque côté de la jonction p-n, c'est-à-dire en face avant et en face arrière, deux électrodes métalliques sont déposées afin de récupérer les porteurs photogénérés. Ces contacts doivent être ohmiques, c'est-à-dire que la caractéristique $I(V)$ du contact doit être linéaire [2]. L'électrode déposée sur la face avant a une forme de grille permettant d'optimiser la collecte des porteurs tout en laissant pénétrer la lumière, et l'autre qui recouvre la totalité de la face arrière s'agit d'un contact métallique jouant le rôle d'une couche réfléchissante pour les photons non absorbés lors de leur premier passage.

Puisque le nombre de photons qui pénètrent la cellule photovoltaïque dépend fortement de la réflectivité de sa surface, une couche anti-réfléchissante obtenue le plus souvent par dépôt d'une couche d'oxyde sur le semiconducteur, est indispensable afin de minimiser toute perte de rayonnement incident due à la réflexion. Or, l'effet d'interférence qui a lieu au sein de la couche d'oxyde permet de piéger le rayonnement incident. La technique utilisée pour cela est la texturation; opération sert à créer des pyramides de quelques microns de hauteur rendant la surface susceptible d'adapter la même texturation en introduisant un relief. Ce dernier, tout en augmentant la surface, induit des réflexions multiples sur les facettes le constituant, piégeant ainsi un maximum du rayonnement incident et limitant la réflectivité de la surface [3].

La texturation de surface peut se faire par [4,5] voie chimique, par voie mécanique, par gravure plasma ou par utilisation de silicium poreux¹.

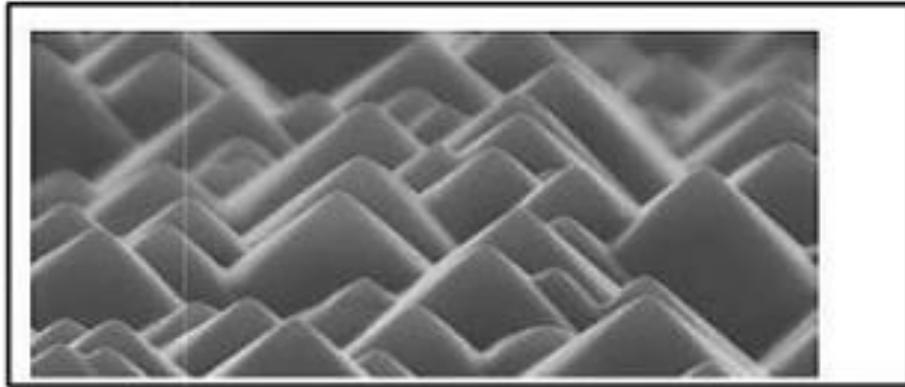


Figure III-2 : Surface d'une couche de silicium texturée en forme de pyramides obtenue par imagerie MEB [1].

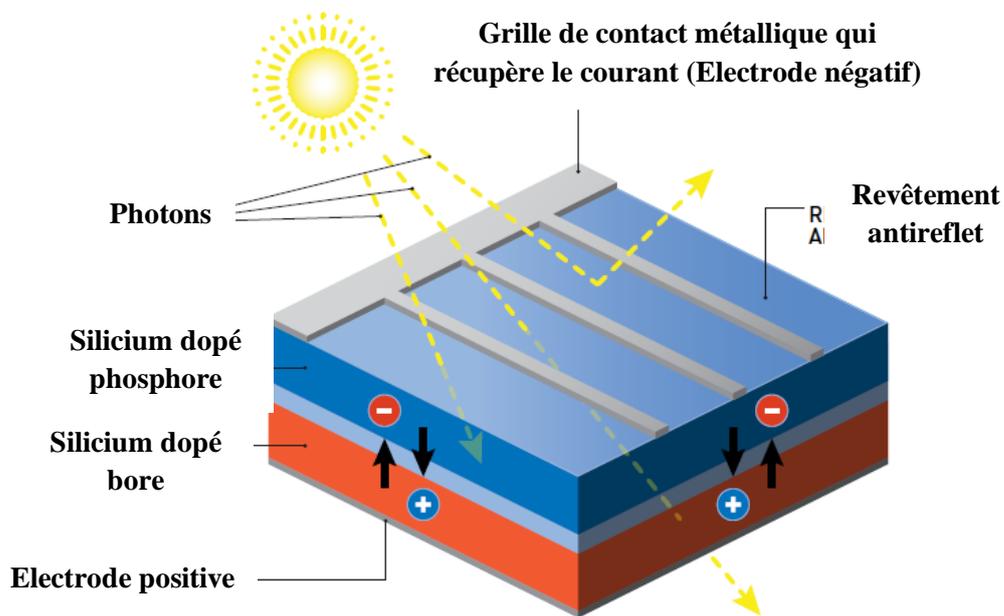


Figure III-3 : Architecture d'une cellule PV avec une jonction p-n.

¹ Le silicium poreux est obtenu à partir du silicium monocristallin soumis à une oxydation anodique en milieu acide fluorhydrique (HF).

III-6- Techniques de fabrication :

Le silicium est actuellement le matériau *ad hoc* le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques disponibles au niveau industriel. Il est obtenu à partir de la réduction de silice, élément le plus répandu dans la croûte terrestre et particulièrement dans le sable ou le quartz. La première étape consiste à produire du silicium métallurgique sous forme de morceaux de silice (galets, ou morceaux de quartz filonien) dont la pureté est de 98% uniquement. On passe par la suite à l'étape de purification par composés chimiques pour aboutir au silicium de qualité électronique qui se présente sous forme liquide. Suivant le processus de cristallisation, le silicium ainsi obtenu est coulé sous forme de lingot puis tranché en plaquettes très fines de 200 micromètres d'épaisseur (wafers) par des scies au carbure de silicium ou au diamant. Après un traitement pour enrichir en éléments dopants (P, As, Sb ou B) et donc obtenir du silicium semi-conducteur de type p ou n, les wafers sont « métallisés » : des rubans de métal sont incrustés en surface et reliés à des contacts électriques. Une fois métallisés, les wafers sont devenus des cellules photovoltaïques [6].

La production des cellules photovoltaïques exige de l'énergie, et on estime qu'un module photovoltaïque doit fonctionner environ deux à trois ans suivant sa technique de fabrication pour produire l'énergie qui a été nécessaire à sa fabrication (retour énergétique du module) [7].

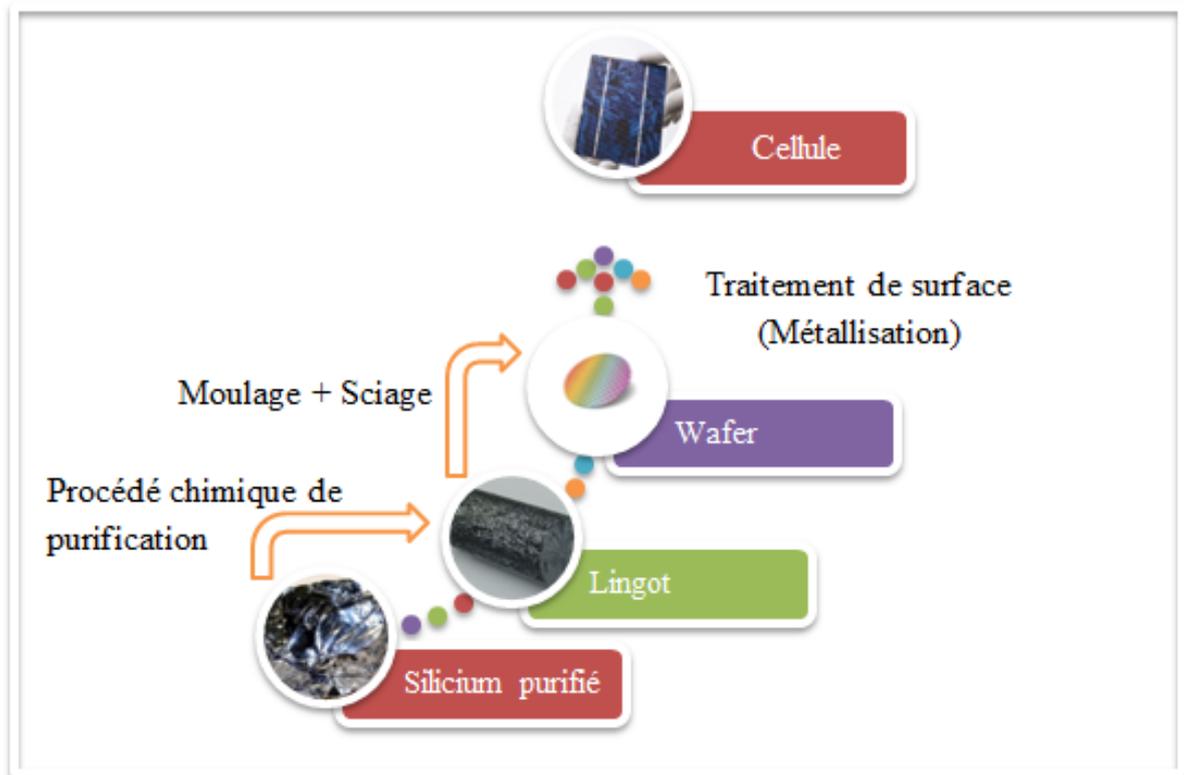


Figure III-4 : Procédure de la fabrication d'une cellule photovoltaïque.

III-7- Paramètres des cellules solaires :

III-7-1 Caractéristique courant-tension $I(V)$:

Les propriétés électriques de la cellule solaire sont synthétisées dans une courbe qu'on appelle caractéristique courant-tension $I(V)$ qui permet également d'évaluer le comportement de la cellule dans l'obscurité et sous éclairage, en représentant la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension à ces bornes depuis le court-circuit (tension nulle correspondant au courant maximum produit) jusqu'au circuit ouvert (courant nul pour une tension maximale aux bornes de la cellule).

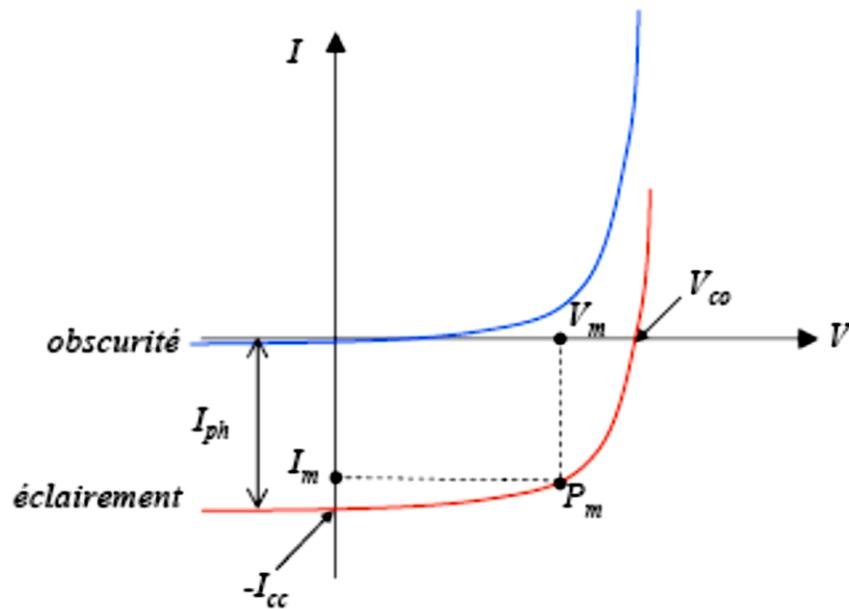


Figure III-5: Caractéristique $I(V)$ d'une cellule solaire; à l'obscurité et sous éclairement.

III-8- Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

III-8-1- Circuit électrique équivalent :

A l'obscurité, la cellule solaire se comporte comme une diode classique, elle commence à conduire dès que la tension appliquée devient supérieure à la tension de seuil V_s . Dans le cas idéal, elle obéit à la loi de Shockley :

$$I_D = I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{aKT}\right) - 1 \right]$$

$$I_D = I_s \left[\exp\left(\frac{V}{aV_{th}}\right) - 1 \right] \quad \text{(III-1)}$$

Où

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

q : La charge absolue de l'électron en coulomb (1.60281×10^{-19} C).

a : Le facteur de qualité de la diode (sans dimension).

K : La constante de Boltzmann (1.38066×10^{-23} J/K = 8.61400×10^{-5} eV/K).

T : La température absolue en Kelvin (K).

V_{th} : Le potentiel thermique en Volt (V).

Sous éclairement, il faut prendre le terme I_{ph} correspondant au photocourant généré en considération. Donc l'équation (III-1) devient :

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V}{aV_{th}}\right) - 1 \right] \quad (III-2)$$

Cette relation traduit le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale sous éclairement.

Mais en réalité les effets résistifs des électrodes et les fuites aux bornes de la cellule génèrent d'autres paramètres qui doivent être tenus en compte :

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V+R_s I}{aV_{th}}\right) - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (III-3)$$

Par conséquent, le schéma équivalent d'une cellule solaire réelle comporte un générateur de courant I_{ph} , une diode et deux résistances parasites R_s et R_{sh} .

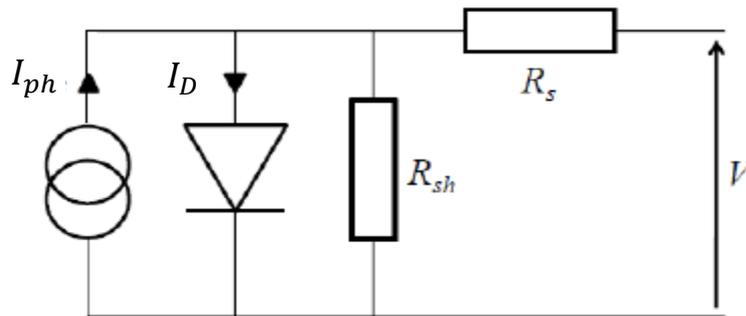


Figure III-6 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

- Le générateur du courant (I_{ph}) : Délivre le courant photogénéré.
- La diode (D) : Modélise la jonction p-n.
- La résistance série R_s : Modélise les pertes résistives au sein de la cellule. Elle est liée à la résistivité volumique et à l'impédance des électrodes et du matériau. Cela provoque une dérivation de la tension aux bornes de la cellule par rapport à celle générée aux bornes de la jonction p-n.
- La résistance shunt R_{sh} ou résistance parallèle : Liée aux effets de bord et aux recombinaisons volumiques entre les deux zones n et p de la jonction.

D'après la caractéristique $I(V)$ schématisée au-dessus, on peut extraire les paramètres décrivant le comportement de la cellule, qui sont les suivants :

III-8-2- Courant de court-circuit I_{cc} :

Il s'agit du courant qui traverse la cellule photovoltaïque lorsque celle-ci est court-circuitée, c'est-à-dire lorsque le pôle + est relié au pôle - (la tension à ses bornes est alors nulle). D'où, en annulant la tension V dans l'équation (III-3), on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{I_{cc} R_s}{aV_{th}} \right) - 1 \right) - \frac{I_{cc} R_s}{R_{sh}} \quad (\text{III-4})$$

Le terme $I_s \left(\exp \left(\frac{I_{cc} R_s}{aV_{th}} \right) - 1 \right)$ peut être négligé devant I_{ph} car la résistance série est très faible (pour la plupart des cellules solaires). Donc l'expression approchée du courant de court-circuit est donnée par :

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right)} \quad (\text{III-5})$$

$$\text{Dans le cas où } R_{sh} \gg R_s \Rightarrow \frac{R_s}{R_{sh}} \ll 1 \Rightarrow 1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \approx 1 \quad (\text{III-6})$$

L'équation (III-5) est réduite en :

$$I_{cc} \approx I_{ph} \quad (\text{III-7})$$

Le courant de court-circuit I_{cc} croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

III-8-3-Tension à circuit ouvert V_{co} :

Il s'agit de la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge, c'est équivalent à dire que le pôle + et le pôle - sont isolés électriquement de tout autre circuit électrique (le courant la traversant est alors nul), elle est donnée par la relation :

$$V_{co} = aV_{th} \ln \left(1 + \frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (\text{III-8})$$

Cette tension dépend pratiquement de l'éclairement, du type de cellule solaire (jonction p-n, jonction Schottky), des matériaux constituant la couche active et la nature des contacts de la couche active-électrode.

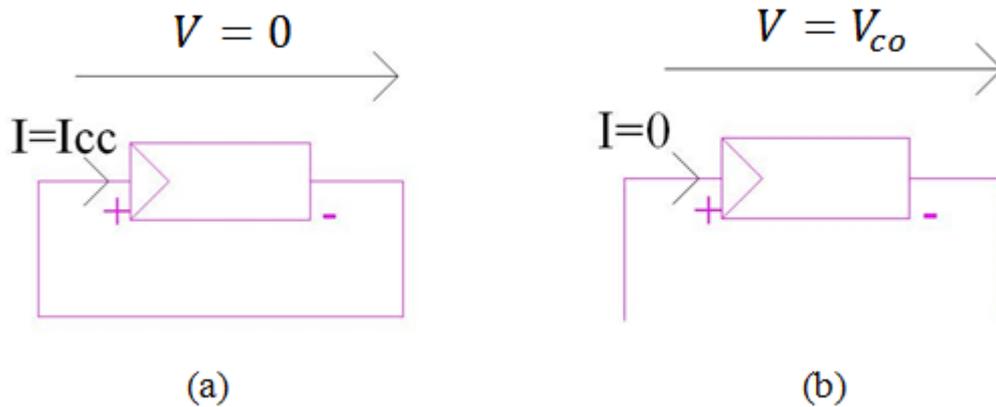


Figure III- 7: Schémas équivalents- Courant de court-circuit I_{cc} (a) Tension à circuit ouvert V_{co} (b).

Suivant le degré d'éclairement, deux régimes extrêmes peuvent être distingués :

- ❖ Régime de faible intensité lumineuse : $I_{ph} \ll I_s$, ce qui donne :

$$\ln \left(1 + \frac{I_{ph}}{I_s} \right) = \frac{I_{ph}}{I_s} \quad \text{(III-9)}$$

Donc :

$$V_{co} = aV_{th} \left(\frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad \text{(III-10)}$$

C'est la zone où le comportement de la cellule est linéaire. Si on pose $R_0 = \frac{aV_{th}}{I_s}$, on peut écrire la formule précédente comme suit :

$$V_{co} = R_0 I_{ph} \quad \text{(III-11)}$$

Où R_0 représente la résistance interne de la diode faiblement éclairée, en polarisation externe nulle (circuit ouvert).

- ❖ Régime d'intensité lumineuse intense tel que : $I_{ph} \gg I_s$, soit alors :

$$\frac{I_{ph}}{I_s} \gg 1 \quad \text{(III-12)}$$

D'où

$$V_{co} = aV_{th} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad \text{(III-13)}$$

C'est la zone engendrant le comportement logarithmique de la cellule.

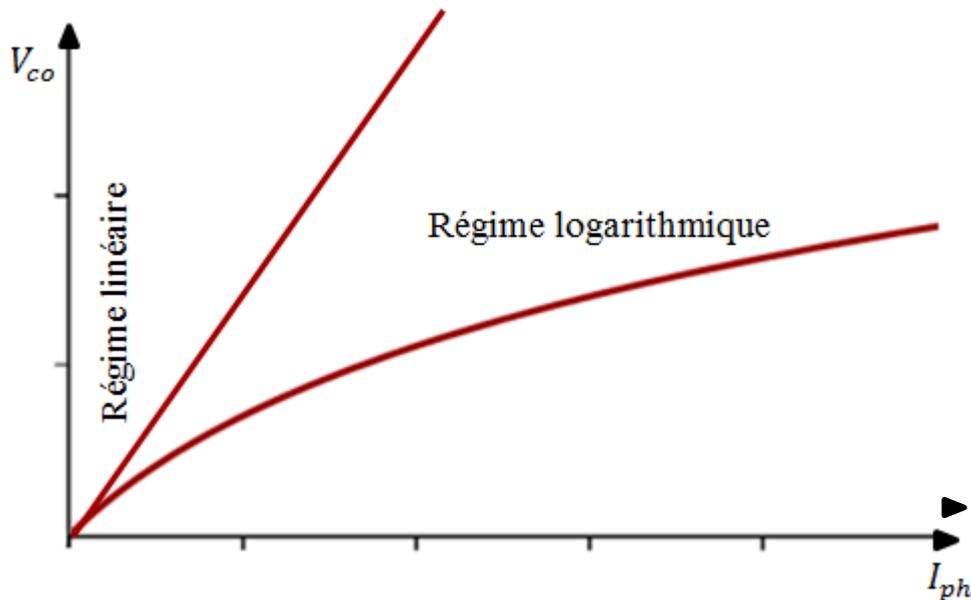


Figure III-8 : Différents régimes d'après la puissance d'irradiation.

Il faut noter que la tension augmente avec le \ln de I_{ph} (\ln de l'éclairement) mais elle ne croît pas en fonction de la température malgré sa dépendance proportionnelle de celle-ci ($V_{co} \propto V_{th} = \frac{KT}{q}$), l'explication de cette ambiguïté se pose sur le fait que le courant de saturation I_s varie exponentiellement avec la température ce qui compense largement le terme $\frac{KT}{q}$.

III-8-4- Le point de fonctionnement $P_{max}(V_{pm}, I_{pm})$:

Pour évaluer la performance d'une cellule photovoltaïque, on a besoin d'introduire ce qu'on appelle la puissance maximale donnée par :

$$P_{max} = V_{pm} \times I_{pm} \quad (\text{III-14})$$

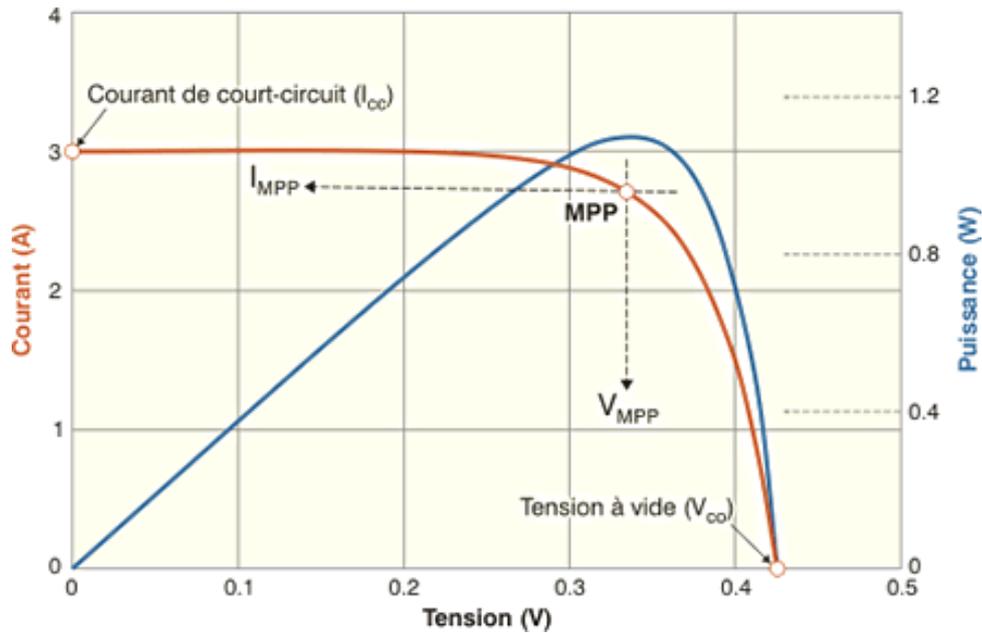


Figure III-9 : Le point du fonctionnement P_{max} de la caractéristique $I(V)$.

Sur la caractéristique $I(V)$, elle correspond au point du fonctionnement $P_{max}(V_{pm}, I_{pm})$ nommé aussi point de puissance maximale (MPP) dont les coordonnées sont V_{pm} et I_{pm} respectivement.

Typiquement, la tension maximale d'une cellule PV est d'environ 0.5 à 0.8V¹.

III-8-5- Le facteur de forme FF :

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique $I(V)$ pour qualifier la qualité d'une cellule PV : c'est le facteur de remplissage ou fill factor (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule et le produit $I_{cc} \times V_{co}$:

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \times V_{co}} = \frac{I_{pm} \times V_{pm}}{I_{cc} \times V_{co}} \quad \text{(III-15)}$$

¹ Actuellement, les cellules présentent des valeurs de l'ordre de 0.5V ; 3.5A ; 2.1 Wc.

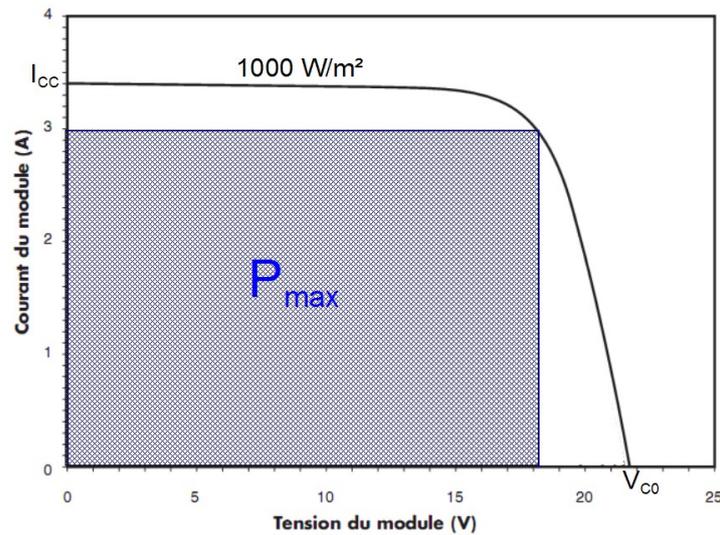


Figure III-10 : Notion de facteur de forme FF pour une cellule PV.

Le facteur de forme exprimé en % et toujours inférieur à 1¹, qualifie la forme plus ou moins carrée de la caractéristique courant-tension. Plus sa valeur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales.

Les quatre paramètres décrits au-dessus peuvent être assemblés dans un seul paramètre appelé le rendement η .

- Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et celle du rayonnement solaire au quel la cellule est soumise, il s'écrit donc :

$$\eta = \frac{P_{max}}{S \times E} \quad \text{(III-16)}$$

Avec :

S : La surface de la cellule solaire (en cm²).

E : L'ensoleillement (en W/m²).

D'après (III-15) : $P_{max} = FF \times I_{cc} \times V_{co}$

$$\eta = \frac{FF \times I_{cc} \times V_{co}}{S \times E} \quad \text{(III-17)}$$

¹ En pratique il faut considérer les pertes inévitables : en série à cause de la résistance non nulle des constituants des cellules, et en parallèle à cause des légères fuites de courant. Généralement, le facteur de forme se situe entre 0.6 et 0.85.

Les rendements des cellules issues des filières exploitant le "silicium cristallin" et celles exploitant les "couches minces" sont donnés dans le tableau ci contre :

Rendement		Filière « silicium cristallin »		Filière « couches minces »		
		(Si-c)		Silicium amorphe hydrogéné Si-a : H	Tellurure de cadmium CdTe	Couches minces CIS et CIGS
Technologie		Silicium monocristallin	Silicium polycristallin			
Rendement obtenu au laboratoire		25%	19.8%	13%	16.5%	19.2%
Rendement typique	Pour cellules encapsulées	17%	14.5%	8%	-	-
	Pour les modules	14.5%	12.5%	-	7-11%	-

Tableau III-1: Rendement des différentes technologies de cellules photovoltaïques.

III-8-6- Influence des différents paramètres sur la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$:

En pratique, la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique n'est pas totale. Différentes pertes viennent influencer le rendement de la cellule. Elles sont dans la plupart des cas dues à la nature du matériau et à la technologie utilisée [3]. Ces pertes sont évoquées ci-après :

III-8-6-1- Influence de l'éclairement et de la température :

L'éclairement et la température ont une influence directe sur la caractéristique $I(V)$ d'une cellule PV.

La figure suivante représente les variations du courant et de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairement à température maintenue constante à 25°C. On remarque que le courant de court circuit I_{cc} pour une température donnée varie proportionnellement avec l'éclairement, contrairement à la tension à vide V_{co} qui ne varie que très peu en fonction de l'irradiation (environ 0,5 V).

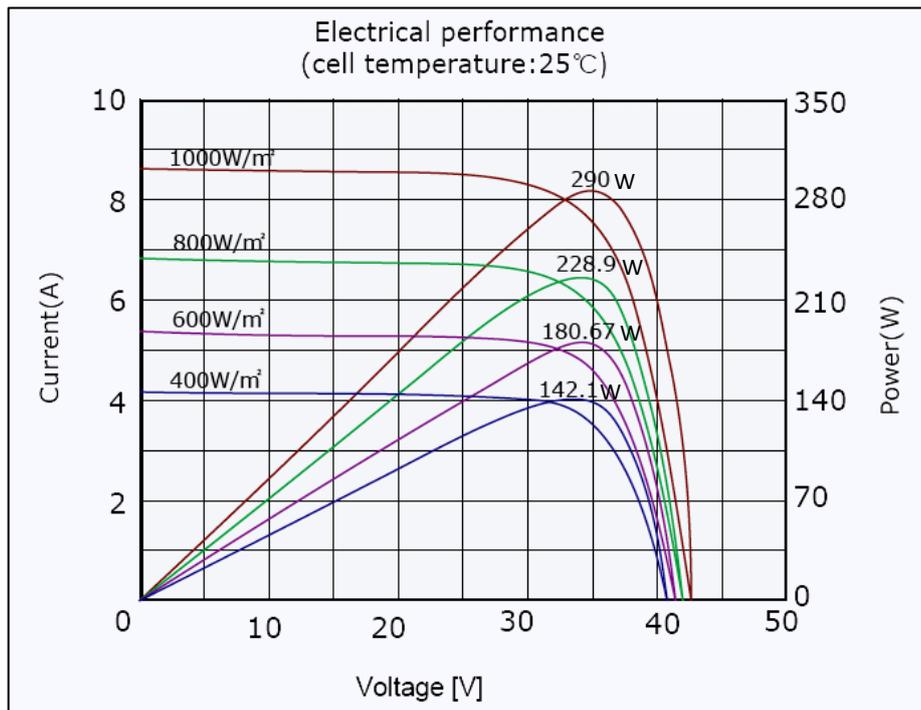


Figure III-11: Evolution de la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ en fonction de l'éclairement.

De même, la température influe considérablement le comportement (et donc le rendement) de la cellule solaire exposée sous irradiation. Cette influence se traduit principalement par une diminution de la tension générée (et une très légère augmentation du courant). Suivant les modèles, ce comportement induit, par degré, une perte de 0.5 % du rendement par rapport au rendement maximum de la cellule. On comprendra donc tout l'intérêt d'une ventilation correcte à l'arrière des panneaux [8].

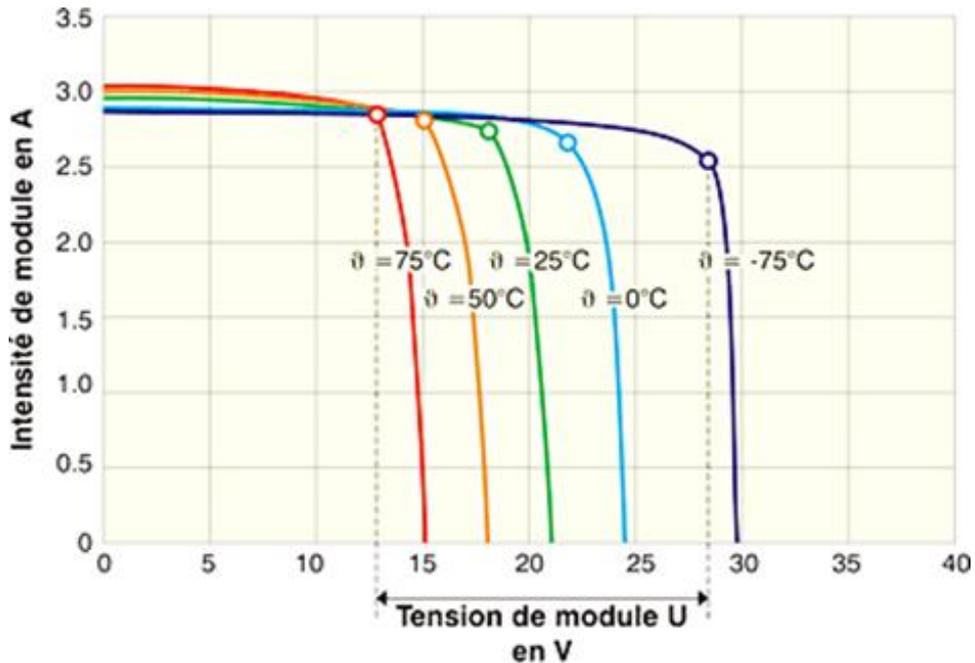


Figure III-12: Evolution de la caractéristique $I(V)$ en fonction de la température.

La perte de tension d'une cellule peut être estimée par la formule suivante :

$$V(T^\circ) = V(25^\circ\text{C}) + (K_p \cdot \Delta T^\circ) \quad (\text{III-18})$$

Avec :

K_p : Coefficient de température [mV/K], valeur fournie par le fabricant.

ΔT : Augmentation de température par rapport aux conditions STC (25°C).

III-8-6-2- Influence de la résistance série :

La résistance série caractérise les pertes par effet Joule de la résistance propre du semiconducteur et les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contacts ohmiques de la cellule. Les contacts semiconducteur-électrodes à résistance élevée abaissent appréciablement la tension et le courant de sortie ce qui va limiter le rendement de conversion [9].

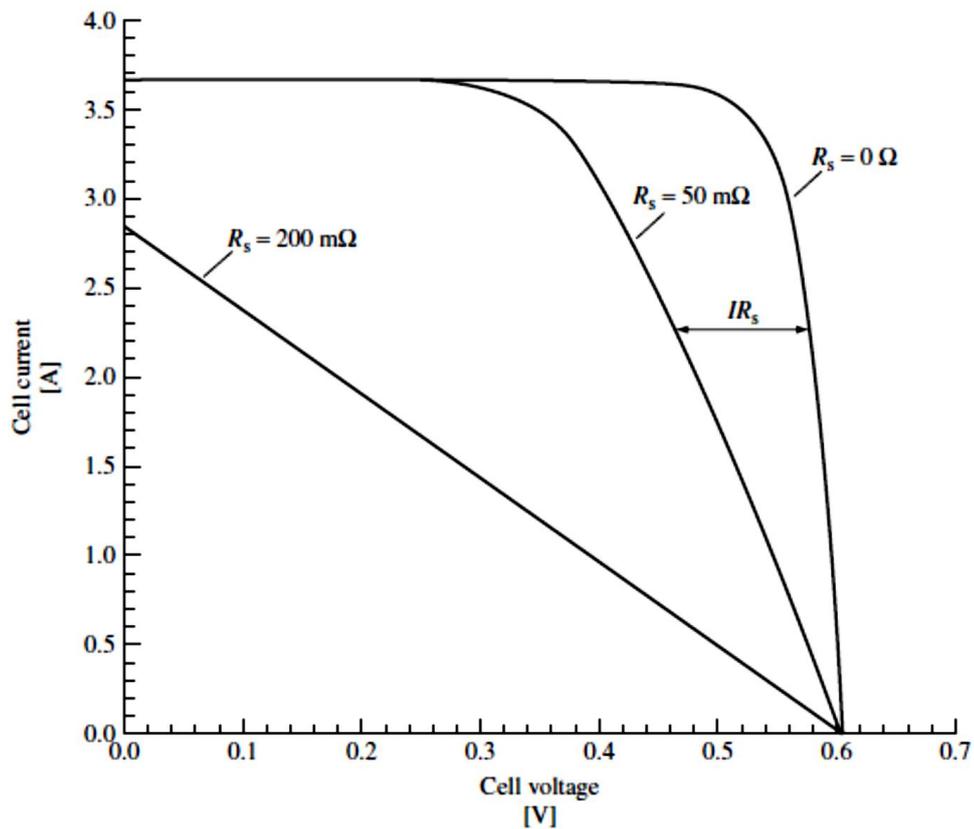


Figure III-13: Effet de la résistance série R_s sur la pente de la caractéristique $I(V)$.

III-8-6-3- Influence de la résistance parallèle :

La résistance parallèle (ou shunt) caractérise les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structuraux du matériau, épaisseurs des régions n et p et de la zone de charge d'espace. L'existence de fissures et de défauts de structures complexes devient le siège d'un phénomène physique assimilable aussi à une résistance parallèle R_{sh} . L'ordre de grandeur de la résistance parallèle pour une cellule au Si est de 10^2 à $10^4 \Omega$. R_{sh} augmente avec le groupement série de cellules solaires et diminue avec une connexion parallèle [9].

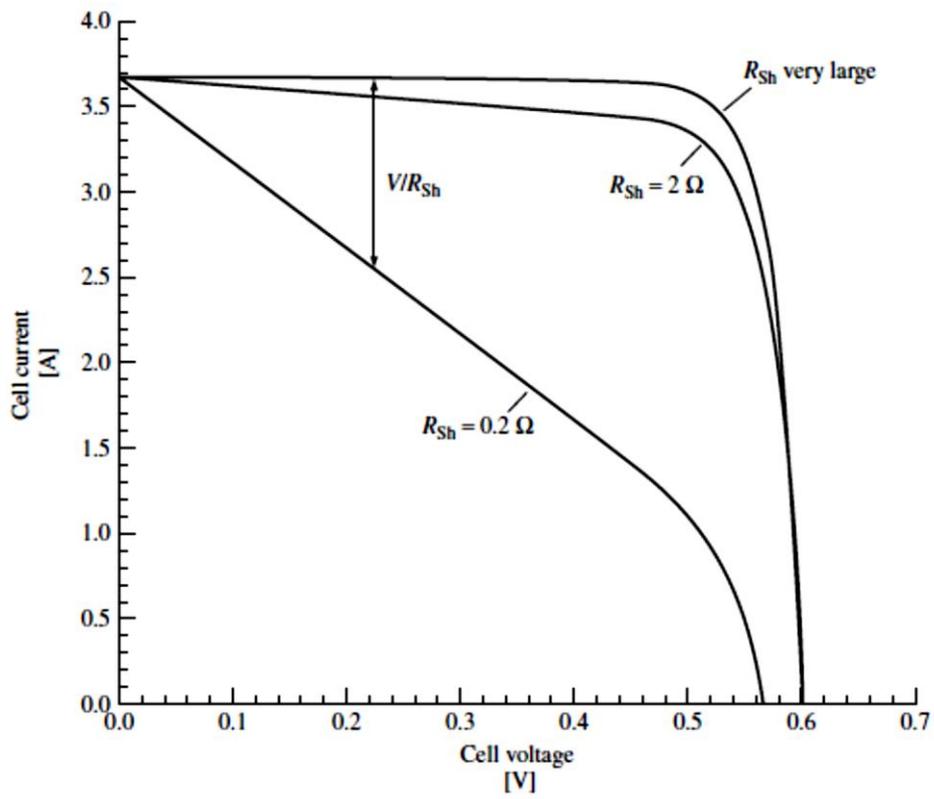


Figure III-14 : Effet de la résistance série R_{sh} sur la pente de la caractéristique $I(V)$.

Références bibliographiques

- [1] DANIEL LINCOT, Directeur de recherches au CNRS « La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire », Découverte N° 344-345 Janvier-Février 2007.
- [2] HAMZA AZZEDINE « Modélisation et Commande d'un Système Photovoltaïque », Mémoire de magister, Université BADJI MOKHTAR Annaba.
- [3] NICHIPORUK OLEKSIY « Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités », L'institut national des sciences appliquées de Lyon, 03 mai 2005.
- [4] B. EQUER, Energie solaire photovoltaïque (volume1: physique et technologie de la conversion photovoltaïque), 1ère édition, ELLIPES, Paris, 1993.
- [5] S. QUOIZOLA, Epitaxie en phase vapeur de silicium sur silicium mesoporeux pour report sur substrats économiques et application photovoltaïque bas coût, Thèse de doctorat, école doctorale : électronique, électrotechnique et automatisme, spécialité : dispositifs de l'électronique intégrée, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, Lyon, 2003.
- [6] BENAHMED ABDELMOUMENE et TEMIMI MAHMOUD « Etude des propriétés électriques des cellules photovoltaïques organiques », Mémoire de magister, Université ABOUBAKR BELKAID Tlemcen, 2010-2011.
- [7] « NPD Solarbuzz predicts hard times for thin-film PV » disponible sur photon-international.com, août 2013.
- [8] « Le rendement et la puissance crête des cellules photovoltaïques » www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16697.
- [9] R. MAOUEDJ, « Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah ». Mémoire De Magistère Décembre 2005.



CHAPITRE IV

• Les modules photovoltaïques

La succession de chercheurs est comparable à un seul homme qui apprend indéfiniment.

IV-1- Introduction :

Les panneaux solaires photovoltaïques constituent la partie visible d'une installation PV. Une installation domestique comporte bien souvent plus d'une dizaine de panneaux solaires photovoltaïques juxtaposés. A savoir au Portugal, à Moura, la plus grande centrale solaire photovoltaïque du monde, comporte 350000 panneaux solaires, produit 95 millions de kilowatts-heures par an.

Il est encore commode de bien connaître leur mode de fonctionnement ainsi que le lieu où ces derniers doivent être installés. Ces entités photovoltaïques méritent néanmoins d'être évoquées dans ce chapitre.

IV-2- Modules photovoltaïques :

Dans les conditions standardisées de test, la puissance maximale pour une cellule Si (silicium) de 150 cm² tourne aux alentours de 2.3 Wc sous une tension de 0.5V. Cette cellule constitue donc un générateur de très faible puissance, insuffisant pour les applications électriques courantes [1]. Les modules sont, de ce fait réalisés par association, en série et/ou en parallèle, d'un grand nombre de cellules élémentaires. La connexion en série augmente la tension pour un même courant tandis que la connexion en parallèle augmente le courant pour une tension identique. Le fait que les cellules sont fragiles au bris et à la corrosion exige qu'elles soient encapsulées sous verre ou sous composé plastique ¹[2].

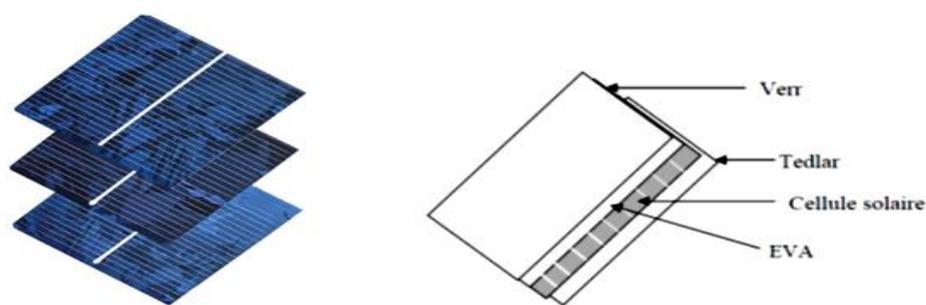


Figure IV-1 : Module photovoltaïque [1,2].

¹ Généralement la cellule est encapsulée dans un polymère EVA (éthylène-vinyl- acétate) où sa surface avant est protégée avec du verre ayant une bonne résistance mécanique, et la surface arrière de polyéthylène [5].

Les matériaux utilisés pour l'encapsulation doivent avoir une durée de vie élevée afin de :

- Résister aux variations de température et à l'exposition aux rayons UV.
- Résister aux efforts mécaniques (transport, montage, efforts éoliens) et aux averses de grêle.
- Se fixer facilement et de façon durable sur la toiture [3].

IV-3- Montage des modules photovoltaïques :

IV-3-1- Montage en série :

La caractéristique courant-tension d'un groupement quelconque de cellules [4] sera homologue à la courbe $I(V)$ d'une cellule de base. En conséquence, tout ce qui a été dit pour une cellule individuelle restera valable – généralisable – pour un groupement de cellules [5].

Dans un groupement de n_s cellules en série (appelée "String")¹ (figure IV-2 (b)), toutes sont traversées par un même courant alors que la tension résultante correspond à la somme des tensions générées par chacune des cellules.

$$V_{sco} = n_s V_{co} \text{ et } I_{scc} = I_{cc} \quad (\text{IV-1})$$

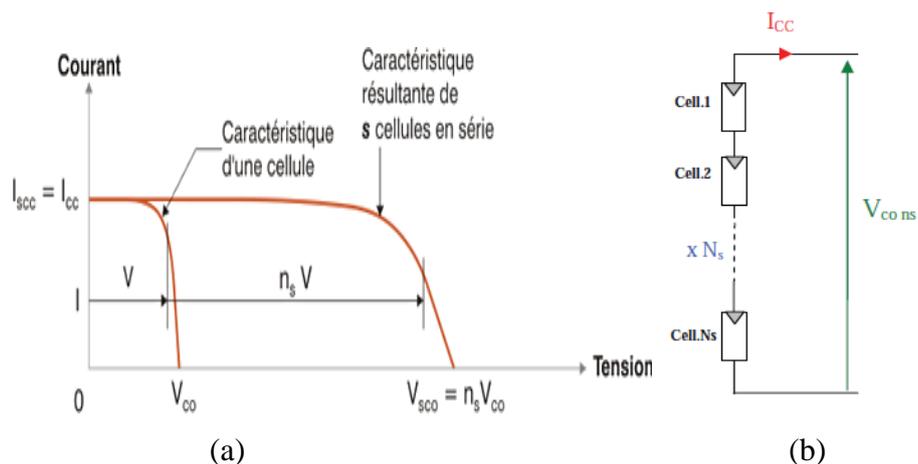


Figure IV-2 : Caractéristique $I(V)$ (a) et circuit équivalent (b) résultants d'un groupement de n_s cellules en série [3,4].

¹ Lorsque les panneaux sont montés en série, l'intensité traversant les panneaux sera celle du panneau le moins performant de la série (phénomène appelé *mismatching*). Ainsi, si l'ombre apparaît sur l'un des panneaux, toute la série aura pour rendement celui du panneau le plus faible.

La plupart des panneaux commercialisés sont couramment réalisés en associant 36 cellules en série ($V_{cons} = 0.6 V \times 36 = 21.6 V$) afin d'atteindre une tension optimale du panneau V_{opt} proche de celle d'une tension de batterie de 12V (à puissance maximale) [6].

IV-3-2- Montage en parallèle :

Par contre, dans un groupement en parrallèle les courants des n_p cellules s'additionnent¹ et la tension de chacune d'elles reste identique.

$$I_{pcc} = n_p I_{cc} \text{ et } V_{pco} = V_{co} \tag{IV-2}$$

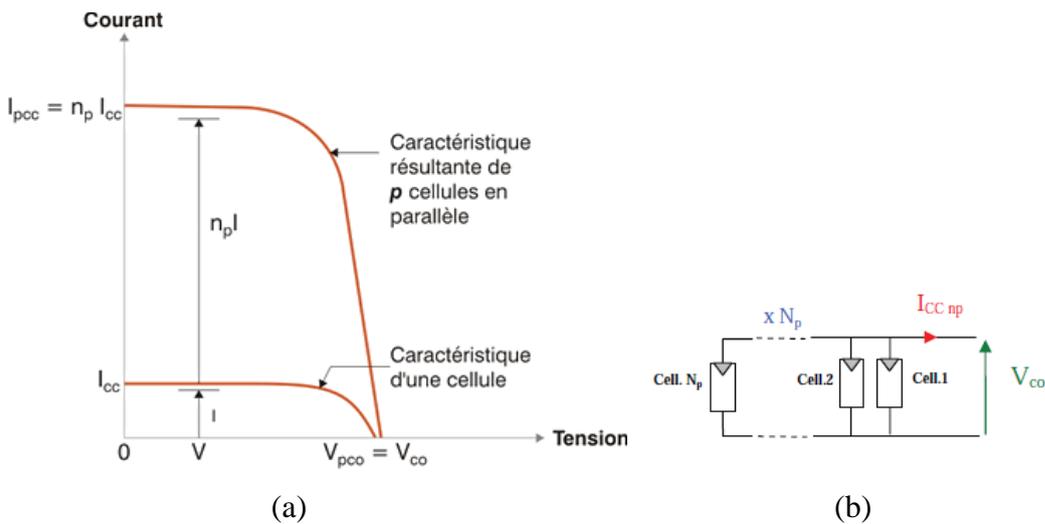


Figure IV-3 : Caractéristique $I(V)$ (a) et circuit équivalent (b) résultants d'un groupement de n_p cellules en parallèle [3,4].

IV-3-3- Montage hybride (série-parallèle):

Les caractéristiques globales d'une installation se déduisent donc d'une combinaison des caractéristiques des constituants des $n_s \times n_p$.

$$I_{cc}^t = \sum n_p I_{cc} \text{ et } V_{co}^t = \sum n_s V_{co} \tag{IV-3}$$

¹ Les cellules ont le droit d'être montées en parallèle tant qu'elles sont de même type. Si les cellules sont différentes, des courants compensateurs risquent de détruire les cellules.

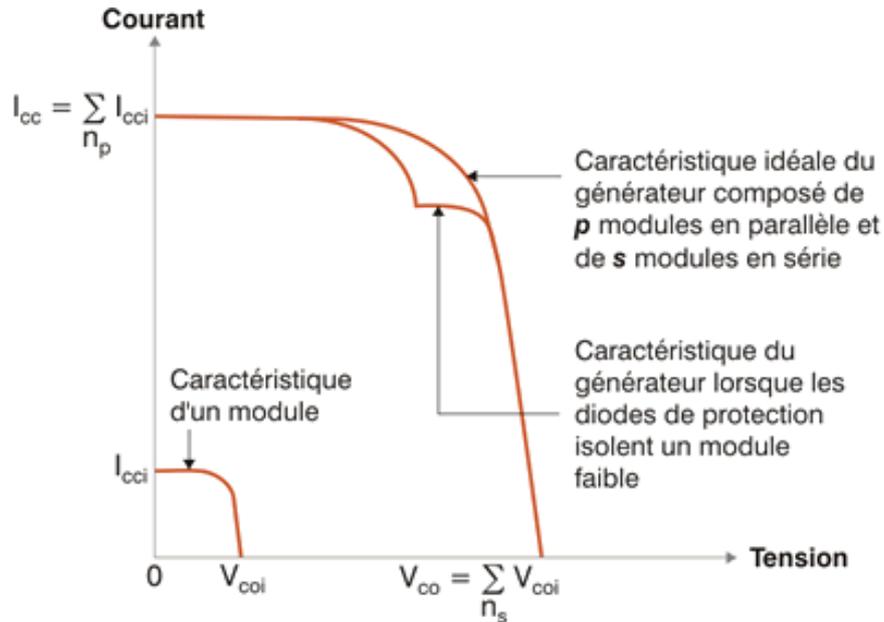


Figure IV-4 : Caractéristique globale d'une installation [3].

Le passage d'un module à un panneau se fait par l'ajout de diodes de protection¹, en série pour éviter les courants inverses et en parallèle, dites diodes by-pass, qui n'interviennent qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de protection associée [7].

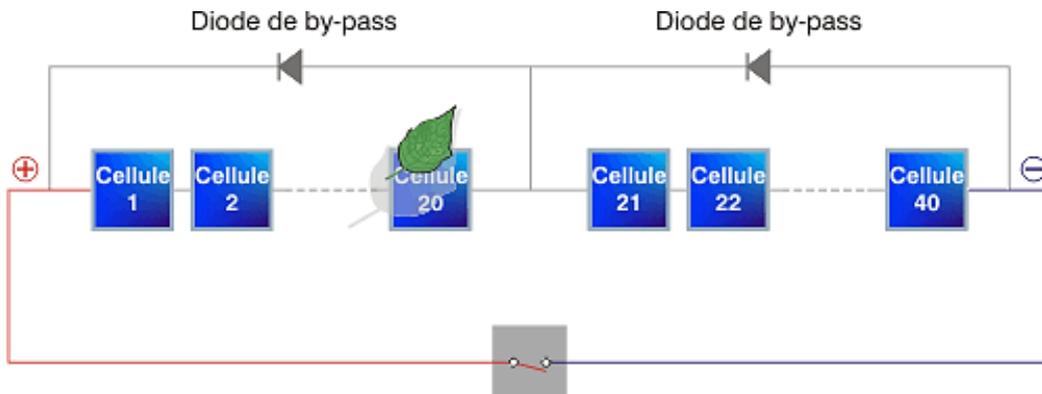


Figure IV-5 : Panneau photovoltaïque (protection par diode by-pass) [3].

¹ Sous certaines conditions, la cellule la plus faible peut alors se comporter comme une cellule réceptrice, dissipant la puissance générée par la cellule la plus forte. Celle-ci peut même être détruite si la contrainte ou la température devient trop importante (c'est le phénomène « hot spot » ou « point chaud »), ce qui nécessite l'utilisation des diodes by-pass.

Sous éclairage, la diode by-pass est bloquée et tout le courant passe par la cellule solaire tandis que dans l'ombre, la diode by-pass conduit le courant autour de la cellule ombrée causant seulement au module une chute de tension de 0.6 V [8].

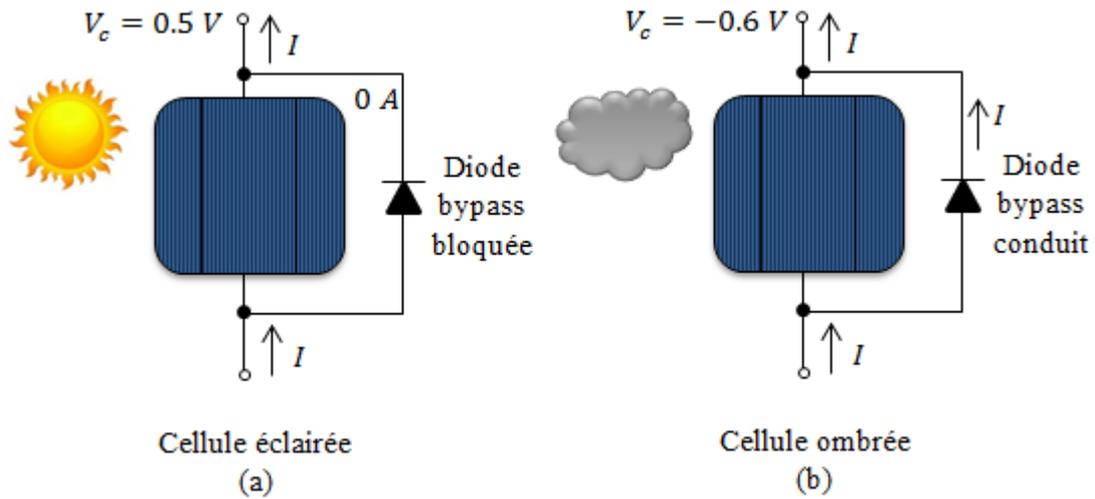


Figure IV-6 : Cellule solaire avant et après l'effet de l'ombre avec une diode de bypass.

L'utilisation de ces by-pass induit néanmoins des perturbations de la courbe caractéristique, modifiant le point de puissance maximal du module :

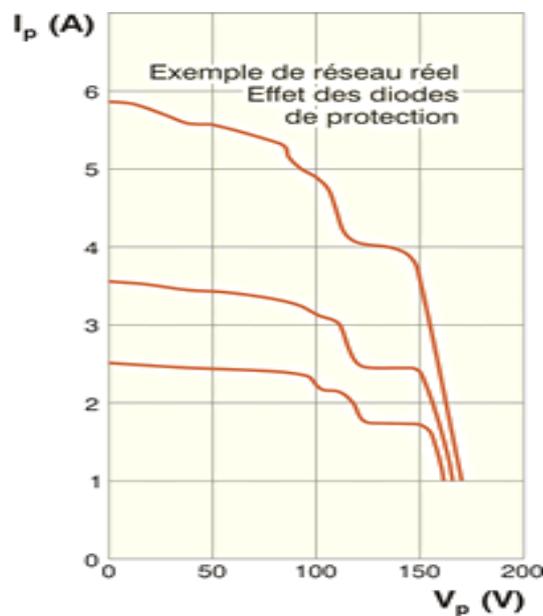


Figure IV-7 : Effet des diodes de protection sur la caractéristique $I(V)$ [3].

Afin d'en réduire ces pertes, il faut que les diodes by-pass soient placées en cohérence avec les ombres générées par l'environnement du module.

IV-4- Zone de fonctionnement du module photovoltaïque :

La caractéristique d'un générateur PV constitué de plusieurs cellules possède une allure semblable à celle d'une cellule élémentaire à condition qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule.

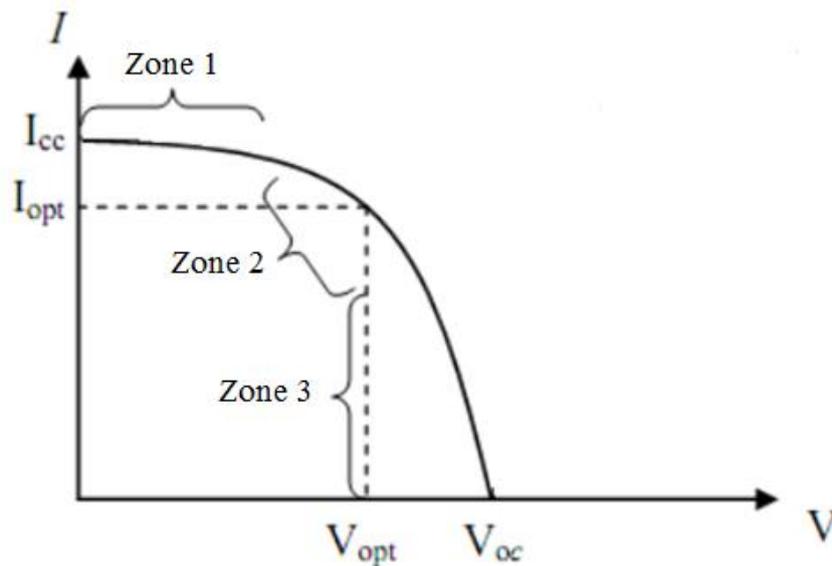


Figure IV-8 : Les différentes zones de la caractéristique $I(V)$ d'un module PV.

La caractéristique $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque peut donc être décomposée en trois zones :

- 1^{ère} zone : zone assimilée à un générateur de courant I_{cc} qui est proportionnel à l'irradiation.
- 2^{ème} zone : zone assimilée à un générateur de tension V_{co} .
- 3^{ème} zone : zone où l'impédance interne du générateur varie très fortement de R_s à R_{sh} [9].

Références bibliographiques

- [1] « Les caractéristiques électriques des cellules et des modules photovoltaïques » <http://www.energieplus-lesite.be>.
- [2] 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.
- [3] <http://www.ef4.be/fr/photovoltaïque/aspects-techniques/modules-photovoltaïques.html>
- [4] ALAIN RICAUD, Photopiles solaires, 1ère édition, presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1997.
- [5] SALAHEDDINE BENSALAM « Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires », Mémoire de Magister, Université FERHAT ABBAS Sétif, 06/01/2011.
- [6] A. GUEN, « contribution à l'étude des systèmes de télécommunications mobiles Alimentés par énergie solaire », thèse de magister, Université de Tlemcen, février 1992.
- [7] MISSOUM MOHAMMED « Contribution de l'énergie photovoltaïque dans la performance énergétique de l'habitat à haute qualité énergétique en Algérie », Mémoire de Magister Université HASSIBA BEN BOUALI Chlef, 11 décembre 2011.
- [8] SOFIANE ABADA « Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur SEPIC », université LAVAL QUEBEC, 2011.
- [9] ALONSO CORRINE « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie ». Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Université de PAUL SABATIER TOULOUSE III, 2003.

Références bibliographiques

Figures:

- [1] C.FKlingshirn: Energy Materials & Solar Cells, 2001.
- [2] « L'énergie solaire », La Recherche | novembre 2012 • n° 469
- [3] « Les caractéristiques électriques des cellules et des modules photovoltaïques »
<http://www.energieplus-lesite.be>
- [4] M. PETIBON Stéphane, Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques, Université de Toulouse, 2009.



CHAPITRE V

- **Stockage de l'énergie solaire**

Sur la pile voltaïque. Nous pouvons conjecturer que nous avons porté la puissance de l'instrumentation à son plus haut degré et il ne semble pas que nous allons actuellement ajouter quelque chose d'important à notre connaissance de ses effets ou d'obtenir une nouvelle lumière sur la théorie de son action.

V-1- Introduction :

Etant une énergie intermittente, l'énergie photovoltaïque produite par les systèmes photovoltaïques est très fluctuante et dépend énormément des conditions diverses : Météo, période de la journée, saisons... etc. C'est la raison pour laquelle il faudra penser à stocker cette énergie pour la restituer ultérieurement en dehors des heures d'ensoleillement. Le concept de "stockage d'énergie" est d'apporter de la flexibilité et de renforcer la fiabilité des systèmes énergétiques simultanément. Il s'agit d'établir un équilibre en un temps donné entre l'offre et la demande en énergie, aussi bien pour la fourniture d'électricité.

Vue l'importance du stockage électrochimique de l'énergie solaire assuré par l'intégration des batteries, dans le présent travail on présente un rappel sur les différents types de batteries, leur principe de fonctionnement, leurs caractéristiques, ainsi le fonctionnement d'un système PV avec batterie sera mené.

V-2- Stockage de l'énergie solaire :

Afin de garantir une provision d'énergie quasi permanente pour n'importe quelle condition d'ensoleillement, les générateurs photovoltaïques autonomes nécessitent un stockage électrique qui repose sur le fait d'emmagasiner une quantité d'énergie dans des installations autonomes pour des exploitations ultérieures en fournissant :

- Un déphasage entre la production et la consommation : jour/nuit, courtes périodes de mauvais temps.
- Une puissance élevée sur un temps court compatible avec la production durant la journée.

Cette fourniture d'énergie sera assurée, par exemple, pendant deux à trois jours pour certains petits systèmes domestiques à une quinzaine de jours pour les applications professionnelles, comme les phares maritimes [1].

V-3- Technologies de stockage :

Les différentes applications font appel à des batteries de technologie différente afin de répondre au service désiré. Parmi ces technologies, la batterie au plomb, plus adaptée au stockage de faible capacité avec une utilisation quotidienne. Des technologies de batteries

plus performantes pourraient être distinguées comme les batteries au nickel. Néanmoins leur coût est bien plus élevé limitant ainsi la généralisation de leur emploi. La technologie Lithium s'annonce comme la concurrente la plus prometteuse. Sa durée de vie et son rendement sont parmi les meilleurs des accumulateurs électrochimiques. Le coût est encore prohibitif comparé à la technologie Plomb mais il est attendu qu'il sera réduit prochainement de sorte que le Li-ion dominera les applications PV [2].

Types d'accumulateurs	Caractéristiques
Accumulateurs au plomb	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tension varie de 1.7 à 2.4V. ▪ Longévité. ▪ Bon rapport qualité/prix. ▪ Bonne tenue aux températures extrêmes. ▪ Charge possible à courant faible.
Accumulateurs au Cd-Ni	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tension varie de 1.15 à 1.45 V ; ▪ Très bonne résistance mécanique ; ▪ Décharges totales supportées ; ▪ Pas d'émanation toxique. ▪ Excellente tenue à la chaleur.
Accumulateurs au Zn-Ni	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tension varie de 1.6 à 1.8 V ; ▪ Durée de vie très faible.
Accumulateurs au Fe-Ni	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Taux d'autodécharge très fort ; ▪ Rendement faible ; ▪ Tension varie de 1.2 à 1.4 V.
Accumulateurs au lithium	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tension varie entre 1.9 à 2.5 V ; ▪ Bonne stabilité en température ; ▪ Grande capacité massique ¹.

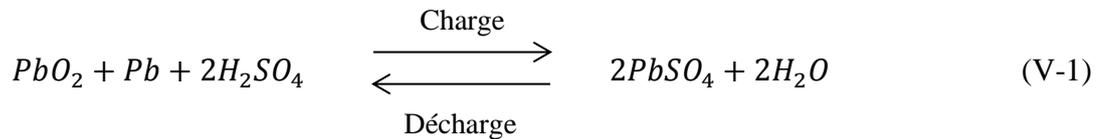
Tableau V-1: Technologie des accumulateurs et leurs caractéristiques.

¹ Elle est exprimée en Wh/kg. Varie de 28 à 35 Wh/kg pour le Ni-Cd, elle peut aller de 12 (plomb pur) jusqu'à 50 Wh/kg pour le Pb-Ca.

V-4- Principe de fonctionnement d'une batterie :

Les accumulateurs et les batteries sont des systèmes électrochimiques destinés à stocker de l'énergie. Ceux-ci restituent sous forme d'énergie électrique libérée pendant la décharge, l'énergie chimique générée par des réactions électrochimiques mises en jeu pendant la charge. Ces réactions réversibles sont activées au sein d'une cellule élémentaire entre deux électrodes baignants dans un électrolyte lorsqu'une charge est branchée à ses bornes. Etant susceptibles de donner naissance à un courant électrique, ces réactions d'oxydoréduction exigent que l'échange des électrons de valence s'effectue par le canal d'un circuit extérieur au système. Ainsi la combustion libre de l'hydrogène produisant de l'eau et de l'énergie calorifique ne peut donner naissance à un courant électrique car l'échange électronique s'accomplit directement, en quelque sorte par un court-circuitage moléculaire [3].

L'équation suivante décrit la réaction principale intervenant dans le processus:



Si cette réaction est décomposée en deux réactions partielles, simultanées, distinctes dans l'espace, dont l'une donne lieu à une capture et l'autre à une libération d'électrons, l'échange de ces électrons s'effectue alors par un courant extérieur et fournit de l'énergie électrique.

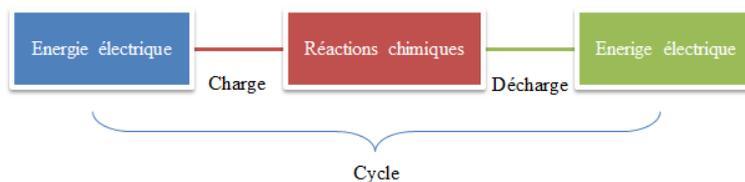
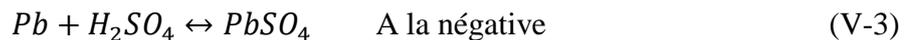


Figure V-1: Processus de fonctionnement d'une batterie.

V-5- Principales caractéristiques des accumulateurs :

V-5-1- Capacité en Ampère heure :

La capacité d'une batterie représente la quantité de courant extrait d'une électrode à travers l'électrolyte et les matériaux actifs des électrodes sur une décharge sous des conditions prédéfinies. Cette capacité s'exprime en ampère-heure, (1Ah = 3600 Coulombs).

Ainsi la capacité d'une batterie peut se varier selon certains facteurs, en particulier de la façon dont elle a été chargée et déchargée. La capacité peut donc s'exprimer dans des conditions de référence, souvent pour une durée de décharge de 20 heures et pour une température de 25 °C. On parlera alors de capacité nominale [4].

V-5-2- Rapports de chargement et déchargement :

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

V-5-3- Température :

La température de la batterie est sans doute un paramètre influençant sa capacité. Le comportement d'une batterie est spécifié à une température de 27 degrés. Des températures plus faibles ralentissent les réactions chimiques en réduisant la capacité de la batterie d'une manière significative. Une batterie a donc une capacité beaucoup plus faible à froid qu'à chaud.

V-5-4- La durée de vie :

Un accumulateur peut être chargé puis déchargé complètement un certain nombre de fois avant que ces caractéristiques ne se détériorent. Par ailleurs, quel que soit le mode d'utilisation de l'accumulateur, il y'a une durée de vie totale exprimée en année (ou en nombre de cycles) [5].

V-5-5- Profondeur de décharge :

La profondeur de décharge est le pourcentage de la capacité totale d'une batterie utilisable pendant un cycle de charge/décharge. Autrement dit, c'est le rapport entre la quantité d'électricité déchargée et la capacité nominale.

V-5-6- La tension d'utilisation :

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

V-5-7- Le rendement :

Exprime le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie cédée à l'accumulateur.

V-5-8- Le taux d'autodécharge :

L'autodécharge est la perte de capacité en laissant l'accumulateur au repos (sans charge) pendant un temps donné.

V-6- Connexion d'une batterie :

Pour brancher une batterie, il faut que les câbles de connexion soient adaptés à sa puissance. Ainsi, afin de réduire les pertes par effet Joule la section du câble doit être plus ou moins grande suivant l'intensité de courant. Puisque un court-circuit peut se produire, l'intégration d'un fusible entre la batterie et le régulateur est recommandée.

Dans le cas de plusieurs batteries demandant un assemblage en série ou en parallèle, celles-ci sont branchées entre elles au premier lieu puis raccordées au régulateur [6].

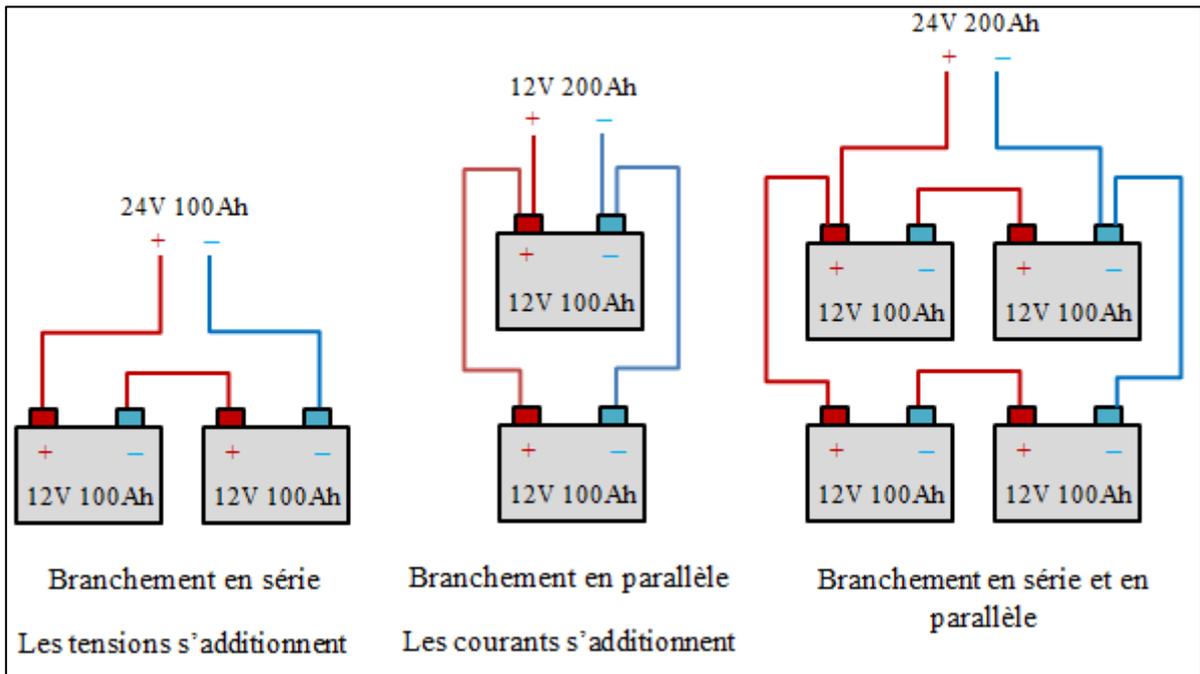


Figure V-2: Connexion des batteries.

V-7- Principe de fonctionnement d'un système photovoltaïque avec batterie:

Un générateur photovoltaïque avec batterie comprend généralement différents composants de base comme l'indique la figure suivante :

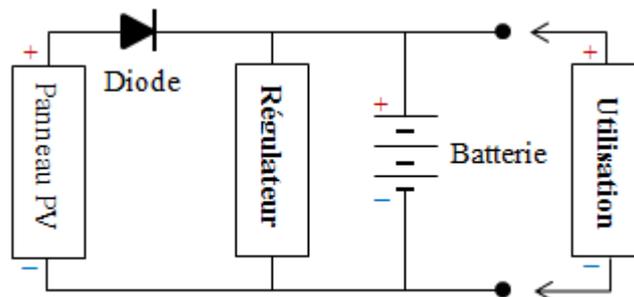


Figure V-3: Schéma de principe d'un système PV avec batterie.

- Le panneau solaire charge la batterie en période d'ensoleillement.
- La batterie d'accumulateurs assure le stockage journalier et / ou saisonnier de l'énergie électrique.

- La diode anti-retour évite la décharge des accumulateurs à travers le panneau solaire en période d'obscurité.
- Le régulateur de charge protège la batterie contre la surcharge et éventuellement contre les décharges profondes occasionnelles [7].

Chaque composant du système devra être choisi en fonction des contraintes techniques et économiques.

V-7-1- Modes de fonctionnement :

Pour un système donné, il existe cinq modes de fonctionnement selon l'éclairement et le courant d'utilisation.

a- Premier mode : Déconnexion de la charge

Au cours de la déconnexion de la charge. Le courant du panneau solaire, dépendant de l'ensoleillement, charge la batterie.

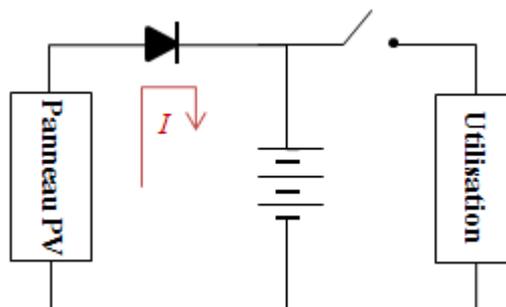


Figure V-4: 1^{er} Mode _Charge déconnectée.

b- Deuxième mode : Excédent de courant

La charge est maintenant connectée, le courant généré par le panneau solaire est supérieur au courant d'utilisation. Le courant en excès charge la batterie :

$$I = I_B + I_U \quad (V-4)$$

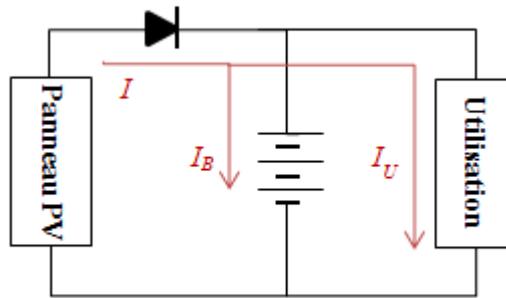


Figure V-5 : 2^{ème} Mode _Batterie chargée par le courant excédentaire.

c- Troisième mode : Courant nul

La charge est connectée. Le courant provenant du panneau solaire se trouve, pour un ensoleillement donné, égal au courant d'utilisation. Donc, la batterie n'est traversée par aucun courant :

$$I = I_U \quad (V-5)$$

$$I_B = 0 \quad (V-6)$$

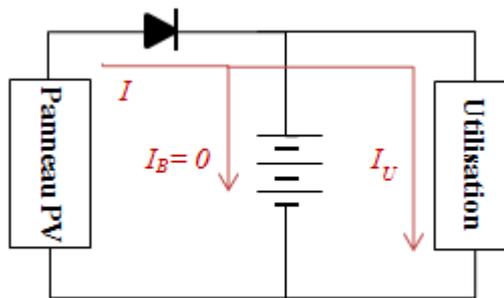


Figure V-6: 3^{ème} Mode _Courant nul dans la batterie.

d- Quatrième mode : courant déficitaire

La charge est connectée. Le courant provenant du panneau solaire est inférieur au courant d'utilisation. La batterie se décharge en fournissant le courant déficitaire :

$$I_B = I_U - I \quad (V-7)$$

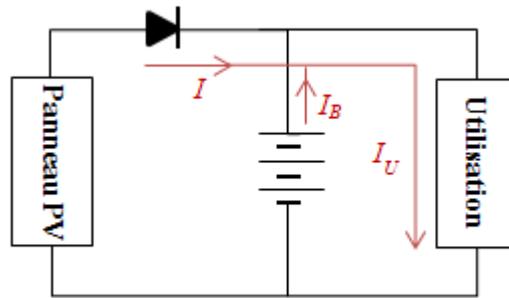


Figure V-7: 4^{ème} Mode _Décharge de la batterie dans le circuit.

e- Cinquième mode : nuit

La charge est toujours connectée. Le courant généré par le panneau solaire est nul (période d'obscurité). La diode anti-retour est bloquée. La batterie se décharge en cédant le courant d'utilisation :

$$I_B = I_U \quad (V-8)$$

$$I = 0 \quad (V-9)$$

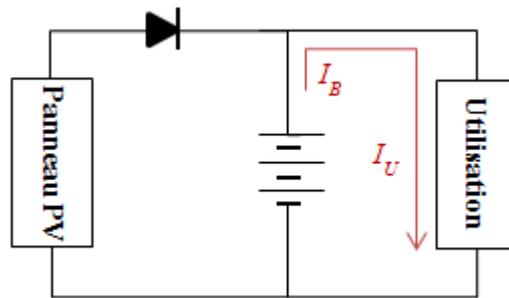


Figure V-8: 5^{ème} Mode _Courant d'utilisation fourni par la batterie.

V-8- Contrôle de charge :

V-8-1- Les diodes anti-retour :

On sait bien que le courant circule naturellement du point de tension le plus fort vers le plus faible. Au cours de la période de charge, la tension de la charge tend à dépasser la tension délivrée par le photo-générateur. Le courant passerait alors de la batterie vers le photo-générateur, si on ne mettait pas une diode qui bloque le passage du courant dans ce

sens. Cela pourrait l'endommager. Les diodes anti-retour servent donc à empêcher la décharge de la batterie dans le module durant la nuit.

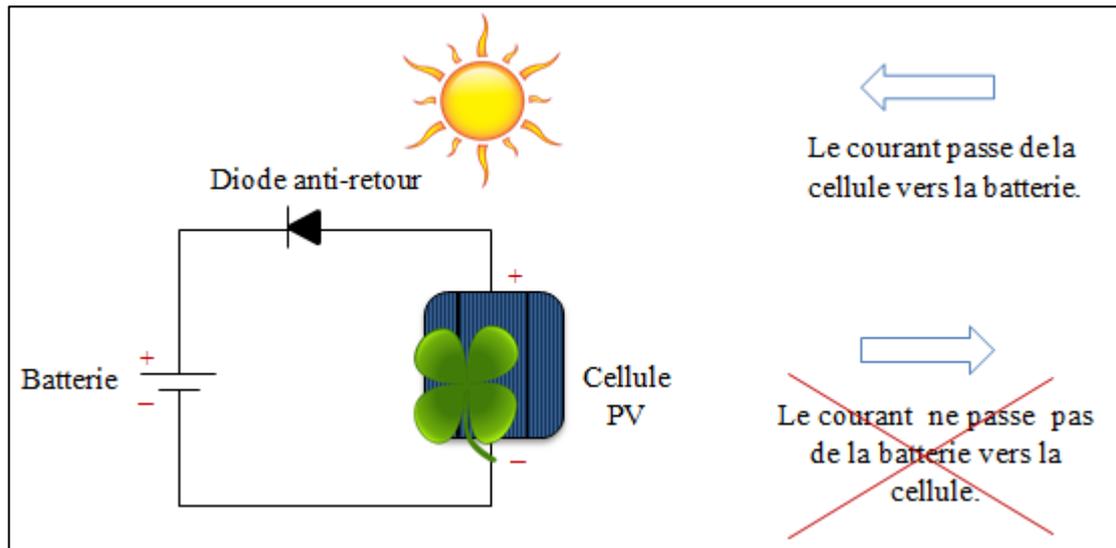


Figure V-9: Principe d'une diode antiretour.

V-8-2- Le régulateur de charge :

L'objectif d'un régulateur de charge est de protéger la batterie en lui assurant une meilleure durée de vie permettant à l'application autonome de se fonctionner longtemps.

L'amélioration de la durée de vie d'une batterie plomb (couramment utilisée) sert à éviter :

- Que la tension dépasse un certain seuil, ce qui traduit la surcharge.
- Que la batterie se décharge de plus de 90 % de son contenu, ce qui traduit la décharge profonde.

Ces fonctions sont possibles grâce à la mise en place d'un régulateur charge/décharge dont la connexion se fait avec les panneaux, la batterie et l'utilisation.

Lorsque la tension aux bornes de la batterie atteint 14,5 V (seuil haut typique pour une batterie au plomb de 12 V nominale), la liaison avec le panneau est rompue par le régulateur, en stoppant la charge de la batterie qui sera rétablie vers 13,5 V.

Dans le cas contraire, quand la tension atteint 11,5 V (seuil bas typique pour 12 V), le régulateur rompt la liaison avec le récepteur en arrêtant son utilisation, puisqu'il met ainsi l'appareil hors service jusqu'à ce que la tension batterie soit revenue à un niveau de 12,5 V. Il rétablit alors l'utilisation.

Généralement, une protection surcharge est quasiment indispensable car l'alimentation solaire présente un excès d'énergie dans la plupart des cas (l'été surtout), ce qui n'est pas le cas pour la protection décharge qui est exigée seulement pour la sécurité en cas d'incident où la batterie entre en décharge profonde lorsque le dimensionnement et les composants sont mal adaptés.

Pratiquement, les fonctionnalités anti-retour et régulation de charge sont réalisées via des boîtiers électroniques avec une logique à relais ou à transistors. Elles peuvent être de type série (pour les puissances élevées) ou de type parallèle (pour les basses puissances) [8].

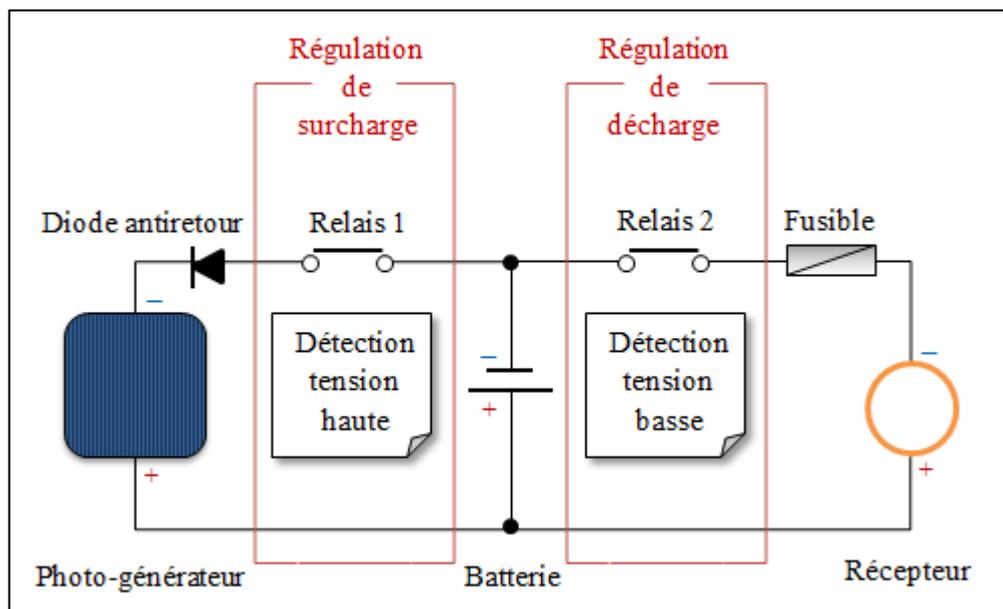
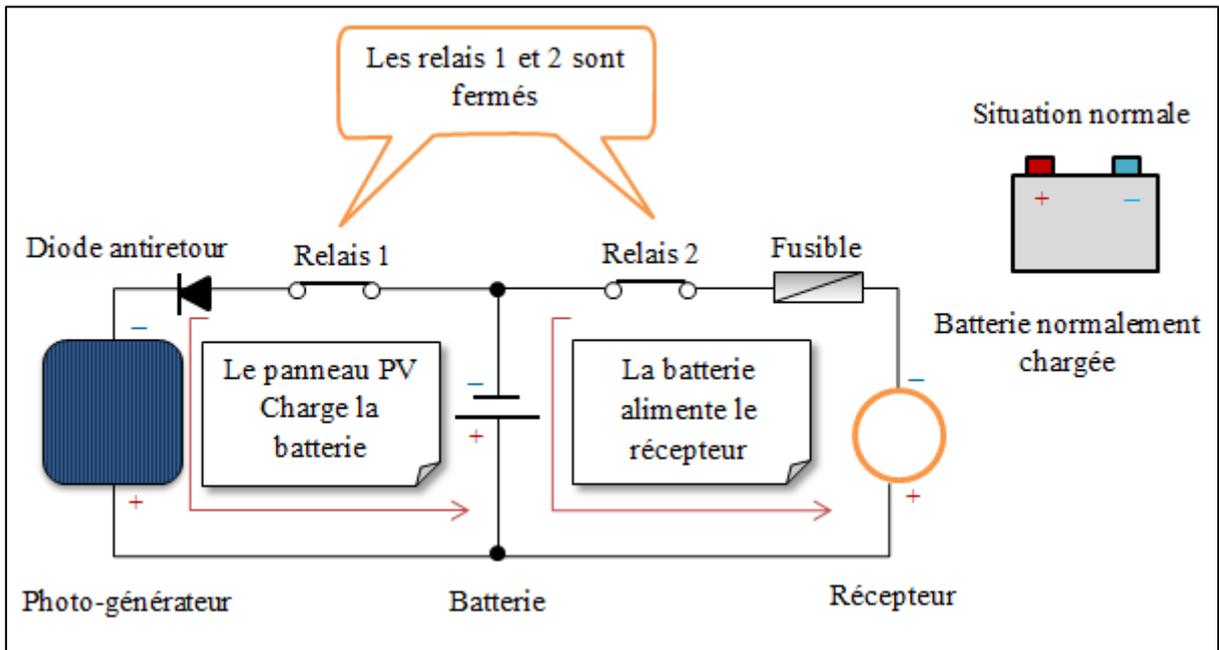
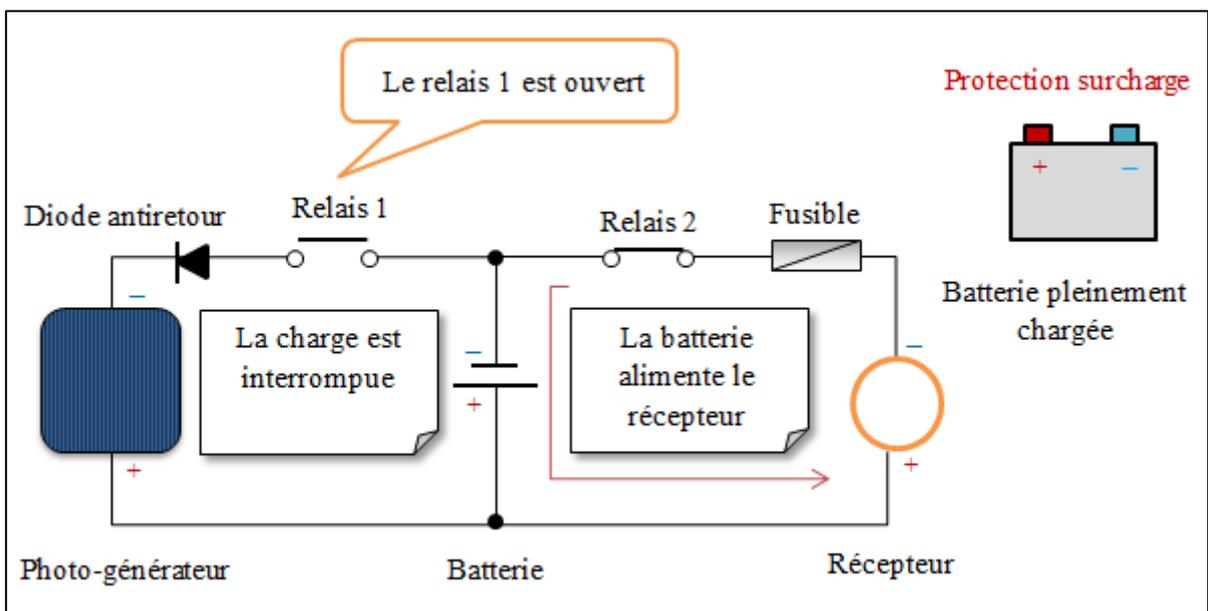


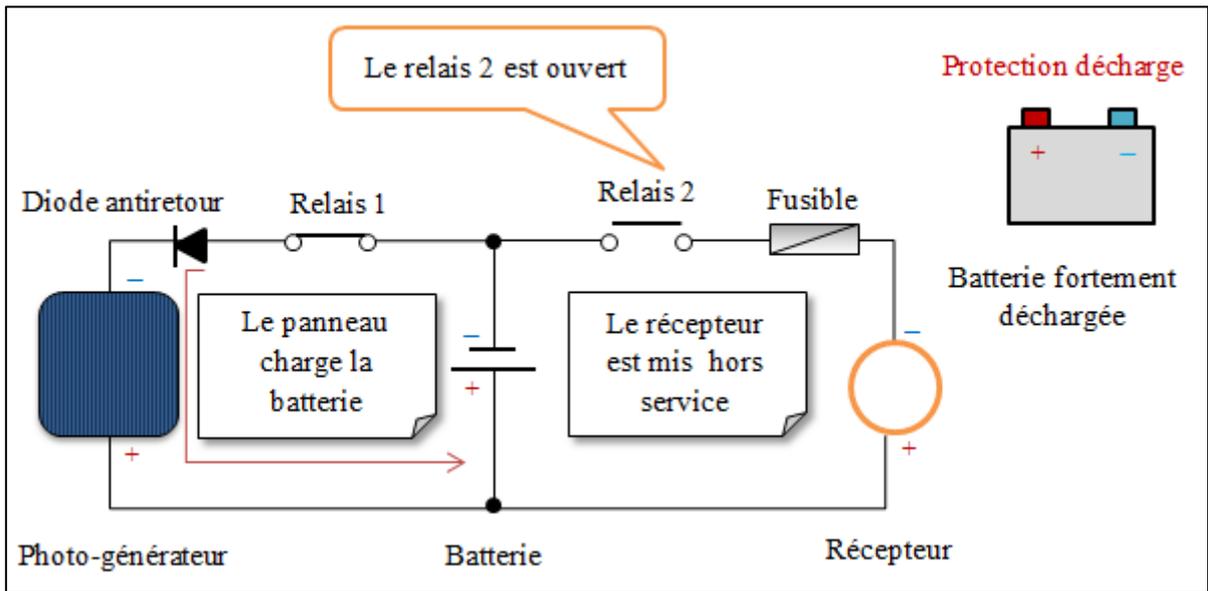
Figure V-10: Principe de fonctionnement d'un régulateur charge/décharge.



(a) Etat normal.



(b) Etat de surcharge.

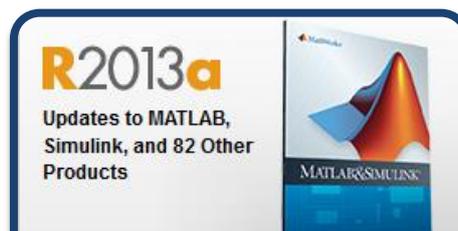


(c) Etat de décharge.

Figure V-11: Régulateur charge/décharge.

Références bibliographiques

- [1] Le stockage de l'électricité d'origine photovoltaïque Florence Mattera Direction de la recherche technologique CEA centre de Cadarache « CLEFS CEA - N° 50/51 - HIVER 2004-2005 »
- [2] BENHADDOUCHE NESRINE FATIMA « La Commande D'un Système Photovoltaïque D'un Satellite », Thèse de Master UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID – TLEMCEN, 8 Octobre 2013.
- [3] « Introduction à l'Etude du Système de Stockage dans un Système Photovoltaïque » N. ACHAÏBOU « Centre de Développement des Energies Renouvelables, B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger »
- [4] « Cellules solaires_ Les bases de l'énergie photovoltaïque », ANNE LABOURET, éditions techniques et scientifiques françaises, 5^{ème} édition, Dunod.
- [5] I. TSUDA, K. KUROKAWA, K.NOZAKI: «Annual simulation results of photovoltaic system with redox flow battery», solar Energy Materials and solar cells 35, pp 503 –508, 1994.
- [6] www.arebor-energie.fr/encyclopedie
- [7] « Modules et systèmes photovoltaïques », ALAIN RICAUD, Sept 2008
- [8] BENDJAMAA IBRAHIM « Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque » mémoire de magister, UNIVERSITE ABOU-BAKR BELKAID – TLEMCEN, 2011-2012



CHAPITRE VI

Simulation des modules PV:

- **Résultats et discussion**

Les propositions mathématiques qui reflètent la réalité ne sont pas certaines et celles qui sont certaines ne reflètent pas la réalité.

ALBERT EINSTEIN

VI-1- Introduction :

La modélisation et la caractérisation électrique des panneaux photovoltaïques actuellement commercialisés est une étape importante pour l'optimisation du fonctionnement des systèmes photovoltaïques utilisant ces panneaux. Ceci peut réduire d'une manière considérable le coût de l'installation PV et augmenter le rendement des générateurs PV.

Dans ce dernier chapitre, on analyse la simulation et la caractérisation électrique de trois panneaux PV présentement commercialisés, dans l'environnement Matlab en tenant compte des caractéristiques électriques fournies par le constructeur. L'objectif de ce chapitre est de déterminer quelques paramètres électriques régissant le fonctionnement d'une cellule solaire comme la résistance série et la résistance parallèle afin d'en déduire à partir du simulateur Simulink, les grandeurs électriques optimales du panneau (courant, tension et puissance) en fonction des conditions météorologiques (éclairage et température) et les comparer avec celles conçues par l'expérience.

VI-2- Représentation électrique de la cellule PV :

Plusieurs modèles qui servent à modéliser le comportement de la cellule photovoltaïque sont disponibles dans la littérature, ces modèles utilisent des jargons bien déterminés compris par tous ceux qui l'utilisent. Le modèle général schématisé sur la figure VI-1, comporte les deux résistances R_s et R_{sh} , par contre dans le cas d'une cellule PV idéale, la résistance série a une valeur nulle tandis que la résistance parallèle a une valeur infinie.

Le courant généré par un module photovoltaïque composé d'un nombre de cellules n_s connectées en série est représenté par :

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

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V+R_s I}{a.Vt}\right) - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{VI-1})$$

Avec :

$$Vt = \frac{n_s \cdot K \cdot T}{q}$$

a: Facteur d'idéalité de la diode.

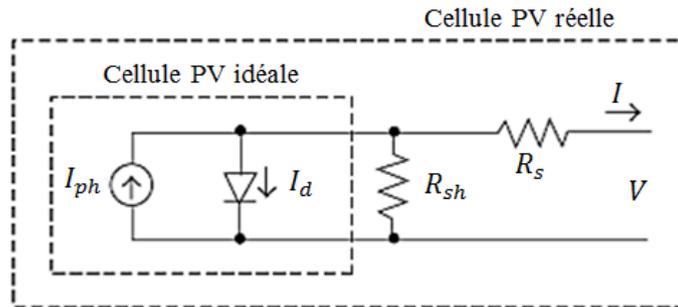


Figure VI-1 : Circuit équivalent d'une cellule PV.

VI-3- Création du modèle de la cellule sous Matlab/Simulink :

Le modèle représentant le circuit équivalent d'une cellule PV est obtenu par l'assemblage des composants électriques et électroniques correspondants que dispose l'outil Simulink de Matlab et qui sont disponibles dans la librairie « *Simscape* », et ce, en intégrant au modèle :

- Deux résistances et une diode.
- Un générateur de courant « *Controlled Current Source* » disponible dans la librairie « *SimPowerSystems* » → « *Electrical Sources* », et dont le contrôle se fait en fonction de l'éclairement sous lequel le panneau PV est soumis.
- Un composant « *Simulink-PS Converter* » disponible dans la librairie « *Simscape* » → « *Utilities* » qui permet de convertir le signal d'entrée en un signal physique.

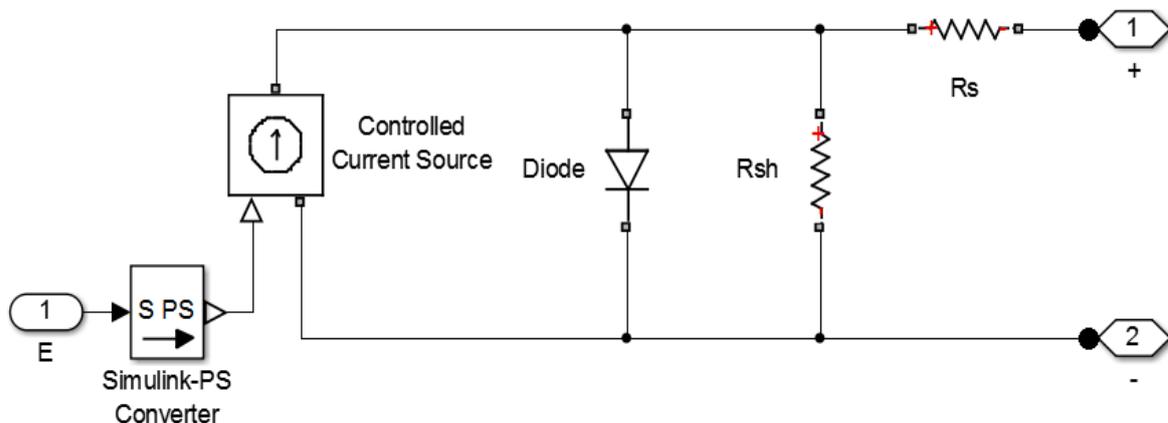


Figure VI-2 : Circuit équivalent de la cellule PV modélisée.

La caractéristique $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque est une équation non linéaire à plusieurs variables, certaines variables sont fournies par les fabricants, d'autres sont prises comme constantes mais d'autres encore restent à calculer.

VI-3-1- Détermination des paramètres inconnus :

Le nombre des paramètres varie selon le modèle choisi, dans notre travail on a adapté le modèle à une seule diode où les paramètres à évaluer sont : I_{ph} , I_s , R_s , et R_{sh} .

a- Détermination de I_{ph} :

D'après la figure (VI-1), (modèle idéal: $R_s = 0$ et $R_{sh} = \infty$), le courant de sortie I aux conditions standards (STC) est donné par :

$$I = I_{ph0} - I_{s0} \left[\exp\left(\frac{V}{a \cdot V_{t0}}\right) - 1 \right] \quad (\text{VI-2})$$

Cette équation permet la quantification du photocourant I_{ph0} qui ne peut pas être déterminé autrement.

En utilisant la condition où la cellule PV est court-circuitée ($I = I_{cc}$ et $V = 0$), l'équation (VI-2) devient alors :

$$I_{cc} = I_{ph0} - I_{s0} \left[\exp\left(\frac{0}{a \cdot V_{t0}}\right) - 1 \right] = I_{ph0} \quad (\text{VI-3})$$

$$I_{cc} \approx I_{ph0} \quad (\text{VI-4})$$

Notons que cette équation n'est valable que dans le cas idéal. D'autre part, la dépendance du photocourant de l'irradiation et de la température nous permet d'avoir la relation suivante :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_0} (I_{ph0} + K_i \cdot \Delta T) \quad (\text{VI-5})$$

Où :

G : L'irradiation (W/m^2).

G_0 : L'irradiation aux STC=1000 W/m^2 .

I_{ph0} : Photocourant (A) généré par la lumière aux STC.

K_i : Coefficient du courant de court-circuit (mA/K), fourni par le fabricant.

$\Delta T = T - T_0$ (En Kelvin, $T_0 = 25^\circ C$).

b- Détermination de I_s :

Généralement la résistance R_{sh} est supposée très grande, donc en éliminant le dernier terme de l'équation (VI-1), il s'ensuit :

$$I = I_{ph0} - I_{s0} \left[\exp\left(\frac{V+R_s I}{a.Vt_0}\right) - 1 \right] \quad (VI-6)$$

En utilisant maintenant la condition où la cellule PV est en circuit ouvert ($I = 0$ et $V = V_{co}$), on peut écrire :

$$0 = I_{ph0} - I_{s0} \left[\exp\left(\frac{V_{co}}{a.Vt_0}\right) - 1 \right] \quad (VI-7)$$

$$I_{s0} = \frac{I_{ph0}}{\left[\exp\left(\frac{V_{co}}{a.Vt_0}\right) - 1 \right]} \quad (VI-8)$$

$$I_{s0} = \frac{I_{cc}}{\left[\exp\left(\frac{V_{co}}{a.Vt_0}\right) - 1 \right]} \quad (VI-9)$$

D'un autre côté, le courant de saturation I_s est défini par :

$$I_s = DT^3 \exp\left(\frac{-qE_g}{a.k.T}\right) \quad (VI-10)$$

Avec :

D : Facteur de diffusion de la diode.

E_g : L'énergie du gap (eV) du matériau considéré, (1.12 eV pour le silicium).

Afin de se débarrasser du facteur de diffusion D de la diode, apparu dans l'équation (VI-10), il faut réécrire cette équation à T_0 et faire le rapport entre les deux. Ainsi, l'expression obtenue est :

$$I_s = I_{s0} \left(\frac{T}{T_0}\right)^3 \exp\left(\frac{qE_g}{a.k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right) \quad (VI-11)$$

c- Détermination de R_s et R_{sh} :

En réalité, il est impossible de négliger la résistance série R_s et la résistance parallèle R_{sh} à cause de leur impact sur l'efficacité de la cellule PV. Dans notre démarche on a procédé deux cas distincts ; un cas auquel on n'a pris en considération que de la résistance R_s , le terme $\frac{V+R_s.I}{R_{sh}}$ étant négligé du fait que la résistance R_{sh} est très grande, et le deuxième cas où les deux résistances ont été calculées simultanément sans s'éloigner de la réalité, par la méthode qu'on va décrire ultérieurement.

▪ 1^{er} Cas : Calcul de R_s en posant $R_{sh} \gg$

Du fait que les valeurs de la tension et du courant à puissance maximale (V_{pm} et I_{pm}) sont disponibles dans les fiches techniques, on peut alors s'en servir pour évaluer l'équation subséquente :

$$I_{pm} = I_{ph0} - I_{s0} \left[\exp \left(\frac{V_{pm} + R_s I_{pm}}{a.Vt0} \right) - 1 \right] \quad (\text{VI-12})$$

Puisque $\exp \left(\frac{V_{pm} + R_s I_{pm}}{a.Vtn} \right) \gg 1$, l'équation précédente peut être simplifiée comme suit :

$$I_{pm} = I_{ph0} - I_{s0} \exp \left(\frac{V_{pm} + R_s I_{pm}}{a.Vt0} \right) \quad (\text{VI-13})$$

On peut donc déterminer la valeur de la résistance série R_s :

$$R_s = \frac{a.Vt0 \cdot \ln \left(\frac{I_{ph0} - I_{pm}}{I_{s0}} \right) - V_{pm}}{I_{pm}} \quad (\text{VI-14})$$

▪ 2^{ème} Cas : Calcul de R_s et R_{sh}

Afin que le modèle proposé soit plus authentique, R_s et R_{sh} sont choisies astucieusement de façon à rendre la puissance maximale calculée $P_{max,c}$ égale à la puissance de crête expérimentale $P_{max,ex}$ fournie par les fabricants. Ainsi il est possible d'écrire l'équation suivante :

$$I_{pm} = \frac{P_{max,c}}{V_{pm}} = \frac{P_{max,ex}}{V_{pm}} \quad (\text{VI-15})$$

$$I_{pm} = I_{ph0} - I_{s0} \left[\exp \left(\frac{V_{pm} + R_s I_{pm}}{a.Vt} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I_{pm}}{R_{sh}} \quad (\text{VI-16})$$

$$\frac{P_{max,c}}{V_{pm}} = I_{ph0} - I_{s0} \left[\exp\left(\frac{V_{pm} + R_s I_{pm}}{a.Vt}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I_{pm}}{R_{sh}} \quad (VI-17)$$

$$R_{sh} = \frac{V + R_s I_{pm}}{I_{ph0} - I_{s0} \left[\exp\left(\frac{V_{pm} + R_s I_{pm}}{a.Vt}\right) - 1 \right] - \frac{P_{max,c}}{V_{pm}}} \quad (VI-18)$$

La valeur initiale de R_{sh} correspondante à la pente du segment de ligne entre le point du court-circuit ($0, I_{cc}$) et le point de puissance maximale (V_{pm}, I_{pm}) est déterminée à partir de cette équation pour $R_s = 0$. Ces deux valeurs sont par la suite incrémentées simultanément jusqu'à ce que la puissance maximale modélisée soit égale à celle disponible dans la fiche technique du fabricant.

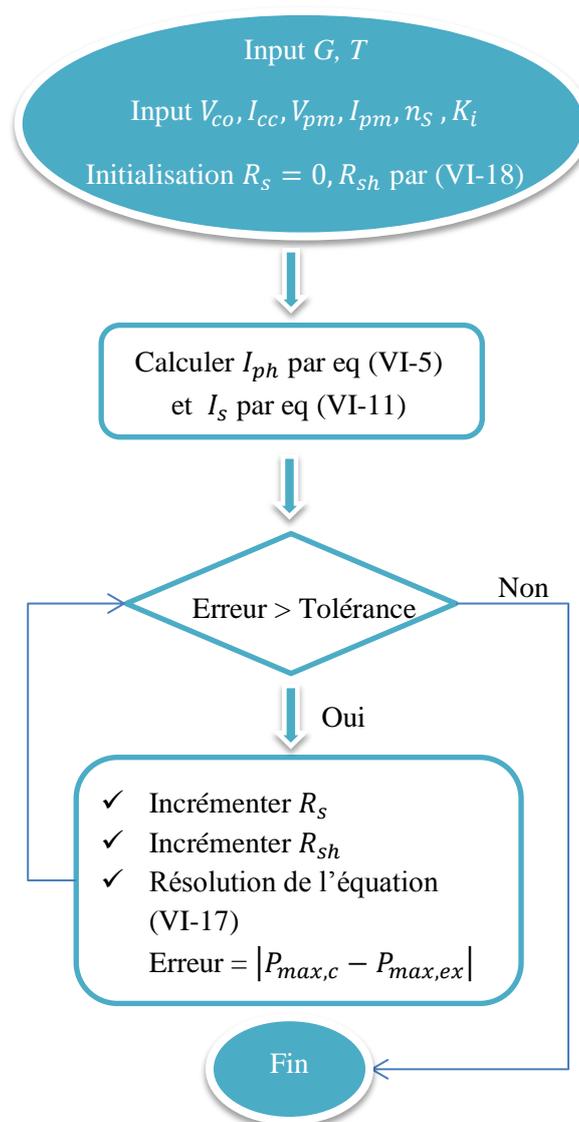


Figure VI-3 : Diagramme de l'algorithme correspondant.

VI-3-2- Modules photovoltaïques choisis:

Les données simulées (théoriquement) au préalable doivent être confrontées aux données expérimentales afin de pouvoir se prononcer sur leur validité et leur précision. Pour cela, trois modèles qui font partie de la technologie « *SunPower* » ont été choisis pour mener à bien cette étude.

Dotés de cellules monocristallines à haut rendement et de la technologie « *back-contact* » (connexion des cellules à l'arrière du panneau), les panneaux photovoltaïques « *SunPower* » offrent le meilleur rendement du marché.

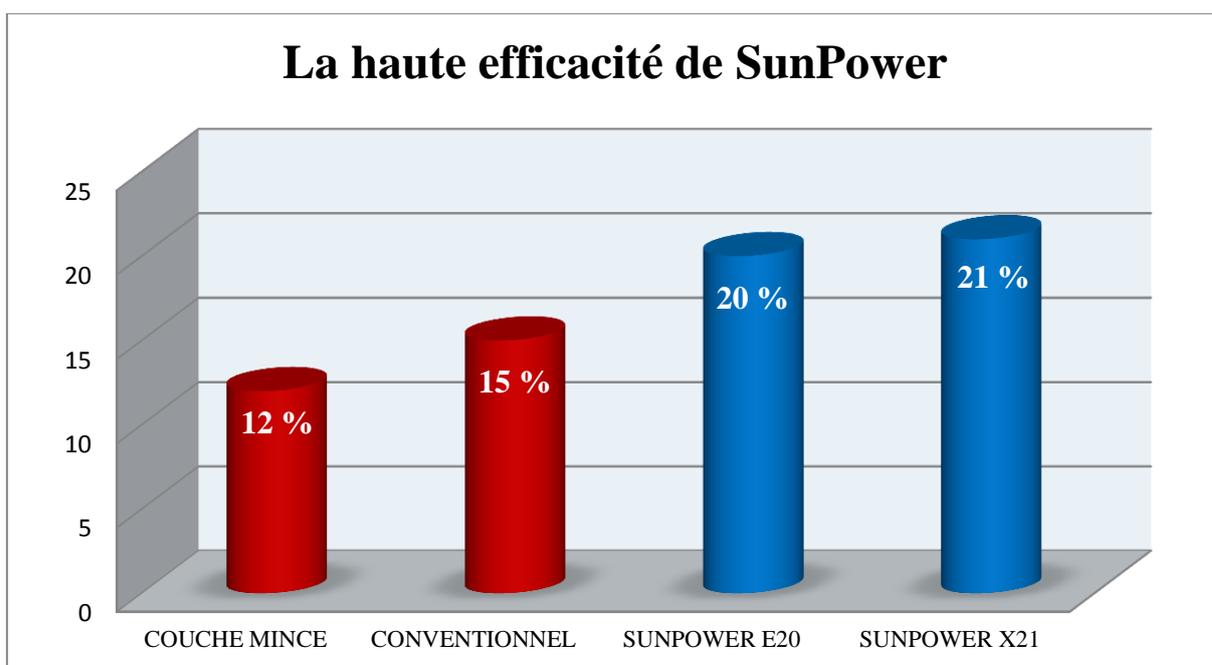


Figure VI-4 : Rendement des panneaux SunPower comparé aux autres technologies.

Les produits *Sunpower* sont les détenteurs du record mondial de production d'énergie grâce à la technologie *Maxeon* et l'utilisation de silicium de très haute qualité. Leur rendement est le plus élevé au monde, jusqu'à 50% de plus que les autres modules (entre 7 et 9% de kWh en plus par watt installé).

<i>Paramètres</i>	<i>Technologie (monocristallin)</i>		
	<i>SPR-333NE-WHT-D</i>	<i>SPR-305NE-BLK-D</i>	<i>E20-245</i>
<i>Puissance maximale (Pmax)</i>	333W	305W	245W
<i>Tension à Pmax (Vpm)</i>	54.7V	54.7V	40.5V
<i>Courant à Pmax (Ipm)</i>	6.09A	5.58A	6.05A
<i>Tension à circuit ouvert (Vco)</i>	65.3V	64.2V	48.8V
<i>Courant de court-circuit (Icc)</i>	6.46A	5.96A	6.43A
<i>Nombre de cellules (n_s)</i>	96	96	96
<i>Coefficient du courant de court-circuit (Ki)</i>	0.0035 A/K	0.0035 A/K	0.0035 A/K
<i>Coefficient de tension de circuit ouvert (Kv)</i>	-0.1766 V/K	-0.1766 V/K	-0.1325 V/K

Tableau VI-1: Caractéristiques des trois modules sélectionnés pour simulation.

a- Simulation avec le modèle R_s :

Après avoir calculé les trois paramètres inconnus (I_{ph} , I_s , et R_s) dans un script Matlab, les deux dernières valeurs sont affectées respectivement aux paramètres des blocs (diode et résistance R_s). Ainsi, il faut préciser la température de mesure T et le nombre de cellules n_s dans le bloc « Diode ».

Puisque ce modèle ne tient compte que de la résistance série ($R_{sh} \gg$), il semble alors raisonnable qu' une valeur de 1MOhm soit affectée au paramètre résistance dans le bloc de R_{sh} .

Le tableau suivant énumère les paramètres utilisés pour le modèle courant et ceux calculés numériquement à savoir (I_{ph} , I_s , et R_s). La valeur 1 est affectée par défaut au facteur d'idéalité a .

Paramètres	Technologie (monocristallin)		
	SPR-333NE-WHT-D	SPR-305NE-BLK-D	E20-245
V_{pm} (V)	54.7V	54.7V	40.5V
I_{pm} (A)	6.09A	5.58A	6.05A
V_{co} (V)	65.3V	64.2V	48.8V
I_{cc} (A)	6.46A	5.96A	6.43A
I_{ph} (A)	6.46A	5.96A	6.43A
I_s (A)	2.0738×10^{-11}	2.9881×10^{-11}	1.6554×10^{-8}
a	1	1	1
R_s (Ω)	0.5818	0.4853	0.2183

 Tableau VI-2: Paramètres pour le modèle R_s .

b- Simulation avec le modèle R_{sh} :

Le tableau suivant présente les paramètres de 2^{ème} modèle où les deux résistances ont été introduites :

Paramètres	Technologie (monocristallin)		
	SPR-333NE-WHT-D	SPR-305NE-BLK-D	E20-245
V_{pm} (V)	54.7V	54.7V	40.5V
I_{pm} (A)	6.09A	5.58A	6.05A
V_{co} (V)	65.3V	64.2V	48.8V
I_{cc} (A)	6.46A	5.96A	6.43A
I_{ph} (A)	6.46A	5.96A	6.43A
I_s (A)	2.0738×10^{-11}	2.9881×10^{-11}	1.6554×10^{-8}
a	1	1	1
R_s (Ω)	0.3900	0.3800	0.1700
R_{sh} (Ω)	402.4930	671.1936	964.5362

 Tableau VI-3: Paramètres pour le modèle R_{sh} .

VI-3-3- Création du modèle de panneau PV :

Une fois que les paramètres inconnus des deux modèles R_s et R_{sh} ont été déterminés, il reste à savoir lequel des deux s'accorde mieux au comportement d'un module PV.

Le modèle de la cellule PV créée ne suffit pas pour visualiser les courbes relatives aux différentes caractéristiques, il faut absolument le compléter comme l'indique la figure (VI-5) et le tableau (VI-4), afin de simuler le fonctionnement d'un panneau PV, et de reproduire la réalité expérimentale.

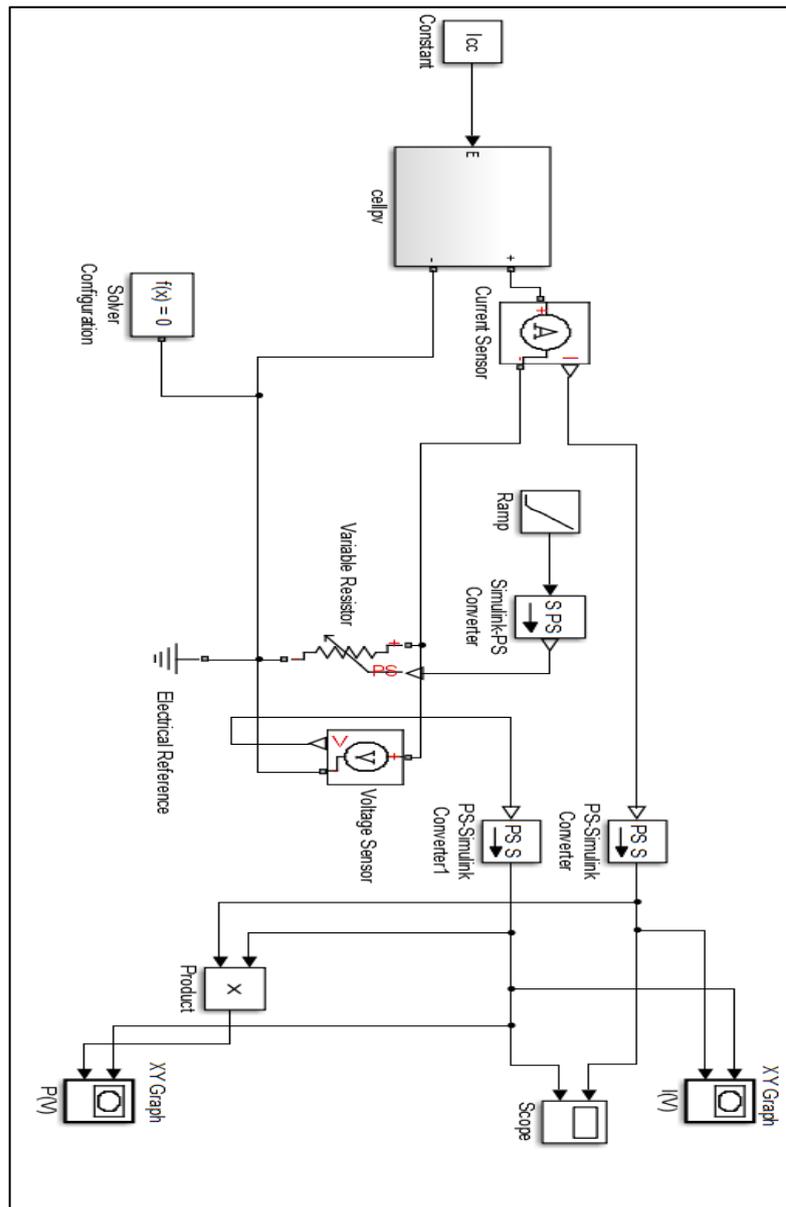


Figure VI-5: Schéma de la cellule photovoltaïque simulée.

Les éléments intégrés au panneau sont les suivants :

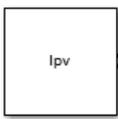
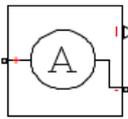
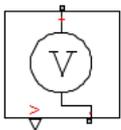
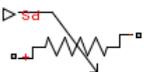
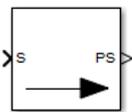
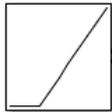
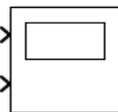
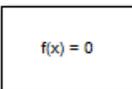
Bloc	Nomenclature	Fonction
	Constant	➤ Génère une valeur constante.
	Current Sensor	➤ Converti le courant mesuré dans n'importe quel branchement électrique en un signal physique proportionnel au courant.
	Voltage Sensor	➤ Converti la tension mesurée en un signal physique proportionnel à la tension.
	Variable Resistor	➤ Modélise une résistance linéaire variable.
	Simulink-PS Convertir	➤ Converti le signal d'entrée en un signal physique.
	Ramp	➤ Génère un signal linéairement variable.
	PS-Simulink Convertir	➤ Converti un signal physique en un signal de sortie.
	Scope	➤ Affiche les signaux générés durant la simulation.
	Electrical Reference	➤ Simule la mise à terre.
	Solver Configuration	➤ Spécifie les paramètres du modèle et les méthodes de résolution du système.
	XY Graph	➤ Permet de tracer la courbe Y(X)

Tableau VI-4: Description des éléments intégrés au panneau.

La valeur I_{ph} qui correspond à une irradiation de 1000W/m^2 est affectée au bloc « constant » et la durée de la simulation est ajustée à 100s.

VI-4- Résultats de la simulation :

VI-4-1- Courbes obtenues pour le modèle R_s :

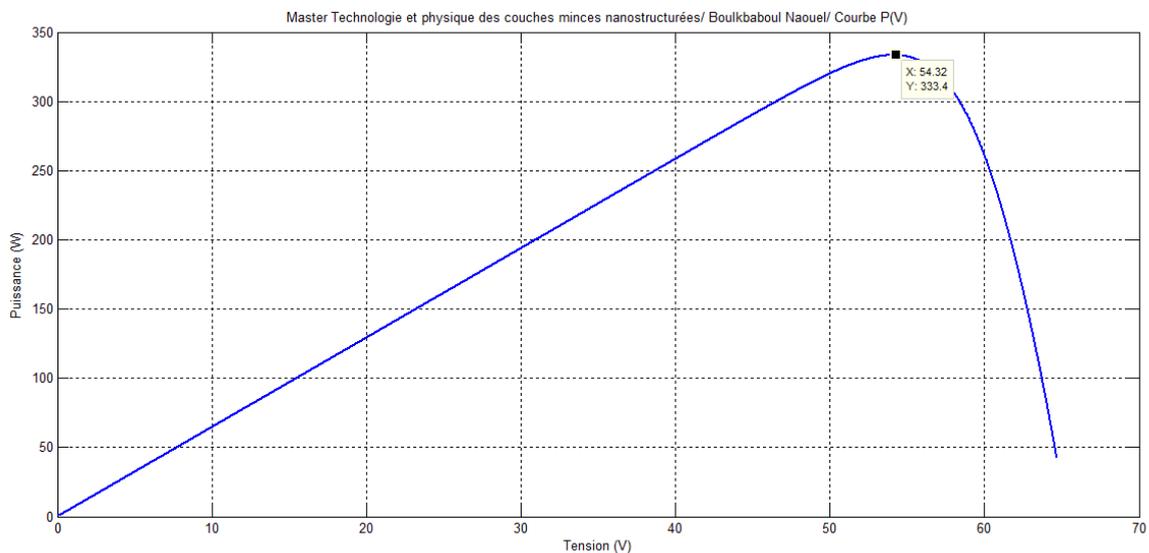


Figure VI-6: Simulation de la caractéristique $P(V)$, ($T=25^\circ\text{C}$, $G=1000\text{W/m}^2$) correspondante au module SPR-333NE-WHT-D (modèle R_s).

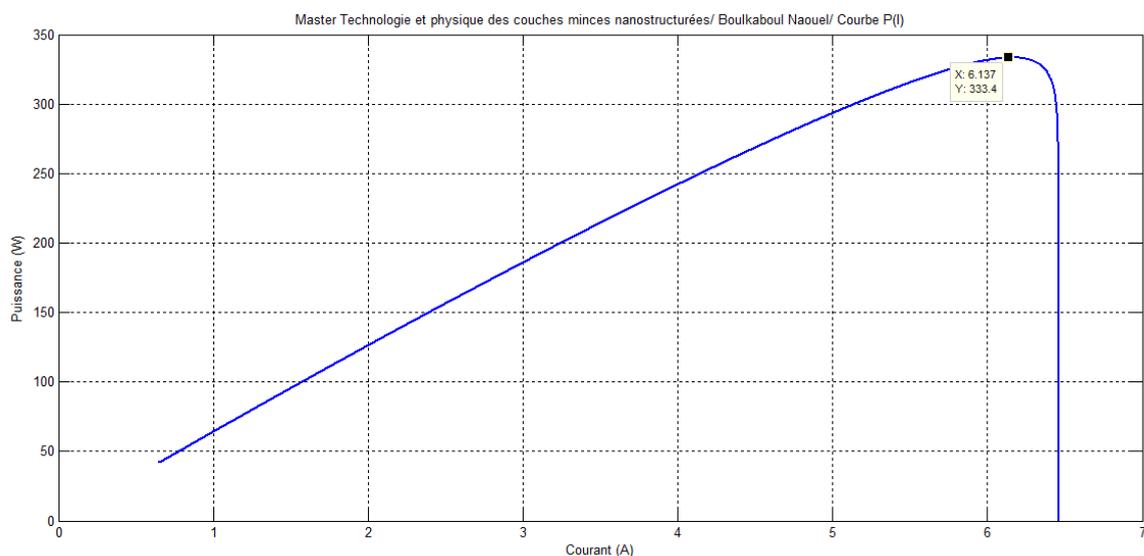


Figure VI-7: Simulation de la caractéristique $P(I)$, ($T=25^\circ\text{C}$, $G=1000\text{W/m}^2$) correspondante au module SPR-333NE-WHT-D (modèle R_s).

VI-4-2- Courbes obtenues pour le modèle R_{sh} :

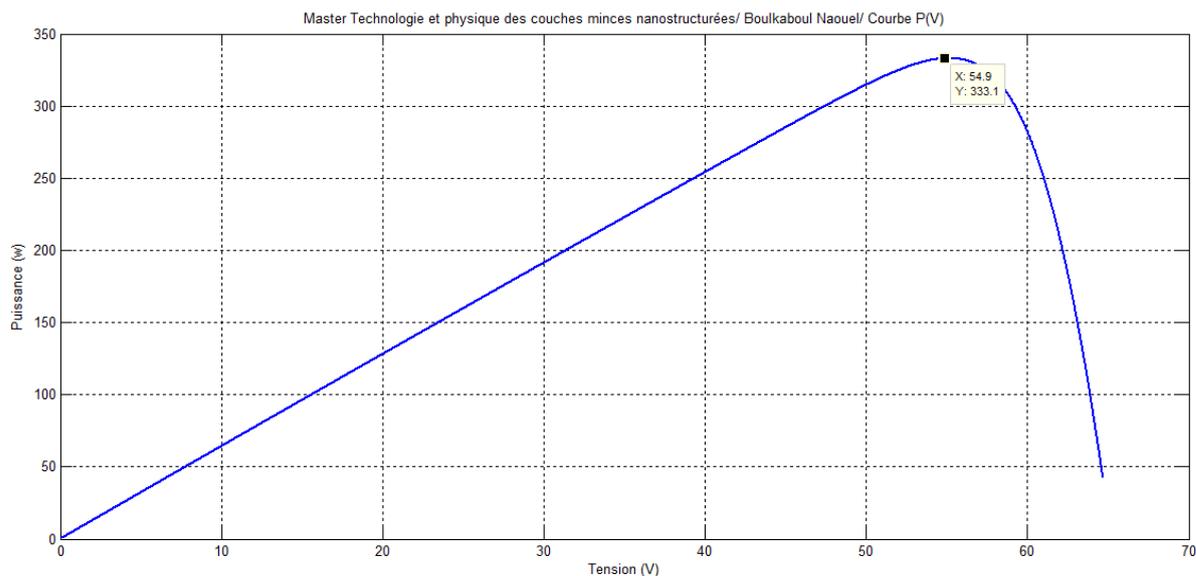


Figure VI-8: Simulation de la caractéristique $P(V)$, ($T=25^{\circ}C$, $G=1000W/m^2$)
correspondante au module SPR-333NE-WHT-D (modèle R_{sh}).

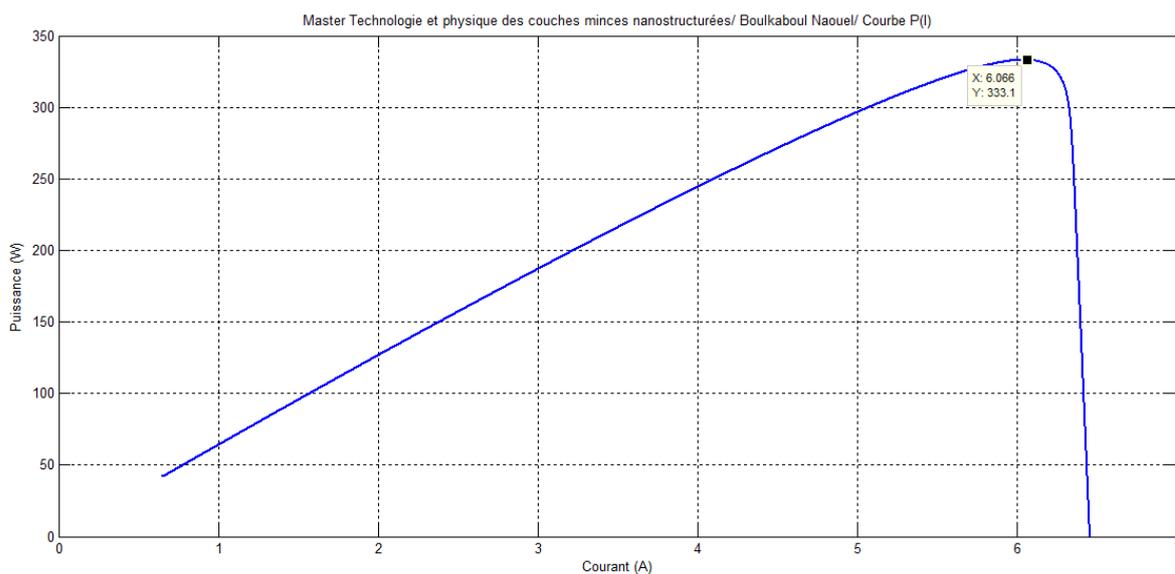


Figure VI-9: Simulation de la caractéristique $P(I)$, ($T=25^{\circ}C$, $G=1000W/m^2$)
correspondante au module SPR-333NE-WHT-D (modèle R_{sh}).

Le tableau suivant résume les résultats obtenus par simulation des paramètres (P_{max} , V_{pm} et I_{pm}) pour les deux modèles (R_s et R_{sh}), et ceux fournis par les constructeurs afin de permettre une comparaison directe.

	Paramètres	Technologie (monocristallin)								
		SPR-333NE-WHT-D			SPR-305NE-BLK-D			E20-245		
		P_{max} (W)	V_{pm} (V)	I_{pm} (A)	P_{max} (W)	V_{pm} (V)	I_{pm} (A)	P_{max} (W)	V_{pm} (V)	I_{pm} (A)
	Constructeur	333	54.7	6.09	305	54.7	5.58	245	40.5	6.05
Modèle R_s (Ω)	Simulation	333.4	54.32	6.137	306	54.09	5.656	244.9	40.5	6.05
	Erreur (%)	0.12	0.695	0.772	0.327	1.12	0.241	0.04	0	0
Modèle R_{sh} (Ω)	Simulation	333.1	54.9	6.066	305	54.59	5.586	245	40.59	6.035
	Erreur (%)	0.03	0.366	0.394	0	0.201	0.108	0	0.222	0.248

Tableau VI-5 : Comparaison des paramètres de la simulation avec les paramètres expérimentaux.

L'analyse de ces résultats montre clairement que notre simulation reproduit avec fidélité les caractéristiques des modèles fabriqués, et ce, avec une grande précision. En plus, l'exploitation des erreurs relatives indique que le modèle R_{sh} est le mieux adapté dans ce cas.

Il est à noter que les versions récentes de Matlab offre une autre possibilité de simulation des cellules solaires, et ce, à travers un composant « *Solar Cell* » disponible dans la librairie Simscape de Simulink. De ce fait, nous avons essayé par curiosité de voir l'effet de substitution du modèle de circuit équivalent par ce composant dans le schéma du panneau PV (figure VI-10).

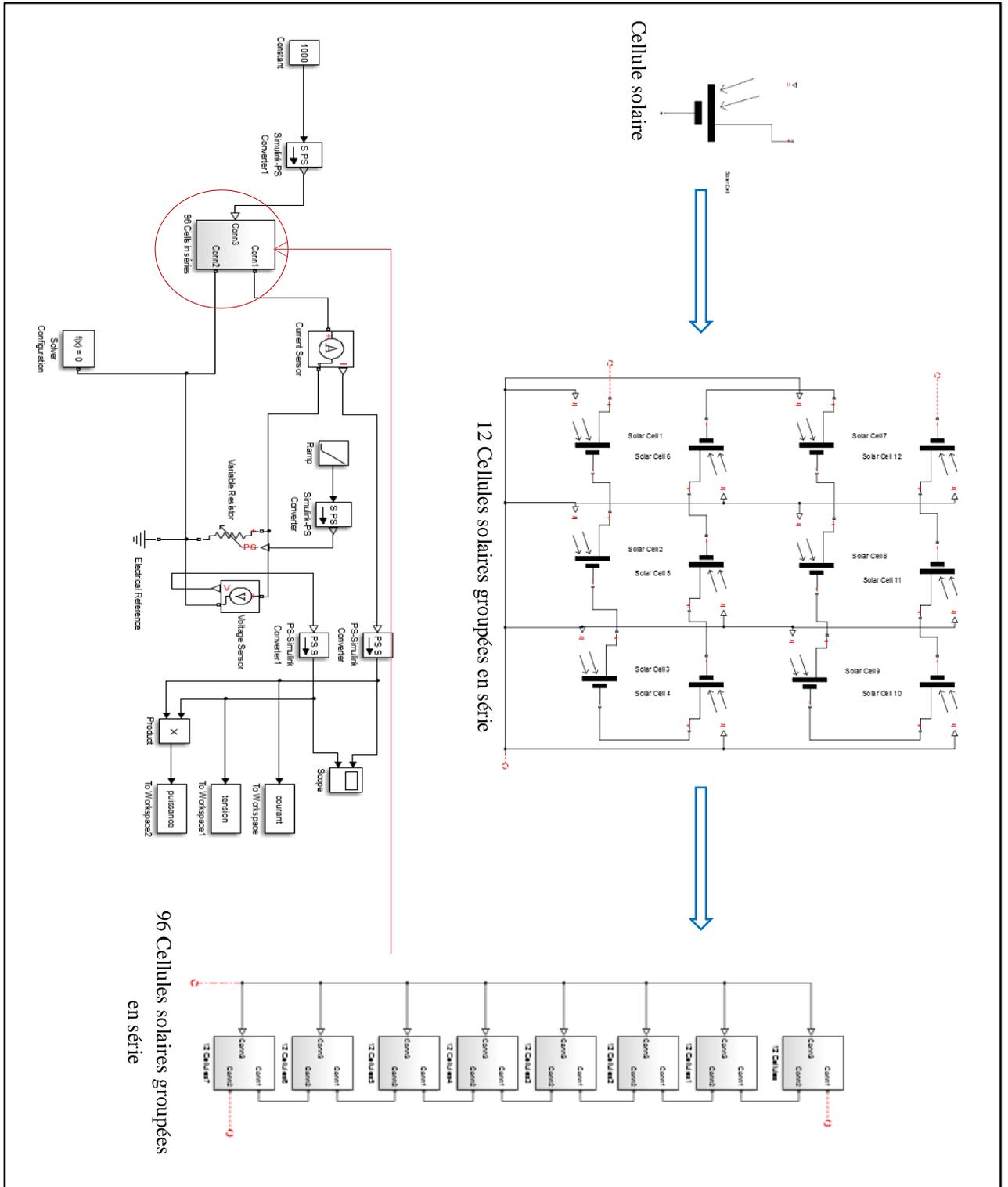


Figure VI-10: Création d'un module composé de 96 cellules en série à partir du bloc « Solar Cell ».

Paramètres	Technologie (monocristallin)								
	Modèle Rsh (Ω)						Modèle Rs(Ω)		
	SPR-333NE-WHT-D			SPR-305NE-BLK-D			E20-245		
	Pmax (W)	Vpm (V)	Ipm (A)	Pmax (W)	Vpm (V)	Ipm (A)	Pmax (W)	Vpm (V)	Ipm (A)
Constructeur	333	54.7	6.09	305	54.7	5.58	245	40.5	6.05
Simulation	333.1	54.9	6.067	305	54.59	5.586	245	40.5	6.05
Erreur (%)	0.03	0.366	0.378	0	0.201	0.108	0	0	0

Tableau VI-6 : Comparaison des paramètres de la simulation avec les paramètres expérimentaux en utilisant un module composé de 96 cellules en série à partir du bloc « Solar Cell ».

Sans surprise, nous avons obtenus des résultats identiques comme le montre le tableau VI-6.

VI-5- Influence des différents paramètres sur le comportement du panneau:

Afin d'enrichir cette étude et de compléter la simulation, il est judicieux de tenir compte de l'effet de l'irradiation, la température et les résistances série et parallèle sur le comportement du panneau PV.

Pour illustrer l'influence de ces paramètres sur les résultats obtenus, on simule un panneau photovoltaïque avec les caractéristiques du module E20-245 (figure VI-11), en faisant varier :

- L'irradiation de 200 à 1000 W/m² avec un pas de 200.
- La température de 0 °C à 75 °C avec un pas de 25.
- La résistance série : $R_s = 0 \Omega$, 0.2183 Ω et 0.4 Ω .
- La résistance parallèle : $R_{sh} = 100 \Omega$, 256.1362 Ω et 1 M Ω .

VI-5-1- Effet de l'irradiation sur le module PV :

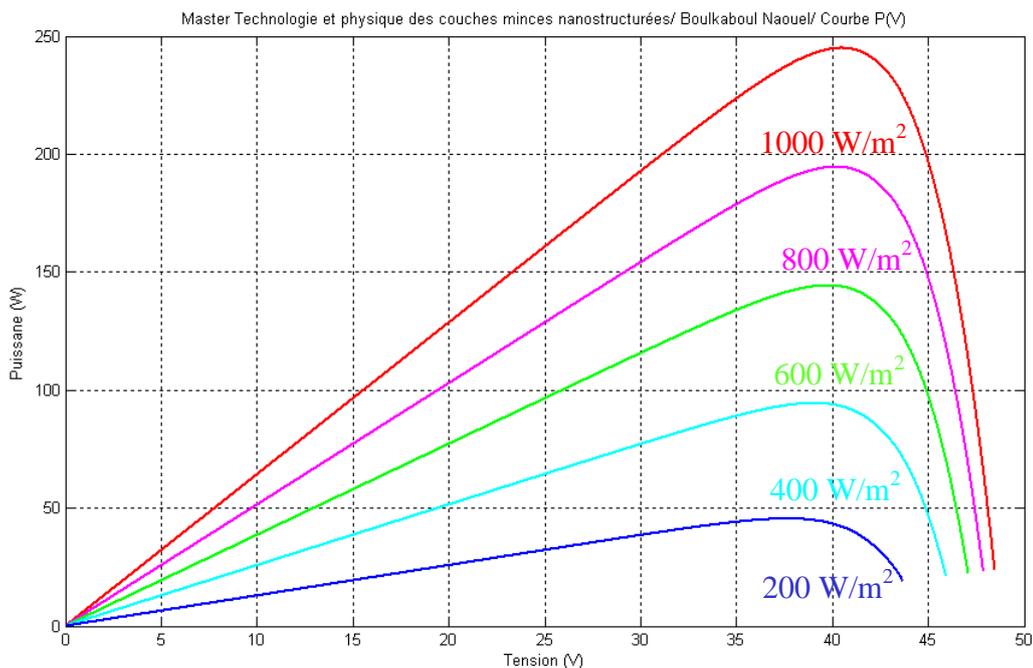


Figure VI-12: Fluctuation de la caractéristique $P(V)$ correspondante au module E20-245, pour T constante ($T=25^{\circ}C$), et G variable.

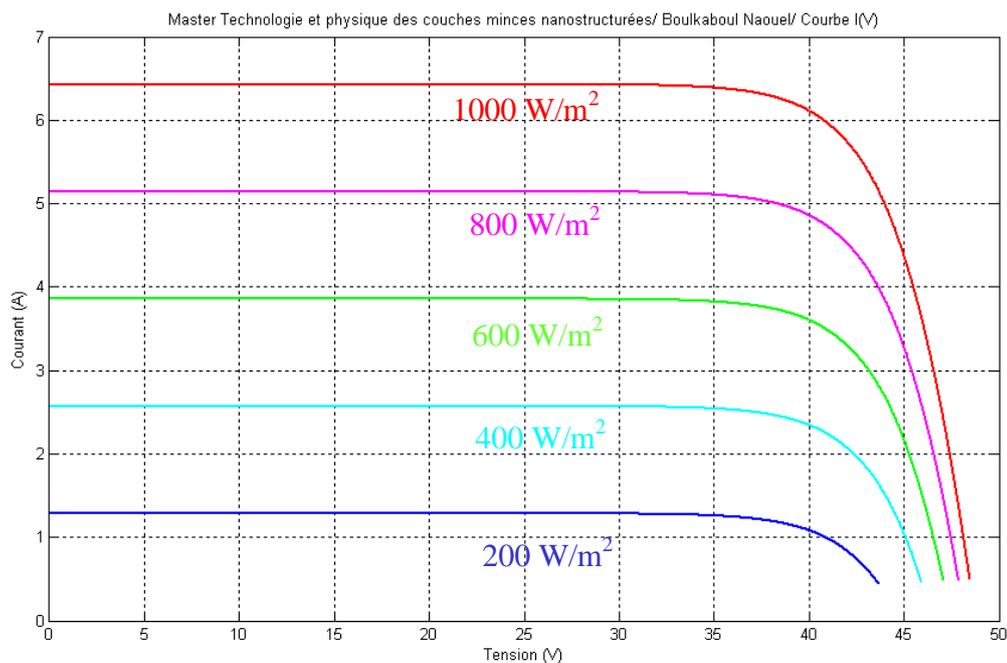


Figure VI-13: Fluctuation de la caractéristique $I(V)$ correspondante au module E20-245, pour T constante ($T=25^{\circ}C$), et G variable.

Les deux courbes nous renseignent sur l'effet remarquable de l'éclairement sur les caractéristiques $P(V)$ et $I(V)$. Ainsi le courant de court-circuit I_{cc} croît avec l'augmentation de l'irradiation.

VI-5-2- Effet de la température sur le module PV :

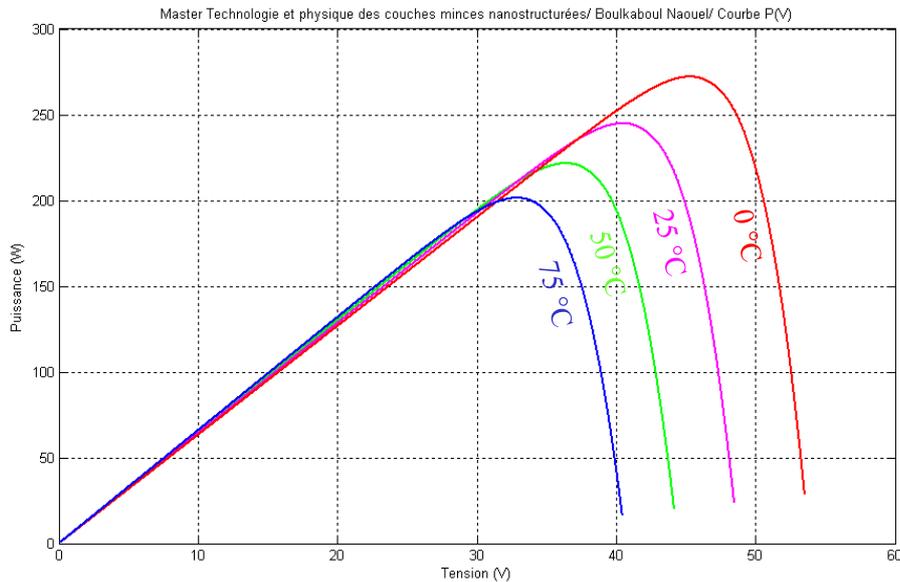


Figure VI-14: Fluctuation de la caractéristique $P(V)$ correspondante au module E20-245, pour G constante ($G=1000 \text{ W/m}^2$), et T variable.

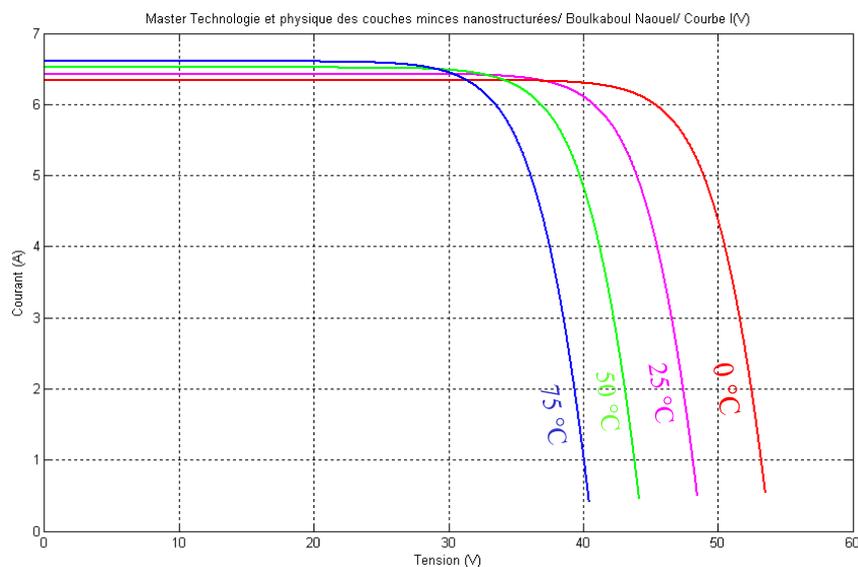


Figure VI-15: Fluctuation de la caractéristique $I(V)$ correspondante au module E20-245, pour G constante ($G=1000 \text{ W/m}^2$), et T variable.

Vraisemblablement, la température a un impact néfaste sur le comportement d'un module PV, on voit clairement d'après les courbes ci-dessus que la tension V_{co} diminue avec l'augmentation de la température contrairement au courant I_{cc} qui perçoit une légère croissance.

VI-5-3- Effet de la résistance R_s sur le module PV :

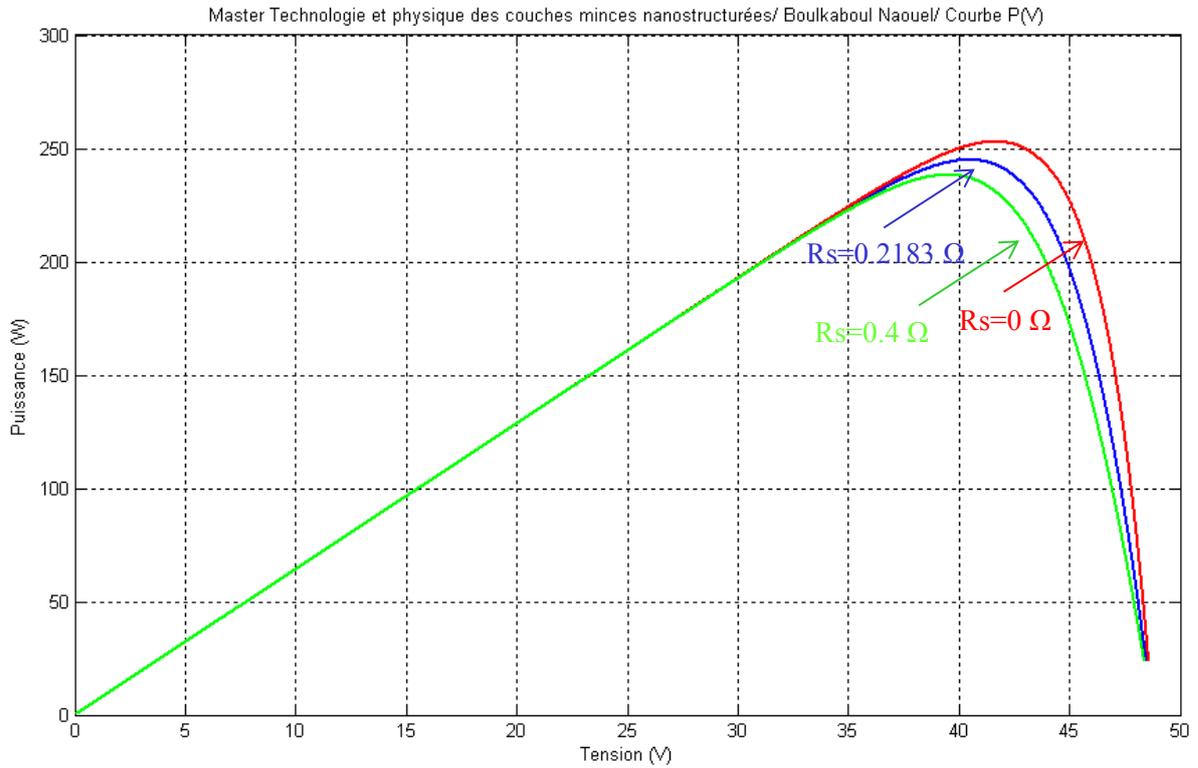


Figure VI-16: Caractéristique $P(V)$ correspondante au module E20-245, pour différentes valeurs de R_s .

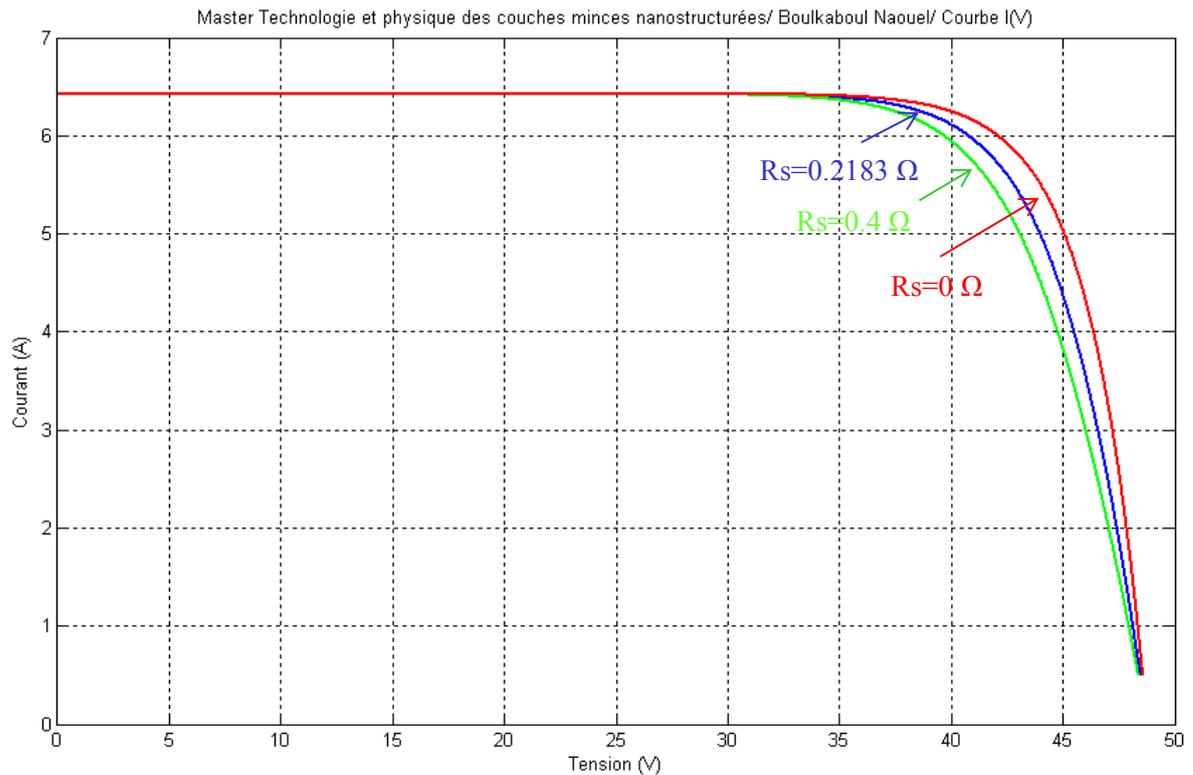


Figure VI-17: Caractéristique $I(V)$ correspondante au module E20-245, pour différentes valeurs de R_s .

En dépit du non changement de I_{cc} et V_{co} sous l'effet de la variation de R_s , la courbe s'éloigne de la forme rectangulaire quand la résistance série augmente. Donc la résistance R_s doit avoir la plus petite valeur possible afin d'obtenir un bon rendement car plus elle augmente plus les performances du module diminuent.

VI-5-4- Effet de la résistance R_{sh} sur le module PV :

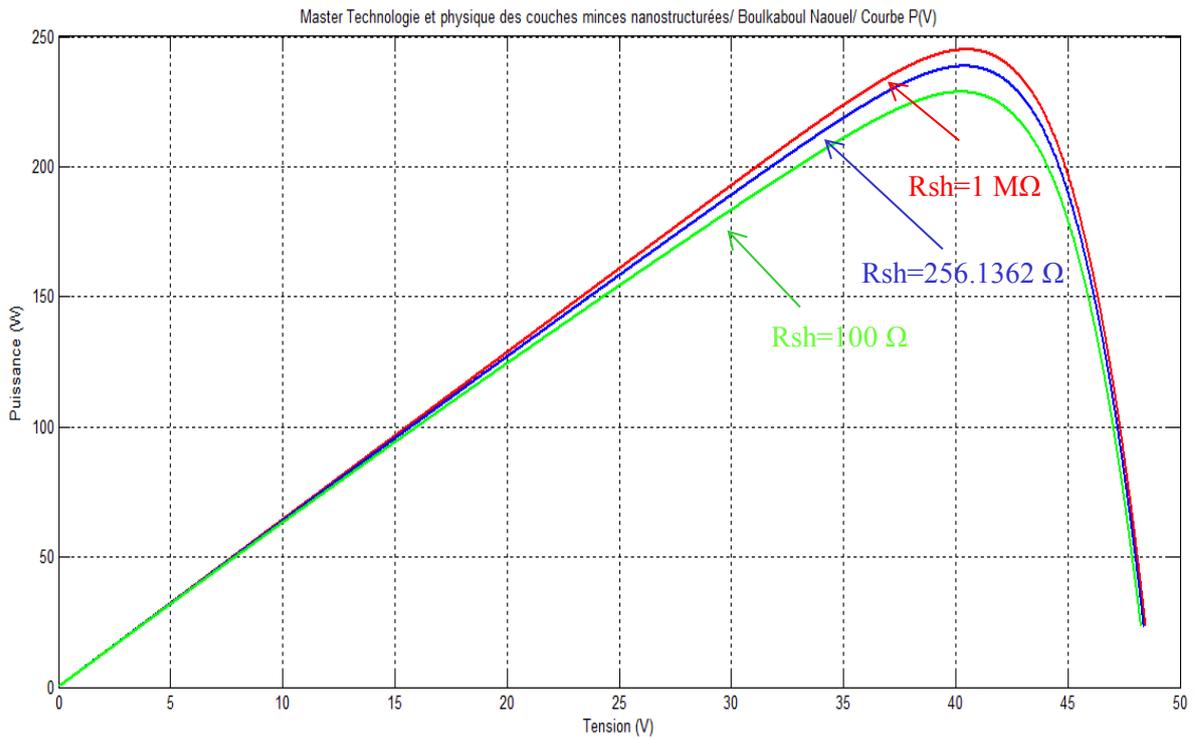


Figure VI-18: Caractéristique $P(V)$ correspondante au module E20-245, pour différentes valeurs de R_{sh} .

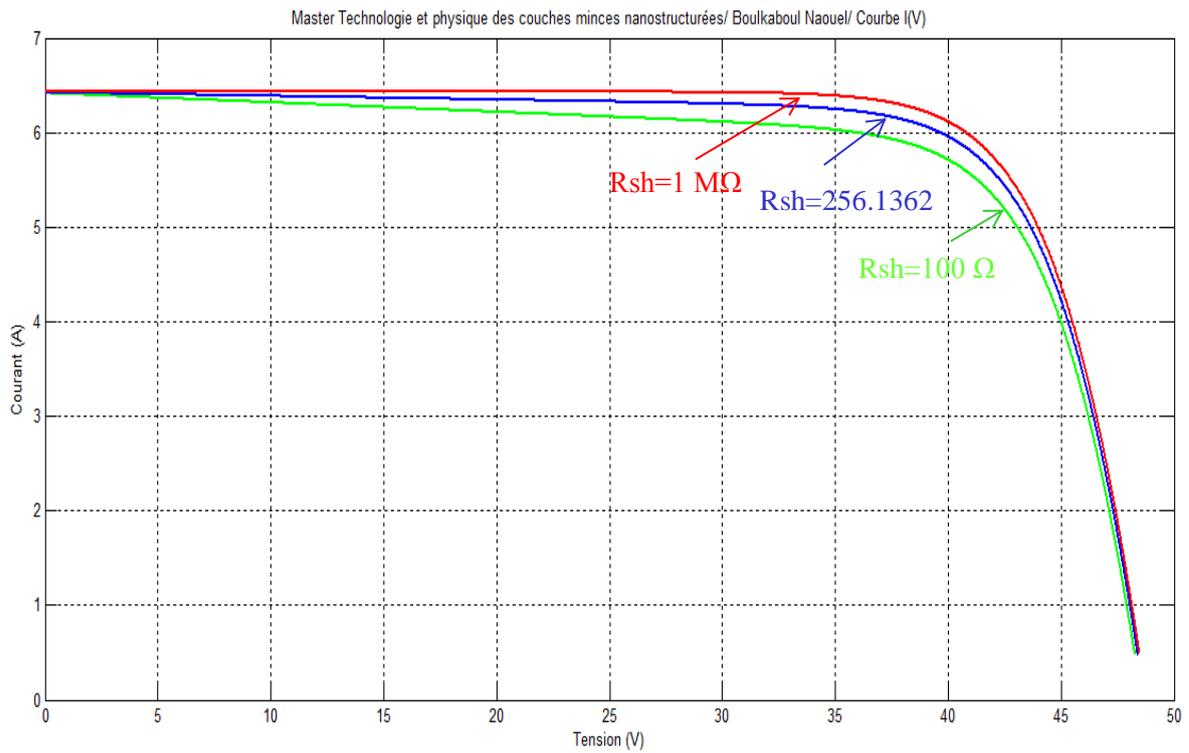


Figure VI-19: Caractéristique $I(V)$ correspondante au module E20-245, pour différentes valeurs de R_{sh} .

Les performances du module PV varie proportionnellement avec la résistance R_{sh} , donc il est indispensable qu'elle soit la plus grande que possible pour offrir le meilleur rendement.



CONCLUSION

Le monde que nous avons créé est le résultat de notre niveau de réflexion, mais les problèmes qu'il engendre ne sauraient être résolus à ce même niveau.

ALBERT EINSTEIN

Conclusion générale

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie renouvelable qui provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein des matériaux bien particuliers tels que les semi-conducteurs (le Silicium, le Germanium, ...).

Dans ce domaine, la modélisation du fonctionnement électrique des modules photovoltaïques (PV) est indispensable. Ceci permettra d'une part de qualifier le processus technologique de réalisation des cellules PV, et d'autre part, d'analyser le fonctionnement optimal.

Dans la partie simulation que nous avons réalisée, on a étudié les caractéristiques $I(V)$, $P(V)$ à différentes zones de fonctionnement des panneaux solaires photovoltaïque par le groupement de cellules photovoltaïques en série et parallèle.

L'implémentation des schémas équivalents traduisant le principe de fonctionnement des modules PV dans l'environnement Matlab/Simulink (utilisé par une grande majorité des chercheurs et ingénieurs), permet une simulation fiable et utile pour les concepteurs de modules photovoltaïques.

Cette simulation a permis aussi de déterminer l'influence des conditions météorologiques (éclairage et température) sur les caractéristiques $I(V)$ des modules PV.

Les résultats obtenus ont reflété avec une grande précision et fidélité les caractéristiques électriques (valeurs expérimentales) fournies par les constructeurs de différents modèles de panneaux photovoltaïques existants sur le marché.

ANNEXE**FICHES TECHNIQUES DES DIFFERENTS MODULES PV UTILISES
1- MODULES PV SPR-333NE-WHT****SUNPOWER**

MODULES SOLAIRES E20/333 et E20/327

RENDEMENT SUPÉRIEUR À 20%

Les modules SunPower E20 détiennent le rendement le plus élevé du marché et produisent, dans les mêmes conditions de surface, plus de puissance que leurs concurrents

COMPATIBILITÉ AVEC DES ONDULEURS SANS TRANSFORMATEUR

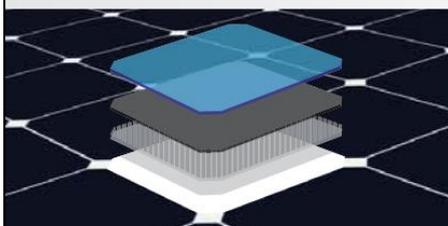
La parfaite compatibilité des onduleurs permet aux clients d'allier le très haut rendement des modules à celui des onduleurs pour optimiser la production d'énergie

TOLÉRANCE POSITIVE GARANTIE

Nos clients sont assurés, grâce à la tolérance positive, que tous les modules atteignent, ou même dépassent, leur puissance nominale

FIABILITÉ ET ROBUSTESSE

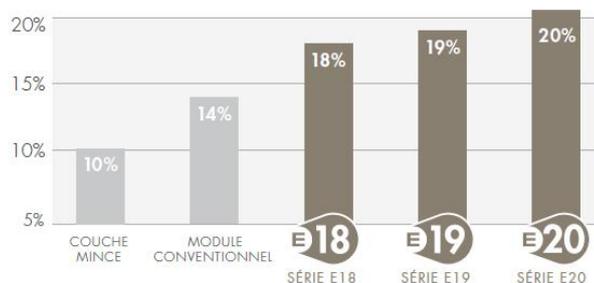
La technologie de cellules solaires Maxeon™ et la qualité de conception des modules SunPower garantissent une fiabilité de pointe

**TECHNOLOGIE MAXEON™**

Cellule solaire à contact arrière brevetée, offrant un rendement inégalé et une fiabilité optimale.

SÉRIE
E20**THE WORLD'S STANDARD FOR SOLAR™**

Les modules solaires SunPower® E20 offrent une performance et un rendement jamais atteints à ce jour. Grâce à la technologie Maxeon™ de SunPower, les modules de la série E20 offrent des rendements allant jusqu'à 20,4 %. Le faible coefficient de température, le verre antireflets et les performances exceptionnelles même à faible luminosité du E20 permettent d'obtenir une puissance remarquable par watt-crête.

L'AVANTAGE DES SOLUTIONS SUNPOWER À HAUT RENDEMENT

SUNPOWER

MODULES SOLAIRES E20/333 et E20/327

MODÈLES : SPR-333NE-WHT-D, SPR-327NE-WHT-D

CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES

Valeurs dans des conditions de test standard : ensoleillement de 1 000 W/m², AM 1,5 et température de cellule de 25 °C

Puissance nominale (+5/-0 %)	P _{nom}	333 W	327 W
Rendement (cellule)	η	22,9 %	22,5 %
Rendement (panneau)	η	20,4 %	20,1 %
Tension à puissance maximale	V _{mpp}	54,7 V	54,7 V
Courant à puissance maximale	I _{mpp}	6,09 A	5,98 A
Tension en circuit ouvert	V _{oc}	65,3 V	64,9 V
Courant de court-circuit	I _{sc}	6,46 A	6,46 A
Tension maximale du système	IEC	1 000 V	
Coefficients de température	Puissance (P)	- 0,38 %/K	
	Tension (V _{oc})	- 176,6 mV/K	
	Courant (I _{sc})	3,5 mA/K	
NOCT		45° C +/- 2° C	
Calibre des fusibles série		20 A	
Valeur indicative de courant inverse Pour 3 Strings (1,25*2*I _{sc} STC)	I _k	16,2 A	
Mise à la terre		Mise à la terre du pôle positif non requise	

CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES

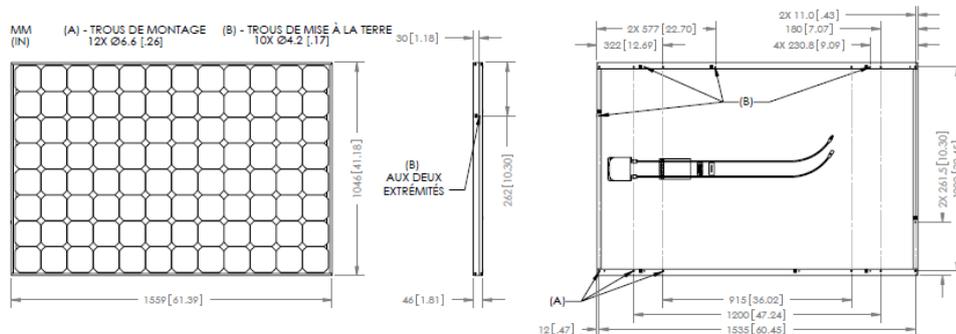
Valeurs à température nominale d'opération de la cellule (NOCT) : ensoleillement 800W/m², température 20 °C, vitesse du vent 1 m/s

Puissance nominale	P _{nom}	247 W	243 W
Tension à puissance maximale	V _{mpp}	50,4 V	50,4 V
Courant à puissance maximale	I _{mpp}	4,91 A	4,82 A
Tension en circuit ouvert	V _{oc}	61,2 V	60,8 V
Courant de court-circuit	I _{sc}	5,22 A	5,22 A

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

Cellules	96 cellules SunPower Maxeon™	Câbles de sortie	Longueur de 1 000 mm / connecteurs multicontact (MC4)
Vitre avant	Verre trempé haute transmission avec couche antireflet (AR)	Frame	Alliage d'aluminium anodisé (noir) de type 6063
Boîtier de connexion	IP-65 avec 3 diodes de dérivation (bypass) 32 x 155 x 128 mm	Poids	18,6 kg

DIMENSIONS



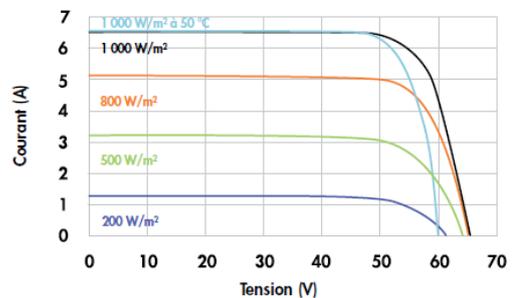
Veillez lire les consignes de sécurité et les instructions d'installation avant d'utiliser ce produit.
Pour plus d'informations, rendez-vous sur le site www.sunpowercorp.fr.

© 2012 SunPower Corporation. SUNPOWER, le logo SunPower Logo, THE WORLD'S STANDARD FOR SOLAR et MAXEON sont des marques commerciales ou marques déposées de SunPower Corporation aux États-Unis et dans d'autres pays. Tous droits réservés. Les spécifications figurant dans ce document sont susceptibles d'être modifiées sans préavis.

www.sunpowercorp.fr

Document n° 001-65483 Rev E / A4_FR
CS 12.445

COURBE TENSION/COURANT



Caractéristiques de courant/tension en fonction de l'ensoleillement et de la température du module.

CONDITIONS DE TEST

Température	- 40° C à +85° C
Charge maximale	550 kg/m ² (5 400 Pa), avant (par exemple neige) avec fixation spécifique
	245 kg/m ² (2 400 Pa) avant et arrière (par exemple vent)
Résistance à l'impact	Grêle : 25 mm à 23 m/s

GARANTIES ET CERTIFICATIONS

Garanties	25 ans sur la performance (garantie linéaire)
	25 ans sur le produit
Certifications	IEC 61215 Ed. 2, IEC 61730 (SCII)

2- MODULES PV SPR-305NE-BLK-D

SUNPOWER®

MODULE SOLAIRE E18/305

RENDEMENT SUPÉRIEUR À 18%

Les modules signature black™ de SunPower, d'apparence lisse et noire, offrent l'un des rendements les plus élevés de leur catégorie

COMPATIBILITÉ AVEC DES ONDULEURS SANS TRANSFORMATEUR

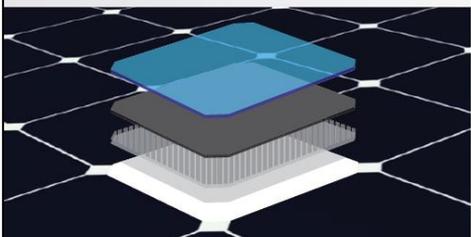
La parfaite compatibilité des onduleurs permet aux clients d'allier le très haut rendement des modules à celui des onduleurs pour optimiser la production d'énergie

COÛT D'INSTALLATION RÉDUIT

Le rendement élevé du module minimise considérablement le nombre de modules par installation. D'où une économie de temps et d'argent.

FIABILITÉ ET ROBUSTESSE

La technologie de cellules solaires Maxeon™ et la qualité de conception des modules SunPower garantissent une fiabilité de pointe

TECHNOLOGIE
MAXEON™

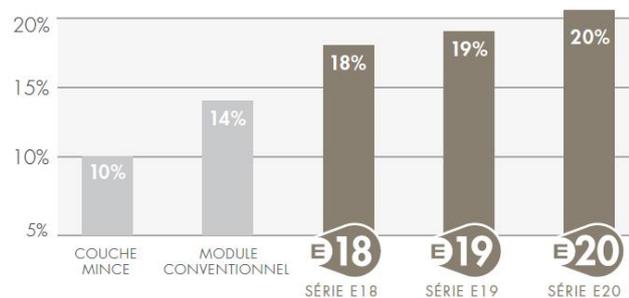
Cellule solaire à contact arrière brevetée, offrant un rendement inégalé et une fiabilité optimale.

SÉRIE
E18

THE WORLD'S STANDARD FOR SOLAR™

Les modules solaires SunPower® E18 assurent une performance et un rendement parmi les plus élevés du secteur. Grâce à la technologie Maxeon™ de SunPower, les modules de la série E18 offrent des rendements allant jusqu'à 18,7%. Le faible coefficient de température et les performances exceptionnelles même à faible luminosité du E18 permettent d'obtenir une puissance remarquable par watt-crête.

L'AVANTAGE DES SOLUTIONS SUNPOWER À HAUT RENDEMENT



SUNPOWER

MODULE SOLAIRE E18/305

MODÈLE : SPR-305NE-BLK-D

CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES

Valeurs dans des conditions de test standard : ensoleillement de 1 000 W/m², AM 1,5 et température de cellule de 25 °C

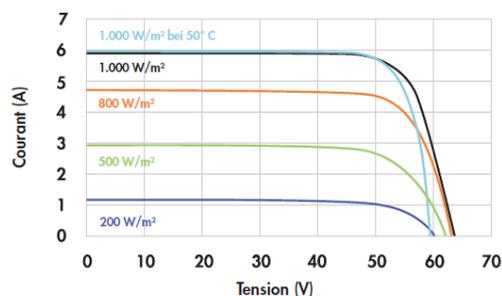
Puissance nominale (+5/- 3 %)	P _{nom}	305 W
Rendement (cellule)	η	22,6 %
Rendement (panneau)	η	18,7 %
Tension à puissance maximale	V _{mpp}	54,7 V
Courant à puissance maximale	I _{mpp}	5,58 A
Tension en circuit ouvert	V _{oc}	64,2 V
Courant de court-circuit	I _{sc}	5,96 A
Tension maximale du système	IEC	1.000 V
Coefficients de température	Puissance (P)	- 0,38 %/K
	Tension (V _{oc})	- 176,6 mV/K
	Courant (I _{sc})	3,5 mA/K
NOCT		46°C +/- 2°C
Calibre des fusibles série		20 A
Valeur indicative de courant inverse Pour 3 Strings (1,25*2*I _{sc} STC)	I _z	14,9 A
Mise à la terre		Mise à la terre du pôle positif non requise

CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES

Valeurs à température nominale d'opération de la cellule (NOCT) : ensoleillement 800W/m², température 20 °C, vitesse du vent 1 m/s

Puissance nominale	P _{nom}	226 W
Tension à puissance maximale	V _{mpp}	50,2 V
Courant à puissance maximale	I _{mpp}	4,49 A
Tension en circuit ouvert	V _{oc}	60,0 V
Courant de court-circuit	I _{sc}	4,83 A

COURBE TENSION/COURANT



Caractéristiques de courant/tension en fonction de l'ensoleillement et de la température du module.

CONDITIONS DE TEST

Température	- 40 °C à +85 °C
Charge maximale	550 kg/m ² (5 400 Pa), avant (par exemple neige) avec fixation spécifique 245 kg/m ² (2 400 Pa) avant et arrière (par exemple vent)
Résistance à l'impact	Grêle : 25 mm à 23 m/s

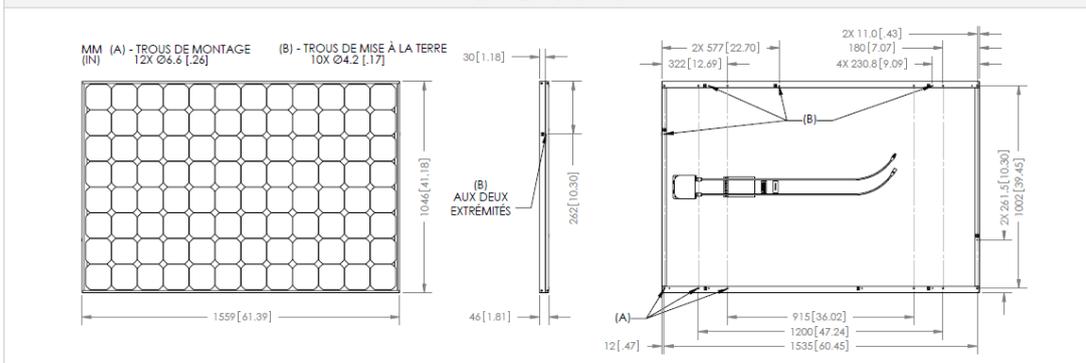
GARANTIES ET CERTIFICATIONS

Garanties	25 ans sur la performance (garantie linéaire) 25 ans sur le produit
Certifications	IEC 61215 Ed. 2, IEC 61730 (SCII)

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

Cellules	96 cellules SunPower Maxeon™	Câbles de sortie	Longueur de 1 000 mm / Connecteurs Amphenol (Helios H4)
Vitre avant	Verre trempé haute transmission	Cadre	Alliage d'aluminium anodisé (noir) de type 6063
Boîtier de connexion	IP-65 avec 3 diodes de dérivation (bypass) 32 x 155 x 128 mm	Poids	18,6 kg

DIMENSIONS



Veuillez lire les signes de sécurité et les instructions d'installation avant d'utiliser ce produit.
Pour plus d'informations, rendez-vous sur le site www.sunpowercorp.fr.

© 2012 SunPower Corporation. SUNPOWER, le logo SunPower Logo, THE WORLD'S STANDARD FOR SOLAR et MAXEON sont des marques commerciales ou marques déposées de SunPower Corporation aux États-Unis et dans d'autres pays. Tous droits réservés. Les spécifications figurant dans ce document sont susceptibles d'être modifiées sans préavis.

www.sunpowercorp.fr

Document n° 502362 Rev B / A4_FR
CS 12_378

3- MODULES PV E20-245

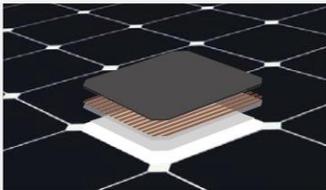
SUNPOWER®

MORE ENERGY. FOR LIFE.™

MODULES SOLAIRES DE LA SÉRIE E



- **Rendement supérieur à 20,1%**
Idéal pour l'optimisation de la surface disponible sur votre toiture.
- **Haute performance**
Excellentes performances en cas de températures élevées, de faible luminosité et par temps nuageux.^{1,2,3}
- **Tout type de toitures**
Grâce à leurs caractéristiques et performance, les modules de la Série E s'adaptent parfaitement à tout type de toitures.



Cellules photovoltaïques Maxeon®: techniquement meilleures.

Une conception garantissant la performance et la résistance.

Tranquillité d'esprit

Les modules sont conçus pour offrir une énergie constante et régulière pendant de nombreuses années.^{4,5}

Des cellules conçues pour durer

La cellule photovoltaïque Maxeon de SunPower® est la seule cellule reposant sur une base solide en cuivre qui permet une meilleure résistance à la corrosion et aux fissures qui détériorent habituellement les modules conventionnels.¹

classée 1^{ère} lors du test de durabilité de Fraunhofer.¹⁰

100% de puissance conservée lors du test de durabilité PDKI complet d'Atlas 25+.¹¹

PERFORMANCE, FIABILITÉ ET ESTHÉTISME INÉGALÉS



MODULE E20 - 245

SÉRIE
E20

RENDEMENT ÉLEVÉ⁶

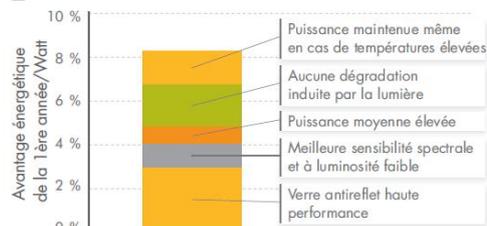
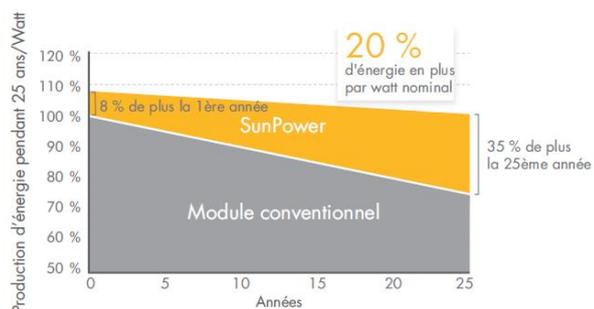
Plus d'énergie générée par mètre carré

Les modules de la Série E pour usage domestique convertissent davantage de lumière du soleil en électricité : jusqu'à 36% de puissance en plus par module¹ et 60% d'énergie en plus par mètre carré sur 25 ans.^{3,4}

PRODUCTION D'ÉNERGIE ÉLEVÉE⁷

Plus d'énergie produite par watt nominal

La performance élevée de la première année offre 7-9% d'énergie en plus par watt nominal.³ Ce pourcentage augmente au fil du temps, atteignant 20% durant les 25 premières années.⁴



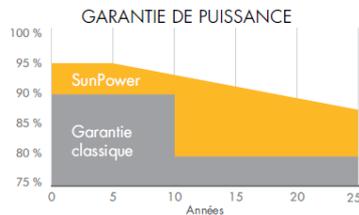
sunpowercorp.fr

SUNPOWER

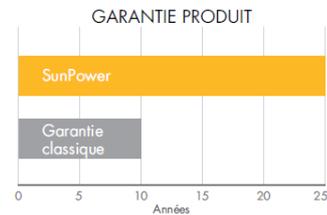
MORE ENERGY. FOR LIFE.™

MODULES SOLAIRES DE LA SÉRIE E

SUNPOWER OFFRE LA MEILLEURE GARANTIE SUR LE PRODUIT ET SUR LA PUISSANCE



Plus de puissance garantie: 95% sur les 5 premières années, -0,4% par an jusqu'à l'année 25⁸



Garantie de 25 ans contre les défauts de produit et de puissance, coûts de remplacement du module compris.⁹

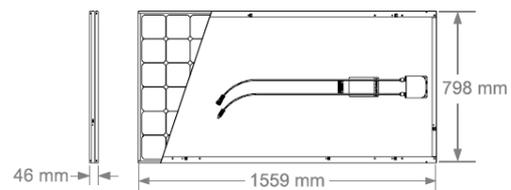
Caractéristiques Électriques		
	E20-245	E19-235
Puissance nominale ¹² (Pnom)	245 W	235 W
Tolérance (module)	+5/-0%	+5/-0%
Rendement moyen (module) ¹³	20,1%	19,3%
Tension à puissance maximale (Vmpp)	40,5 V	40,5 V
Courant à puissance maximale (Impp)	6,05 A	5,80 A
Tension en circuit ouvert (Voc)	48,8 V	48,4 V
Courant de court-circuit (Isc)	6,43 A	6,18 A
Tension maximale du système	1000 V IEC & 600 V UL	
Calibre des fusibles série	20 A	
Coef. Temp. Puissance (Pmpp)	-0,38% / °C	
Coef. Temp. Tension (Voc)	-132,5 mV / °C	
Coef. Temp. Courant (Isc)	3,5 mA / °C	

Conditions de Test et Caractéristiques Mécaniques	
Température	- 40°C to +85°C
Charge maximale	Vent: 2400 Pa, 245 kg/m ² avant et arrière Neige: 5400 Pa, 550 kg/m ² avant
Résistance à l'impact	25mm de diamètre à 23 m/s
Apparence	Classe A
Cellules	72 Cellules monocristallines Maxeon Gén. II
Verre trempé	Verre trempé haute transmission avec couche antireflet
Boîtier de connexion	Classé IP-65
Connecteurs	Yukita (YS-254/YS-255)
Cadre	Anodisé noir de classe 1
Poids	15 kg

Tests et Certifications	
Tests Standards	IEC 61215, IEC 61730, UL1703
Tests Qualité	ISO 9001:2008, ISO 14001:2004
Conforme aux règles d'env.	RoHS, OHSAS 18001:2007, Sans Plomb, PV Cycle
Test ammoniacal	IEC 62716
Test Env. salins	IEC 61701 (Sévérité maximum)
Test PID	Sans dégradation induite par le potentiel : 1000 V ¹⁰
Autres tests	TUV, MCS, UL, JET, KEMCO, CSA, CEC, FSEC

Références :

- 1 Comparaison entre les modules SunPower de 327 W et les modules conventionnels de 240 W, 1,6 m² env., 15% de rendement.
- 2 PVEvolution Labs "SunPower Shading Study," Fév. 2013.
- 3 De manière générale, 7 à 9 % d'énergie en plus par watt nominal, BEW/DNV Engineering "SunPower Yield Report," Jan. 2013
- 4 Dégradation SunPower 0.25%/an dégradation comp. à 1.0%/an pour un panneau conv. Campeau, Z. et al. "SunPower Module Dégradation Rate," Article SunPower publié, Fév. 2013; Jordan, Dirk "SunPower Test Report," NREL, Oct. 2012.
- 5 "SunPower Module 40-Year Useful Life" Article SunPower publié en Fév. 2013. Une vie utile correspond à 99 panneaux avec un rendement de plus de 70% en dessus de leur puissance nominale sur 100.
- 6 Provenant de la liste de 2600 panneaux dans le Photon Int., Fév. 2012
- 7 8% d'énergie en plus comparé au top 10 des plus grands fabricants, Résultats de 2012 (151 panneaux, 102 entreprises), Photon International, Mar. 2013.
- 8 Comparé au top 15 des plus grands fabricants de panneaux. Revue SunPower des garanties existantes fait en Fév. 2013.
- 9 Certaines restrictions sont à prendre en compte. Lire en détails la garantie.
- 10 Fraunhofer ISE a testé 5 des 8 plus grands fabricants, "PV Module Durability Initiative Public Report," Fév. 2013.
- 11 Comparé à un panneau de référence non testé. Atlas 25+ Durability test report, Fév. 2013.
- 12 Conditions de test standard (1000 W/m² ensoleillement, AM 1.5, 25° C)
- 13 Basé sur la moyenne des rendements de puissance nominale de production.



Accédez à la page <http://www.sunpowercorp.com/facts> pour plus d'informations.

Pour plus de détails, consultez la fiche technique détaillée : www.sunpowercorp.fr/datasheets. Lisez les instructions de sécurité et d'installation avant d'utiliser ce produit.

©Avril 2013 SunPower Corporation. Tous droits réservés. SUNPOWER, le logo SUNPOWER, MAXEON, MORE ENERGY. FOR LIFE. et SIGNATURE sont des marques commerciales ou déposées de SunPower Corporation. Les spécifications fournies dans ce document sont susceptibles d'être modifiées sans préavis.

energreen
L'ÉNERGIE D'ALLER PLUS LOIN

www.energreen.be
Tel: 010 45 13 73
Fax: 010 45 90 73
info@energreen.be
Av. Lavoisier 13
1300 Wavre

sunpowercorp.fr

Document # 505818 Rev A /A4_FR