



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة غرداية



Université de Ghardaïa
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
قسم الآلية والكهروميكانيك
Département de d'automatique et d'électromécanique

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme
Master

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : électromécanique

Spécialité : Maintenance *industrielle*

Thème

***Etude comparative théorique et expérimentale
des différentes technologies d'une cellule
solaire photovoltaïque***

Présenté par :
KADI MOHAMMED

Soutenu publiquement le : 11 Juin 2025

Devant le jury compose de:

BELAOUR Abderrahmane	Université de Ghardaïa	Président
MOSBAH SAID	Université de Ghardaïa	Encoder
BEKKOUCHE Sid Mohamed	Université de Ghardaïa	Examineur
BARAKATE Fadila	Université de Ghardaïa	Examinatrice

Année universitaire 2024/2025

Résumé :

Ce travail présente une étude approfondie sur la modélisation, la simulation et l'analyse des performances de différents types de modules photovoltaïques (monocristallin, polycristallin, amorphe, et à couches minces) en se basant sur des mesures réelles relevées sur le site SKTM de Ghardaïa. Les courbes de puissance en fonction de la tension (P-V) montrent que la température influence négativement la puissance maximale délivrée par les modules : plus la température augmente, plus la puissance diminue, ce qui est aussi valable pour le rendement. Des analyses supplémentaires sur l'efficacité en fonction de l'irradiance et de la température confirment ce comportement, révélant une diminution systématique de l'efficacité avec la hausse de température. Les données expérimentales (irradiance, température) de la période de janvier à juin 2017 ont été utilisées pour simuler les performances des modules sous Matlab/Simulink. Les résultats simulés sont proches des calculs théoriques, validant la précision des modèles utilisés. Les modules Atersa A-250M et A-235P (mono et polycristallins) offrent de meilleures performances que ceux à base de silicium amorphe ou à couches minces, ce qui est cohérent avec leurs caractéristiques techniques et leurs rendements respectifs. Ce travail met également en évidence l'importance du point de puissance maximale (MPP) et des pertes liées aux résistances série, tout en soulignant l'impact majeur de la température sur la production photovoltaïque.

Mots clés : Cellule Photovoltaïque / Modélisation / Simulation / Matlab-Simulink

المخلص

يعرض هذا الفصل دراسة (PV) يستند العمل المقدم في أطروحة الدراسة النهائية الى دراسة النظام الكهروضوئي شاملة حول نمذجة ومحاكاة وتحليل أداء أنواع مختلفة من وحدات الطاقة الكهروضوئية (أحادية البلورة، متعددة البلورات، SKTM السيليكون غير المتبلور، والخلايا ذات الأغشية الرقيقة) اعتماداً على بيانات تجريبية حقيقية تم جمعها من موقع أن ارتفاع درجة حرارة الخلايا يؤدي إلى انخفاض (P-V) في غرداية، الجزائر. تُظهر منحنيات القدرة مقابل الجهد ، مما يدل على التأثير السلبي للحرارة على كفاءة الألواح الشمسية. كما توضح (Pmpp) ملحوظ في القدرة القصوى التحاليل الإضافية لعلاقة الكفاءة مع الإشعاع ودرجة الحرارة انخفاضاً تدريجياً في الكفاءة كلما ارتفعت درجة الحرارة. وقد تم استخدام البيانات المناخية الحقيقية للفترة الممتدة من يناير إلى يونيو 2017 لمحاكاة أداء الوحدات باستخدام برنامج Matlab/Simulink حيث أظهرت النتائج تطابقاً جيداً مع الحسابات النظرية. أظهرت الوحدات أحادية ومتعددة البلورات أداءً أفضل من تلك المصنوعة من السيليكون غير المتبلور أو الأغشية الرقيقة، وذلك (Atersa A-250M و A-235P) بما يتماشى مع خصائصها التقنية وكفاءتها. يسلط هذا العمل الضوء أيضاً على أهمية نقطة القدرة في تحسين الإنتاج، وتأثير المقاومات الداخلية على الأداء العام، ودور درجة الحرارة الكبير في تقليل الإنتاجية الكهربائية في ظروف التشغيل الحقيقية

الكلمات المفتاحية: خلية شمسية / محاكاة / مطلب سيملينك

Abstract :

This work displays a comprehensive study on the modeling, simulation, and performance analysis of various photovoltaic module technologies—monocrystalline, polycrystalline, amorphous silicon, and thin-film Cd-Te—based on real measurement data collected at the SKTM site in Ghardaïa, Algeria. The power-voltage (P–V) curves clearly demonstrate that increasing cell temperature leads to a significant decrease in the maximum power output (P_{mpp}), highlighting the detrimental effect of heat on solar panel efficiency. Further evaluations of efficiency versus irradiance and temperature confirm that efficiency steadily drops as temperature rises. Real climatic data from January to June 2017 were used to simulate module behaviors under Matlab/Simulink, showing good agreement between simulated results and theoretical calculations. Among the studied technologies, monocrystalline and polycrystalline modules (Atersa A-250M and A-235P) exhibit superior performance compared to amorphous and thin-film modules, which is consistent with their respective technical specifications and efficiency ratings. The study also emphasizes the critical importance of the Maximum Power Point (MPP) for energy optimization, the influence of series resistance on output performance, and how temperature plays a dominant role in reducing the energy yield of PV systems under real conditions.

Key words: PV Cell / Modeling / Simulation / Matlab-Simulink

DEDICASE

Je dédie ce modeste travail :

*Avant tout à la mémoire de ma chère mère, Que Dieu ait pitié d'elle et
la place dans ses vastes paradis*

*À l'esprit de mon père, pour m'aider à avancer dans la vie. ; Merci
pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi*

*À ma chère épouse, qui a œuvrée pour ma réussite, de par son soutien,
pour toute son assistance et sa présence dans ma carrière*

À mes chères enfants, chacun en son nom

À tout s mes frères surtout Mansour et Sœurs Et à toute la famille

KADI

À mes collègues de l'université

À toutes mes adorables que j'ai connu pendant toute ma vi

Remerciements

Avant toute chose, je tiens à exprimer ma gratitude envers « Dieu », le tout-puissant, pour m'avoir accordé sagesse et santé dans l'accomplissement de cette modeste tâche.

Nous adresserons nos remerciements, et à exprimer mes reconnaissances à mon promoteur Mr. MOSBAH Said pour leur encadrement et soutien.

Je tiens à exprimer mes respectueux et sincères remerciements à tous les membres du jury (président et examinateurs) qui ont accepté d'examiner ce travail.

Enfin, que tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail en particulier Khaled Adjila , Soufiane Ben babah , soient assurés de ma profonde gratitude.

Table des matières

INTRODUCTION GENERAL	1
Chapitre II Notions de base sur les cellules solaires	5
II. 1 Introduction	6
II. 2 Historique	6
II. 3 Le rayonnement solaire et le nombre de masse	7
II. 4 La cellule photovoltaïque	9
II. 4. 1 L'effet photovoltaïque	9
II. 4. 2 L'interaction photon/semi-conducteur	13
II. 4. 3 Jonction P-N	15
II. 5 Conclusion	18
Chapitre III Les technologies principales de cellules Photovoltaïque	20
III. 1 Introduction	21
III. 2 Solaire Photovoltaïque.....	21
III. 3 Les filières technologiques	21
III. 3. 1 Les cellule photovoltaïques au silicium cristallin	21
III. 3. 2 Les cellules photovoltaïques en couches minces	24
III. 3. 3 Autre cellules des couches minces	25
III. 3. 4 Cellules organiques et plastiques	26
III. 4 Le photovoltaïque	27
III. 4. 1 La cellule PV	27
III. 5 Générateur photovoltaïque (GPV).....	28
III. 5. 1 La constitution d'un module photovoltaïque	28
III. 6 Bloc et champ photovoltaïque	34
III. 6. 1 Système de protection	34
III. 7 Caractéristiques électriques d'une cellule PV	37
III. 7. 1 Modèle d'une cellule solaire	38
III. 8 Paramètres électriques de la cellule photovoltaïque.....	41
III. 9 Conclusion	42
Chapitre IV schémas équivalents des cellules photovoltaïques	45
IV. 1 Introduction	46
IV. 2 Modèle d'une cellule solaire idéale	46
IV. 3 Modèle d'une cellule solaire réelle.....	47

IV. 4	Différents modèles électriques de panneau photovoltaïque	48
IV. 4. 1	Modèle à une diode (à une seule exponentielle)	48
IV. 5	Exemple de fonctionnement des modules PV en condition réelles.....	Erreur ! Signet non défini.
IV. 5. 1	Oued Nechou le site d'implantation d'installation d'expérimentation	52
IV. 6	Conclusion :	53
Chapitre V SIMULATION COMPARATIVE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DES DONNEES DES MODULES PV D'OUED NECHOU		
V. 1	Introduction :	56
V. 2	Matlab Simulink :	56
V. 3	Caractéristiques électroniques d'une cellule photovoltaïque	57
V. 4	Simulation d'un système électrique de mesure d'une cellule photovoltaïque.....	58
V. 4. 1	Interprétation Influence de l'éclairement	60
V. 4. 2	Interprétation Influence de la température :	62
V. 4. 3	Interprétation la courbe efficacité -irradiance paramétrée à la température.....	64
V. 4. 4	Interprétation la courbe efficacité - la température paramétrée à l'irradiance ...	65
V. 5	Simulation de montage de mesure d'un module photovoltaïque .	Erreur ! Signet non défini.
V. 5. 1	Essais expérimentaux	Erreur ! Signet non défini.
V. 5. 2	Partie Calcul :	Erreur ! Signet non défini.
V. 5. 3	Module de Technologie Polycristallin :	Erreur ! Signet non défini.
V. 5. 4	Module de Technologie Amorphe.....	Erreur ! Signet non défini.
V. 6	Conclusion :	Erreur ! Signet non défini.
Conclusion générale		75

LISTE DES FIGURES

Figure I-1: Définition de l'Air Masse [5].....	8
Figure I-2 : Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5 d'après le domaine spectral utile aux cellules au silicium [6]	9
Figure I-3 : Schéma de principe de l'effet photovoltaïque (cellule conventionnelle) [7].....	10
Figure I-4 : Schéma d'une cellule photovoltaïque en silicium [9].....	12
Figure I-5: Mécanisme physique de production du courant photovoltaïque [9]	13
Figure I-6: Paramètres d'absorption du Silicium :	14
Figure I-7: Dopages N et P du silicium et leurs schémas de bandes associées [8]	16
Figure I-8: Structure de bandes d'une jonction pn [7]	17
Figure II-1: Photos de cellules monocristalline (a) et multi cristalline (b).	24
Figure II-2: Deux exemples de modules utilisant le Sia (Silicium amorphe)	25
Figure II-3: Cellule solaire tout organique sur substrat souple	26
Figure II-4: Structure basique d'une cellule solaire.	28
Figure II-5: Ruban métallique d'une cellule.	29
Figure II-6: Encapsulation des cellules.	29
Figure II-7: Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_s cellules en série.	31
Figure II-8: Caractéristiques résultant d'un groupement de N_p cellules en parallèle.	32
Figure II-9: Association mixte des modules.	33
Figure II-10 : Caractéristique Correspondants à L'association / Série Parallèle De Modules Pour L'association Parallèle.	33
Figure II-11: champ photovoltaïque composé de N_s blocs en parallèle.	34
Figure II-12: connexion d'un GPV élémentaire avec diode by-pass et diode anti retour.	34
Figure II-13: Etat de fonctionnement de diode by-pass.	35
Figure II-14: Protection avec une diode anti-retour.	36
Figure II-15: Le passage d'une cellule à un champ photovoltaïque.	37
Figure II-16: Caractéristique I-V d'une cellule PV.	37
Figure II-17 : Circuit équivalent complet d'une cellule PV.	38
Figure II-18: la caractéristique I-V d'une cellule.	41
Figure III-1: schéma idéale d'une cellule photovoltaïque.	46
Figure III-2: schéma équivalent d'une cellule solaire.	48
Figure III-3: Schema Equivalent A Une Diode Avec Résistance Shunt.	49
Figure III-4: Schéma Equivalent A Deux Diodes Sans Résistance Shunt.	51
Figure III-5 : Centralepvoued Nechou.	52
Figure III-6: Répartition des sous champs dans le central PV.	53
Figure IV-1: Interface Simulink/Matlab.	56
Figure IV-2: Schéma bloc d'un module PV in Matlab-Simulink	57
Figure IV-3 : Model électrique d'une cellule photovoltaïque.	57
Figure IV-4 : Montage De Mesure Des Paramètres Electrique De La Cellule Photovoltaïque Par Matlab Simulink.	58
Figure IV-5: COURBE PUISSANCE par rapport à tension, paramétrées avec irradiance	59
Figure IV-6 : courbe puissance par rapport à tension PV monocristallin A-250M.	60
Figure IV-7 : courbe puissance par rapport à tension paramétrées avec température. ..	62
Figure IV-8 : Courbe efficacité par rapport à irradiance, paramétrées avec température	63

Liste Des Figures

Figure IV-9: courbe efficacité par rapport à température, paramétrées avec irradiance	65
Figure IV-10 : courbe de radiation au niveau SKTM du 1 janvier au 30 Juin 2017.	69
Figure IV-11 : les courbes I(V) et P(V) Monocristallin Atersa, A-250M	70
Figure IV-12 : les Courbes I(V) Et P(V) Polycristallin Atersa, A-235p Erreur ! Signet non défini.	
Figure IV-13 : Les Courbes I(V) Et P(V) Amorphe Schott Protect Asi-103 Erreur ! Signet non défini.	
Figure IV-14 : les courbes I(V) et P(V) Couches Mince (Cd-Te) First Solar, FS-380	71

Liste Des Figures

LISTE DES TABLEAU

Tableau II-1: Comparatif des rendements des différents types de cellules [6].	27
Tableau IV-1: Données techniques de Spécifications du module photovoltaïque monocristallin Atersa A-250M.....	Erreur ! Signet non défini.
Tableau IV-2 :de courbe : courant par rapport à tension PV monocristallin A-250M.....	58
Tableau IV-3: Courbe courant par rapport à tension PV monocristallin A-250M.....	59
Tableau IV-4 : paramètres de température de courbe puissance par rapport à tension.....	61
Tableau IV-5 : courbe efficacité par rapport à irradiance, paramétrisée avec température	63
Tableau IV-6 : Courbes efficacité par rapport à température, paramétrées avec irradiance	64
Tableau IV-7:Données de calcul : Spécifications du module photovoltaïque Polycristallin Atersa A-235P	Erreur ! Signet non défini.
Tableau IV-8:DONNEES DE CALCUL : SPECIFICATIONS DU MODULE PHOTOVOLTAÏQUE SCHOTT SOLAR AG, PROTECT ASI-103	Erreur ! Signet non défini.
Tableau IV-9 DONNEES DE CALCUL : Specifications Du Module Photovoltaïque A Couche Mince (Cd-Te) Fs-380	Erreur ! Signet non défini.
Tableau IV-10 : Tableau des radiations moyenne à SKTM période du 1janvier au 30 juin 2017	Erreur ! Signet non défini.

Nomenclature

P_{max} : Puissance maximale W

P_c : Puissance crête du système photovoltaïque (Wc)

P_i : Puissance d'éclairement aux conditions STC (1 kW/m²)

U_{max} : Tension maximal V

U_{oc} : Tension en circuit ouvert V

V_{ch} : Tension du champ V

$V_{batterie}$: Tension de la batterie V

I_{max} : Courant maximal A I_{cc} : Courant de court-circuit A

η : Rendement des modules photovoltaïque %

E_c : Énergie consommée (Wh/j)

G : Irradiation globale sur plan incliné ((kWh/m²/j) k : Coefficient correcteur, ce coefficient tient compte

N_{module} : Nombre de modules photovoltaïque

N_s : Nombre des batteries en séries

N_p : Nombre des batteries en parallèles

N_T : Nombre des batteries Total

C : Capacité de la batterie en ampère heure (Ah)

N : Nombre de jour d'autonomie

D : Décharge maximale admissible

S : Section de Câblage ρ : Conducteurs en cuivre

R : Résistance électrique du câble

L : Longueur de câble

Nomenclature et abréviations

ΔU : Chute de tension maximale

C_{batterie} : capacité d'une batterie γ : Est la longitude($^{\circ}$).

ω : Angle horaire compté en (degré).

δ : Déclinaison (degré).

Z : Distance zénithale ψ : Azimut h : Hauteur du soleil($^{\circ}$).

Φ : Longitude

Θ : Latitude

Liste d'abréviations :

PV : photovoltaïque

FF : Facteur de Forme

DC : Courant continue

AC : Courant Alternatif

Si : Silicium

GPV : Générateur Photovoltaïque

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Aujourd'hui, plus de 81% d'énergie utilisée dans le monde provient de gisement de combustible fossile (charbon 27%, pétrole 31%, gaz 23%) ou d'uranium 5%, constitués au fil des âges et de l'évolution géologique [1].

Les sources d'énergie renouvelables devraient remplacer les sources d'énergie traditionnelles non renouvelables afin de répondre à la demande croissante d'énergie dans l'avenir. L'énergie renouvelable est nécessaire non seulement en raison de la pénurie inévitable de sources d'énergie fossile, mais aussi pour prévenir la pollution de l'air et le réchauffement climatique en raison des émissions élevées de dioxydes de carbone. De plus, les risques en matière environnementales liés aux rejets de CO₂ dans l'atmosphère engendrent le phénomène de l'effet de serre [2]. Les principales sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie éolienne et solaire sont propres, abondantes et abordables, ce qui en fait une alternative prometteuse aux combustibles fossiles existants.

Parmi les sources d'énergie renouvelables, l'énergie solaire présente le plus grand potentiel en termes de quantité disponible pour la population humaine, de flexibilité technologique et de disponibilité pour la conversion aux autres types d'énergie, et du coût des technologies de conversion. Avec les réductions de prix dans les systèmes photovoltaïques au cours des dernières années et la démonstration de l'approvisionnement en énergie dans différentes applications ont fait de l'énergie solaire un type populaire et important de source d'énergie.

La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique peut se faire de deux façons :

L'énergie solaire thermique (ECS) utilise la vapeur générée par le rayonnement solaire concentré dans un turbogénérateur classique.

Les cellules photovoltaïques (PV) génèrent de l'électricité en absorbant directement les photons tombant sur la cellule [2].

L'Algérie avec sa situation géographique, occupe une position privilégiée dans l'exploitation d'énergie solaire avec une durée d'ensoleillement qui varie de 3000 heures /an dans le nord à 3400 heures/an dans le sud, l'une des plus élevées au monde. Elle reçoit le maximum d'énergie lors du solstice d'été (21 ou 22 juin) et le minimum lors du solstice d'hivers (21 ou 22 décembre).

Les principes fondamentaux derrière cette technologie sont l'effet photovoltaïque, dans lequel la lumière du soleil est directement convertie en électricité. L'énergie solaire présente plusieurs avantages nous citons les plus importants :

Introduction générale

C'est une énergie maitrisable et adaptable à toute région.

Permet de produire de l'électricité sans dégrader l'environnement.

Les systèmes photovoltaïques n'exigent pas beaucoup d'entretien, comme ils sont silencieux et non polluants.

Les frais de la maintenance sont relativement faibles.

Sur cette base, beaucoup de recherches et de développements ont été impliqués pour améliorer la technologie au cours des dernières décennies.

Cette thèse se compose de quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous décrivons les notions préliminaires et le fonctionnement des cellules photovoltaïques industrielles.

Dans le deuxième chapitre, nous détaillons la théorie de technologies des quatre types des technologies, silicium monocristallin /cristallin/amorphe et couche mince.

Le troisième chapitre, est consacrée à l'exposition du logiciel de simulation de la Matlab/Simulink, nous décrivons la méthodologie et présentation des résultats théoriques des quatre différentes technologies de cellule photovoltaïques utilisée à SKTM Oued Nechou.

Dans le quatrième chapitre consacré pour les analyses des écarts entre les résultats expérimentaux calculer sur la base des données métrologique de site SKTM Oued Nechou et les prévisions théoriques de chaque technologie

Ce travail se termine par une conclusion générale et des perspectives.

Bibliographie

Médiathèque et éditions du CEA

Yannick Veschetti, « Modélisation, caractérisation et réalisation de nouvelles structures photovoltaïques sur substrat de silicium mince », Université de Luis Pasteur Strasbourg Thèse de doctorat , 2005.

Jiali Zhou , « Fabrication of Silicon Heterojunction Interdigitated Back-contacted (SHJIBC) solar cells », Université de technologies Delft, mémoire de master, 2017.

Barrouba tani nadéra « Optimisation des paramètres géométriques et physiques de cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités », université Abou Bakr Bel kaid Tlemcen thèse de doctorat en microélectronique, 2015.

CHAPITRE I
NOTIONS DE BASE SUR LES
CELLULES SOLAIRES

I. 1 Introduction

Les technologies photovoltaïques ont dominé l'industrie de l'énergie solaire au cours des dernières années. Une cellule solaire photovoltaïque est un dispositif électronique ayant une structure de diode simple, ce que nous appelons une jonction p-n qui sépare la paire électron-trou créée par l'absorption d'un photon. Les supports séparés sont transportés vers les contacts métalliques externes des cellules et forment les courants électriques.

I. 2 Historique

Le développement des cellules photovoltaïques a commencé en 1839 lorsque le français Alexandre Edmond Becquerel a mis en évidence l'apparition d'une tension aux bornes de deux électrodes immergées dans une solution électrolytique quand celle-ci était exposée à la lumière naturelle [1]. Ensuite, Albert Einstein a découvert que la lumière n'avait pas une trajectoire ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules (photons). L'énergie d'un photon est donnée par la relation :

$$E=hc \lambda \dots\dots\dots(I-1)$$

Où:

h : représente la constante de Planck,

C : est la vitesse de la lumière dans le vide

λ : est sa longueur d'onde [2].

En 1954 Chapain et all [3] ont développé la première cellule solaire au Silicium, avec un rendement énergétique de 6%. En 1958, une cellule avec un rendement de 9 % a été mise au point. Ainsi, les premiers satellites alimentés par des cellules solaires ont envoyés quelques années après dans l'espace. En 1973, la maison alimentée par des cellules photovoltaïques fût construite au sein de l'Université de Delaware (USA) pour la première fois. Dix ans plus tard, la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque a parcouru une distance de 4 000 km en Australie, le premier mégawatt crête installé est atteint dès 1978.

De 2010 à 2016 : la puissance installée du parc photovoltaïque mondial a été multipliée par 6 entre fin 2010 (50 GW) et fin 2016 (305 GW).

2024 : dans l'Union européenne, la production d'électricité d'origine solaire (304 TWh, soit 11,1% du mix électrique de l'UE cette année-là) dépasse pour la première fois la production des centrales à charbon (269 TWh, 9,8%). Au niveau mondial, le charbon reste toutefois de très loin la principale source d'électricité.

I. 3 Le rayonnement solaire et le nombre de masse

Le développement, l'optimisation et la caractérisation de cellules photovoltaïques nécessite la connaissance de la source d'énergie utilisée qui est le soleil qui est une source d'énergie inépuisable. Cette étoile distante de 150 millions de km de la terre est constituée d'environ 85% d'hydrogène et de 15% d'hélium [3]. Sa température délivrée est d'environ 5800 K, ceci conduit à une puissance de $9.5 \cdot 10^{25} \text{ W}$.

Le rayonnement incident reçu par la terre en normale s'approche de 1400 W/m^2 avant d'aborder la couche atmosphérique. Le soleil émet donc un spectre dans des longueurs d'onde de 290 à 2770 nm qui comprend les rayons ultraviolets, les couleurs de l'arc-en-ciel et les rayons infrarouges. L'atmosphère terrestre joue le rôle d'un filtre et ne laisse passer qu'une partie de ce spectre [4]. En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit une atténuation et une modification de son spectre à cause des divers facteurs liés à la surface de la terre : absorption par les molécules des différentes couches de l'atmosphère, conditions climatiques, latitude du lieu d'observation et la saison.

La couche d'ozone par exemple, absorbe une partie du rayonnement sur une large bande de l'ultraviolet au visible, et l'oxygène présente deux bandes étroites d'atténuation vers 690 et 760 nm, respectivement. Enfin, la vapeur d'eau possède de nombreuses bandes d'absorption dans le visible et encore plus dans l'infrarouge. Ces divers effets font que le flux énergétique reçu au niveau du sol se réduit alors à 1000 W/m^2 avec un spectre décalé vers le rouge [5].

Afin de comparer et d'unifier les performances des cellules photovoltaïques élaborées dans les différents laboratoires du monde, il a été institué la notion d'Air Mass (AM), donnée par la relation (I.2). Celle-ci représente la quantité de la puissance absorbée par l'atmosphère.

$$AM = \frac{1}{\cos\theta} \dots\dots\dots(I-2)$$

A titre d'exemple, si le soleil est au zénith lieu d'observation alors $\Theta=0^\circ$ et $AM=1$, la notation utilisée dans ce cas est AM1. AM0 correspond à l'irradiance hors atmosphère et elle est surtout utilisée pour prédire le comportement des cellules pour des applications spatiales [6].

Le spectre standard le plus étudié est AM1.5G correspondant à l'angle égal à 48.2° au-dessus de l'horizon, le terme G signifiant global car il tient compte à la fois des radiations directes et diffuses par opposition à AM1.5D qui ne tient compte que des radiations directes. AM1.5G fournit une irradiance de 970 W/m^2 , mais il a été arrondi à 1 kW/m^2 . On donne sur la Figure I.1 un schéma représentatif de quelques irradiances.

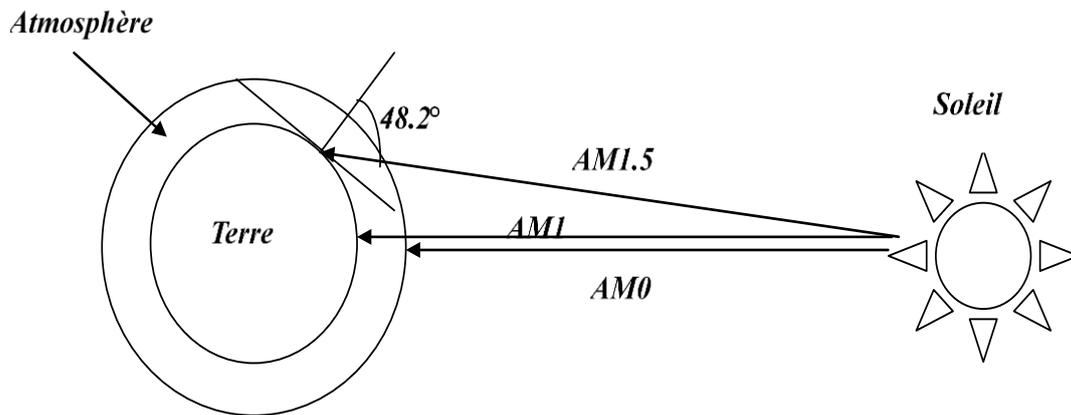


Figure I-1: Définition de l'Air Masse [5]

L'intensité reçue à la surface de la terre notée I_D peut être calculée grâce à la formule empirique suivante :

$$I_D = 1.353(0.7^{AM})^{0.678} \dots\dots\dots(I-3)$$

Avec I_D donnée en KW/m^2 pour une surface perpendiculaire aux rayons incidents.

Les spectres AM0 et AM1.5 sont représentés sur la Figure I.2.

- La conversion de l'énergie absorbée en charges électriques libres
- La collecte de ces particules dans un circuit électrique extérieur

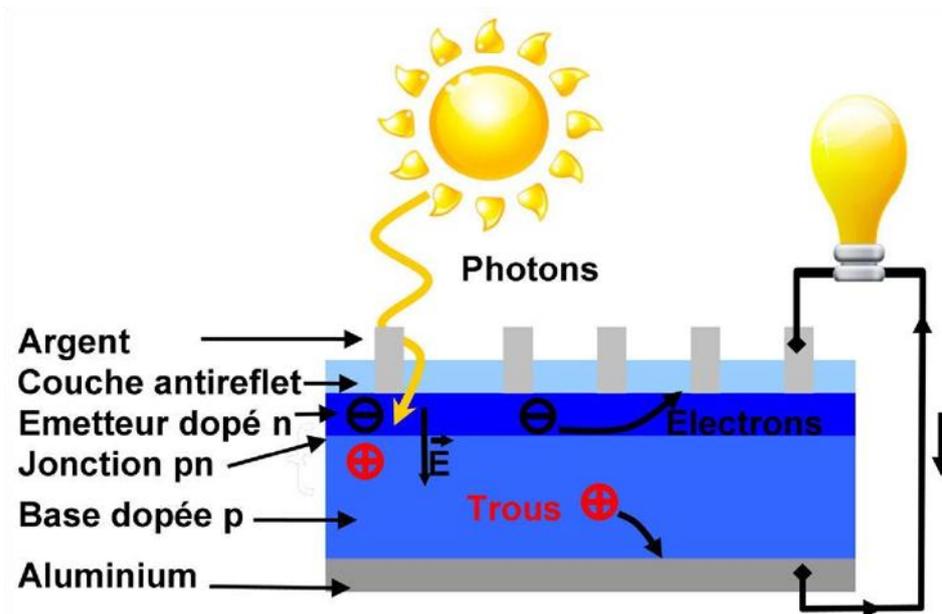


Figure I-3 : Schéma de principe de l'effet photovoltaïque (cellule conventionnelle) [7]

Dans un semi-conducteur exposé à un rayonnement lumineux, un photon d'énergie suffisante arrache un électron, créant un « trou ». Normalement, l'électron trouve rapidement un trou pour se remplacer et l'énergie apportée par le photon est ainsi dissipée. Mais le principe d'une cellule photovoltaïque est de forcer les électrons et les trous à se diriger chacun vers une face opposée du matériau au lieu de se recombiner en son sein. Ainsi, il apparaîtra une différence de potentiel et donc une tension entre les deux faces, comme dans une pile. Pour cela, on s'arrange pour créer un champ électrique permanent au moyen d'une jonction pn entre deux couches dopées respectivement p et n [8].

C'est grâce à la jonction ou à l'interface métallurgique de ces deux couches que la cellule produise de l'électricité.

Un dispositif photovoltaïque doit donc être constitué essentiellement :

- D'un matériau absorbant dans la gamme du spectre solaire.
- D'une structure de collecte, de résistance électrique la plus faible possible.

- Lorsque les deux semi-conducteurs constituent une jonction, un champ électrique s'établit [5] de deux types de semi-conducteurs qui forment une jonction où se forme un champ électrique.

Les photons incidents créent des paires électrons/trous dans les zones n et p et dans la zone de charge d'espace. Les photo-porteurs se comportent différemment selon la région :

- Dans la zone n ou p, le champ électrique transporte les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace. Un photo-courant de diffusion est généré quand les porteurs sont majoritaires dans la zone n (pour les électrons) ou dans la zone p (pour les trous).
- Dans la zone de charge d'espace, les paires électron/trou créées sont dissociées par le champ électrique où un photo-courant de génération est créé, et dans lequel les électrons sont dirigés vers la région n et les trous vers la région p.

Ces deux photo-courants s'associent pour un photo-courant résultant I_{ph} , qui est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse [3].

Le courant remis sur une charge par une cellule photovoltaïque exposé sous éclairage s'écrit :

$$I = I_{obs} - I_{ph} \dots \dots \dots (I-4)$$

Le courant est donné par la relation suivante :

$$I_{obs} = I_0 \left(\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right) \dots \dots \dots (I-5)$$

Où :

V : tension aux bornes de la jonction.

q : charge élémentaire ($q = 1.6 * 10^{-19}$ C) T:température (en degré Kelvin)

k : constante de Boltzmann ($k = 1.38 * 10^{-23}$ J.K-1)

I_0 est le courant de saturation en inverse de la diode. Le coefficient n est le facteur d'idéalité de la diode et il dépend de la qualité de la jonction (il est égal à 1 si la diode est idéale et égal à 2 si elle est entièrement dirigée par la génération/recombinaison avec des pièges situés au milieu de la bande interdite).

La Figure I.4 est une illustration schématique des phénomènes de photo génération et de collecte de porteurs.

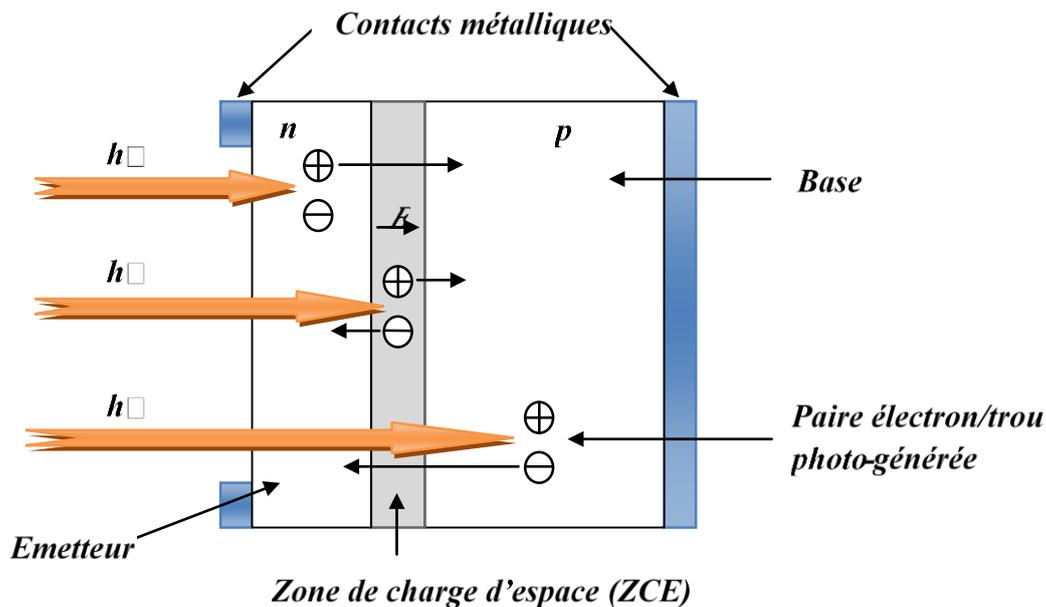


Figure I-4 : Schéma d'une cellule photovoltaïque en silicium [9]

Nous pouvons dire que la longueur de diffusion des électrons photo-générés est plus grande que celle des trous. La base présente une épaisseur relativement grande ($\sim 200-300 \mu\text{m}$) le plus souvent de type p et va fournir plus de porteurs. Afin de limiter les recombinaisons avec les porteurs majoritaires, elle est faiblement dopée (environ 10^{16}cm^{-3}). L'émetteur de type n, est de faible épaisseur ($\sim 0.5 \mu\text{m}$) et fortement dopé ($\sim 10^{20} \text{cm}^{-3}$) afin d'obtenir un champ électrique suffisant dans la ZCE ($\sim 0.3 \mu\text{m}$). L'épaisseur de la cellule doit être choisie de manière à ce qu'un maximum de photons soit absorbé par le silicium, tout en tenant compte des contraintes de découpe du matériau [8].

La Figure I.5 illustre le mécanisme physique de production du courant photovoltaïque.

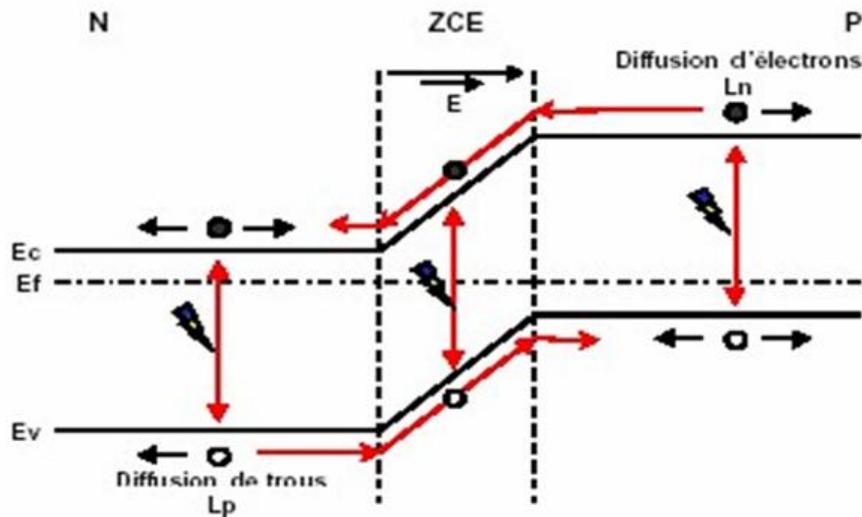


Figure I-5: Mécanisme physique de production du courant photovoltaïque [9]

I. 4. 2 L'interaction photon/semi-conducteur

L'écart entre les bandes de valence et de conduction, est une caractéristique fondamentale des semi-conducteurs. La Figure I.6 présente les différentes transitions qui existent suivant la nature du gap. Lorsque le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction coïncident dans l'espace des « k », nous parlons du gap direct. Les transitions inter bandes s'effectuent verticalement, et ils sont radiatives (Figure I.6.a). Ceci montre le fonctionnement des semi-conducteurs binaires, tels que le GaAs, utilisés énormément en optoélectronique.

Dans le cas du silicium, le gap est indirect : les transitions électroniques entre les extrema des bandes sont obliques, c'est à dire non radiatives puisqu'elles impliquent un changement du vecteur d'onde de l'électron. Les électrons du sommet de la bande de valence peuvent être excités directement vers le minimum relatif central de la bande de conduction grâce à un photon de plus grande énergie. Lorsque un photon est absorbé (ou émis) par l'électron, la transition est effectuée dans le gap indirect (Figure I.6.b).

Nous signalons que la valeur du gap indirect du Silicium est de 1,124 eV à 300 K

(ce qui correspond à une longueur d'onde de 1107 nm), mais celle du premier gap direct vaut 3,4 eV qui correspondent à 365 nm.

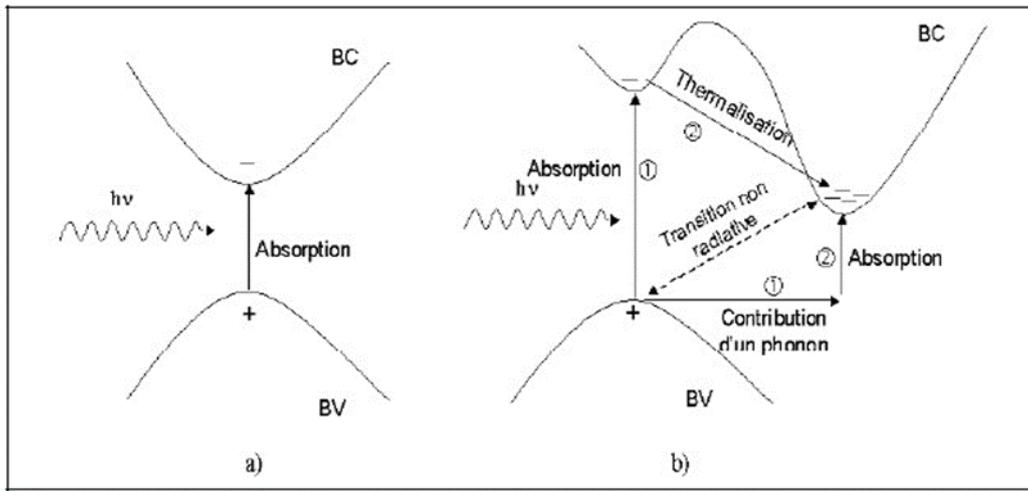


Figure I 6 : Transitions inter bandes d'électrons dans un semi-conducteur.

a) semi-conducteur à gap direct, b) semi-conducteur à gap indirect [6]

Dans le domaine du photovoltaïque, l'interaction entre les photons et un semi-conducteur est interprété par une caractéristique fondamentale du matériau : Le coefficient d'absorption donne une explication sur le nombre de photons absorbés par unité d'épaisseur du matériau en fonction de leur longueur d'onde. La Figure I.7 nous montre celui du Silicium. Nous observons que la majorité des photons incidents est absorbée dans les 100 premiers Angström du matériau et ceci pour des longueurs d'ondes inférieures à 365 nm.

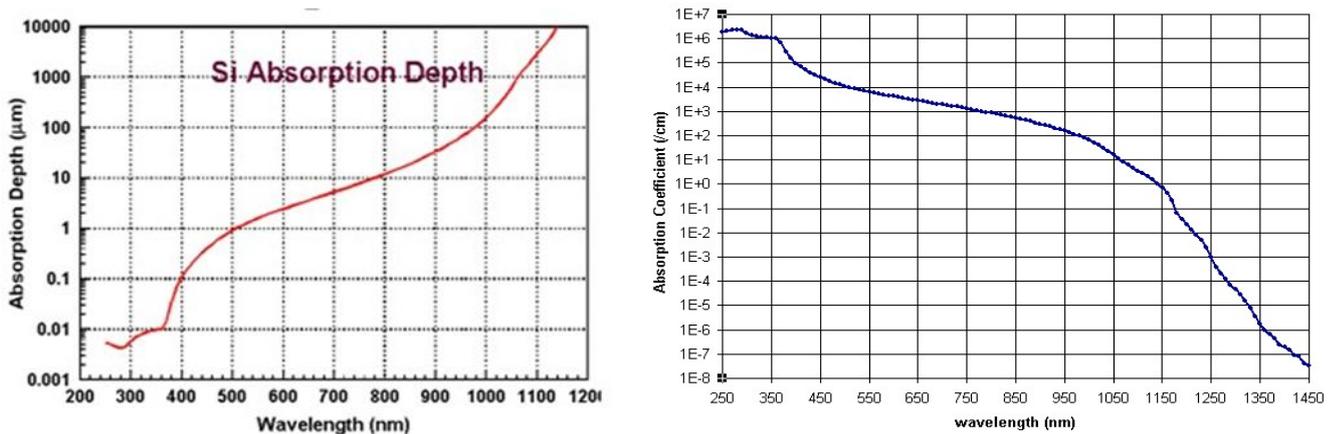


Figure I-6: Paramètres d'absorption du Silicium :

- a) profondeur de pénétration des photons en fonction de la longueur d'onde.**
- b) Coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde [6]**

Comme nous l'avons vu précédemment, ces transitions directes ne sont plus possibles pour des longueurs d'ondes plus grandes. Il faut alors qu'un photon au moins vienne assister l'électron pour que ce dernier passe dans la bande de conduction. Ceci réduit la probabilité de transition. L'accroissement de la longueur d'onde des photons engendre donc une diminution du coefficient d'absorption. Lorsque l'énergie du photon devient inférieure à celle du gap du matériau, la transition est impossible et automatiquement le photon n'est pas absorbé.

L'interaction photon/électron au sein du semi-conducteur se traduit finalement par la génération d'une paire électron-trou, qui change localement la conductivité du matériau. La cellule photovoltaïque joue le rôle d'un générateur.

Il s'agit à présent de séparer les deux types de porteurs pour éviter qu'ils ne se recombinent entre eux et de les collecter dans un circuit électrique extérieur.

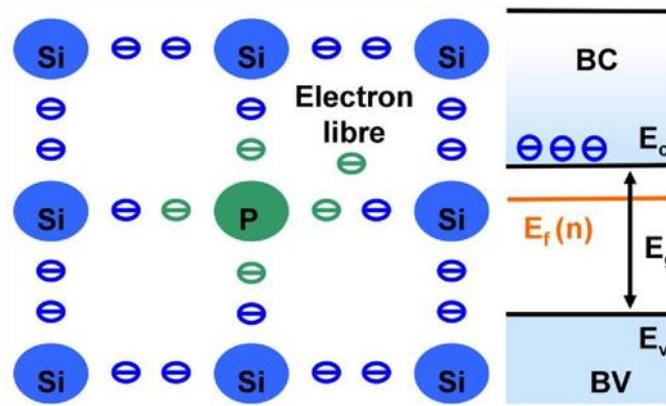
L'absorption est caractérisée par le taux de génération optique, noté G . Il s'agit du taux de création de paires électron-trou (en $\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$). En général, les porteurs minoritaires n'existent que pour un temps égal à leur durée de vie. Ils sont donc métastables. La grandeur τ définit la durée de vie moyenne avant que les porteurs ne se recombinent et elle est associée à la longueur de diffusion L_D et au coefficient de diffusion D du matériau par la relation :

$$L_D = \sqrt{D * \tau} \tag{I-6}$$

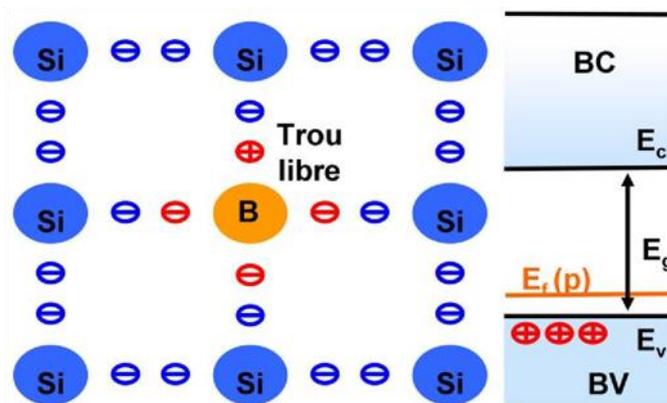
I. 4. 3 Jonction P-N

Dans l'industrie photovoltaïque, le dopage en phosphore et en bore sont respectivement de l'ordre de 10^{20} cm^{-3} et de 10^{16} cm^{-3} . Les concentrations en électrons et en trous sont donc considérablement altérées.

Ces modifications déplacent le niveau de Fermi E_f (situé initialement au milieu du gap) vers la bande de conduction pour le silicium dopé n et vers la bande de valence pour le silicium dopé p. La figure I.8 schématise les modifications dues au dopage dans les deux cas.



a) Silicium dopé n et schéma des bandes associé.



b) Silicium dopé p et schéma des bandes associées

Figure I-7: Dopages N et P du silicium et leurs schémas de bandes associées [8]

Si le silicium de type n est mis au contact du silicium de type p, les électrons libres de la zone n vont pénétrer dans la zone p et se recombiner avec les trous qui sont majoritaires dans cette zone à l'inverse, les trous de la zone p vont pénétrer du côté n et se recombiner avec les électrons majoritaires. C'est le phénomène de diffusion. Il tend à ramener le système à l'équilibre. Or, ces trous et ces électrons qui quittent les zones p et n brisent localement l'électron-neutralité et laissent apparaître derrière eux des ions fixes de bore et de phosphore. Ces derniers qui sont chargés négativement et positivement forment une zone de charge d'espace ZCE (appelée zone de déplétion) dans laquelle les porteurs de charge sont absents et ne neutralisent plus les donneurs ionisés. Par conséquent, il y a formation d'un champ électrique interne E (c'est ce champ qui permet par la suite la séparation des paires photos générées) orienté de la zone n (zone positive) vers la zone p (zone négative). Il entraîne les porteurs de charge dans le sens opposé au phénomène de diffusion. Les trous minoritaires de la zone n vont

vers les électrons minoritaires de la zone p et inversement. C'est le phénomène de dérive. L'équilibre est atteint lorsque le phénomène de diffusion est compensé exactement par celui de dérive (dû au champ électrique). En d'autres termes, il y a compensation des courants de porteurs majoritaires (courant de diffusion) et minoritaires (courant de dérive) : le courant total est nul comme le montre la figure I.9, la structure de bandes d'une telle structure est composée de trois zones.

Sur celle-ci, les zones p et n qui sont non perturbées sont représentées aux extrémités.

La zone de charge d'espace, qui est la seule où l'électroneutralité n'est pas conservée en tout point, est située entre les deux. Il faut également noter que la formation de la jonction pn résulte en un alignement des niveaux de Fermi des deux matériaux par décalage des bandes de valence et de conduction. Il y a formation d'une barrière de potentiel à l'interface.

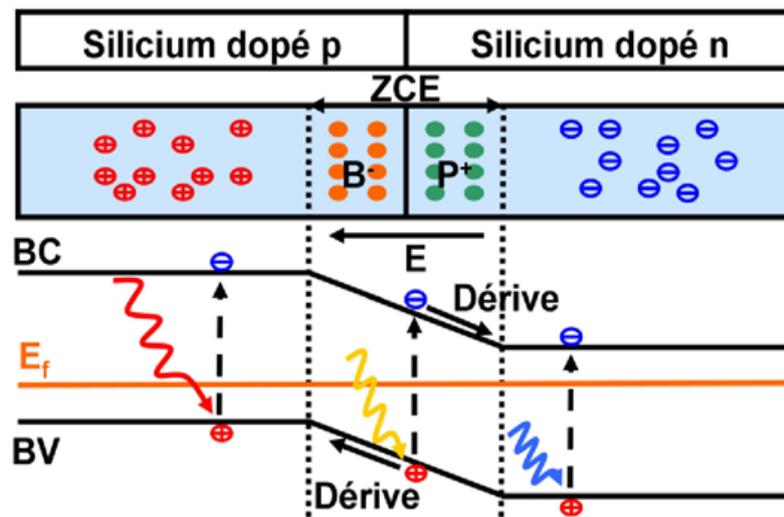


Figure I-8: Structure de bandes d'une jonction pn [7]

Comme c'est le cas dans un semi-conducteur classique il y aura génération des paires électron-trou si la jonction est éclairée. En fonction de l'énergie du photon incident et donc de la profondeur de pénétration de ce dernier.

- ✓ Si la paire électron-trou est générée à l'extérieur de la zone de déplétion : les électrons et les trous qui sont minoritaires dans les zones p et n risquent de se recombiner. En effet, ils sont métastables et caractérisés par une faible durée de vie dans ces zones. Néanmoins, s'ils arrivent à proximité du champ interne, celui-ci les happe et les propulse vers les zones n et p où ils deviennent majoritaires et stables.

- ✓ Si la paire électron-trou est générée dans la zone de charge d'espace : elle est immédiatement dissociée par le champ. Les porteurs de charge rejoignent les zones où ils sont majoritaires

I. 5 Conclusion

Ce chapitre a permis d'introduire au lecteur les concepts fondamentaux nécessaires à la compréhension du thème de ce mémoire. Nous avons également présenté l'historique et le phénomène fondamental à l'origine de cette technologie, qui est le rayonnement solaire ainsi que le nombre de masse spectrale. Dans le chapitre suivant, nous expliquerons les diverses technologies concernant les cellules photovoltaïques.

Références bibliographiques

System.solaire.free.fr/soleil.htm

KechidaEssaghir « Etude expérimentale et théorique du gisement solaire pour la région de M'sila », Mémoire de master en physique énergétique et énergies renouvelables, université de Msila, 2019

El arbi el bouziani, ' Le gisement solaire,' Faculté de science ibn to fail a A Kenitra 'Maroc' (2014).

J. Royer et T. Djiako et E. Schiler, B. Sadasy, " Le pompage photovoltaïque, Mémoire de magister en Automatique "Université d'Ottawa, 1998

Julien LABBÉ, " l'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés ", thèse de doctorat de l'école des mines de paris, Spécialité "Énergétique" le 21 décembre 2006

O, Sotehi. Etude des caractéristiques de fonctionnement et de la performance d'un distillateur solaire ; thèse de magistère, Université de Constantine.2009.

J, A, Duffie; W, A, Beckman. Solar engineering of thermal processes, John Wiley and Sons. (1980).

M .IQBAL, 'An introduction to solar radiation', Academic press, New York, 1983. [9] Azadeh A., Maghsoudi A., Sohrabkhani S., (2010), «An integrated artificial neural networks approach for predicting global radiation», Energy Conversion and Management. [10] Mohamed Amjahdi et Jean Lemale<<Adopter le solaire thermique et photovoltaïque

>>Dunod ; paris, 2011

[11] <https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Ouargla>

[12]<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?map=africa&lang=fr>

HelaliKamelia « Modélisation d'une cellule photovoltaïque : Etude comparative»,

Mémoire de magister, département d'électrotechnique, faculté du génie électrique,

UMMTO2012

CHAPITRE II
LES TECHNOLOGIES PRINCIPALES
DE CELLULES PHOTOVOLTAÏQUE

II. 1 Introduction

L'électricité photovoltaïque a dans un premier temps été développée pour des applications autonomes sans connexion à un réseau électrique pour par exemple des satellites de télécommunication ou pour des habitations isolées. On la trouve maintenant dans des applications de diverses puissances comme les calculatrices, les montres et d'autres objets d'utilisation courante. En effet, cette électricité produite par des cellules photovoltaïques individuelles peut alimenter diverses charges continues sans difficulté. Plus récemment, avec l'émergence d'installations photovoltaïques connectées au réseau de distribution, le photovoltaïque a connu un développement important en tant que moyen de production d'électricité.

Cette évolution constante a été rendue possible grâce aux recherches fondamentales menées dans le domaine des matériaux photovoltaïques, mais aussi par l'amélioration progressive des dispositifs de gestion de cette énergie menée en parallèle. En effet, l'électricité photovoltaïque est une source d'énergie intermittente, à caractère non-linéaire et dépendante de nombreux paramètres comme l'irradiance et la température. Il a donc fallu adapter cette source d'énergie à notre mode de consommation, soit en stockant la production solaire dans des batteries ou dans tout autre moyen de stockage en cours de développement, soit en la renvoyant sur le réseau électrique public [4].

II. 2 Solaire Photovoltaïque

Contrairement à l'énergie solaire thermique qui utilise le soleil comme source de chaleur, l'énergie solaire photovoltaïque utilise le soleil comme source de lumière en transformant en électricité l'énergie des photons arrivant à la surface de la Terre. La lumière solaire (photons) transmet son énergie aux électrons contenus dans un semi-conducteur (qui constitue une cellule photovoltaïque). Cette transformation (effet photovoltaïque) est sans action mécanique, sans bruit, sans pollution et sans combustible. L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien français A. Becquerel en 1839. Le mot « photovoltaïque » vient du mot « photo » (du grec « phos » qui signifie « lumière ») et du mot « Volt » (patronyme du physicien Alessandro Volta qui a contribué de manière très importante à la recherche en électricité) [6,23].

C'est dans la filière photovoltaïque que s'inscrit notre projet.

II. 3 Les filières technologiques

II. 3. 1 Les cellules photovoltaïques au silicium cristallin

Les cellules les plus utilisées sont aujourd'hui les cellules au silicium cristallin, dite de première génération (80 % des panneaux sur le marché).

II. 3. 1. 1 Les matériaux solides cristallisés (c-Si, P-Si, μ c-Si)

La recherche sur la filière du silicium cristallin a débuté dans les années 1950 en France et a pour principal but de réduire les coûts de production en mettant en jeu les problèmes de rendements en fonction des épaisseurs de cellules. Les recherches actuelles dans le silicium s'effectuent au niveau de l'amélioration de divers procédés tels que la purification, la cristallisation et l'élimination des impuretés, pour atteindre des rapports coûts/rendement optimaux.

La cellule au silicium monocristallin est constituée d'un seul cristal. Elle a un aspect uniforme, de couleur gris bleuté, ou noir. Il existe également des cellules composées de plusieurs cristaux assemblés, dites au silicium microcristallin (grain plus petits que $1\mu\text{m}$), polycristallin (grain plus petits que 1mm) ou multicristallin (grains plus petits que 10 cm) . On peut les reconnaître, si les grains sont suffisamment épais, car elles forment une mosaïque de macles.

Le rendement des cellules monocristallin est actuellement de l'ordre de 15 à 19% en industrie et de 25% en laboratoire. Pour les cellules polycristallin, le rendement en industrie est de 12 à 16 % et 20.4% en laboratoire.

Il existe de nos jours des solutions qui permettent d'augmenter significativement les rendements comme les cellules hétérojonction qui consistent à déposer des couches de silicium amorphe sur une ou deux faces d'une plaquette cristalline. Un de ces procédés existant et actuellement mis sur le marché est procédé HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin layer), qui se substitue au procédé standard de fabrication des cellules cristallins, en atteignant des rendements commerciaux de l'ordre de 20%. Le silicium amorphe permet de réaliser l'hétérojonction ; l'absorbeur étant le silicium cristallin.

II. 3. 1. 2 Les avantages du silicium cristallin sont :

- Ce semi-conducteur de type IV se dope facilement avec du bore et du phosphore ;
- Le Silicium est le deuxième élément le plus fréquent de la croûte terrestre : O₂(46%), Si (28%), Al (8%) ;
- Il possède un oxyde naturel SiO₂ présentant d'excellentes propriétés électroniques ;
- Les technologies de production sont aujourd'hui matures et leur industrialisation ne pose pas de difficulté ;
- Les cellules PV offrent un rendement de conversion élevé ;
- La durée de vie et le vieillissement des cellules PV sont maîtrisés

II. 3. 1. 3 Les Inconvénients du silicium cristallin sont :

- Un coût de fabrication élevé ;
- Une performance qui diminue fortement lorsque la température de module augmente
- Une performance qui diminue fortement à faible éclairement ;
- Presque aucune flexibilité d'utilisation (surface rigide)
- Un gap indirect à 1.12 eV : pour absorber 90% de l'énergie reçue, il faudrait une épaisseur de 100 μm , ce qui est conséquent notamment par rapport aux couches minces que nous verrons par la suite. De plus, cela fait qu'il n'est pas le mieux adapté pour capter la part maximale du spectre solaire.

II. 3. 1. 4 Quelques propriétés des cellules du silicium cristallin :

- Influence de l'éclairement : la tension baisse de manière importante lorsque l'éclairement descend en dessous de 30 à 50 W m^{-2} . Cela est pénalisant pour l'emploi du cristallin dans les pays à climat tempéré ou encore sous lumière artificielle.
- Influence de température : une cellule cristalline a une perte de l'ordre de 0.4%/°C, en puissance, pour une température supérieure à 25 °C, principalement due chute de la tension.
- Propriétés physiques :
 - Masse atomique :28
 - Température de fusion :1496 °C
 - Structure tétraédrique cubique faces centrées
 - Hybridation : sp^3



Figure II-1: **Photos de cellules monocristalline (a) et multi cristalline (b).**

II. 3. 2 Les cellules photovoltaïques en couches minces

Les couches minces consistent en un dépôt de matériaux semi-conducteur sur un substrat rigide ou souple. Il existe plusieurs technologies de couches minces commercialisées dont trois vois qui semblent s'imposer, même si cela ne représente actuellement pas plus de 20% du marché PV : le silicium amorphe (a-Si), le tellure de cadmium (CdTe) et les combinaison à partir du diséléniure de cuivre et d'indium (CIS ou CIGS lorsque du gallium est ajouté).

Les couches minces nécessitent beaucoup moins de matières que le silicium cristallin (moins de 1 μm contre 100 μm pour le silicium cristallin).

Il existe trois grandes technologies de couches minces :

A) Les couches minces au silicium

Le silicium amorphe est un semi-conducteur ayant d'excellentes propriétés optiques, mais de faibles propriétés électroniques, ce qui mène à des rendements modules dans l'industrie assez faible, de l'ordre de 6 à 8% (13.4% record cellule en laboratoire).

Les principales différences avec les cellules cristallines sont que les cellules sur couches minces de silicium amorphe ont besoin de support pour leur tenue mécanique et qu'elles ne peuvent pas être basées sur une simple jonction p-n : l'effet de diffusion est négligeable pour le silicium amorphe, sa longueur de diffusion est l'ordre de 150 nm contre 10 à 200 μm pour le silicium cristallin.

II. 3. 2. 1 Les avantages des cellules en couches minces :

- Un fort potentiel de réduction des coûts liés à des processus de fabrication peu onéreux : utilisation de verre de faible qualité ou de polymères comme substrat, sur lesquels on dépose une mince couche active
- Une flexibilité de mise en œuvre des matériaux, notamment avec l'utilisation de substrats souples ;
- La possibilité d'obtenir des cellules semi-transparentes.

II. 3. 2. 2 Les Inconvénients des cellules en couches minces :

- Le rendement encore faible ;
- La rareté de certains matériaux ;
- La toxicité de certains matériaux.

II. 3. 2. 3 Quelques propriétés des couches minces au silicium :

- Influence de l'éclairement : Une particularité du silicium amorphe est qu'il continue à produire de l'électricité à très faible éclairement ($<20 \text{ Wm}^{-2}$), contrairement aux autres technologies.
- Influence de la température : Une cellule au silicium amorphe a une perte de l'ordre de $0.2\% / ^\circ\text{C}$ en puissance en moyenne, pour une température de fonctionnement supérieure à $25 ^\circ\text{C}$.
- Effet de stabilisation sous lumière : une autre spécificité des cellules au silicium amorphe est l'effet Staebler-Wronski

II. 3. 3 Autres cellules des couches minces

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



Module souple Uni Solar (68Wc, 1,12 m²)



Module rigide Sharp (115Wc, 1.42 m²)

Figure II-2: Deux exemples de modules utilisant le Sia (Silicium amorphe)

II. 3. 4 Cellules organiques et plastiques

Observé depuis 30 ans dans les matériaux semi-conducteurs organiques, l'effet photovoltaïque a connu cette dernière décennie un grand essor.

Initialement donnant des valeurs très faibles de rendement de conversion, cette application particulière des semi-conducteurs organiques commence à attirer l'attention en 1986 lorsque l'équipe de Tang [3] montre que les rendements proches du pourcent sont atteignables, conformément aux prédictions de Merritt en 1978. La cellule, composée alors d'une bicouche de molécules évaporées sous vide, atteint 0,95% de rendement de conversion [6]. Ces cellules comprennent deux voies : la voie des cellules « humides » et les voies des cellules polymères organiques dites aussi cellules « plastiques ».

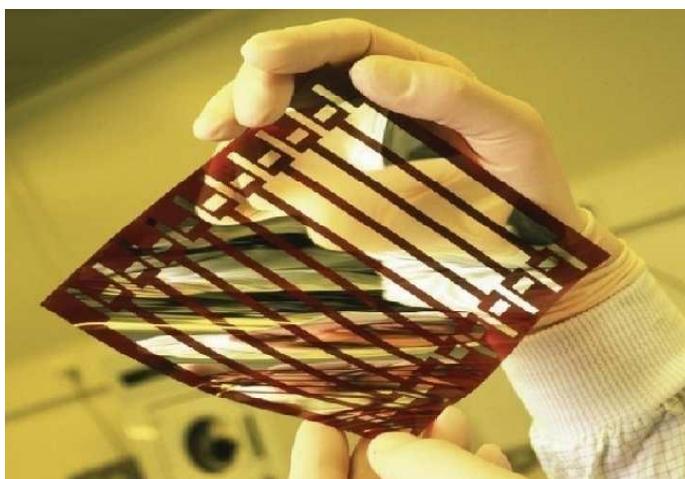


Figure II-3: Cellule solaire tout organique sur substrat souple

L'intérêt de ces cellules vient aussi du fait que, contrairement aux cellules à base de matériaux inorganiques, elles offrent l'avantage de pouvoir être déposées en grande surface, à grande vitesse, par des techniques d'impression classiques. Elles ouvrent également la voie aux applications légères, nomades et souples. Enfin, grâce à des coûts de fabrication et de matériaux plus faibles, ces cellules devraient dans l'ensemble revenir beaucoup moins chères que leurs concurrentes [24].

Le tableau ci-dessous donne le comparatif des rendements des différents types de cellules.

Type	Cellule (labo)	Module (labo)	Module (commercial)	Niveau développement
1ère génération				
Silicium monocristallin	24.70%	22,70%	12-20%	Production industrielle

Silicium polycristallin	20.30%	16,20%	11-15%	Production industrielle
2e génération				
Silicium amorphe	13.40%	10.40%	5-9%	Production industrielle
Silicium cristallin couche mince		9,40%	7%	Production industrielle
CIS	19.30%	13.50%	9-11%	Production industrielle
CdTe	16.70%		6-9%	Prêt pour la production
3e génération				
Cellule organique	5.70%			Au stade de la recherche
Cellule de Grätzel	11%	8.40%		Au stade de la recherche
Cellules multi-jonctions	39%	25-30%		Au stade de la recherche. production exclusivement applications spatiales

Tableau II-1: Comparatif des rendements des différents types de cellules [6].

II. 4 Le photovoltaïque

II. 4. 1 La cellule PV

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

D'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure,

et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne,

D'une couche anti-reflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires, d'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode,

Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissantes justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

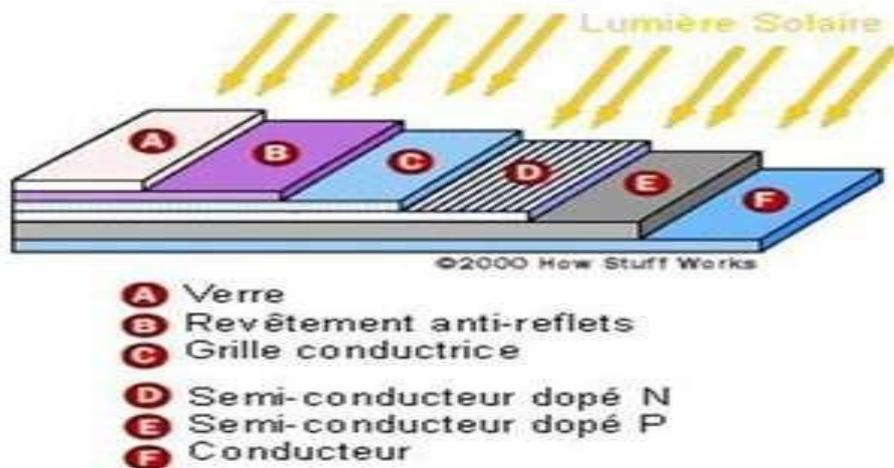


Figure II-4: Structure basique d'une cellule solaire.

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule [2].

II. 5 Générateur photovoltaïque (GPV)

II. 5. 1 La constitution d'un module photovoltaïque

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

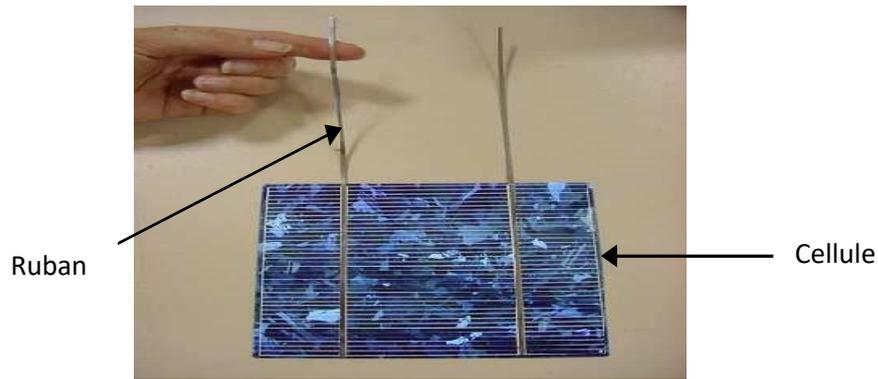


Figure II-5: **Ruban métallique d'une cellule.**

- Les cellules sont encapsulées sous vide entre 2 films thermoplastiques transparents (EVA : Ethylène Acétate de Vinyle).
- Le plus souvent présence d'un cadre en aluminium avec joint périphérique pour permettre la dilatation
- un verre trempé en face avant protège les cellules sur le plan mécanique tout en laissant passer la lumière
- la face arrière est constituée d'un verre ou d'une feuille TEDLAR

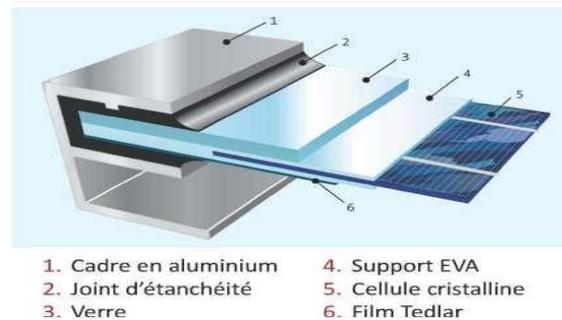
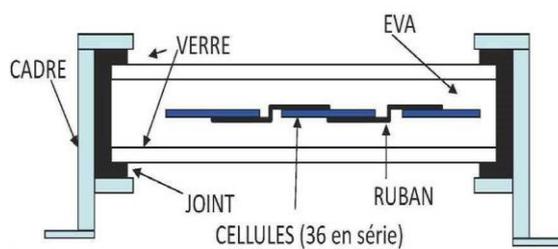


Figure II-6: **Encapsulation des cellules.**

- Connexion ; la boîte de connexion étanche regroupe les bornes de raccordement, les diodes by-pass
- Les 2 câbles unipolaires sont raccordés.

En associant les cellules PV en série (somme des tensions de chaque cellule) ou en parallèle (somme des intensités de chaque cellule), on peut constituer un générateur PV selon les besoins des applications visées. Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaités. Ainsi, pour Ns

cellules en série, constituant des branches elles-mêmes N_p en parallèle, la puissance disponible en sortie du générateur PV est donné par :

$$P_{pv} = N_s \times V_{pv} \times N_p \times I_{pv} \dots\dots\dots (II-1)$$

Avec :

P_{pv} : la puissance disponible en sortie du GPV

V_{pv} : la tension à la sortie du GPV

I_{pv} : le courant de sortie du GPV

N_s : nombre des cellules en série

N_p : nombre des cellules en parallèle

II. 5. 1. 1 Mise en série

Une association de N_s cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, figure II-15, Les équations (II-2-1) et (II-2-2) résume les caractéristiques électriques d'une association série de ns cellules.

$$V_{sco} = N_s \times V_{co} \dots\dots\dots (II-2)$$

Avec :

V_{sco} : la somme des tensions de circuit ouvert de N_s cellule en série.

V_{co} : la tension de circuit ouvert

N_s : nombre des cellules en série

$$I_{sc} = I_{cc} \dots\dots\dots (II-3)$$

Avec :

I_{sc} : le courant de court-circuit de N_s cellule en série.

I_{cc} : le courant de court-circuit de chaque cellule

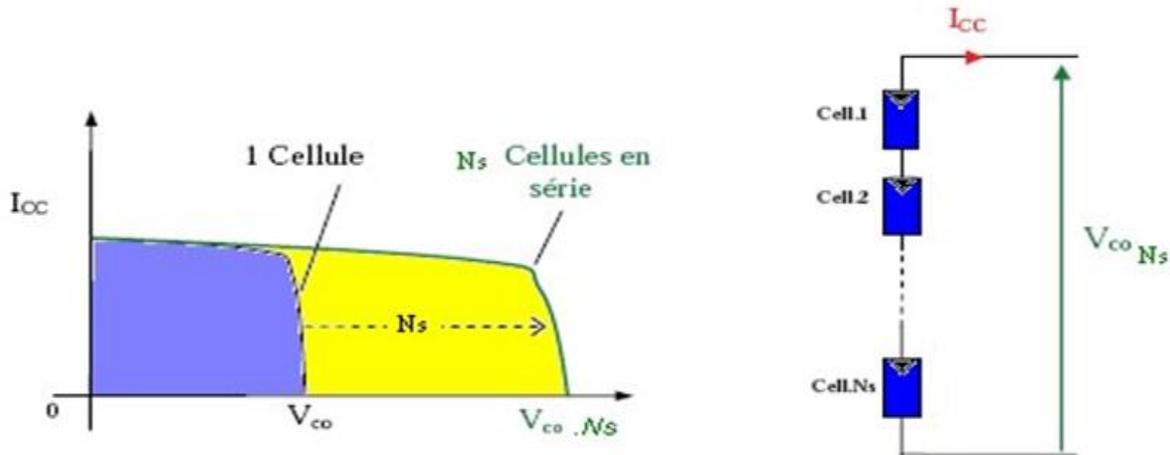


Figure II-7: **Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_s cellules en série.**

Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce. Comme la surface des cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible.

L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble. Les panneaux commerciaux constitués de cellules de première génération sont habituellement réalisés en associant 36 cellules en série ($V_{cons}=0.6V \cdot 36=21.6V$) afin d'obtenir une tension optimale du panneau V_{op} proche de celle d'une tension de batterie de 12V [22].

II. 5. 1. 2 Mise en parallèle

D'autre part, une association parallèle de N_p cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants, Figure II-16, Les équations (II-3-1) et (II-3-2) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de N_p cellules.

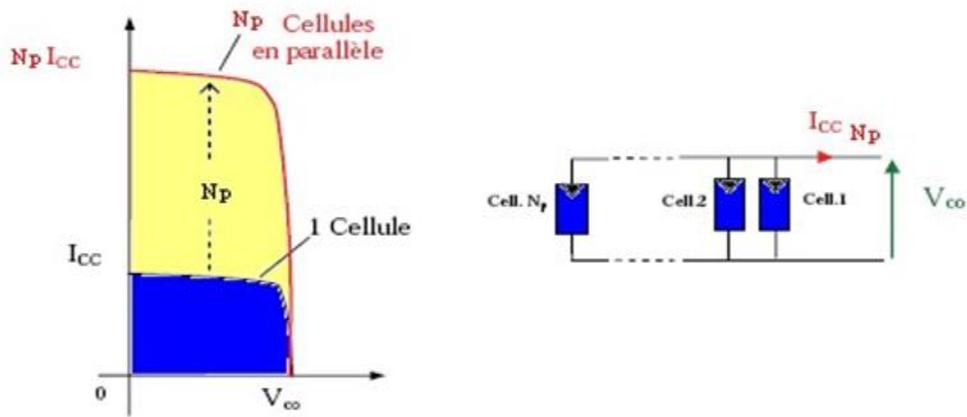


Figure II-8:Caractéristiques résultant d'un groupement de N_p cellules en parallèle.

$$I_{pcc} = N_p \cdot I_{cc} \dots \dots \dots (II-4)$$

Avec

I_{pcc} : le courant de court-circuit de N_p cellule en parallèle.

I_{cc} : le courant de court-circuit de chaque cellule

N_p : nombre des cellules en parallèle

$$V_{pcc} = V_{co} \dots \dots \dots (II-5)$$

Avec :

V_{pcc} : la tension de circuit ouvert de N_p cellule en parallèle.

V_{co} : la tension de circuit ouvert de chaque cellule

II. 5. 1. 3 Association mixte (Série parallèle)

Pour former un générateur PV, il est nécessaire de connecter les unités dans une chaîne parallèle pour obtenir des capacités supérieures correspondant à la charge.

Le courant et la tension aux bornes d'un générateur photovoltaïque sont exprimés par la relation suivante :

$$I_{cct} = N_p \cdot I_{cc}$$

$$V_{cot} = N_s \cdot V_{co} \dots \dots \dots (II-6)$$

I_{cct} : Sommes des courants en court-circuit en parallèle.

Pour former un générateur PV, il est nécessaire de connecter les unités dans une chaîne parallèle pour obtenir des capacités supérieures correspondant à la charge.

Le courant et la tension aux bornes d'un générateur photovoltaïque sont exprimés par la relation suivante :

$$I_{cct} = N_p \cdot I_{cc}$$

$$V_{cot} = N_s \cdot V_{co} \dots \dots \dots (II-7)$$

I_{cct} : Sommes des courants en court-circuit en parallèle.

V_{cot} : Sommes des tensions en circuit-ouvert en série.

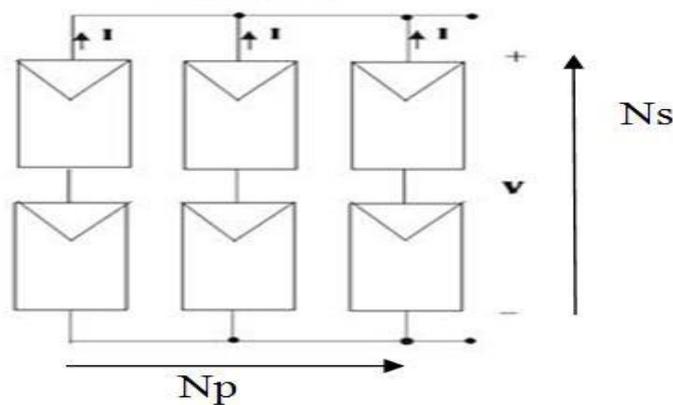


Figure II-9: Association mixte des modules.

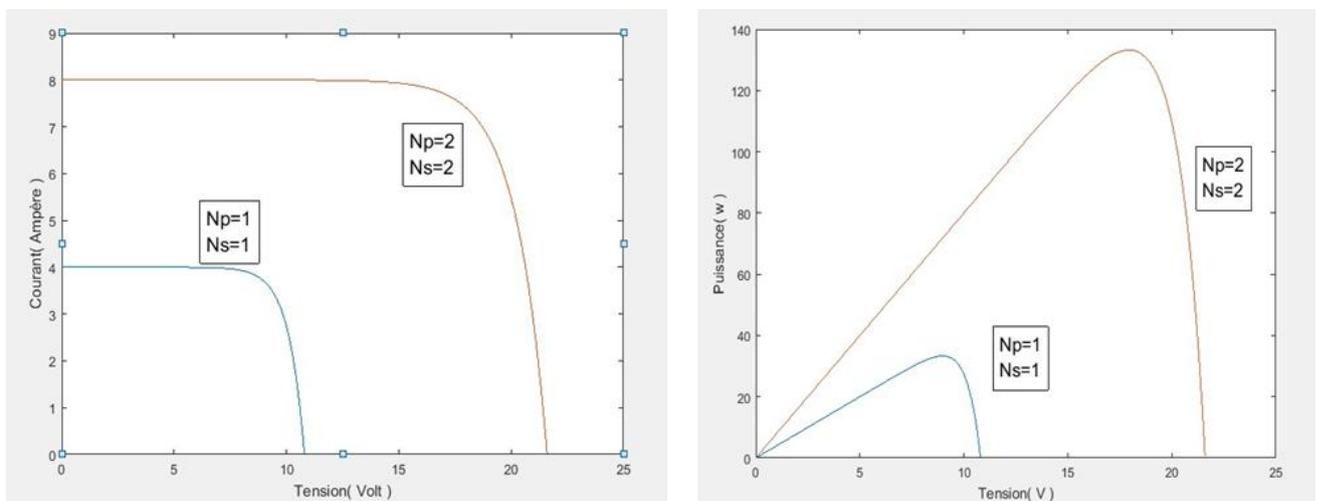


Figure II-10 : Caractéristique Correspondants à L'association / Série Parallèle De Modules Pour L'association Parallèle.

II. 6 Bloc et champ photovoltaïque

Suivant la puissance du panneau, le bloc est constitué de plusieurs modules connectés généralement en série. Ces blocs sont connectés en parallèle pour former un champ photovoltaïque. Pour éviter qu'une branche de cellules connectées en série ne reçoive de l'énergie d'autres blocs connectés en parallèle, il faut installer dans chacune des branches des diodes en série (diode anti retour) comme indiquée dans la Figure1-17. [7]

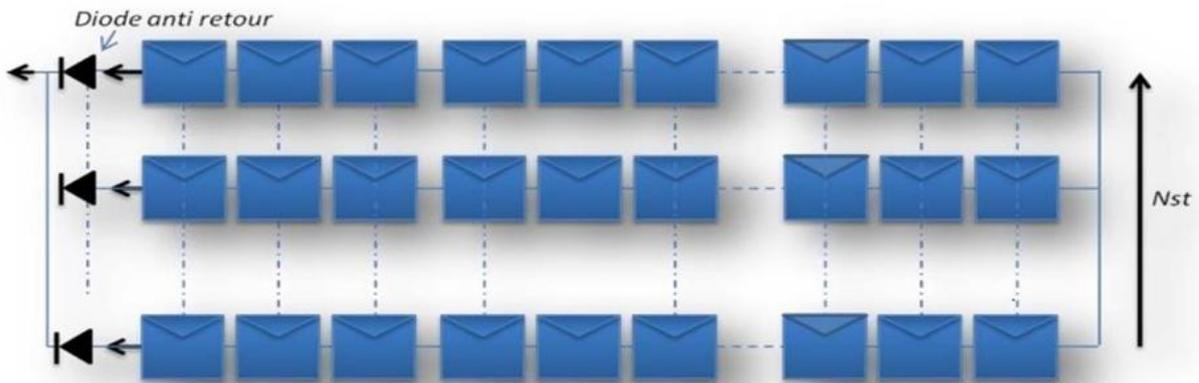


Figure II-11: champ photovoltaïque composé de N_s blocs en parallèle.

II. 6. 1 Système de protection

Pour assurer la protection électrique d'un générateur photovoltaïque de leur fonctionnement en cas d'ombrage Il existe deux types de protections : La Figure1-18 illustre ces deux protections.

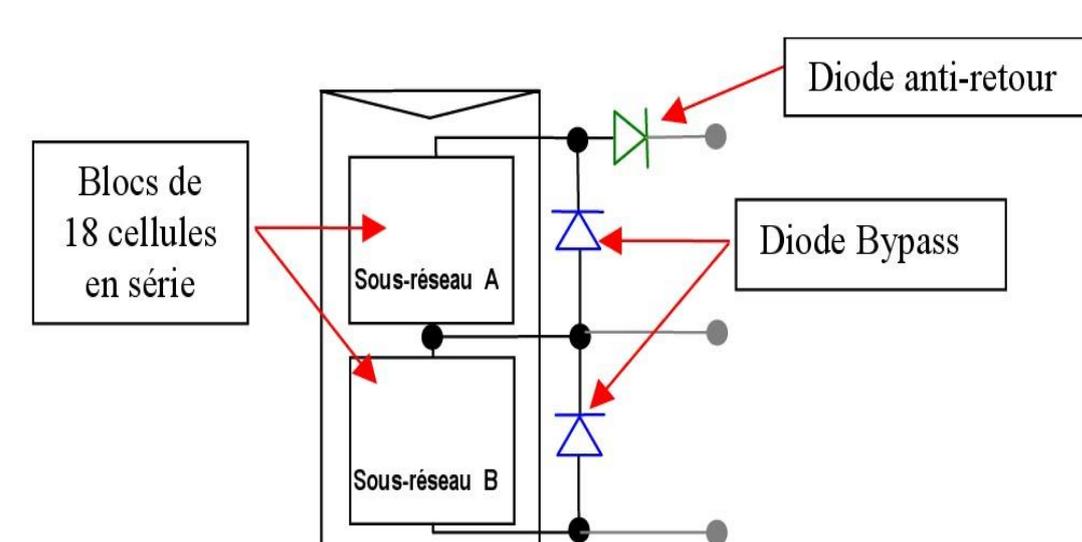


Figure II-12: connexion d'un GPV élémentaire avec diode by-pass et diode anti retour

a) La Diode By-pass

La diode de by-pass est connectée en antiparallèle avec un groupe de cellules pour protéger les cellules les plus faibles contre la polarisation inverse, cette diode sera conductrice dans le cas de l'ombrage d'une ou plusieurs cellules dans une branche et bloquée dans le cas normal, et permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass) et éviter les points chauds. [8]

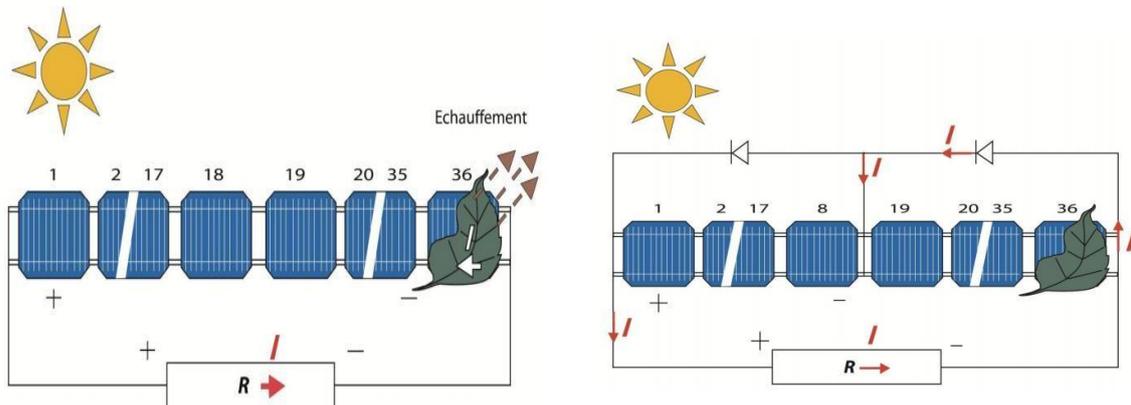


Figure II-13: **Etat de fonctionnement de diode by-pass.**

b) La Diode Anti-Retour

La tension produite par chaque string peut être différente. Lors de la mise en parallèle de ces strings pour former un champ, le string avec la tension la plus faible peut absorber un courant inverse provenant des autres strings. Cela conduit donc à une baisse de production et les modules du string traversés par le courant inverse pourraient être également susceptibles de la défaillance. Pour éviter ces courants inverses, une diode anti-retour est placée au bout de chaque string. [9]

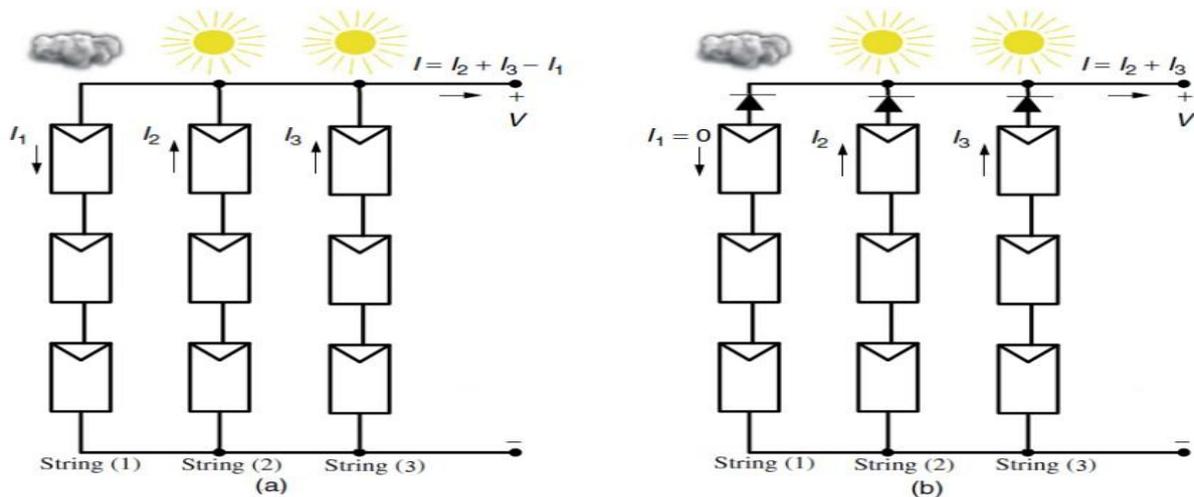


Figure II-14: **Protection avec une diode anti-retour.**

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

La puissance du générateur PV sera optimale si chaque cellule fonctionne à sa puissance maximale notée P_{max} . Cette puissance est le maximum d'une caractéristique $P(V)$ du générateur, et correspond au produit d'une tension optimale notée V_{op} et d'un courant optimal noté I_{op} .

Pour réduire les dysfonctionnements, les fabricants ont choisi de ne pas commercialiser des cellules PV seules. Ainsi, les générateurs PV se trouvent souvent sous forme de modules pré câblés, constitués de plusieurs cellules, aussi appelés par abus de langage panneaux PV. Chaque référence de module a ses propres caractéristiques électriques garanties à $\pm 10\%$ selon le lot de fabrication [1].

Le passage d'un module à un panneau se fait par l'ajout de diodes de protection, une en série pour éviter les courants inverses et une en parallèle, dite diode by-pass, qui n'intervient 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 production associée.

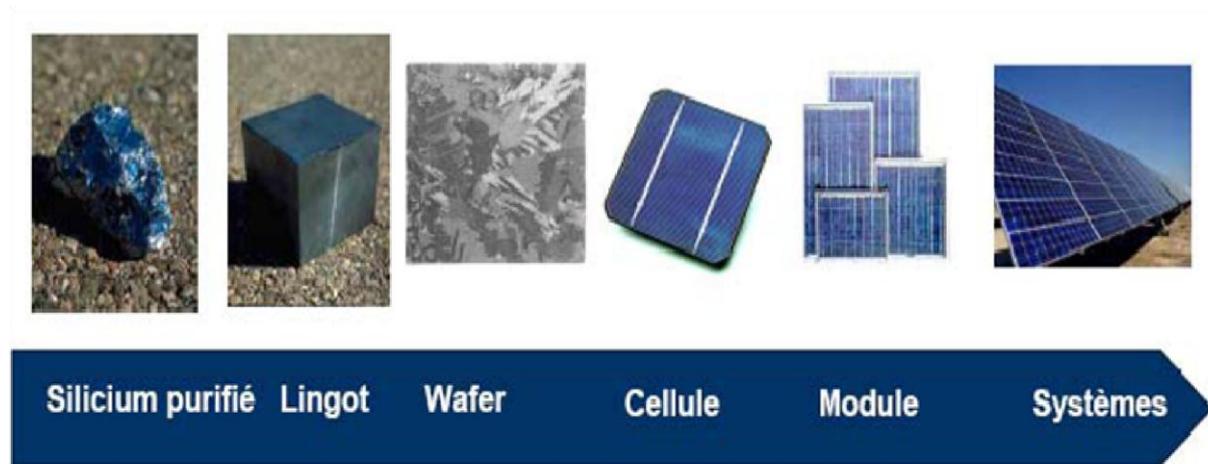


Figure II-15: Le passage d'une cellule à un champ photovoltaïque.

II. 7 Caractéristiques électriques d'une cellule PV

Dans cette figure, on peut remarquer deux points de fonctionnement importants : le courant de court-circuit (ISC) et la tension de circuit ouvert (VOC). Comme son nom indique, le courant de court-circuit correspond au courant quand la cellule est court-circuitée. Ce courant de court-circuit est proportionnel à la surface de la cellule qui capture la lumière, et pour une surface quelconque, ce courant de court-circuit dépend de l'intensité de lumière absorbée par la cellule. La tension de circuit ouvert est la tension aux bornes de la cellule quand il n'y a pas de courant. Sa valeur est de l'ordre de 0.6 V pour la cellule de type cristallin. Ces deux points (I_{SC} et V_{OC}) délimitent le fonctionnement de la cellule en trois zones différentes.

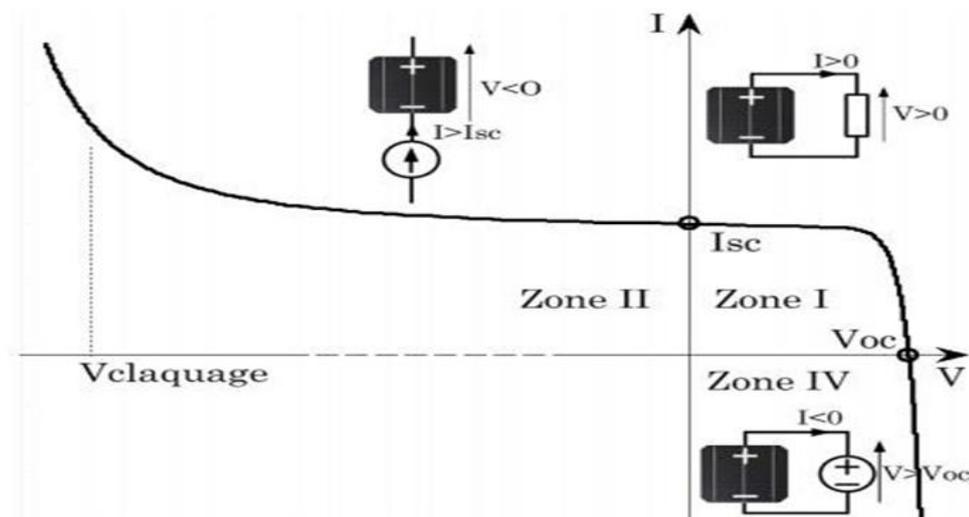


Figure II-16: Caractéristique I-V d'une cellule PV.

-La zone I de la Figure 7-1 correspond au fonctionnement en générateur de la cellule avec $0 \leq I \leq I_{sc}$ et $0 \leq V \leq V_{oc}$. C'est le fonctionnement dit normal de la cellule dans lequel elle débite la puissance produite à la charge.

-La zone II correspond au fonctionnement en récepteur de la cellule avec $I > I_{sc}$ et $V < 0$. Quand le courant traversant la cellule est forcé par un circuit extérieur à dépasser son courant de court-circuit, la cellule produit une tension négative à ses bornes. La croissance en courant provoquera l'endommagement de la cellule si la tension à ses bornes atteint une limite : la tension de claquage (Claquage). L'étude expérimentale sur différentes cellules de type cristallin a montré que la valeur de la tension de claquage varie entre -10 V et -30 .

-La zone III correspond de nouveau au fonctionnement en récepteur de la cellule, mais avec cette fois-ci $I < 0$ et $V > V_{oc}$ Quand la tension aux bornes de la cellule est amenée à dépasser sa tension de circuit ouvert, un courant inverse circule dans la cellule. Si ce courant inverse dépasse une limite, la cellule sera irrémédiablement endommagée.

II. 7. 1 Modèle d'une cellule solaire

La modélisation de la cellule solaire permet d'effectuer une analyse et une évaluation des performances du module photovoltaïque, les plus proches de la réalité.

II. 7. 1. 1 Modèle d'une diode

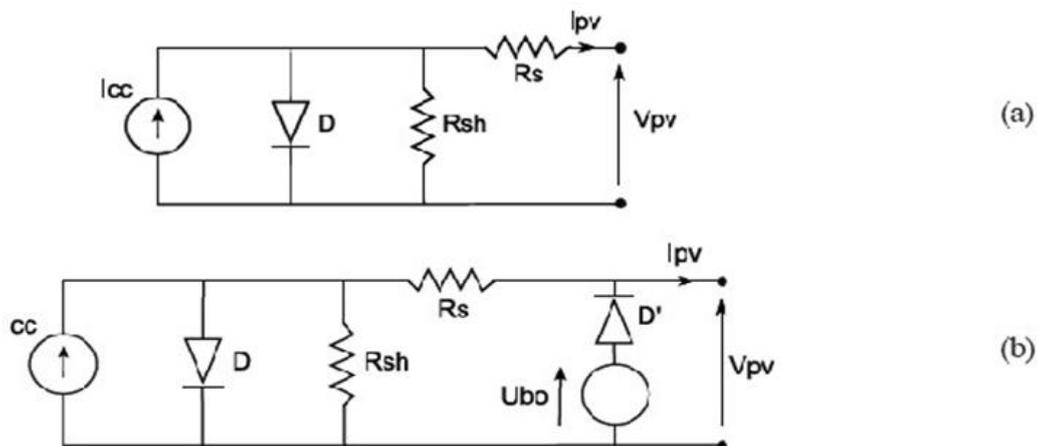


Figure II-17 : Circuit équivalent complet d'une cellule PV.

Les exploitation des caractéristiques courant tension des dispositifs PV sont la plupart du temps réalisées via l'interprétation du modèle à une diode présenté sur la figure I-8 ; Dans ce

modèle la couche active est représentée par un générateur de courant décrivant la propriété d'absorption (I_{ph}). Ce générateur est connecté en parallèle avec une diode décrivant les propriétés de redressement de la jonction (I_{diode}) et une résistance (R_{sh}) décrivant la présence de court-circuit dans le système. La résistance série (R_s) représente la résistivité du matériau dans lequel est fabriquée la cellule, la résistance de contact entre métal et semi-conducteur et la résistance d'interconnexion entre cellules.

L'équation du modèle à une diode de la cellule PV est le suivant :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{v + I R_s}{v_t}\right) - 1 \right] - \frac{v + I R_s}{R_{sh}} \dots \dots \dots (II-8)$$

a) Photo-courant

Le courant I_{ph} d'une cellule PV dépend de la température et de l'ensoleillement ainsi que du coefficient de température du court-circuit généralement donné dans les références constructeurs (α). Le courant I_{ph} pour expression générale :

$$I_{ph} = [I_{ph,STC} + \alpha(T_c - T_{c,STC})] \frac{G}{G_{STC}} \dots \dots \dots (II-8)$$

$I_{ph,STC}$: est le photo-courant aux STC (103 W/m², AM1.5), en [A]. α : le coefficient température du courant court-circuit en [A/°C]

T_c : est la température cellule, en [°C] $T_{c,STC}$: est la température cellule aux STC, [$T_{c,STC} = 25^\circ\text{C}$] G : est l'éclairement reçu par la cellule solaire [W/m²] G_{STC} : est l'éclairement aux STC.

La température de la cellule peut être donnée en fonction de la température ambiante par l'expression suivante :

$$T_c = T_a + \frac{(NOCT - 20)}{800} G \dots \dots \dots (II-9)$$

Avec :

T_c : est température de la cellule en [°C]

T_a : est la température ambiante en [°C]

NOCT : est la température normale de fonctionnement de la cellule.

b) Courant de saturation de la diode

Le courant de saturation est proportionnel à la température et aussi dépend de largeur de bande d'énergie du matériau de la cellule solaire.

$$I_0 = I_{0, \text{réf}} \left(\frac{T_c}{T_{c, \text{STC}}} \right)^3 \exp \left[\left(\frac{E_g}{n T_{c, \text{STC}}} \right) \left(\frac{1}{T_{c, \text{STC}}} - \frac{1}{T_c} \right) \right] \dots \dots \dots (\text{II-10})$$

Avec :

I_0 : est le courant de saturation inverse à la température T_c .

$I_{0, \text{ref}}$: courant de saturation inverse de référence.

E_g : est l'énergie de la bande interdite. Pour le silicium, elle est égale à 1.12eV

La tension thermique V_t donnée par l'équation suivante :

$$V_t = n k T / q \dots \dots \dots (\text{II-11})$$

Avec :

k : est le constant de Boltzmann

n : est facteur d'idéalité de diode.

q : est la charge d'électron.

II. 7. 1. 2 Modèle à deux diodes

Le modèle à deux diodes a été introduit dans le but d'obtenir une meilleure adéquation entre résultats expérimentaux et théoriques. La présence de défauts ou d'inhomogénéités dans une cellule provoquera des déviations sur les caractéristiques courant tension qui ne suivront plus le modèle à une diode. Une seconde diode (figure 8-2) est donc insérée en parallèle avec la première, mathématiquement cela permet d'ajouter une croissance exponentielle (un régime supplémentaire au fonctionnement) ou d'influencer la croissance induite par la première diode. L'équation du système est modifiée par l'ajout des paramètres de la deuxième diode (n_{id2} et I_{02}) et devient :

$$I = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - I_{Rsh} \dots \dots \dots (\text{II-12})$$

$$I = I_{ph} - I_{01} \left[\exp \left(\frac{q(V + I R_s)}{n_1 K T} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp \left(\frac{q(V + I R_s)}{n_2 K T} \right) - 1 \right] - \frac{(V + I R_s)}{R_{sh}} \dots \dots \dots (\text{II-13})$$

II. 8 Paramètres électriques de la cellule photovoltaïque

En dessinant la caractéristique courant-tension(I-V) et puissance-tension(P-V) d'une cellule PV.

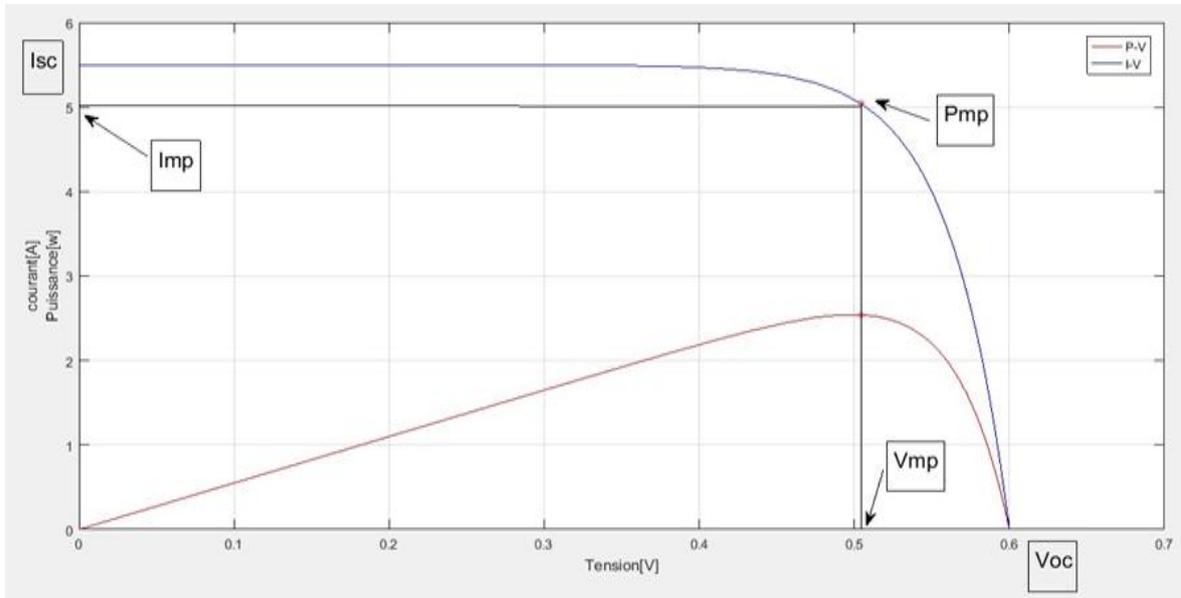


Figure II-18: la caractéristique I-V d'une cellule.

$P_m = V_{mp} \cdot I_{mp} \dots\dots\dots(II-14)$

Avec :

P_m : la puissance maximale.

I_m : est le courant délivré par la cellule au point de puissance maximale P_m .

V_m : est la tension aux bornes de la cellule au point de puissance maximale P_m .

a) Tension de circuit ouvert

Est la valeur de tension du générateur PV lorsque le courant est nul Elle est donnée par l'expression suivante :

$V_{oc} = nV_t \ln((I_{ph})/I_0 + 1) \dots\dots\dots(II-15)$

b) Courant de court-circuit

Il représente le courant délivré par la cellule quand la tension à ses bornes est nulle ($V=0$). Il est donné par l'expression suivante :

$I_{sc} = [I_{ph, stc} + \alpha(T_c - T_{c, stc})] G / (G_{stc}) \dots\dots\dots(II-16)$

c) Puissance débitée

La puissance fournie par la cellule est le produit I.V. Il s'écrit comme suit :

$$P=I.V=[I_{ph}-I_0[\exp((v+IR_S)/(Vt))-1]]-(v+IR_S)/(R_{sh})]-v \quad \dots\dots\dots(\text{II-17})$$

$$\partial p/\partial v |_{p=p_m} =0 \quad \dots\dots\dots(\text{II-18})$$

d)Facteur de forme

Le facteur de forme est donné par le rapport entre la puissance maximale est le produit (Voc.Isc)

$$FF=(P_m)/(I_{sc} V_{oc})=(I_m V_m)/(V_{oc} I_{sc}) \dots\dots\dots(\text{II-19})$$

e) Rendement de conversion

Le rendement η est un autre paramètre primordial qui est défini par le rapport entre la puissance fournie et la puissance incidente P_{in} de la cellule solaire

$$\eta=(P_m)/(P_{inc})=(V_m I_m)/(P_{inc} S_c) \dots\dots\dots(\text{II-20})$$

Pour comparer le rendement des cellules solaires, la puissance incidente doit être prise comme identique, sous les conditions d'ensoleillement standard AM1.5 et à 25°C. Afin de comparer la production photovoltaïque avec les autres sources d'énergie, la littérature utilise souvent l'unité Watt crête (W_c ou W_p en anglais peak Watt). Elle correspond à la puissance nominale d'une cellule photovoltaïque [4].

La tension produit par la cellule PV est très faible il faut connectées plusieurs cellules en série pour obtenir une tension compatible avec la charge et former un module PV généralement consiste en 36 cellules en série.

II. 9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit les différentes technologies des cellules photovoltaïques et leurs équations mathématiques et en fin différents connexion existé de cellules pour former un modules qui produits une énergie électrique.

Dans le chapitre suivant nous présentons les schémas électrique équivalents idéal, réelle, une seule diode et à deux diodes avec et sans résistance shunt.

Références bibliographiques

System.solaire.free.fr/soleil.htm

KechidaEssaghir « Etude expérimentale et théorique du gisement solaire pour la région de M'sila », Mémoire de master en physique énergétique et énergies renouvelables, université de Msila, 2019

El arbi el bouziani, ' Le gisement solaire,' Faculté de science ibn to fail a A Kenitra 'Maroc' (2014).

J. Royer et T. Djiako et E. Schiler, B. Sadasy, " Le pompage photovoltaïque, Mémoire de magister en Automatique "Université d'Ottawa, 1998

Julien LABBÉ, " l'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés ", thèse de doctorat de l'école des mines de paris, Spécialité "Énergétique" le 21 décembre 2006

O, Sotehi. Etude des caractéristiques de fonctionnement et de la performance d'un distillateur solaire ; thèse de magistère, Université de Constantine.2009.

J, A, Duffie; W, A, Beckman. Solar engineering of thermal processes, John Wiley and Sons. (1980).

M .IQBAL, 'An introduction to solar radiation', Academic press, New York, 1983. [9] Azadeh A., Maghsoudi A., Sohrabkhani S., (2010), «An integrated artificial neural networks approach for predicting global radiation», Energy Conversion and Management. [10] Mohamed Amjahdi et Jean Lemale«<Adopter le solaire thermique et photovoltaïque

HelaliKamelia « Modélisation d'une cellule photovoltaïque : Etude comparative»,

Mémoire de magister, département d'électrotechnique, faculté du génie électrique,

UMMTO2012

Mr.Abderrazek Mahfoude« modélisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement», thèse de doctorat, université Stif, 2015

I. Vechiu, "Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome", Thèse de doctorat l'université du havre, Paris, décembre 2005

Bibliographie

Said Chikha, « Optimisation de la puissance dans les systèmes photovoltaïques », thèse de Magister option Commande, UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI OUM EL BOUAGHI, 2011/2012.

A. Ricaud, « Modules et systèmes photovoltaïques », Septembre 2008

www.zergoungreenenergy.com

www.ginverter.com

solairepedia.fr

M. KARA Abdelfattah, « Dimensionnement et analyse du coût d'un système hybride de production d'énergie renouvelable pour des sites isolés en Algérie », Mémoire de Master, UNIVERSITE FERHAT ABBAS –SETIF1, Faculté de Technologie Département d'Electrotechnique.

CHAPITRE III
SCHÉMAS ÉQUIVALENTS DES
CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

Bibliographie

III. 1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant des photons, comprise dans le rayonnement solaire, en énergie électrique par le biais de capteurs fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible (nommée cellule PV). [21]

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui à une caractéristique statique courant tension (I-V) non linéaire et présente un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairement et de la tension de la cellule. Le point de fonctionnement du (GPV) peut donc varier entre les points extrêmes correspondant au courant de court-circuit (I_{cc}) et la tension en circuit ouvert (V_{co}).

La détermination du point de fonctionnement du (GPV) dépend directement de la charge à laquelle il est connecté, il est plus ou moins éloigné du (PPM) caractérisé par le courant et la tension optimaux, notées (I_{op} , V_{op}).

Dans ce chapitre, nous allons tenter de définir les modèles s'appliquant aux cellules photovoltaïques, la détermination de ses paramètres se fera sur bases de données fournies par le constructeur de panneaux.

III. 2 Modèle d'une cellule solaire idéale

La photopile est un composant semi-conducteur qui délivre un courant en excitant ce dernier par des photons, donc en première approximation on a une source de courant, qui est court-circuitée par une diode (car la photopile est une jonction P-N).

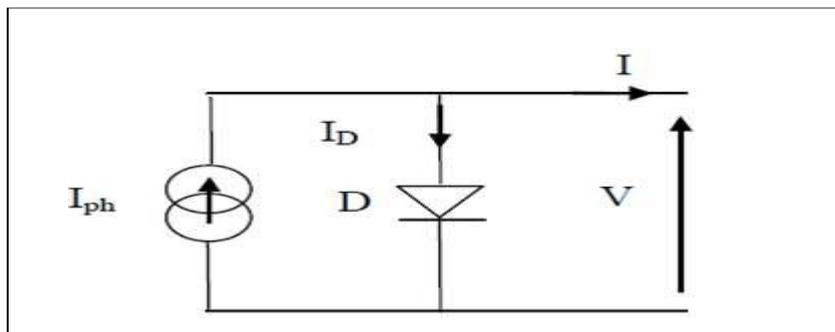


Figure III-1: schéma idéale d'une cellule photovoltaïque.

Les trois paramètres sont :

I_{ph} : Le courant photonique.

I_{pv} : Le courant électrique produit par la cellule PV.

Bibliographie

I_d : courant de diode.

La loi de Kirchhoff permet de déduire directement l'équation caractéristique [44]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \dots\dots\dots(\text{III-1})$$

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

$$I_d = I_s \left[\exp\left(\frac{V_d}{nV_t}\right) - 1 \right] \dots\dots\dots(\text{III-2})$$

Le courant débité équivaut à :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V_d}{nV_t}\right) - 1 \right] \dots\dots\dots (\text{III-3})$$

Avec :

V_d : La tension de la diode (V).

V_t : La tension thermique.

n : le facteur d'idéalité de la diode.

$$V_t = \frac{NKT}{q} \dots\dots\dots(\text{III-4})$$

Avec :

V_t : Tension thermique [V].

N : Facteur d'idéalité de la photopile.

K : Constant de Boltzmann (1.38. J/K).

q : Charge de l'électron (1.6. C).

donc :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{qV_d}{n.K.T}\right) - 1 \right) \dots\dots\dots(\text{III-5})$$

III. 3 Modèle d'une cellule solaire réelle

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles de la cellule photovoltaïque qui diffèrent entre eux par le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et de l'intensité de courant de sortie.

Bibliographie

Rauschenbach (1980) et Townsend (1981) ont prouvés que des cellules photovoltaïques peuvent être modélisées par un circuit électrique équivalent qui contient des paramètres ayant les significations liées aux phénomènes physiques de la cellule.

Roger (1984), Appelbaum (1987), Ekstein (1990), Duffie et Beckmann (1991) et

Alghuwainem (1992) ont employés le modèle à quatre paramètres. [22]

III. 4 Différents modèles électriques de panneau photovoltaïque

III. 4. 1 Modèle à une diode (à une seule exponentielle)

Réellement il existe plusieurs influences des résistances parasites dans la production de l'énergie électrique, et la cellule photovoltaïque est représentée généralement par le schéma suivant :

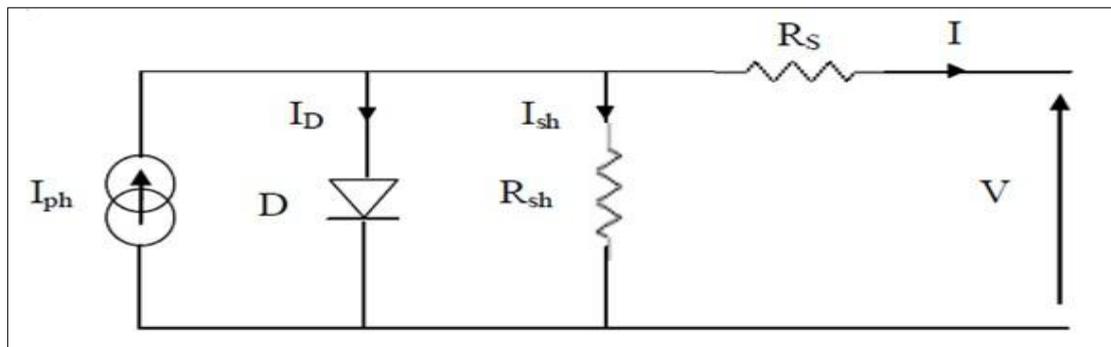


Figure III-2: schéma équivalent d'une cellule solaire.

C'est le modèle le plus classique dans la littérature, il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes Physique de polarisation et deux résistances (série et shunt).

Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique (I-V) de la photopile :

- la résistance série est la résistance interne de la cellule, elle principalement la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles. [23]

III. 4. 1. 1 Modèle à une diode avec résistance shunt

La résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

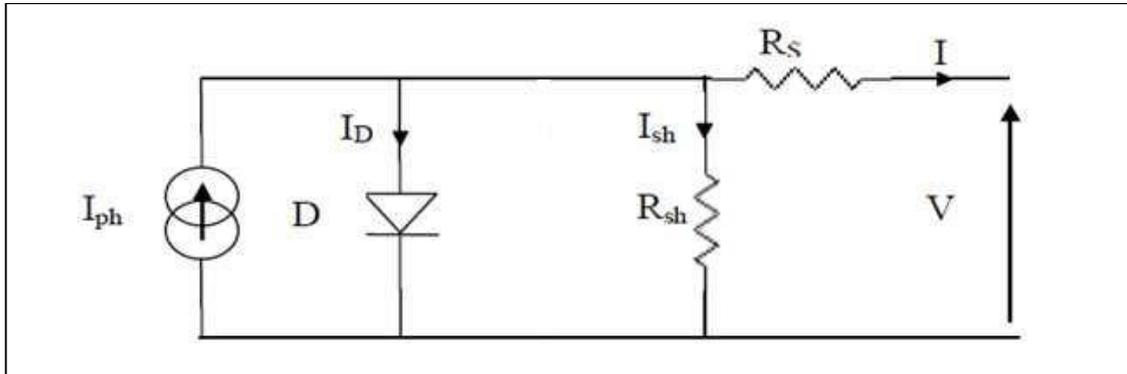


Figure III-3: Schema Equivalent A Une Diode Avec Résistance Shunt.

III.3.1.2 Modèle à une diode sans résistance shunt

Le courant de la diode est donné par :

$$I_D = I_0 \times \left[\exp \left(\frac{q \times (V + R_s \times I)}{a.k.T} \right) - 1 \right] \dots \dots \dots (III-6)$$

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \dots \dots \dots (III-7)$$

$$I = I_{ph} - I_0 \times \left[\exp \left(\frac{q \times (V + R_s \times I)}{a.k.T} \right) - 1 \right] - \left(\frac{V + R_s \times I}{R_{sh}} \right) \dots \dots \dots (III-8)$$

III. 4. 1. 2 Modèle à une diode sans résistance shunt

Un modèle électrique empirique simple, le plus proche du générateur photovoltaïque, est actuellement le plus utilisé en raison de la qualité des résultats obtenus, c'est le modèle à une diode. La figure illustre le circuit électrique équivalent au modèle à une diode. [23]

Un modèle électrique empirique simple, le plus proche du générateur photovoltaïque, est actuellement le plus utilisé en raison de la qualité des résultats obtenus, c'est le modèle à une diode. La figure illustre le circuit électrique équivalent au modèle à une diode. [23]

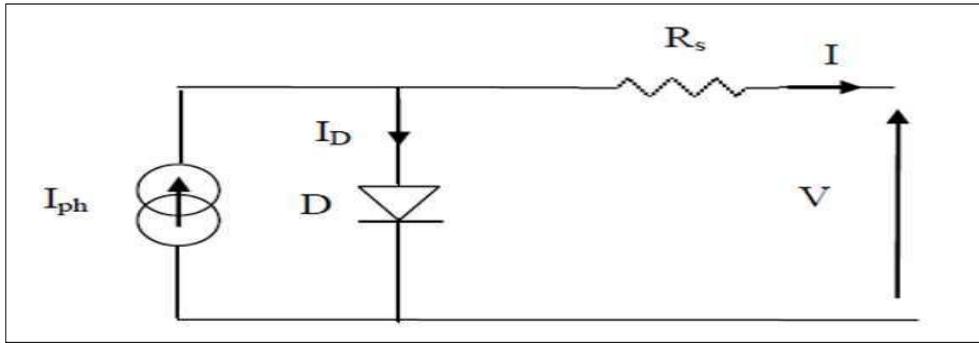


Figure III 4: schéma équivalent à une diode sans résistance shunt.

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles :

$$I = I_{ph} - I_D \dots\dots\dots(III-9)$$

$$I = I_{ph} - I_0 \times [\exp ((q \times (V + R_s \times I)) / (a \cdot k \cdot T)) - 1] \dots\dots\dots(III-10)$$

III.3.2 Modèle à deux diodes (à deux exponentielles)

III.3.2.1 Modèle à deux diodes avec résistance shunt

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique suivant (figure III.5), qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, deux diodes pour la polarisation de la cellule, une résistance shunt et une résistance série.

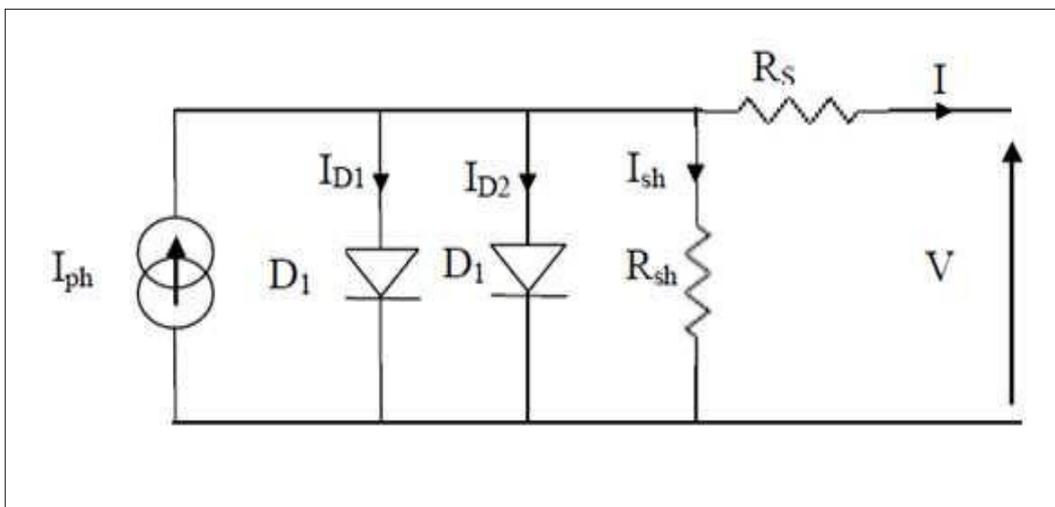


Figure III.5: Schema Equivalent A Deux Diodes Avec Resistance Shunt.

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles :

$$I = I_{ph} - (I_{D1} + I_{D2}) - I_{sh} \dots\dots\dots(III-11)$$

Le courant de la diode est donné par :

Bibliographie

$$I_{D1} = I_{01} \times \left[\exp \left(\frac{q \times (V + R_s \times I)}{a \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right] \dots \dots \dots \text{(III-12)}$$

$$I_{D2} = I_{02} \times \left[\exp \left(\frac{q \times (V + R_s \times I)}{a \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right] \dots \dots \dots \text{(III-13)}$$

Avec :

I_{01}, I_{02} : courant de saturation des diodes.

$$I = I_{ph} - I_{01} \times \left[\exp \left(\frac{q \times (V + R_s \times I)}{a \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right] - I_{02} \times \left[\exp \left(\frac{q \times (V + R_s \times I)}{a \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right] - \left(\frac{V + R_s \times I}{R_{sh}} \right) \dots \dots \dots \text{(III-14)}$$

III. 4. 1. 3 Modèle à deux diodes sans résistance shunt

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique (figure III.6), qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux (éclairage), deux diodes pour la

Polarisation de la cellule et une résistance série.

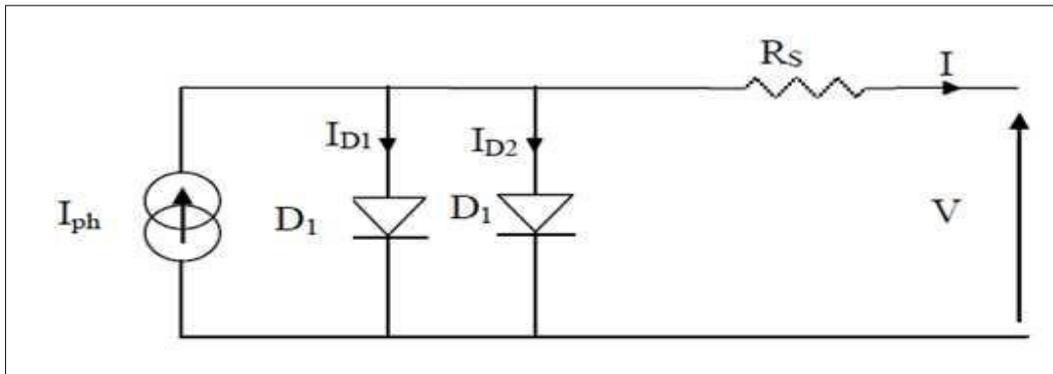


Figure III-4: Schéma Equivalent A Deux Diodes Sans Résistance Shunt.

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles :

$$I = I_{ph} - (I_{D1} + I_{D2}) \dots \dots \dots \text{(III-15)}$$

$$I = I_{ph} - I_{01} \times \left[\exp \left(\frac{q \times (V + R_s \times I)}{a \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right] - I_{02} \times \left[\exp \left(\frac{q \times (V + R_s \times I)}{a \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right] \dots \dots \dots \text{(III-16)}$$

Après la modélisation de défèrent modèles on peut dit que :

Les quatre paramètres inconnus son I_{ph} , I_0 , a et R_s ou avec précision les paramètres aux conditions de référence.

Alors que R_s et a sont supposés être constants, I_{ph} est en fonction de l'éclairement et de la température des cellules et I_0 est en fonction de la température seulement. Cette dernière peut être déterminée à partir de la température ambiante et avec l'aide des données des essais standards fournis par les fabricants.

III. 4. 2 Oued Nechou le site d'implantation d'installation d'expérimentation

Le site d'implantation le central solaire photovoltaïque de Ghardaïa est réalisée par S.P.E. « Société Algérienne de production de l'électricité » sur un site à environ 15 km au nord de la ville de Ghardaïa, près du village d'OUED NECHOU située à une latitude de 32°24'N et une longitude de 3°48'E avec une altitude de 566m. Le terrain d'assiette est d'une envergure de 10 hectares qui est limitée au nord et à l'ouest par la route nationale N°01, au sud et à l'est par un terrain vague. OUED NECHOU est caractérisé par une irradiation solaire qui atteint en été des valeurs d'ordre de 900 à 1000 W/m² et un climat saharien dont les conditions climatiques sont très sévères vu la température élevée et les tempêtes de sable auxquelles les régions de sud sont soumises. Ce central pilote permettra de tester le comportement de ce genre d'équipements et son adaptation au climat du sud. Le central est d'une puissance nominale d'environ 1100 kWc (crête).



Figure III-5 : Centralepvoued Nechou.

Constitution de la centrale

Le central est un projet « pilote », partagée en huit (08) sous-champs ; contenant quatre (04) modules photovoltaïques de technologie différentes et deux (02) type de structures (fixe et Motorisé).

➤ Sous champ (1) : 105 KWc en silicium monocristallin structure motorisé. ➤ Sous champ (2) : 98.7 KWc en silicium poly cristallin structure motorisé.

Bibliographie

➤ Sous champ (3) : 100.8 KWc en couche minces (Tellurure de cadmium Cd-Te) structure fixe.

➤ Sous champ (4) : 100.116 KWc en silicium amorphe structure fixe.

➤ Sous champ (5) : 105 KWc en silicium monocristallin structure fixe.

➤ Sous champ (6) : 98.7 KWc en silicium poly cristallin structure fixe.

➤ Sous champ (7) : 255 KWc en silicium monocristallin structure fixe.

➤ Sous champ (8) : 258.5 KWc en silicium poly cristallin structure fixe.

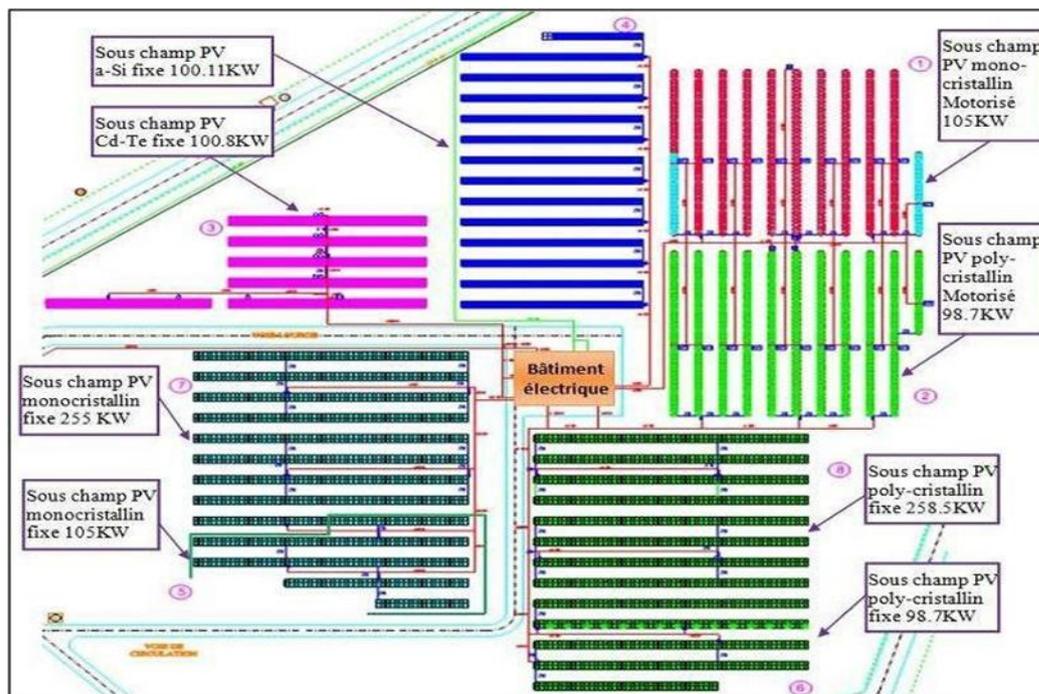


Figure III-6: Répartition des sous champs dans le central PV.

III. 5 Conclusion :

Ce chapitre aborde les différents schémas électriques pour les technologies de cellules photovoltaïques et offre une vision technique de la centrale solaire SKTM Oued Nechou à Ghardaia. L'objectif est d'utiliser les informations recueillies sur cette centrale dans les chapitres suivants, dédiés à la simulation et à la mise en parallèle des résultats théoriques et expérimentaux des quatre technologies employées.

Références

1. Hneini, MemaBabe. Etude de la centrale photovoltaïque de Skhouna (Saida). Diss. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA, 2019.
2. Guermoui, Mawloud, et al. "New soft computing model for multi-hours forecasting of global solar radiation." *The European Physical Journal Plus* 137.1 (2022): 162.
3. Guermoui, Mawloud, et al. "A novel hybrid model for solar radiation forecasting using support vector machine and bee colony optimization algorithm: review and case study." *Journal of Solar Energy Engineering* 143.2 (2021).
4. Khelifi, Reski, et al. "Multi-step-ahead forecasting of daily solar radiation components in the Saharan climate." *International Journal of Ambient Energy* 41.6 (2020): 707715.
5. Guermoui, Mawloud, John Boland, and AbdelazizRabehi. "On the use of BRL model for daily and hourly solar radiation components assessment in a semiarid climate." *The European Physical Journal Plus* 135.2 (2020): 1-16.
6. Guermoui, Mawloud, et al. "Forecasting intra-hour variance of photovoltaic power using a new integrated model." *Energy Conversion and Management* 245 (2021): 114569.

CHAPITRE IV
SIMULATION THEORIQUE ET
EXPERIMENTALE DES DONNEES
DES MODULES PV D'OUED NECHOU

IV. 1 Introduction :

L'ensembles des cellules photovoltaïques forme des modules PV. Ces modules regroupés forment des champs photovoltaïques. Ces cellules rassemblées peuvent être connectées en série et / ou parallèle. L'objectif de ce chapitre est de modéliser une cellule PV d'une manière compréhensible, et d'étudier ces performances en variant les principales caractéristiques régissant son rendement et sa durée de vie. Cette étude simpliste est faite de telle manière à comprendre le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques, par la variation de la température, l'irradiation, et des caractéristiques électriques.

Pour achever cet objectif nous avons simulé un système de mesure d'une cellule photovoltaïque des modules suivants qui fonctionnée à SKTM oued Nechou selon la bibliothèque installée dans le logiciel Matlab.

IV. 2 Matlab Simulink :

Matlab SIMULINK est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques. Il fournit un espace graphique et une bibliothèque de blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal [40].

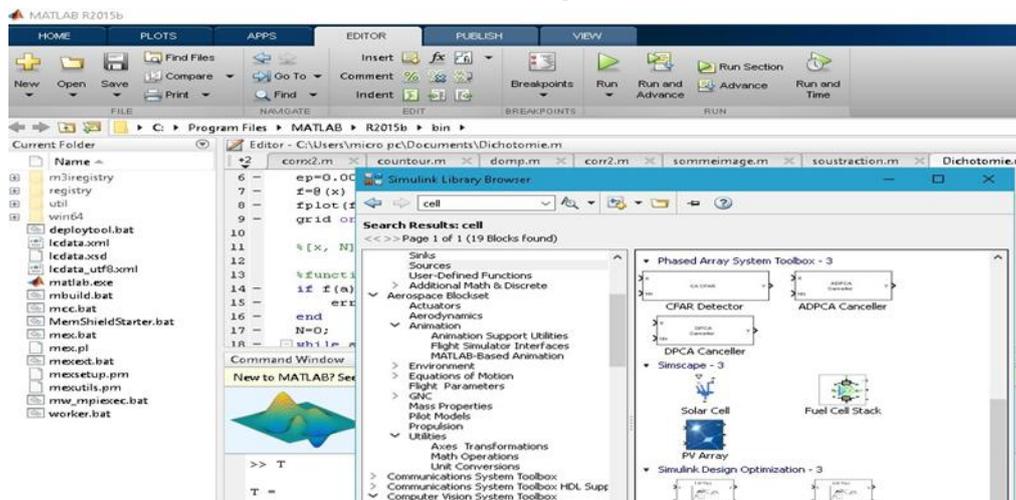


Figure IV-1: Interface Simulink/Matlab.

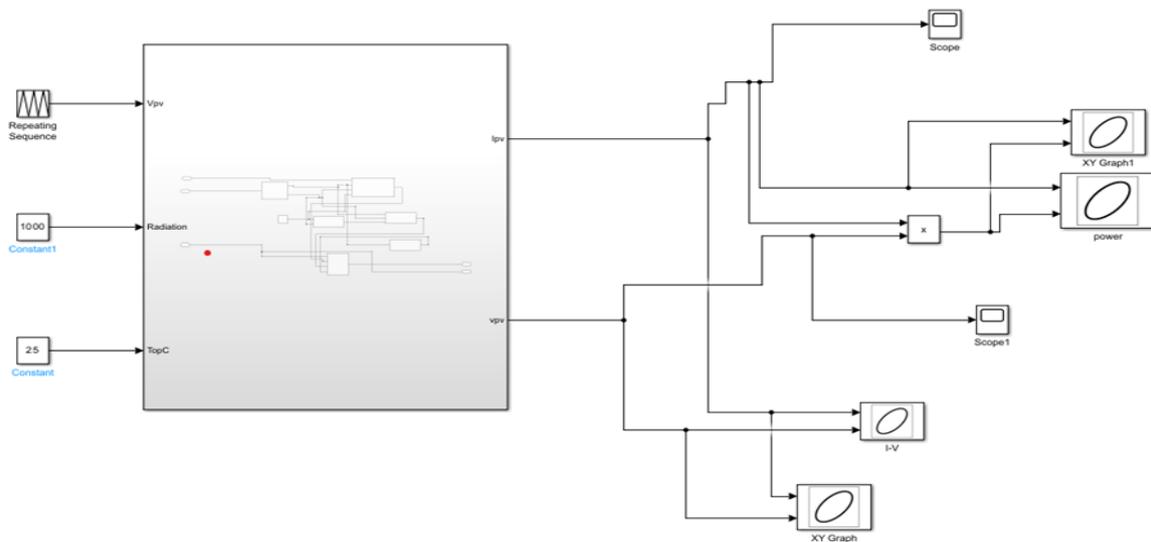


Figure IV-2: Schéma bloc d'un module PV in Matlab-Simulink

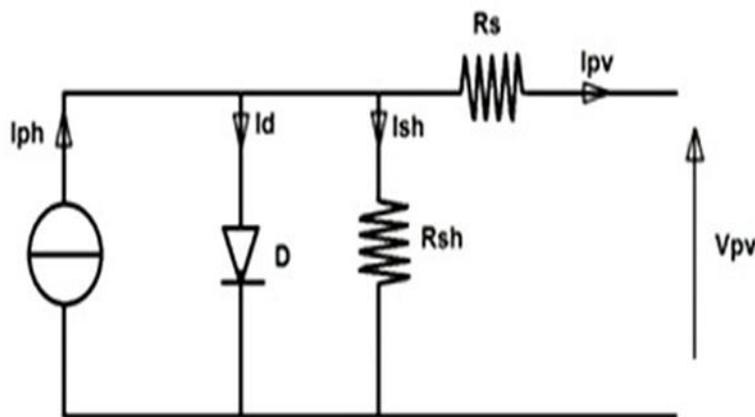


Figure IV-3 : Model électrique d'une cellule photovoltaïque.

D'après ce circuit, et on appliquant la loi de Kirchoff, on déduit ces équations [41] :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \dots \dots \dots (IV-1)$$

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_{rs} \left[e^{q \left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{A K T N_s} \right)} - 1 \right] - N_p \left(\frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{R_s R_{sh}} \right) \dots \dots \dots (IV-2)$$

Ou I_{ph} est proportionnel à l'irradiation solaire, donné par l'équation suivante :

$$I_{ph} = [I_{rs} + k_i(T - T_r)] \frac{G}{G_r} \dots \dots \dots (IV-3)$$

$$I_{rs} = I_{rr} \cdot \left[\frac{T}{T_r} \right]^3 \cdot \exp \left(\frac{q E_G}{K A} \left[\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right] \right) \dots \dots \dots (IV-4)$$

IV. 3 Simulation d'un système électrique de mesure d'une cellule photovoltaïque

On a conçu un montage de mesure par Simulink/Matlab d'une cellule photovoltaïque, qui fait part du module photovoltaïque Atersa A-250M, avec les caractéristiques définies dans le tableau précédant, pour déduire les valeurs de : courant et de puissance, fournit en dépendance de la tension, on faisant varier les facteurs climatiques comme l'éclairage E et la température T et aussi la résistance en série R_s [42].

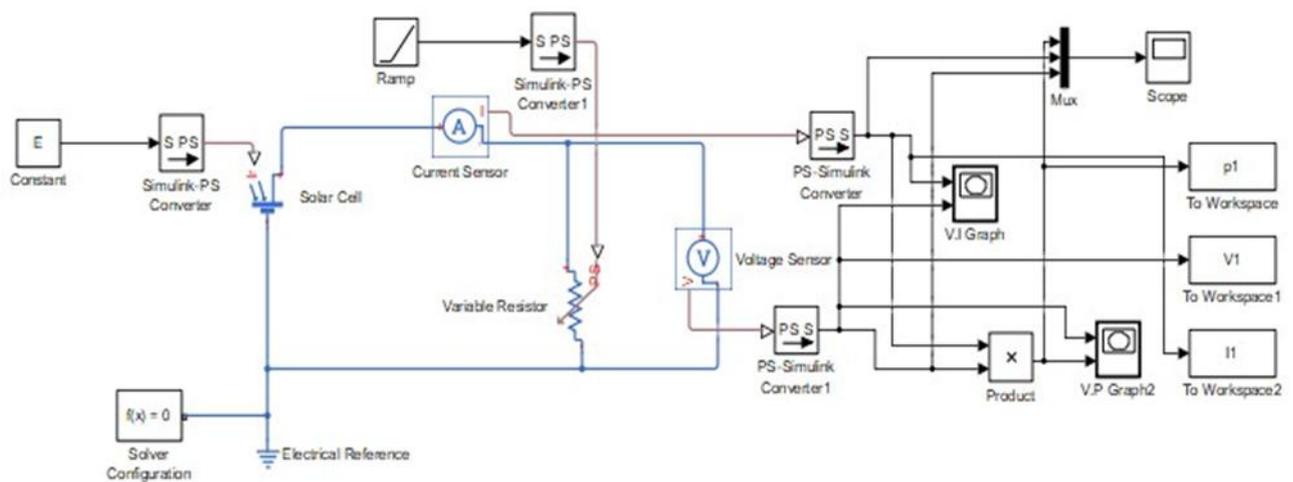


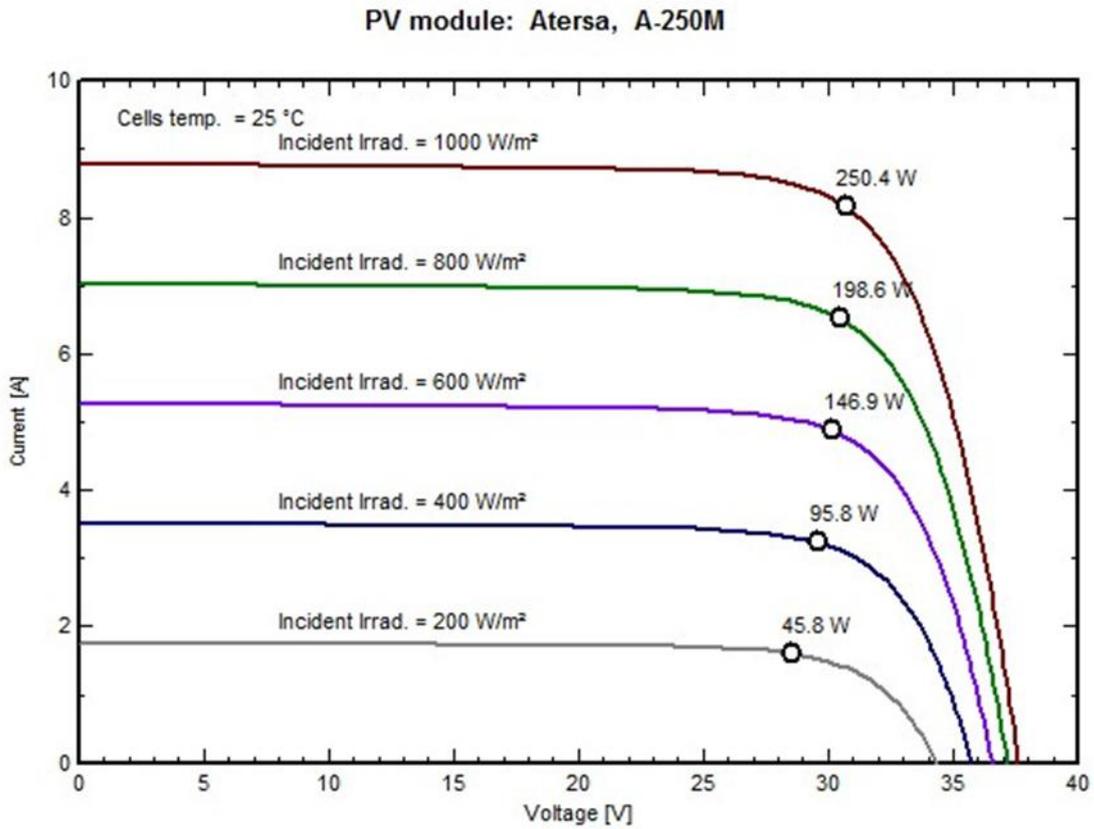
Figure IV-4 : Montage De Mesure Des Paramètres Electrique De La Cellule Photovoltaïque Par Matlab Simulink.

Tableau IV-1: courant par rapport à tension PV monocristallin A-250M

<i>Paramètres courbe: irradiance incidente [W/m2]</i>				
<i>1000</i>	<i>800</i>	<i>600</i>	<i>400</i>	<i>200</i>
<i>Température [°C]</i>		<i>25</i>		

Figure IV-5: **COURBE PUISSANCE** par rapport à tension, paramétrées avec irradiance

Tableau IV-2: Courbe courant par rapport à tension PV monocristallin A-250M



<i>Paramètres courbe: irradiance incidente [W/m²]</i>				
<i>1000</i>	<i>800</i>	<i>600</i>	<i>400</i>	<i>200</i>
<i>Température [°C]</i>			<i>25</i>	

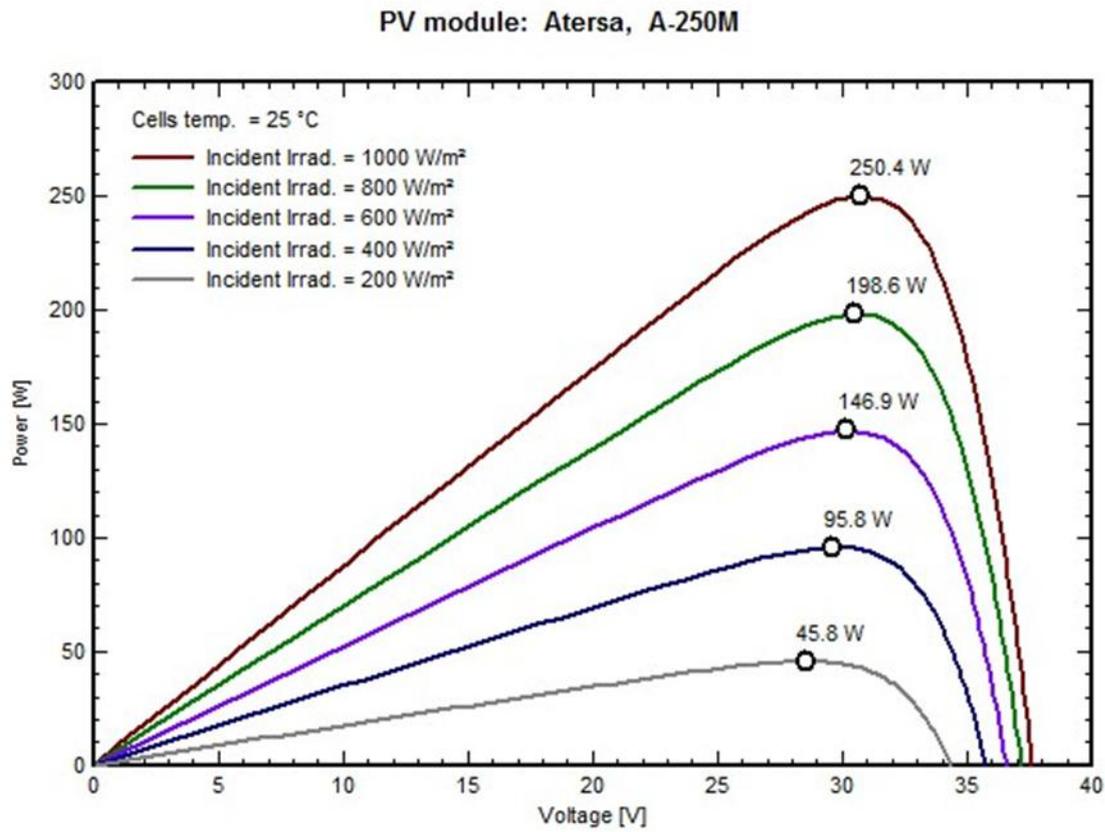


Figure IV-6 : courbe puissance par rapport à tension PV monocristallin A-250M

IV. 3. 1 Interprétation Influence de l'éclairement

Les figure (IV.4) et (IV.5) représentent les variations du courant I et de la puissance P en fonction de la tension V respectivement, à la température $T = 25^\circ C$, pour Cinq valeurs d'éclairement comme suit ($E = 1000 W/m^2$, $E = 800 W/m^2$, $E = 600 W/m^2$, $E = 400 W/m^2$ et $E = 200 W/m^2$).

Les deux graphes montrent comment le courant I varie en fonction de la tension V pour différents niveaux d'éclairement incident puis éclairement incident est $1000 W/m^2$ produit une puissance maximale de $250 W$ est égale la puissance au conditions STC.

Eclairement incident de $800 W/m^2$ le courant et la puissance diminuent également, la puissance maximale est d'environ $198.6 W$.

Eclairement incident $600 W/m^2$ une réduction supplémentaire de l'éclairement entraîne une diminution du courant et la puissance. Ici la puissance maximale est d'environ $146.9 W$.

Eclairement incident $400 W/m^2$ cet éclairement plus faible la puissance de sortie maximale chute à environ $95.8 W$.

Eclairement incident 200 W/m^2 cela représente un très faible niveau de rayonnement solaire, ce qui entraîne un courant considérablement réduit et une puissance maximale d'environ 45.8 W .

- Effet de l'éclairement sur le courant : lorsque l'éclairement incident diminue, le courant de court-circuit (I_{cc} , le courant lorsque la tension est nulle) diminue proportionnellement.
- Effet de l'éclairement sur la tension : la tension en circuit ouvert (V_{co} , la tension lorsque le courant est nulle) est moins affectée par les changements d'éclairement que le courant, bien qu'une légère diminution puisse être observée à de très faible éclairement.
- Point de puissance maximale (MPP) : pour chaque courbe, il y a un point où le produit du courant et de la tension est maximisé. Ces points sont les valeurs de puissance maximale correspondantes.

En résumé, les deux graphes fournissent des informations cruciales sur les performances du module PV Atersa, A-250M dans diverses conditions de rayonnement solaire à une température de cellule constante.

Tableau IV-3 : paramètres de température de courbe puissance par rapport à tension.

<i>Paramètres courbe: température [$^{\circ}\text{C}$]</i>				
<i>10</i>	<i>25</i>	<i>40</i>	<i>55</i>	<i>70</i>
<i>Irradiance incidente [W/m^2]</i>		<i>1000</i>		

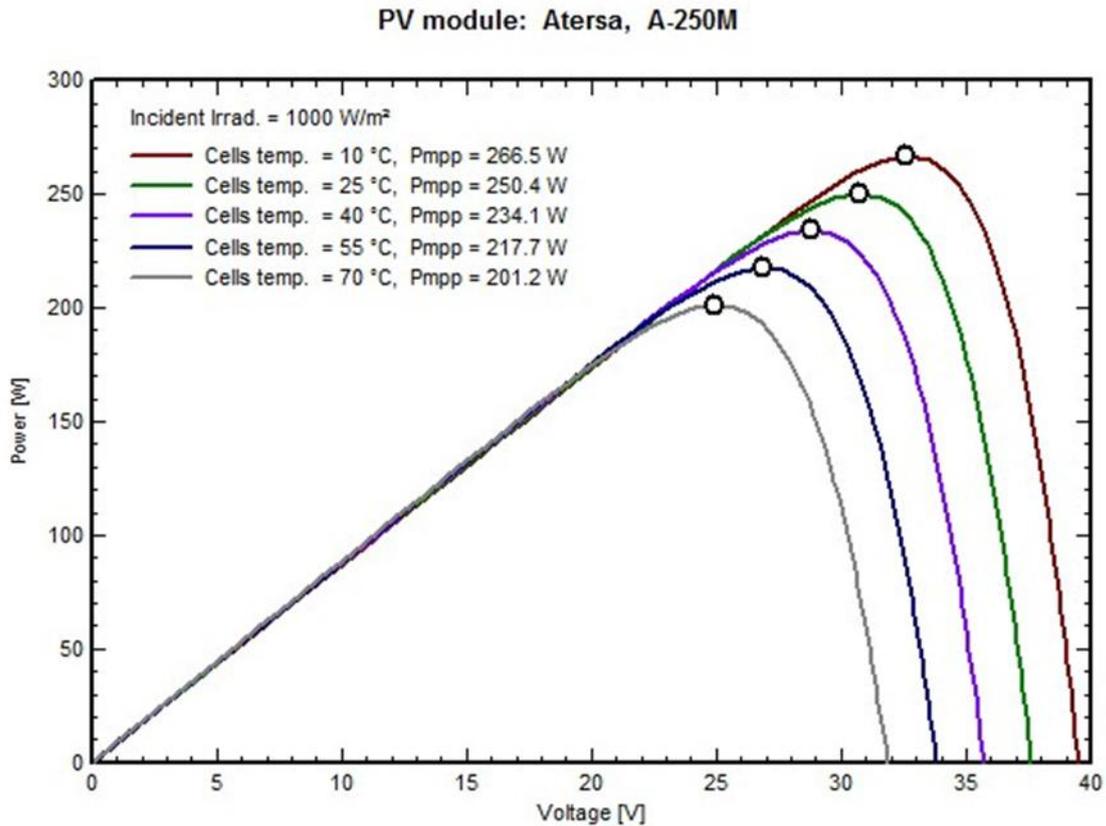


Figure IV-7 : courbe puissance par rapport à tension paramétrées avec température.

IV. 3. 2 Interprétation Influence de la température :

La figure IV.6 présente la courbe de la puissance (W) en fonction de la tension (V), paramétrée selon la température. Cela signifie qu'elle illustre l'évolution de cette relation à différentes températures des cellules photovoltaïques. L'irradiance solaire incidente est maintenue constante à 1000 W/m², ce qui constitue une condition standard pour les essais de panneaux solaires.

Chaque courbe représente la relation puissance-tension pour une température spécifique. Les températures et les puissances maximales (Pmpp) correspondantes sont les suivantes :

- À 10 °C : Pmpp = 266,5 W
- À 25 °C : Pmpp = 250,4 W
- À 40 °C : Pmpp = 234,1 W
- À 55 °C : Pmpp = 217,7 W
- À 70 °C : Pmpp = 201,2 W

Toutes les courbes P-V ont une forme similaire : la puissance augmente avec la tension jusqu'à atteindre un point de puissance maximale (MPP), puis décroît rapidement.

Ce point de puissance maximale est essentiel pour optimiser les systèmes solaires, car c'est là que le module délivre sa puissance maximale.

Effets de la température :

- Sur la puissance maximale : On observe clairement qu'à mesure que la température augmente, la puissance maximale diminue. Entre 10 °C et 70 °C, la puissance passe de 266,5 W à 201,2 W, soit une baisse significative.

- **Sur la tension au MPP :** La tension à laquelle la puissance maximale est atteinte tend également à diminuer légèrement avec l'élévation de la température.

Résumé :

Ce graphique met en évidence l'effet négatif de l'augmentation de la température sur les performances du module photovoltaïque A-250M, pour une irradiation constante de 1000 W/m² : plus la température des cellules est élevée, moins le module produit d'énergie électrique.

Tableau IV-4 : courbe efficacité par rapport à irradiance, paramétrisée avec température

<i>Paramètres courbe: température [°C]</i>				
<i>10</i>	<i>25</i>	<i>40</i>	<i>55</i>	<i>70</i>

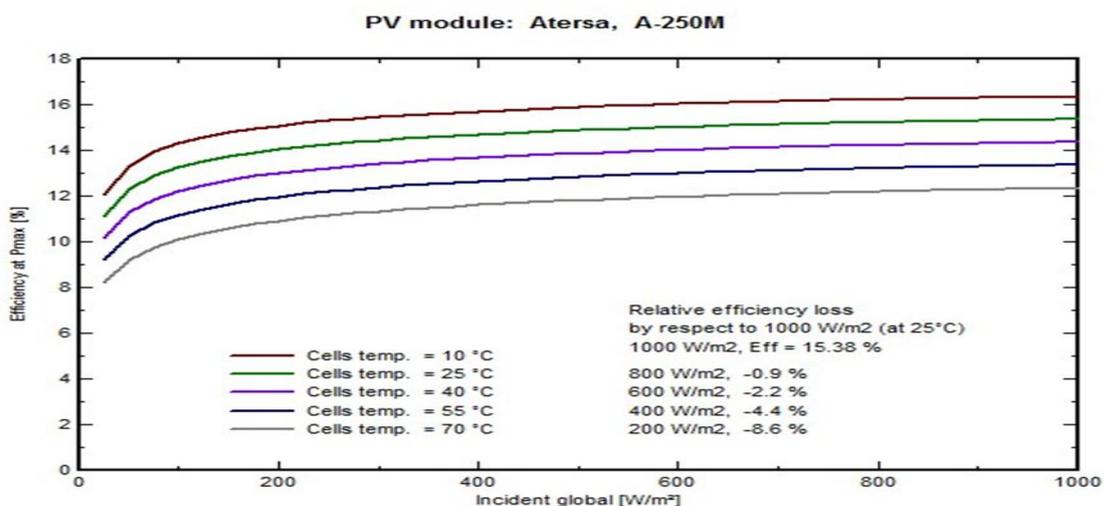


Figure IV-8 : Courbe efficacité par rapport à irradiance, paramétrées avec température

IV. 3. 3 Interprétation la courbe efficacité -irradiance paramétrée à la température

Ce graphique montre l'évolution de l'efficacité du module en fonction de l'irradiance incidente, pour différentes températures de cellule :

- 25 °C: courbe la plus haute, efficacité maximale(STC)
- 40 °C
- 55 °C
- 70 °C : courbe la plus basse, efficacité minimale

On remarque que pour une irradiance donnée, l'efficacité diminue avec l'augmentation de la température. L'efficacité augmente avec l'irradiance jusqu'à atteindre un point optimal, puis se stabilise ou diminue légèrement.

Perte relative d'efficacité à 25 °C selon l'irradiance :

Irradiance (W/m ²)	Efficacité (%)	Perte (%)
1000	15,38	—
800	—	0,9
600	—	2,2
400	—	4,4
200	—	8,6

Tableau IV-5 : Courbes efficacité par rapport à température, paramétrées avec irradiance

<i>Paramètres courbe: irradiance incidente [W/m²]</i>				
<i>1000</i>	<i>800</i>	<i>600</i>	<i>400</i>	<i>200</i>

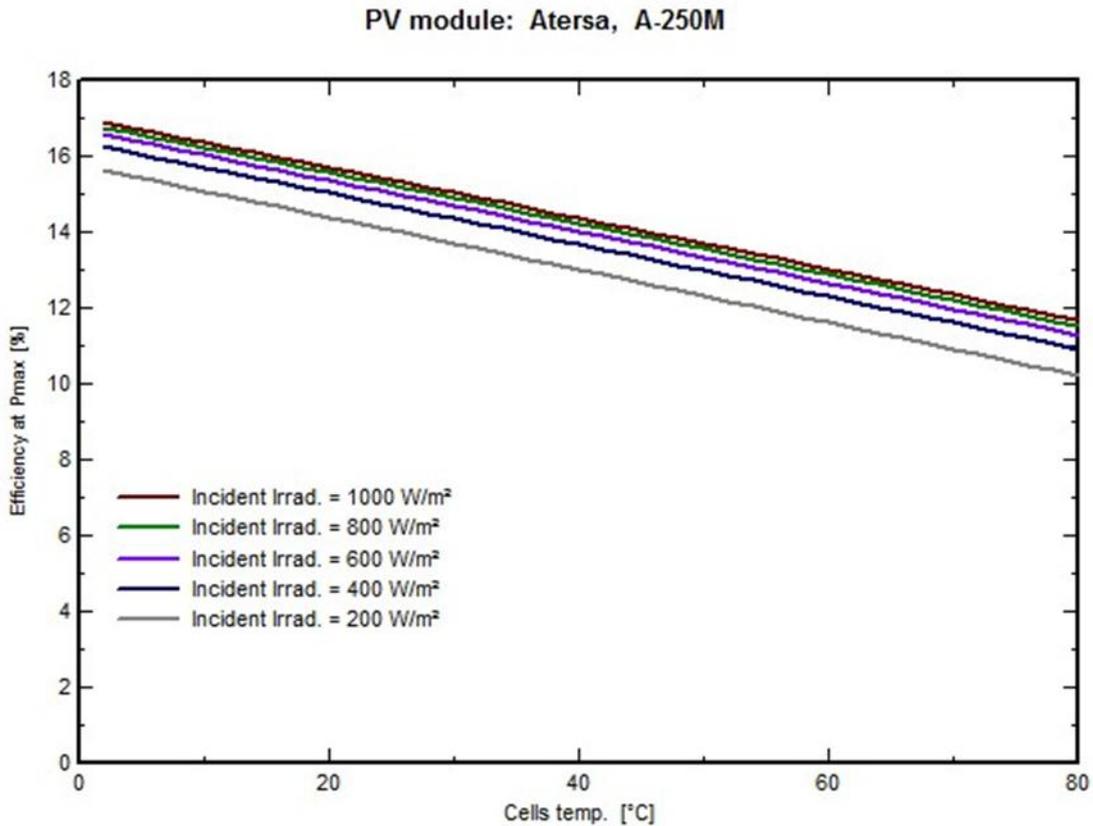


Figure IV-9: courbe efficacité par rapport à température, paramétrées avec irradiances

IV. 3. 4 Interprétation la courbe efficacité - la température paramétrée à l'irradiance

Le graphique présente plusieurs courbes, chacune correspondant à une irradiance incidente différente (1000, 800, 600, 400, 200 W/m²).

L'efficacité du module diminue avec l'augmentation de la température, quelle que soit l'irradiance.

- Effet de la température : diminution systématique de l'efficacité.
- Effet de l'irradiance : plus l'irradiance est élevée, plus l'efficacité est importante.
- Pente des courbes : elles sont négatives et relativement parallèles, indiquant un comportement similaire de perte d'efficacité avec la température pour différentes irradiances.

Caractéristiques techniques des modules photovoltaïques

Module Monocristallin Atersa A-250M (Tableau IV.7)

Caractéristique	Valeur
Puissance nominale	250 W
Tension nominale	30,35 V
Intensité nominale	8,24 A
Tension à vide (Voc)	73,62 V
Courant de court-circuit (Isc)	8,79 A
Coefficient de température (Kp)	-0,43 %/°C
Rendement STC	15,4 %
Nombre/type de cellules	60
Dimensions	1645 × 990 mm

Module polycristallin Atersa A-235P (Tableau IV.8)

Caractéristique	Valeur
Puissance nominale	235,2 W
Tension nominale	29 V
Intensité nominale	8,10 A
Tension à vide (Voc)	36,9 V
Courant de court-circuit (Isc)	8,64 A
Coefficient de température (Kp)	-0,43 %/°C
Rendement STC	14,5 %
Nombre/type de cellules	60 monocristallines
Dimensions	1645 × 990 mm

Module au silicium amorphe SCHOTT ASI-103 (Tableau IV.9)

Caractéristique	Valeur
Puissance nominale	103 W
Tension nominale	30,4 V
Intensité nominale	3,39 A
Voc	41,1 V
Isc	4 A
Coefficient de température (Kp)	-0,20 %/°C
Rendement STC	7,1 %
Nombre/type de cellules	72
Dimensions	1308 × 1108 mm

Module à couches minces Cd-Te FS-380 (Tableau IV.10)

Caractéristique	Valeur
Puissance nominale	80 W
Tension nominale	48,5 V
Intensité nominale	1,65 A
Voc	60,8 V
Isc	1,88 A
Coefficient de température (Kp)	-0,25 %/°C
Rendement STC	11,1 %
Nombre/type de cellules	154

Dimensions 1200 × 600 mm

Résultats expérimentaux et calculs

Mesures sur site (SKTM – Oued Nechou, Ghardaïa)

Les données expérimentales concernent la période de janvier à juin 2017. Elles ont permis de simuler les courbes I(V) et P(V) de quatre modules photovoltaïques différents, en utilisant :

- les paramètres techniques des fabricants,
- les données météorologiques réelles (irradiance et température).

Définitions importantes :

Point de Puissance Maximale (MPP) : point où $P = V \times I$.

Rendement (τ) : $\tau = P / (E \times S)$

Facteur de forme (FF) : $FF = P_m / (V_{oc} \times I_{sc})$

Avec E est l'éclairement incident en (w/m²) et S est la surface effective du module PV.

Facteur de forme : Rapport entre la puissance optimale P_p et le produit de la tension de circuit ouvert par le courant de court-circuit : $FF = P_m / (V_{oc} \times I_{sc})$

Éclairement moyen (Tableau IV.11)

Mois	Éclairement moyen (W/m ²)
Janvier	258
Février	253
Mars	300
Avril	296
Mai	295
Juin	293
Moyenne	282,5

E moyenne = 282.5 W/m².

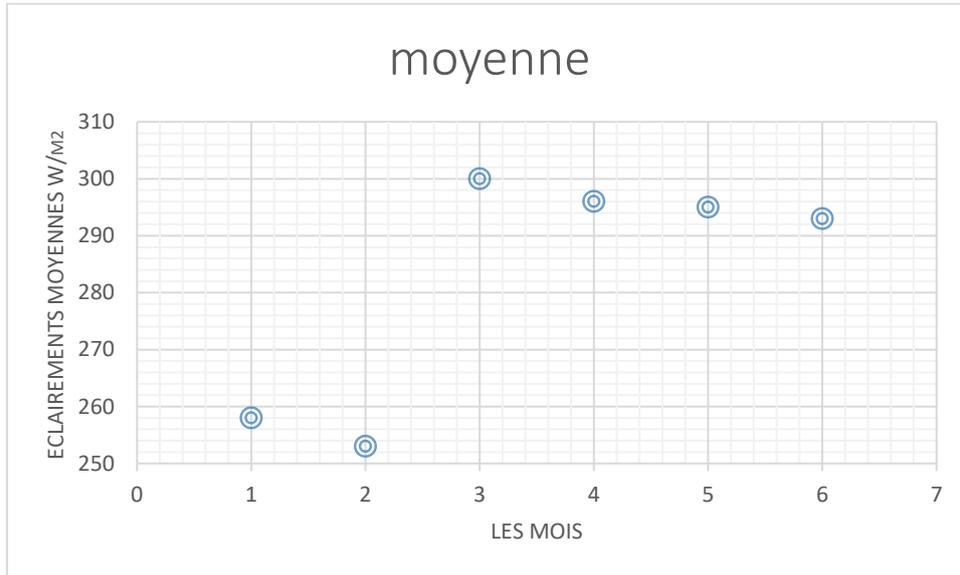


Figure IV-10 : courbe de radiation au niveau SKTM du 1 janvier au 30 Juin 2017.

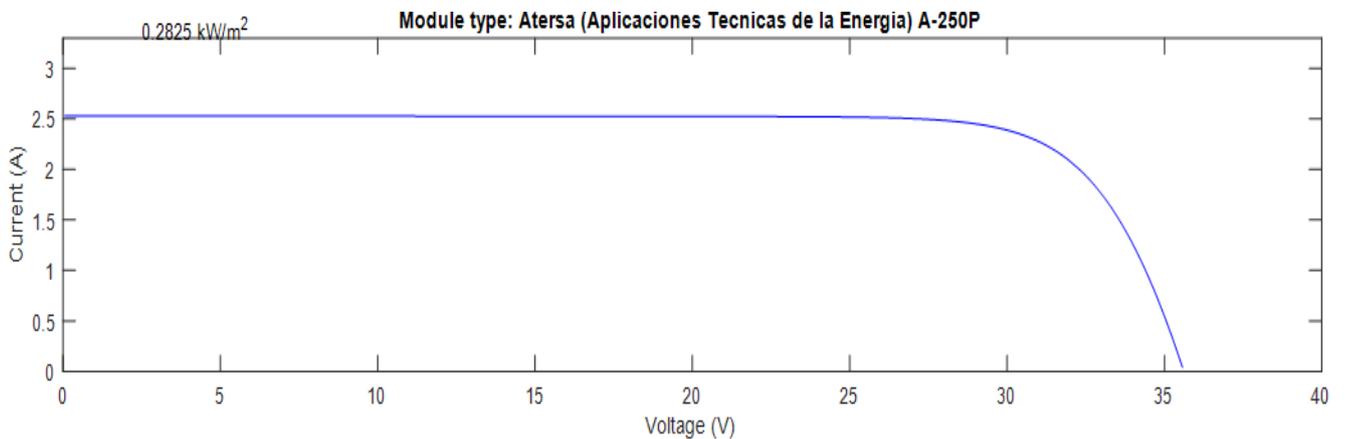
IV. 3. 5 Simulation sous Matlab/Simulink

1. Module monocristallin Atersa A-250M

- $\tau = 0,1535$; $S = 1,63 \text{ m}^2$; $E_c = 282,5 \text{ W/m}^2$
- Puissance calculée : 70,62 W
- Puissance Simulink : 71,64 W

→ Résultats très proches.

Pm sous Matlab Simulink=71.64 W



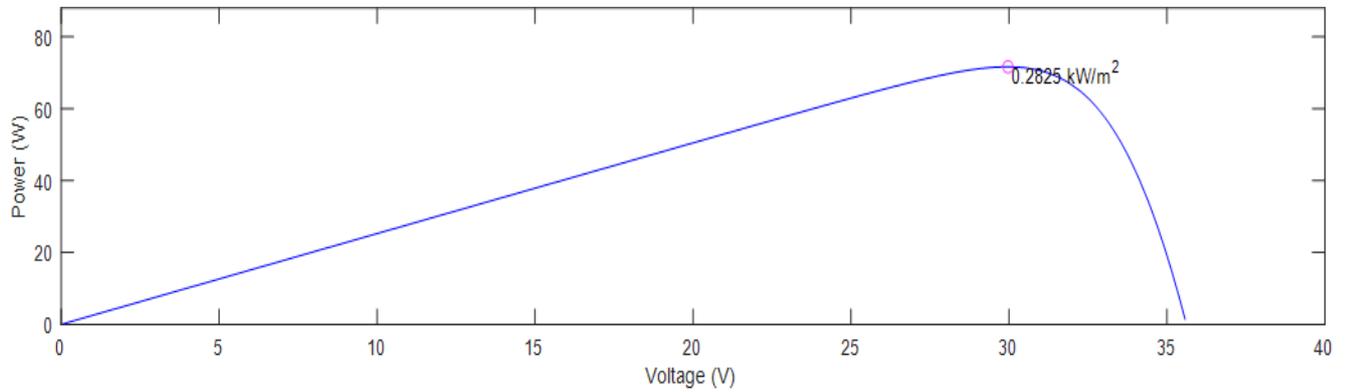
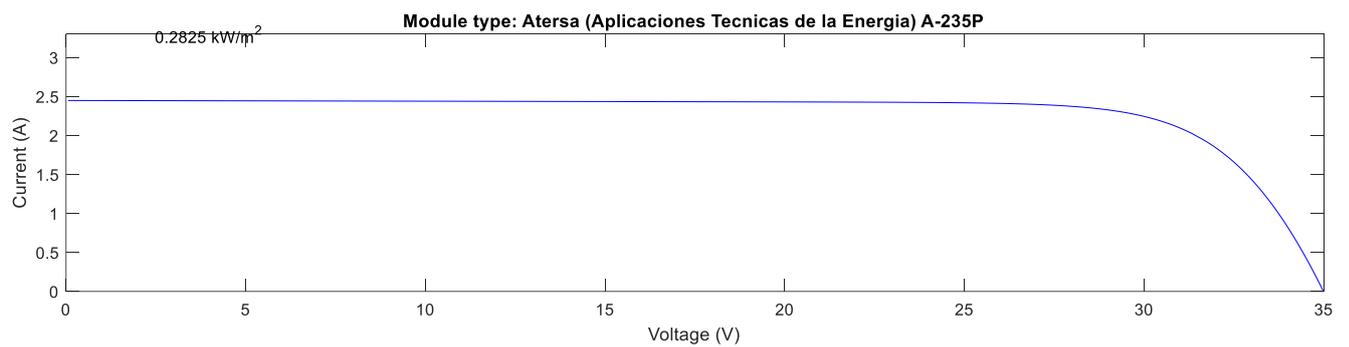


Figure IV-11 : les courbes I(V) et P(V) Monocristallin Atersa, A-250M

Module polycristallin Atersa A-235P

- $\tau = 0,1443$
- Puissance calculée : 66,38 W
- Puissance Simulink : 67,63 W

→ Bon niveau de concordance.



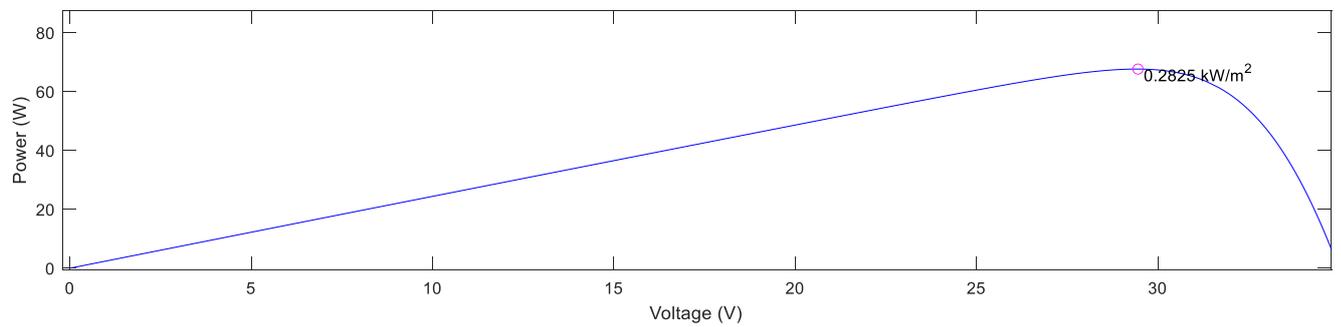
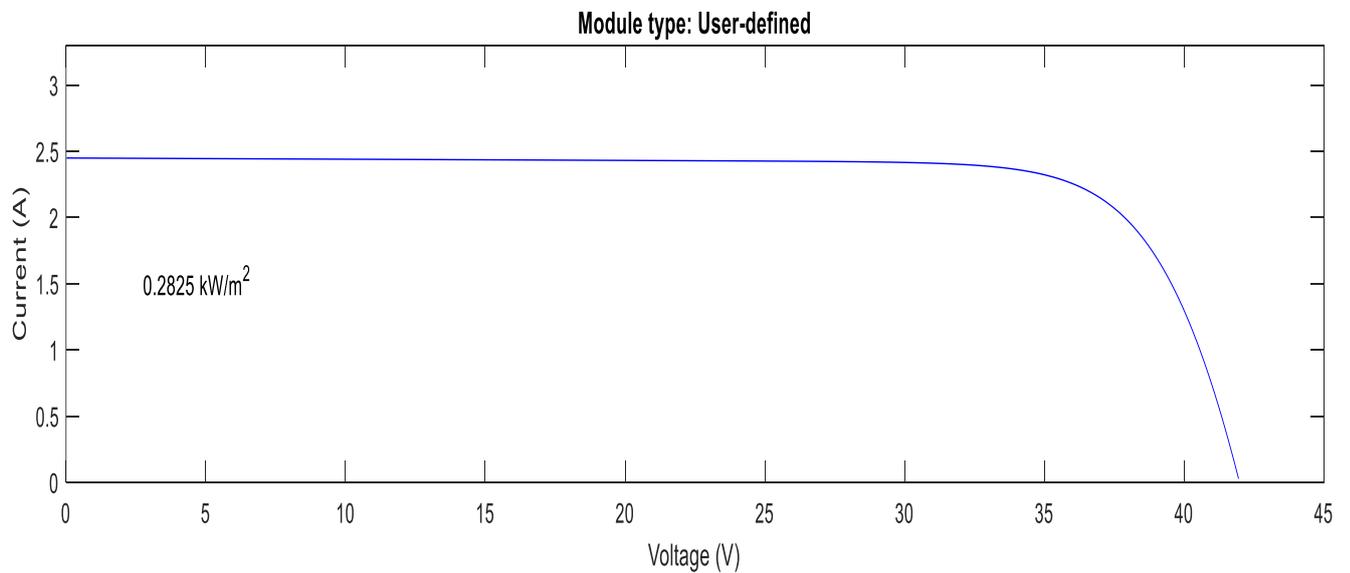


Figure IV-12 : les courbes I(V) et P(V) Polycristallins Atersa A-235P

Module amorphe SCHOTT ASI-103

- $\tau = 0,071$
 - **Puissance calculée : 29,06 W**
 - **Puissance Simulink : 32,69 W**
- **Légère surestimation dans la simulation.**



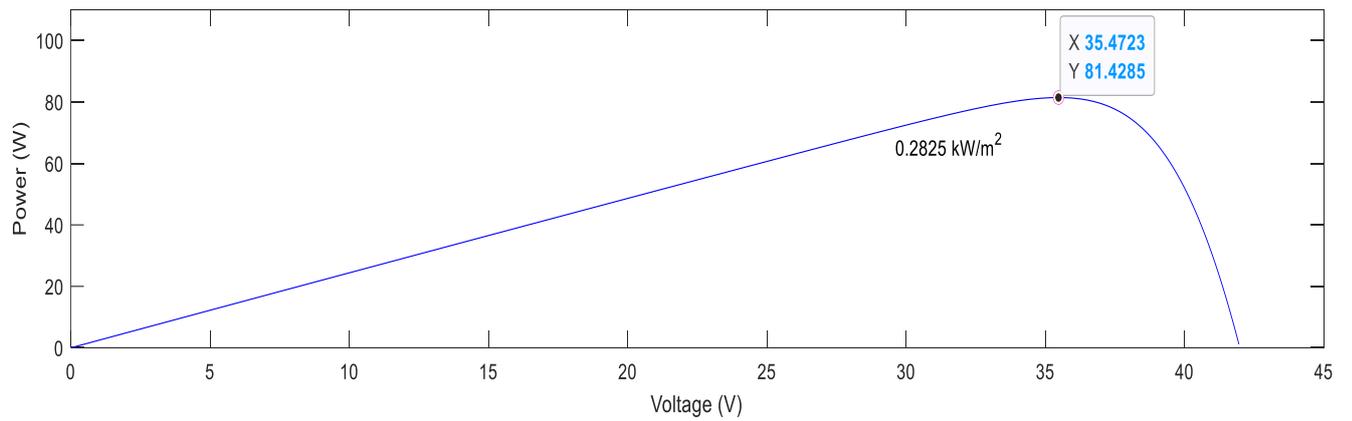
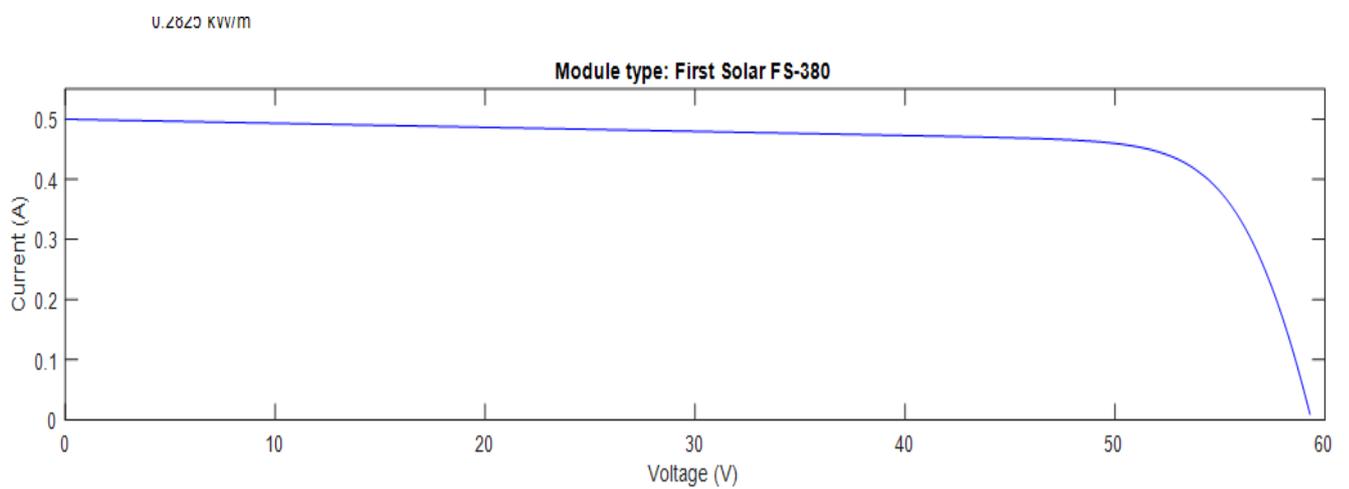


Figure IV-13 : Les Courbes I(V) Et P(V) Amorphe Schott Protect Asi-103

4. Module à couches minces FS-380

- $\tau = 0,111$
- Puissance calculée : 22,57 W
- Puissance Simulink : 23,21 W

→ Écart négligeable.



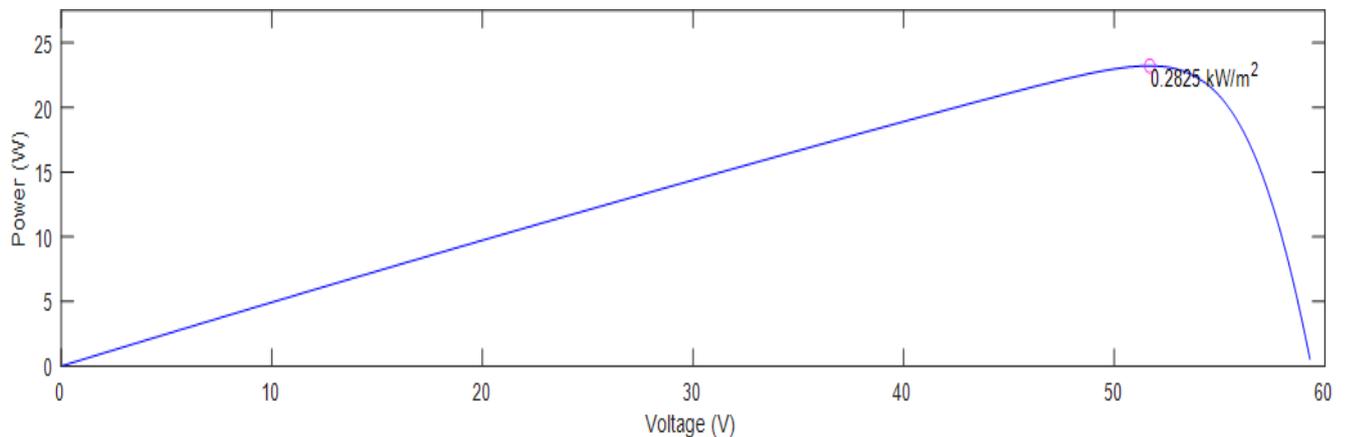


Figure IV-14 : les courbes I(V) et P(V) Couches Mince (Cd-Te) First Solar, FS-380

Interprétation de graphe supérieur I-V :

Cette courbe montre comment le produit par le panneau solaire varie en fonction de la tension, les points clés de cette courbe sont :

Courant de court-circuit (I_{cc}) c'est le courant I lorsque la tension est nulle.

Tension de circuit ouvert (V_{oc}) c'est la tension V lorsque le courant est nul.

Conclusion

Ce chapitre a permis de modéliser et simuler, sous Matlab/Simulink, quatre types de modules photovoltaïques utilisés sur le site SKTM de Ghardaïa : monocristallin, polycristallin, amorphe, et à couches minces.

Les analyses ont montré :

- L'influence négative de la température sur les performances électriques des modules.
- La relation non linéaire entre courant, tension, et puissance.
- L'importance du point de puissance maximale pour l'optimisation.
- L'effet notable des résistances série internes sur le rendement global.

Les résultats calculés et simulés sont globalement cohérents, validant ainsi la méthode de modélisation utilisée.

Références bibliographiques

Y.djeriri, Présentation de Matlab Simulink, cours de Licence et Master, Université Djilali El

Yabes, Département d'électrotechnique, Algérie, 2014/2015.

V. Benamara, Etude et simulation d'un panneau solaire raccordé au réseau avec périphérique de stockage, École De Technologie Supérieure Université Du Québec, M. Ing , Montréal, 2012.

[42] Ouada Mehdi, 1Tarfaya Anis, 1Dr M.S. Meridjet, 2Dr Dib Djalel, Etude et Caractérisation sous Matlab/Simulink d'un Générateur Photovoltaïque, Le 2ème Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables, Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, Ghardaïa, 2012.

[43] NREL/ Matlab Simulink

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail a permis d'explorer, de modéliser et d'analyser les performances de diverses technologies photovoltaïques (monocristallin, polycristallin, amorphe et à couches minces) dans le contexte climatique spécifique du site SKTM à oued Nechou, Ghardaïa (Algérie). En s'appuyant sur des données météorologiques réelles et des outils de simulation avancés tels que Matlab/Simulink, l'étude a révélé de manière détaillée les avantages, les limites et les comportements électriques de chaque type de module photovoltaïque.

Les résultats ont montré que la température ambiante exerce une influence significative et négative sur les performances des modules, en réduisant leur rendement énergétique. De plus, la relation non linéaire entre courant, tension et puissance a été mise en évidence, soulignant l'importance de localiser précisément le point de puissance maximale (MPP) pour chaque technologie afin d'optimiser la production électrique. L'étude a également mis en avant l'impact des résistances internes (série et shunt) sur le rendement global du système.

En somme, cette thèse contribue à une meilleure compréhension des comportements des modules photovoltaïques sous des conditions réelles spécifiques à l'Algérie, et constitue une base solide pour les futurs travaux d'optimisation, d'intégration au réseau et de développement de systèmes hybrides adaptés aux régions sahariennes.

ANNEXE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université de Ghardaïa
Faculté des Sciences et de la Technologie



جامعة غرداية
كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم: الآلية والكهرباء ميكانيكا

غرداية في: 16.1.2025

شعبة: الإلكترونيات
تخصص: هندسة تصنيع

شهادة ترخيص بالتصحيح والاياداع:

انا الاستاذة.....

بصفتي المشرف المسؤول عن تصحيح مذكرة تخرج (اليسانس/ماستر/دكتورا) المعنونة بـ:

Etude Comparative Théorique et expérimentale des
différents technologies d'une cellule photovoltaïque.

من انجاز الطالب (الطالبة):

ك. ع. ح. ح.

التي نوقشت/قيمت بتاريخ: 11 جوان 2025

اشهد ان الطالب/الطالبة قد قام /قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة المناقشة وقد تم التحقق من ذلك من طرفنا

وقد استوفت جميع الشروط المطلوبة .

مصادقة رئيس القسم

رئيس قسم الآلية والكهرباء ميكانيكا
عزراوي محمد



امضاء المسؤول عن التصحيح

الدكتور: سعيد مكي

الدكتور: سعيد مكي