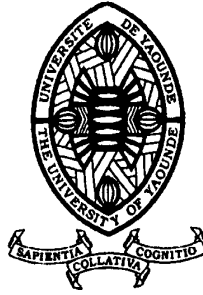


REPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix – Travail – Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I
ECOLE NORMALE SUPERIEURE
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE



REPUBLIC OF CAMEROUN

Peace – Work – Fatherland

UNIVERSITY OF YAOUNDE I
HIGHER TEACHER TRAINING COLLEGE
DEPARTMENT OF PHYSICS

INVENTAIRE DES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES EN VUE DE L'OPTIMISATION DE LEUR FONCTIONNEMENT.

Mémoire présenté et soutenu en vue de l'obtention du Diplôme de Professeur de l'Enseignement Secondaire Deuxième Grade (DI.P.E.S II)

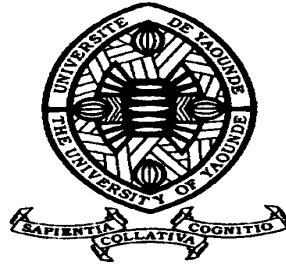
Par :

LANGOUO LAMBOU Carnegie
Licencié en physique

Sous la direction
Pr.
BEGUIDE BONOMA
Maître de
Conférences

Année Académique
2015-2016





AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire de Yaoundé I. Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : biblio.centrale.uyi@gmail.com

WARNING

This document is the fruit of an intense hard work defended and accepted before a jury and made available to the entire University of Yaounde I community. All intellectual property rights are reserved to the author. This implies proper citation and referencing when using this document.

On the other hand, any unlawful act, plagiarism, unauthorized duplication will lead to Penal pursuits.

Contact: biblio.centrale.uyi@gmail.com

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail à mes parents, mon épouse et mes enfants.

REMERCIEMENTS

Je remercie notre Dieu Tout Puissant qui, à travers son fils **JESUS-CHRIST**, m'a donné la force et l'endurance d'atteindre le but escompté et d'accomplir ce travail.

Mes remerciements les plus sincères s'adressent à mon encadreur le Professeur **BEGUIDE BONOMA**, qui par sa présence et son pragmatisme exemplaire a donné un véritable sens à notre travail.

Mes remerciements vont également à l'endroit du **Dr NSOUANDELE** et **M. SEUTCHE du** laboratoire d'énergétique de l'Université de Yaoundé I pour leur soutien intellectuel et leur disponibilité sans limite.

Mes remerciements vont également à l'endroit de tous les enseignants des Départements de Physique, de Chimie, des Mathématiques, des Sciences de l'Éducation et de Formation Bilingue de l'École Normale Supérieure de Yaoundé I pour tous les enseignements qu'ils nous ont apportés.

Mes remerciements vont également à l'endroit de mes encadreurs de stage **M. AWOMO ATEBA Geremie** et **M. SOP Berthelot**.

Mes remerciements vont également à l'endroit des familles **LAMBOU**, **FONTSA**, **TONFACK**, **TCHINDA**, **DOUANLA**, **HIDZEM** et **KUETE**.

Mes remerciements vont également à l'endroit de mes camarades de promotion en général et des camarades retour sur titre en particulier.

Mes remerciements vont également à l'endroit de **FONKOU Jean Alain** et **FONKOU Valentine**.

Mes remerciements vont également à l'endroit de toutes personnes qui n'ont pas été citées et qui ont de près ou de loin participé à la réalisation de ce travail.

SOMMAIRE

DÉDICACE.....	i
REMERCIEMENTS	ii
SOMMAIRE.....	iii
RÉSUMÉ.....	v
ABSTRACT	vi
LISTE DES ABRÉVIATIONS	vii
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES TABLEAUX	viii
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
Chapitre 1 : GÉNÉRALITÉS SUR LES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES	2
Introduction.....	2
1.1 L'énergie solaire	2
1.2 L'effet photovoltaïque	3
1.3 Les différents types de systèmes photovoltaïques	4
1.3.1 Les systèmes photovoltaïques autonomes.....	4
1.3.2 Les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau	5
1.4 Description des éléments du système photovoltaïque	5
1.4.1 La cellule PV.....	5
1.4.1.1 Les technologies d'une cellule photovoltaïque	6
1.4.1.2 Le silicium et ses propriétés.....	7
1.4.2 Le module photovoltaïque.....	8
1.4.2.1 Description du module.....	8
1.4.2.2 Caractéristiques d'un module	8
1.4.2.3 Le panneau photovoltaïque.....	9
1.4.3 Le système de stockage	10
1.4.4 Le système de régulation.....	10
1.4.5 Le système de conversion	11
1.4.6 Les câbles électriques et de liaison.....	11
1.4.7 Autres composants du système photovoltaïque.....	12
1.5 Avantages et inconvénients d'une installation PV.....	12
1.5.1 Avantages	12
1.5.2 Inconvénients	13

Conclusion	13
Chapitre 2 : MATÉRIEL ET MÉTHODES	14
Introduction.....	14
2.1 Matériel utilisé	14
2.2 Méthode utilisée.....	16
2.2.1 Modélisation d'une cellule PV	16
2.2.2 Équation de la caractéristique courant-tension d'une cellule PV	17
2.2.3 Résolution de l'équation de la caractéristique.....	19
Conclusion	20
Chapitre 3 : SIMULATION ET ANALYSE DES RESULTATS	21
Introduction.....	21
3.1 Courbes des caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$ du module BP 380	21
3.2 Étude des paramètres externes sur les caractéristiques du module BP 380	22
3.2.1 Étude de la caractéristique du module en fonction de l'irradiation solaire.....	22
3.2.2 Etude de la caractéristique du panneau en fonction de la température	23
3.3 Étude des paramètres internes sur la caractéristique du module BP 380.....	24
3.3.1 Étude des caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ en fonction du facteur d'idéalité	24
3.3.2 Étude des caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ en fonction de la résistance shunt R_p	25
3.4 Étude des caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ en fonction du type de connexion	26
Conclusion	28
Chapitre 4 : IMPLICATION SUR LE SYSTEME EDUCATIF DU SUJET.....	29
Introduction.....	29
4.1 Fiche pédagogique	29
4.2 Intérêt didactique	32
4.2.1 Physique-chimie	32
4.2.2 Technologie.....	33
Conclusion	33
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	34
BIBLIOGRAPHIE.....	35
ANNEXES.....	37

RÉSUMÉ

Les zones rurales au Cameroun sont plus sous développées. Ce problème est principalement lié à l'électrification de ces zones qui sont le plus souvent éloignées du réseau électrique. Les sources traditionnelles d'énergie comme le charbon, le pétrole et l'énergie nucléaire possèdent de graves répercussions sur l'environnement. L'énergie renouvelable en général et solaire photovoltaïque en particulier apparaît ici comme une solution de rechange.

Ayant constaté que certains systèmes photovoltaïques, sous certaines conditions climatiques, produisent encore de l'énergie et pas d'autres, nous nous sommes proposés de faire un inventaire des systèmes existants, de les étudier et d'en ressortir les paramètres qui influencent leur rendement en vue d'optimiser leur fonctionnement.

La réalisation de cette étude s'est faite à travers la modélisation d'une cellule PV. Ce qui a permis d'établir l'équation de la caractéristique intensité-tension. Par la suite, nous en avons déduis l'équation de la caractéristique intensité-tension d'un module. Cette équation a permis de simuler numériquement sous MATLAB le fonctionnement du module. Au terme de cette simulation, des résultats ont été obtenus. Ces résultats ont permis de valider la méthode utilisée dans l'étude après comparaison des valeurs obtenues et celles fournies par le constructeur du modulé utilisé. Ces résultats ont permis de montrer que les performances d'un module photovoltaïque sont fortement influencées par l'irradiation globale disponible, la température du module, le facteur d'idéalité de la jonction PN et la résistance shunt.

Les systèmes photovoltaïques trouvent de nombreuses applications dans la vie courantes et surtout dans l'électrification des sites isolés des réseaux électriques. Une optimisation de leur fonctionnement s'impose afin de leur permettre de fournir l'énergie toute l'année.

Mots clés : énergie solaire ; module photovoltaïque ; puissance crête ; irradiation ; température.

ABSTRACT

Rural areas in Cameroon are under developed. This problem is mainly related to the electrification of these areas are often remote from the mains. Traditional energy sources like coal, oil and nuclear energy have a serious impact on the environment. Renewable energy in general and solar PV in particular appears as an alternative.

Having found that some photovoltaic systems, under certain climatic conditions, yet produce energy and not others, we proposed to make an inventory of existing systems, to study them and out into the parameters that influence performance to optimize their operation.

The realization of this study was done through modeling a PV cell. This helped to establish the equation of the current-voltage characteristic of module. Thereafter, assume we have the equation of the current-voltage characteristic of a module. This equation was used to simulate numerically MATLAB module operation. At the end of this simulation, the results were obtained. These results have validated the method used in the study after comparing the values obtained and those provided by the manufacturer of the modulated used. These results have shown that the performance of a photovoltaic module is strongly influenced by the available global irradiation, module temperature, the ideality factor of the PN junction and the shunt resistor.

Photovoltaic systems have many applications in the common life and especially in the electrification of isolated electrical network sites. Optimization of their operation is needed to enable them to provide energy throughout the year.

Keywords: solar energy; photovoltaic module; peak power; irradiation; temperature.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

CC/ AC : courant continu/courant alternatif
PV : Photovoltaïque
GPV : Générateur Photovoltaïque
I_{cc} : Courant de Court-Circuit
V_{co} : Tension de Circuit Ouvert
MPP : Maximum Power Point
I_{mp} et V_{mp} : Courant et Tension maximums au MPP
MPPT : Maximum Power Point Tracking
N_s : Nombre de cellules en série
N_p : Nombre de cellules en parallèle
K_v : Coefficient de sensibilité de la tension à la température
K_i : Coefficient de sensibilité de l'intensité à la température
H : heure
W/m² : watts par mètre carré
°C : degré Celsius
mm: millimètre
IR : infra rouge
R_s et R_p : résistance série et résistance shunt ou parallèle
I_{ph} : photo courant
I et V : intensité et tension du courant débité par la cellule
I_{RP} : courant traversant R_p
I_D : courant de diode
V_D: tension de diode
I_{ph} : photo-courant
G : l'irradiation solaire
I₀ : courant de saturation de la diode
K : constante de Boltzmann
q: charge d'électron
A : facteur d'idéalité de la cellule
T: température de la cellule en kelvin
f(x) : fonction
f'(x) : La dérivée de la fonction
 x_n : La présente itération
 x_{n+1} : L'itération suivante
T_{ref} : la température de référence 298 k (25°C)
STC : Standard Test Conditions
AM : Air Masse
ZCE : zone de charge et d'espace

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Schéma de principe d'une cellule photovoltaïque (Benseddik & Djaloud 2012)	5
Figure 1.2: Différents types de cellules photovoltaïques au silicium (Kheridla & Khineche 2014).....	7
Figure 1.3: Boite de jonction (Kheridla & Khineche 2014)	8
Figure 1.4 : Cellule, module et panneau photovoltaïque (Hassini 2010).....	10
Figure 2.1: Module BP 380 (BP 2004)	14
Figure 2.2: caractéristique I(V) du module BP 380 (BP 2004).....	15
Figure 2.3 : Solarimètre SAM30 et thermomètre IR (ES 2009)	16
Figure 3.1 : Caractéristique intensité-tension du module BP 380.....	22
Figure 3.2 : Caractéristique puissance-tension du module BP 380.....	22
Figure 3.3 : Caractéristiques I(V) pour différentes irradiations solaires à 25°C.....	23
Figure 3.4 : Caractéristique P(V) pour différents irradiations solaires à 25°C	23
Figure 3.5 : Caractéristique I(V) pour différentes températures sous une irradiation $G = 1000$ W/m^2	24
Figure 3.6 : Caractéristique P(V) en fonction de la température.....	24
Figure 3.7 : Caractéristique I(V) en fonction du facteur d'idéalité.....	25
Figure 3.8 : Caractéristique P(V) en fonction du facteur d'idéalité	25
Figure 3.9 : caractéristiques I(V) en fonction de la résistance shunt R_p	26
Figure 3.10 : caractéristiques P(V) en fonction de la résistance shunt R_p	26
Figure 3.11 : caractéristiques I(V) en fonction du type de connexion	27
Figure 3.12 : caractéristiques P(V) en fonction du type de connexion	27

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1: Classification de différents types de cellules photovoltaïques au silicium (Kheridla & Khineche 2014).....	7
Tableau 2.1: Caractéristiques du module Solar BP 380 (BP 2004)	15

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis la généralisation de l'utilisation de l'électricité, la consommation énergétique n'a cessé d'augmenter. Les principales sources d'énergies en Afrique sub-saharienne proviennent des combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, etc.). Depuis les crises successives du pétrole des années 70, le problème de la conversion et du stockage de l'énergie a conduit à la recherche et au développement de nouvelles sources d'approvisionnement. Cet intérêt s'est accru face à l'épuisement inéluctable des énergies fossiles, leurs impacts sur l'environnement et aux déchets qu'ils engendrent. De nouvelles énergies dites « énergies renouvelables » ont émergé (biomasse, éolienne, hydroélectrique, géothermie et photovoltaïque). Parmi celles-ci, l'énergie solaire est la mieux partagée par tous les habitants du globe terrestre. Son exploitation permettrait de fournir en électricité des sites isolés des réseaux électriques et éviterait la création de nouvelles lignes électriques qui demandent généralement un lourd investissement.

L'énergie solaire photovoltaïque (PV), qui est la conversion directe de la lumière en électricité grâce à des cellules solaires, représente une alternative intéressante et bien adaptée à des besoins limités. Un système PV est facile à mettre en œuvre. Il a un faible impact environnemental et nécessite peu d'entretien. Il n'est plus concurrentiel lorsque la demande augmente. Une étude rigoureuse est nécessaire pour le meilleur choix basé sur la performance et le moindre coût possible. La performance d'un système PV dépend fortement des conditions météorologiques, telles que le rayonnement solaire, la température et la vitesse du vent. Pour fournir l'énergie continuellement durant toute l'année, un système PV doit donc être bien dimensionné.

L'objectif principal de cette étude est d'inventorier les systèmes PV existants en vue d'optimiser leur fonctionnement. Cela revient à recenser les systèmes photovoltaïques, d'en faire une étude succincte afin d'en ressortir les paramètres limitant la productivité énergétique. La réalisation de cette étude passera par les objectifs intermédiaires suivants : la prise en compte d'un maximum de paramètres, l'identification des paramètres des modules PV et la recherche des paramètres influençant le rendement du système.

Pour atteindre ces objectifs, notre travail est articulé autour de quatre chapitres :
Le premier chapitre commence par faire une étude générale du fonctionnement des systèmes PV. Le deuxième chapitre présente la modélisation d'une cellule PV et les paramètres pouvant influencer le rendement du module PV. Le troisième chapitre présente les résultats obtenus et leur analyse. Le quatrième chapitre présente l'implication du sujet sur le système éducatif.

Chapitre 1 : GÉNÉRALITÉS SUR LES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES

Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion est basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. Cette conversion s'effectue par le biais d'un ensemble des cellules photovoltaïques (PV) appelé module photovoltaïque. Bien que fondamental dans la chaîne que représente un système, le module photovoltaïque à lui seul ne peut pas grand-chose pour répondre à un besoin défini (Ricaud 2011). Il faut en fait l'associer étroitement à un système complet. Ce chapitre présente les concepts dont la connaissance est nécessaire à la compréhension du fonctionnement des systèmes photovoltaïques.

1.1 L'énergie solaire

La distance de la terre au soleil est environ 150 million de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300000 km/s. Les rayons du soleil mettent donc environ 8 minutes à nous parvenir. La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. Sa valeur est communément prise égale à 1360W/m². Au niveau du sol. La densité d'énergie solaire est réduite à 1000 W/ m² à cause de l'absorption dans l'atmosphère. Albert Einstein a découvert en travaillant sur l'effet photoélectrique que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie est portée par des particules, les photons (Benseddik & Djaloud 2012). L'énergie d'un photon étant donnée par la relation :

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.1)$$

h : la constante de Planck,

λ : la longueur d'onde de la lumière incidente,

C : la vitesse de la lumière.

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande.

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 microns (μm) (Benseddik & Djaloud 2012). L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi (Benseddik & Djaloud 2012) :

- 9% dans la bande des ultraviolets (<0,4 μm),
- 47% dans la bande visible (0,4 à 0,8 μm),

- 44% dans la bande des infrarouges ($>0,8 \mu m$).

1.2 L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties : l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. Entre les deux zones se développe une jonction PN avec une barrière de potentiel (Semassou 2011).

Lorsque ce matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont "bombardés" par les photons constituant la lumière. Sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être "arrachés/décrochés" mais une partie de ces électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons "décrochés" créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : C'est l'effet photovoltaïque. La zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode (contact avant) et surtout de collecteurs d'électrons tandis qu'une plaque métallique (contact arrière) recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode (Semassou 2011).

Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux électrons par collision. Si l'énergie transmise est supérieure à celle associée à la bande interdite (E_g) du semi-conducteur, des paires électrons-trous sont alors créés dans cette zone de déplétion par arrachement des électrons. Sous l'effet d'un champ électrique qui règne dans cette zone, ces porteurs libres sont drainés vers les contacts métalliques des régions P et N. Il en résulte alors un courant électrique dans la cellule PV et une différence de potentiel (de 0.6 à 0.8 Volt) supportée entre les électrodes métalliques de celle-ci. Cette tension est communément nommée tension de circuit ouvert (V_{CO}). Elle est fortement dépendante de la température. Le courant maximal PV se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées. On parle alors de courant de court-circuit (I_{CC}) dépendant fortement du

niveau d'éclairage (Semassou 2011).

1.3 Les différents types de systèmes photovoltaïques

Les systèmes photovoltaïques sont actuellement divisés en deux grandes catégories : les systèmes autonomes (non connectés au réseau) et les systèmes couplés au réseau (Semassou 2011).

1.3.1 Les systèmes photovoltaïques autonomes

Les systèmes autonomes sont conçus pour répondre aux besoins de consommation d'un site isolé du réseau électrique. Si l'énergie photovoltaïque est l'unique source d'énergie du système, on parlera de système stand-alone (SAPV System : Stand-Alone Photovoltaic System). Ces systèmes comportent des éléments de stockage afin d'adapter la production photovoltaïque à la demande. Les systèmes photovoltaïques peuvent être associés à d'autres sources d'énergie, la plupart du temps contrôlables comme un groupe électrogène, mais parfois aléatoires (association PV-éolien) : on parle de système hybride. Si on relie une éolienne au système PV, cette dernière recharge les accumulateurs pendant les périodes de vent qui surviennent souvent lorsque le ciel est couvert (Semassou 2011).

Le système hybride a un double avantage (Semassou 2011) :

- La minimisation des perturbations de l'environnement grâce à une consommation sur le lieu de production de ressources naturelles renouvelables,
- La sécurisation d'approvisionnement quelles que soient les conditions météorologiques.

Néanmoins se posent les problèmes suivants (Semassou 2011) :

- l'optimisation de la gestion de l'énergie au sein du système,
- la recherche de la configuration optimale, c'est-à-dire le coût de production minimale.

Il existe deux types de systèmes de production hybride : le système alterné et le système parallèle. Le système alterné consiste en l'association d'un système éolien, d'un système photovoltaïque et d'un groupe électrogène relié par un système de commutation entre les trois permettant d'assurer le passage d'un fonctionnement d'une source à une autre (selon les conditions météorologiques jour et nuit). Par contre, le système parallèle relie les deux sources (éolienne, photovoltaïque) en même temps au système de stockage (batterie) et le groupe électrogène intervient en secours (quand les batteries sont déchargées) (Semassou 2011).

1.3.2 Les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau

Les systèmes photovoltaïques couplés au réseau injectent l'énergie issue des modules sur le réseau de distribution. On distingue deux types d'installations (Semassou 2011) :

→ Injection de la totalité de la production : l'énergie produite par les modules est directement injectée sur le réseau électrique. Les périodes d'injection sur le réseau correspondent aux périodes de production photovoltaïque.

→ Injection du surplus de production : l'énergie produite par les modules est directement consommée sur place par les charges. L'éventuel surplus de production par rapport à la consommation instantanée est injecté sur le réseau.

1.4 Description des éléments du système photovoltaïque

1.4.1 La cellule PV

Les cellules photovoltaïques ou les plaques solaires sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque », découvert par E. Becquerel en 1839. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants. La taille de chaque cellule va de quelques centimètres carrés jusqu'à 100 cm^2 ou plus. Sa forme est circulaire, carrée ou dérivée des deux géométries. Les cellules se branchent en série, ce qui permet aux électrons générés par la cellule d'être repris par la suivante. Le but est d'avoir une différence de potentiel située entre 6 et 24V (Benseddik & Djaloud 2012).

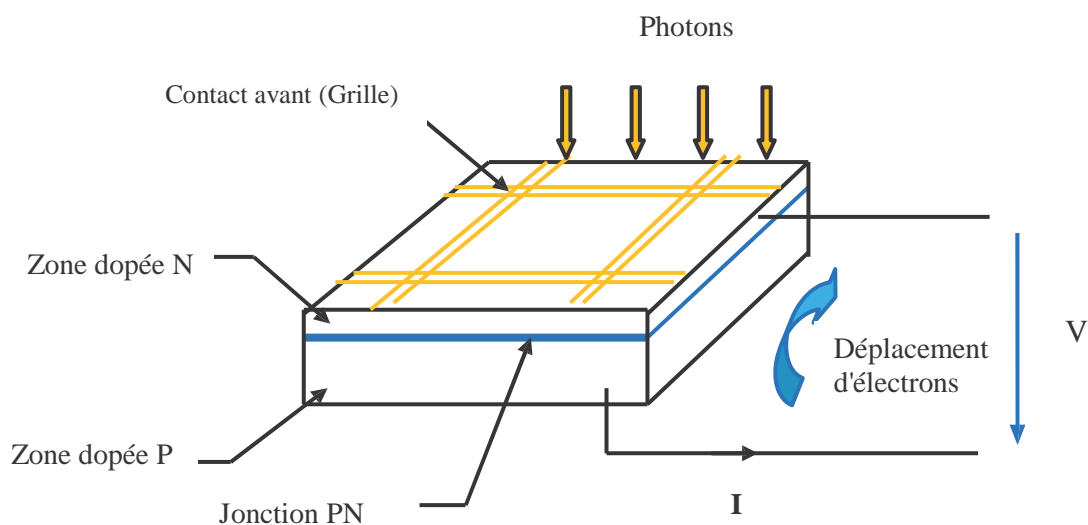


Figure 1.1: Schéma de principe d'une cellule photovoltaïque (Benseddik & Djaloud 2012)

1.4.1.1 Les technologies d'une cellule photovoltaïque

Les technologies d'une cellule photovoltaïque existantes sont les suivantes :

- **Silicium monocristallin**

Le silicium cristallin est actuellement l'option la plus populaire pour les cellules commerciales, bien que beaucoup d'autres matériaux soient disponibles. Le terme «cristallin» implique que tous les atomes dans le matériau PV actif font partie d'une structure cristalline simple où il n'y a aucune perturbation dans les arrangements ordonnés des atomes (Benseddik & Djaloud 2012).

- **Silicium poly cristallin**

Il est composé de petits grains de silicium cristallin. Les cellules à base de silicium poly cristallin sont moins efficaces que les cellules à base de silicium monocristallin. Les joints de grains dans le silicium poly cristallin gênent l'écoulement des électrons et réduisent le rendement de puissance de la cellule. L'efficacité de conversion PV pour une cellule à base de silicium poly cristallin modèle commercial s'étend entre 10 et 14% (Benseddik & Djaloud 2012).

- **Silicium amorphe (a-si)**

Le silicium est déposé en couche mince sur une plaque de verre ou un autre support souple. L'organisation irrégulière de ses atomes lui confère en partie une mauvaise semi-conduction. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire. Elles se caractérisent par un fort coefficient d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs, de l'ordre du micron. Par contre son rendement de conversion est faible (de 7 à 10 %) et les cellules ont tendance à se dégrader plus rapidement sous la lumière (Benseddik & Djaloud 2012).

- **Nouvelle technologie**

On utilise de plus en plus de matériaux organiques dans le domaine de l'optoélectronique, avec des perspectives d'électronique organique voire moléculaire, pour l'éclairage à l'aide de diodes électroluminescentes organiques (OLED : Organic Light-Emitting Diode). Bien que les optimisations des matériaux à mettre en œuvre ne soient pas les mêmes, le domaine du photovoltaïque bénéficie depuis quelques années des avancées technologiques de l'optoélectronique. Ainsi, bien que cette filière soit vraiment récente, les progrès annuels sont spectaculaires. Les matériaux organiques, moléculaires ou polymériques, à base de carbone, d'hydrogène et d'azote sont particulièrement intéressants en termes d'abondance, de coût, de poids et de mise en œuvre (Benseddik & Djaloud 2012).

La photopile ou cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque.

Tableau 1.1: Classification de différents types de cellules photovoltaïques au silicium (Kheridla & Khineche 2014)

Type	Silicium mono cristallin	Silicium poly Cristallin	Amorphe
Durée de vie	35 ans	35 ans	< 10 ans
rendement	De 15% à 19%	De 15% à 19%	7% à 10%
Surface installée	faible	faible	importante
Avantage	Bon rendement en soleil direct	Bon rendement en soleil direct (moins que le monocristallin mais plus que l'amorphe)	Souplesse Prix moins élevé que les cristallins Bon rendement en
Inconvénient	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...), prix élevé	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...), prix élevé	Mauvais rendement en plein soleil.



Figure 1.2: Différents types de cellules photovoltaïques au silicium (Kheridla & Khineche 2014)

1.4.1.2 Le silicium et ses propriétés

La majorité des cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir du silicium cristallin, car il possède la caractéristique d'être non toxique contrairement au cadmium ou au sélénium. En plus, il permet d'atteindre des efficacités de conversion remarquables. Le silicium constitue environ 28% de l'écorce terrestre sous forme de composés (silicates, silice), ce qui en fait une source quasi inépuisable (Kheridla & Khineche 2014).

1.4.2 Le module photovoltaïque

1.4.2.1 Description du module

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module. Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène-vinyle-acétate) et protégé sur la surface avant d'un verre trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique et sur la surface arrière d'une ou de plusieurs couches de polyéthylène (Kheridla & Khineche 2014).

Les modules sont généralement entourés d'un cadre rigide en aluminium anodisé comprenant des trous de fixation. À l'arrière de chaque module se trouve une boîte de jonction contenant deux diodes antiparallèles figure (1.3). Ces diodes antiparallèles permettent d'éviter qu'un module au soleil ne se décharge dans un module à l'ombre (Kheridla & Khineche 2014).

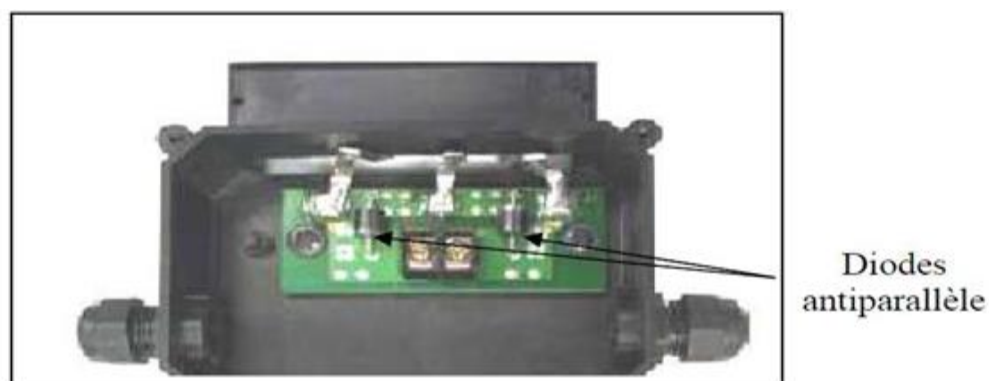


Figure 1.3: Boîte de jonction (Kheridla & Khineche 2014)

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques
- Protection mécanique et support.
- Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur.

La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin. Le courant de sortie et la puissance seront proportionnels à la surface du module. Il ont une efficacité de conversion (énergie électrique produite/énergie solaire incidente) de l'ordre de 10 à 20% (Kheridla & Khineche 2014).

1.4.2.2 Caractéristiques d'un module

Un module est caractérisé par les paramètres suivants (BELGHITRI 2010).

La puissance crête PC : puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000W/m²).

La caractéristique I (V) : courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension V aux bornes de celui-ci.

Tension à vide Vco : tension aux bornes du module en absence de tout courant, pour un éclairement « plein soleil ».

Courant de court-circuit Icc : courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement « plein soleil ».

Point de fonctionnement optimum (Um, Im) : lorsque la puissance de crête est maximum en « plein soleil »,

$$P_m = U_m \cdot I_m \quad (1.2)$$

Rendement η : rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente. Il est donné par la relation

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{FF \times I_{cc} \times V_{co}}{P_{in}} \quad (1.3)$$

Facteur de forme FF : rapport de la puissance maximale à la puissance électrique optimum, il est défini par la relation :

$$FF = \frac{P_{\max}}{V_{co} \times I_{cc}} \quad (1.4)$$

1.4.2.3 Le panneau photovoltaïque

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW à quelques MW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en série (augmenter la tension) et en parallèle (augmenter le courant) pour former un panneau (ou champ PV) (BELGHITRI 2010). La quantité d'électricité dans l'ensemble des composants du panneau PV dépend (BELGHITRI 2010) :

- Des besoins en électricité,
- De la taille du panneau,
- De l'ensoleillement du lieu d'utilisateur,
- De la saison d'utilisateur.

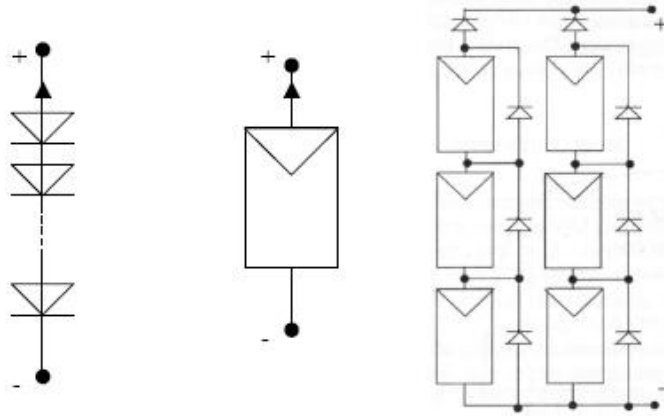


Figure 1.4 : Cellule, module et panneau photovoltaïque (BELGHITRI 2010)

Pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules commerciaux afin d'éviter des pannes destructives liées à l'association de cellules en série et de panneaux en parallèle. Pour cela, deux types de protection classiques sont utilisés dans les installations actuelles (Semassou 2011) :

- la diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les modules photovoltaïques. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur en mode générateur. Par exemple une batterie durant la nuit ;
- les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées. La mise en conduction de ces diodes affecte la caractéristique de sortie du générateur par la perte d'une partie de la production d'énergie et par la présence de deux maximums de puissance.

1.4.3 Le système de stockage

Dans une installation PV, le stockage correspond à la conservation de l'énergie produite par le générateur PV pour une utilisation ultérieure. La production d'énergie par les systèmes PV est très fluctuante et dépend énormément des conditions météorologiques. Le système de stockage permet de mieux adapter le générateur PV en fixant la tension de l'installation (Semassou 2011).

1.4.4 Le système de régulation

Le rôle principal d'un régulateur est de réduire le courant lorsque la batterie est

presque entièrement chargée. Lorsqu'une batterie se rapproche d'un état de charge complète, de petites bulles commencent à se former sur les électrodes positives. Un courant trop élevé peut provoquer une déformation des électrodes à l'intérieur de la batterie, créant ainsi un court-circuit. Le régulateur de charge assure deux fonctions principales (Semassou 2011) :

- la protection des batteries contre les surcharges et les décharges profondes ;
- l'optimisation du transfert d'énergie du champ PV à l'utilisation.

1.4.5 Le système de conversion

Un système de conversion d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ PV et la charge (sans stockage avec charge en continu, il portera le nom de convertisseur continu-continu), soit entre la batterie et la charge (il sera alors appelé onduleur ou convertisseur continu alternatif) (Semassou 2011).

À l'onduleur est généralement associé un redresseur qui réalise la transformation du courant alternatif en courant continu et dont le rôle sera de charger les batteries et d'alimenter en continu le circuit de l'installation en cas de longue période sans soleil (Semassou 2011).

1.4.6 Les câbles électriques et de liaison

Une fois le système photovoltaïque constitué, il reste à envisager son installation pratique. Dans la phase de finition du système, on se préoccupe du câblage afin d'assurer la cohérence de l'ensemble. Les chutes de tension dans les câbles peuvent être très pénalisantes. Il est important également de vérifier que les diamètres de câbles choisis sont compatibles avec les borniers des composants retenus : modules et régulateur surtout. Il arrive qu'ils n'acceptent pas la section de câble que l'on souhaite y mettre. Il faut alors une boîte de jonction intermédiaire ou un bornier supplémentaire pour y remédier (Semassou 2011).

Avant de calculer toutes les sections de câbles, on fait un plan électrique global de l'installation. Il faut également prévoir l'emplacement des composants aussi précisément que possible pour réduire les distances modules boîtier de raccordement, boîtier de raccordement batterie, batterie onduleur. Pour une bonne mesure de la tension de la batterie par le régulateur, ce dernier doit être placé le plus près possible de la batterie (Semassou 2011).

1.4.7 Autres composants du système photovoltaïque

Les derniers éléments indispensables au bon fonctionnement d'un système PV autonome sont les protections contre la foudre, les disjoncteurs et les fusibles. Les panneaux solaires sont des équipements généralement coûteux, ils doivent être protégés pour éviter toute dégradation comme les perturbations induites par les commutations des convertisseurs de puissance. Dans ce cas, on peut introduire des filtres de puissance pour éliminer les harmoniques (Semassou 2011).

1.5 Avantages et inconvénients d'une installation PV

1.5.1 Avantages

Les avantages d'une installation PV sont nombreux (BELGHITRI 2010) :

- Son carburant est gratuit : Le soleil est la seule ressource dont a besoin un panneau solaire. Le soleil brillera jusqu'à la fin des temps et la plupart des cellules photovoltaïques sont fabriquées à base de silicium, un matériau abondant et non toxique (second matériau le plus abondant sur Terre) ;
- L'énergie solaire photovoltaïque ne génère ni bruit, ni émissions nocives, ni gaz polluants : L'électricité solaire utilise seulement l'énergie du soleil comme carburant. Elle ne crée aucun coproduit nocif et contribue activement à réduire le réchauffement climatique ;
- Les systèmes photovoltaïques sont très sûrs et d'une grande fiabilité : L'espérance de vie d'un module solaire est d'environ 30 ans. La performance des cellules photovoltaïques est généralement garantie par les fabricants pour une durée de 20 à 25 ans. Le photovoltaïque est donc une technologie fiable sur le long terme. De plus, la fiabilité des produits est garantie aux consommateurs ;
- Les modules photovoltaïques sont recyclables et les matériaux utilisés pour leur production (silicium, verre, aluminium, etc.) peuvent être réutilisés : Le recyclage n'est pas seulement bénéfique pour l'environnement, il contribue également à réduire l'énergie nécessaire pour produire ces matériaux et ainsi à réduire leur coût de fabrication ;
- L'énergie solaire photovoltaïque exige peu de maintenance : Les modules solaires ne nécessitent pratiquement aucune maintenance et sont faciles à installer ;
- L'énergie solaire photovoltaïque fournit de l'électricité aux zones rurales les plus isolées : Les systèmes photovoltaïques apportent une valeur ajoutée aux zones rurales (en particulier dans les pays en développement où il n'y a pas de réseau électrique disponible) ;
- L'énergie solaire photovoltaïque peut être intégrée de manière esthétique dans les

bâtiments : Les modules solaires peuvent couvrir toits et façades, contribuant ainsi à l'autonomie énergétique des bâtiments. Ils sont silencieux et peuvent être intégrés de manière très esthétique ;

- L'énergie solaire captée par la terre pendant une heure pourrait suffire à la consommation mondiale pendant une année : Au total, ce rayonnement représente 1.6 milliards de TWh, soit huit mille fois la consommation énergétique annuelle mondiale.

1.5.2 Inconvénients

Le développement du photovoltaïque est rapide, mais représente encore peu de chose dans le bilan énergétique mondial (BELGHITRI 2010) :

- L'ensemble des modules existant actuellement produit autant d'énergie que 20 % d'une tranche nucléaire. Ce n'est notamment pas une solution significative pour répondre immédiatement aux enjeux actuels ;

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé ;

- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%) ;

- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en site isolé ;

- Tributaire des conditions météorologiques ;

- Beaucoup d'appareils vendus dans le marché fonctionnent entre 220V et 230 V alternatif. Or, l'énergie issue du générateur PV est unidirectionnelle et de faible voltage (<30V), elle doit donc être transformée par l'intermédiaire d'un onduleur.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait un bref aperçu sur les systèmes PV. Nous avons également décrit le fonctionnement des cellules photovoltaïques. Nous avons fait état de ce que les systèmes photovoltaïques possèdent plusieurs types de configuration selon l'utilisation et selon le mode de stockage. Nous avons également procédé à la description des principaux composants d'un système photovoltaïque autonome. L'analyse fonctionnelle du système nous a permis d'avoir une idée globale des critères indispensables à son dimensionnement. Existe-t-il des paramètres pouvant influencer sur les performances d'un générateur photovoltaïque ?

Chapitre 2 : MATÉRIEL ET MÉTHODES

Introduction

Une cellule photovoltaïque convertit directement l'éclairement solaire en électricité. Son courant et sa tension de sortie dépendent essentiellement de l'éclairement et de la température. À cet effet, la prédiction des performances d'une cellule/module/générateur PV nécessite l'élaboration d'un modèle mathématique permettant l'étude de son fonctionnement pour les différentes conditions météorologiques (éclairement, température, etc...). Dans ce chapitre, nous allons modéliser le générateur PV puis présenter la méthode de simulation numérique adoptée pour étudier son fonctionnement.

2.1 Matériel utilisé

Nous avons utilisé pour cette étude :

- un module Solar BP 380 représenté à la figure (2.1).



Figure 2.1: Module BP 380 (BP 2004)

Le BP 380 est un module photovoltaïque de 80W particulièrement abouti, utilisant des cellules multi-cristallines avec couche antireflet SiN. Ce module solaire est aussi bien adapté pour les applications connectées au réseau telles que le petit résidentiel, les toitures de grands bâtiments commerciaux et même pour les applications traditionnelles (les systèmes de télécommunication et d'électrification rurale). Le BP 380 offre un rapport qualité prix de premier ordre grâce à sa fiabilité, sa feuille arrière en Tedlar blanc et ses 36 cellules multi-cristallines à haut rendement (BP 2004).

Le tableau (2.1) donne les caractéristiques du module Solar BP 380 sous les conditions standards ($G = 1000 \text{ W/m}^2$ et $T_{ref} = 25 \text{ °C}$).

Tableau 2.1: Caractéristiques du module Solar BP 380 (BP 2004)

Grandeurs	Valeur
Puissance nominale	80W
Tension au MPP (Vmp)	17,60 V
Courant au MPP (Imp)	4,55 A
Courant de court-circuit (Icc)	4,80 A
Tension de circuit ouvert (Vco)	22,10 V
Nombre de cellules en série (Ns)	36
Nombre de cellules en parallèle (Np)	1
Coefficient de sensibilité de la tension à la température (Kv)	-0,08 V/K
Coefficient de sensibilité de l'intensité à la température (Ki)	+0,065 A/K

La fiche technique du module BP 380 donne la figure (2.2) :

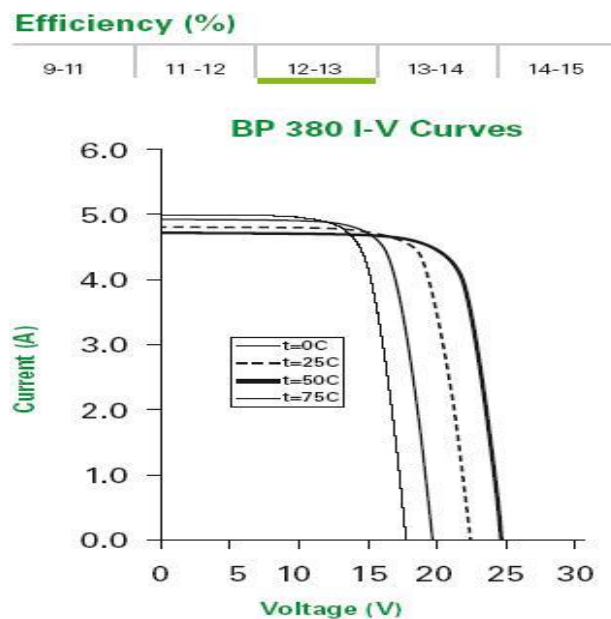


Figure 2.2: caractéristique I(V) du module BP 380 (BP 2004)

- Un solarimètre (Figure 2.3) pour mesurer l'irradiance. Il présente les atouts suivants (ES 2009) :

- Facile d'utilisation, pour un renseignement immédiat ;
- Estimation des puissances ; Estimation des puissances électriques produites et orientation optimale pour l'installation de panneaux solaires et suivi des performances ;
- Étude de l'ensoleillement sur site, à moyen et long terme ;
- Choix et détermination des caractéristiques des générateurs thermiques ou photovoltaïques

- Stocke les valeurs moyennes de puissance et réactualise le calcul de l'énergie cumulée chaque minute ;
- Facilite l'exploitation des données stockées en mémoire, la lecture et l'approximation graphique des données par 24H à l'aide du logiciel de transfert des données.

Caractéristiques de l'instrument (ES 2009):

Étendue de mesure puissance solaire : de 1 W/m² à 1300 W/m² ;

Étendue de mesure énergie cumulée : de 1 Wh/m² à 500 kWh/m² ;

Fréquence de la mesure.....1 / s ; Exactitude.....5% de la mesure ;

Fréquence de stockage (W/m²) : 1 / min (moyenne sur 60 secondes) ;

Capacité de stockage : 31 jours, 44640 points d'enregistrement sauvegardés

Décharge rapide des données : 1000 valeurs/seconde

Détectionhors gamme et défaut capteur

Température d'utilisation de -10°C à +50°C ; Température de stockage de -10°C à +55°C

- Un thermomètre infrarouge (Figure 2.2) pour mesurer la température de la cellule;

- Un ordinateur pour simuler et tracer les courbes intensité-tension et puissance-tension.



Figure 2.3 : Solarimètre SAM30 et thermomètre IR (ES 2009)

2.2 Méthode utilisée

2.2.1 Modélisation d'une cellule PV

Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances : une série R_s et l'autre parallèle R_p (figure 2.4).

La résistance série (R_s) est due à la contribution des résistances de base, du front de la jonction et des contacts faces avant et arrière. La résistance shunt ou parallèle est une

conséquence de l'état de surface le long de la périphérie de la cellule. Elle est réduite à la suite de pénétration des impuretés métalliques dans la jonction (surtout si elle est profonde) et lors du dépôt de la grille métallique ou des prises de contacts sur la face diffusée de la cellule (Yahya *et al.* 2008, Koumi *et al.* 2012).

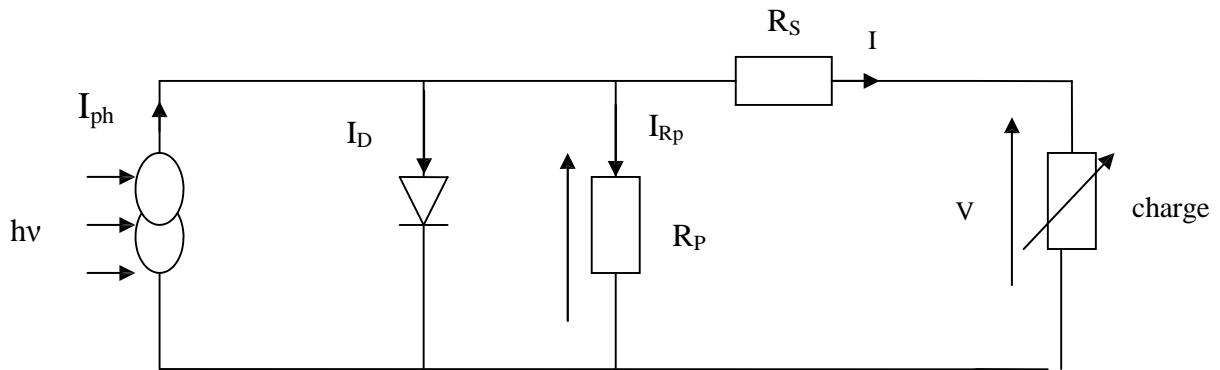


Figure 2.4: schéma électrique équivalent d'une cellule PV (Koumi *et al.* 2012)

2.2.2 Équation de la caractéristique courant-tension d'une cellule PV

Le courant débité par la cellule est la somme algébrique de trois courants :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{Rp} \quad (2.1)$$

I_{ph} : photo-courant en ampères (A), dépendant de l'éclairement (G).

I_D : courant de diode en ampères (A).

I_{Rp} : courant traversant la résistance shunt en ampères (A).

$$V_D = R_p I_{Rp} = V + R_s I \quad (2.2)$$

$$D'où \quad I_{Rp} = \frac{V_D}{R_p} = \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (2.3)$$

Avec V_D : tension aux bornes de la diode en volts (V).

R_s : résistance série en ohms (Ω).

R_p : résistance série en ohms (Ω).

I_D : courant de diode, il est de même ordre de grandeur que I_{Rp} pour les faibles tensions et il devient très grand au voisinage de V_{CO} , il s'écrit sous la forme :

$$I_D = I_0 \left(\exp\left(\frac{qV_D}{AKT}\right) - 1 \right) \quad (2.4)$$

Où

I_0 : courant de saturation de la diode.

K : constante de Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23}$ joule/Kelvin).

q : charge d'électron = $1,602 \cdot 10^{-19}$ C.

A : facteur d'idéalité de la cellule.

T : température de la cellule en kelvin.

En remplaçant (2.3) et (2.4) dans (2.1), on obtient :

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (2.5)$$

Au point de puissance maximale, $I=I_{mp}$ et $V=V_{mp}$. Dans ces conditions, (2.5) devient :

$$I_{mp} = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V_{mp} + I_{mp}R_s)}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{R_p} \quad (2.6)$$

Le facteur d'idéalité de la cellule qui dépend des mécanismes de recombinaison dans la zone de charge d'espace (ZCE). Pour des cellules supposées dépourvus de fuites, R_p est infinie et $R_s=0$. La relation (2.5) se transforme en la relation (2.7)

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{AKT} \right] - 1 \right\} \quad (2.7)$$

Le courant fourni par la cellule est également fonction du courant de court-circuit et de quatre termes scientifiques : I_{ph} (photo-courant), I_0 (courant de saturation), A (facteur d'idéalité) et R_s (résistance série). Les trois cas remarquables de la caractéristique intensité-tension sont :

- En court-circuit, $V = 0$ et $I = I_{cc}$ on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{qI_{cc}R_s}{AKT} \right] - 1 \right\} \quad (2.8)$$

En circuit ouvert, $V = V_{co}$ et $I = 0$. Ce qui donne

$$0 = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{qV_{co}}{AKT} \right] - 1 \right\} \quad (2.9)$$

Au point de puissance maximale

$$I_{mp} = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V_{mp} + I_{mp}R_s)}{AKT} \right] - 1 \right\} \quad (2.10)$$

Pour atteindre les valeurs nominales requises en tension et puissance, il faut brancher les modules PV dans un groupement mixte formé de N_s modules en série et N_p branches.

2.2.3 Résolution de l'équation de la caractéristique

La résolution de l'équation de la caractéristique intensité-tension (2.7) est faite par la méthode de Newton Raphson. Cette méthode est choisie pour la convergence rapide de la réponse. Elle est l'une des méthodes les plus utilisées pour la résolution des équations non linéaires. L'algorithme de cette méthode est basé sur le développement de Taylor.

Soit une équation à résoudre de la forme : $f(x) = 0$ (2.11)

À partir d'une valeur initiale x_0 de la solution, on cherche une correction δx telle que $f(x_0 + \delta x) = 0$ (2.12)

En faisant un développement de Taylor autour de $x = x_0$, on trouve :

$$f(x_0) + f'(x_0) \cdot \delta x + \dots = 0 \quad (2.13)$$

En négligeant les termes d'ordre supérieur ou égal à 2 en δx , on obtient :

$$f(x_0) + f'(x_0) \cdot \delta x \approx 0 \quad (2.14)$$

$$\text{Ce qui donne : } \delta x = -\frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \quad (2.15)$$

La correction est en principe la quantité que l'on doit ajouter pour annuler la fonction $f(x)$ puisque nous avons négligé les termes d'ordre supérieur ou égal à 2 dans le développement de Taylor. Cette correction n'est pas parfaite.

On pose donc :

$$x_1 = x_0 + \delta x \quad (2.16)$$

De façon générale on aura :

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (2.17)$$

Où

$f'(x)$: La dérivée de la fonction ;

x_n : La présente itération ;

x_{n+1} : L'itération suivante.

$$f(I) = I_{CC} - I - I_0 \left[\exp \frac{q(V + IR_s)}{AKT} - 1 \right] \quad (2.18)$$

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{CC} - I_n - I_0 \left[\exp \frac{q(V + I_n R_s)}{AKT} - 1 \right]}{-1 - \frac{qI_0 R_s}{AKT} \left[\exp \frac{q(V + I_n R_s)}{AKT} \right]} \quad (2.19)$$

Dans le code Matlab élaboré, le photo-courant et le courant de saturation de la diode sont déterminés par les relations (2.22), (2.23) et (2.24).

$$I_{ph} = I_{ph}(T_{ref}) + Ki(T - T_{ref}) \cdot \frac{G}{1000} \quad (2.20)$$

ki : Coefficient de sensibilité de l'intensité à la température en ampère par kelvin (A/K).

T_{ref} : température de référence 298 k (25°C).

G : irradiation solaire en watts par mètre carré (W/m²).

$I_{ph}(T_{ref})$: photo-courant à la température de référence.

$$I_{ph}(T_{ref}) = I_{CC}(T_{ref}) \cdot \frac{G}{1000} \quad (2.21)$$

$I_{CC}(T_{ref})$: courant de court-circuit à la température de référence

En introduisant la relation (2.21) dans (2.20), on trouve la relation (2.22) :

$$I_{ph} = \left[I_{CC}(T_{ref}) + Ki(T - T_{ref}) \right] \cdot \frac{G}{1000} \quad (2.22)$$

Le courant de saturation peut s'écrire :

$$I_0 = I_0(T_{ref}) \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \frac{qE_g}{AK} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \quad (2.23)$$

De la relation (2.10), pour $I_{ph} = I_{CC}$ et dans les conditions de référence, on a :

$$I_0(T_{ref}) = \frac{I_{CC}(T_{ref})}{\exp \left(\frac{qV_{CO}(T_{ref})}{N_s AK T_{ref}} \right) - 1} \quad (2.24)$$

Conclusion

Le principal intérêt du modèle à une diode utilisé réside dans sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre à partir des caractéristiques techniques données du constructeur. L'équation de la caractéristique intensité-tension d'une cellule PV est non linéaire. Cette équation montre que le courant débité par une cellule PV dépend de quatre paramètres inconnus : le photo-courant, le courant de saturation de la diode, le facteur d'idéalité de la cellule et la résistance série. La résolution de cette équation est faite par la méthode de Newton Raphson. Nous allons dans la suite élaborer un code sous MATLAB pour simuler numériquement le comportement du module PV en fonction de certains paramètres.

Chapitre 3 : SIMULATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS

Introduction

Ce troisième chapitre est consacré à la présentation et à l'analyse des résultats acquis en appliquant les relations obtenues dans le chapitre précédent à des caractéristiques mesurées courant-tension et puissance-tension du même dispositif photovoltaïque à différentes températures, sous différents éclairages et pour plusieurs autres paramètres. Ceci nous permettra d'explorer les effets de ces différents paramètres sur les caractéristiques intensité-tension et puissance-tension du module photovoltaïque étudié.

3.1 Courbes des caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$ du module BP 380

Les conditions normalisées de test des panneaux solaires sont caractérisées par un rayonnement instantané de 1000W/m^2 , d'une température ambiante de 25°C et d'un spectre **AM de 1.5**. AM représente l'Air Masse qui est l'épaisseur de l'atmosphère que la lumière doit pénétrer. Ces conditions sont appelées STC (Standard Test Conditions) et correspondent à un ensoleillement assez fort. La tension optimale du module BP 380 est de 17,6 Volts (V) et l'intensité du courant optimal est de 4,55 Ampères (A) sous une irradiation de 1000W/m^2 , une température de 25°C et AM de 1.5.

Les courbes intensité-tension et puissance-tension sont obtenues dans les conditions STC. La caractéristique courant-tension (Figure 3.1) nous montre que la cellule PV est une source de courant constant pour de faibles valeurs de la tension avec un courant approximativement égal au courant de court-circuit I_{cc} . Lorsque la tension augmente, le courant commence à diminuer exponentiellement jusqu'à la valeur zéro où la tension est égale à la tension de circuit ouvert V_{co} . La figure (3.2) montre que, sur la gamme entière de tension, il y a un seul point où la cellule fonctionne au rendement le plus élevé : c'est le point de puissance maximal (MPP).

La figure (3.1) présente deux points importants :

- Le courant de court-circuit $I_{cc}=4.8\text{A}$ qui correspond à la tension nulle ;
- La tension de circuit ouvert $V_{co}=22.1\text{V}$ qui correspond à l'intensité nulle.

La figure (3.2) présente un point important : le point de puissance maximal $P_{max}=80\text{W}$ qui correspond à une tension d'environ 18V. Ce point de puissance maximale correspond à un courant de 4,44A. Ces résultats confirment et valident le résultat numérique.

La simulation numérique de la cellule PV est validée par l'obtention de la courbe caractéristique plus arrondie désignant la puissance maximale réelle. Cette puissance maximale permet d'acquérir par projection sur les axes des ordonnées et des abscisses respectivement le courant maximal I_{pmax} et la tension maximale V_{pmax} .

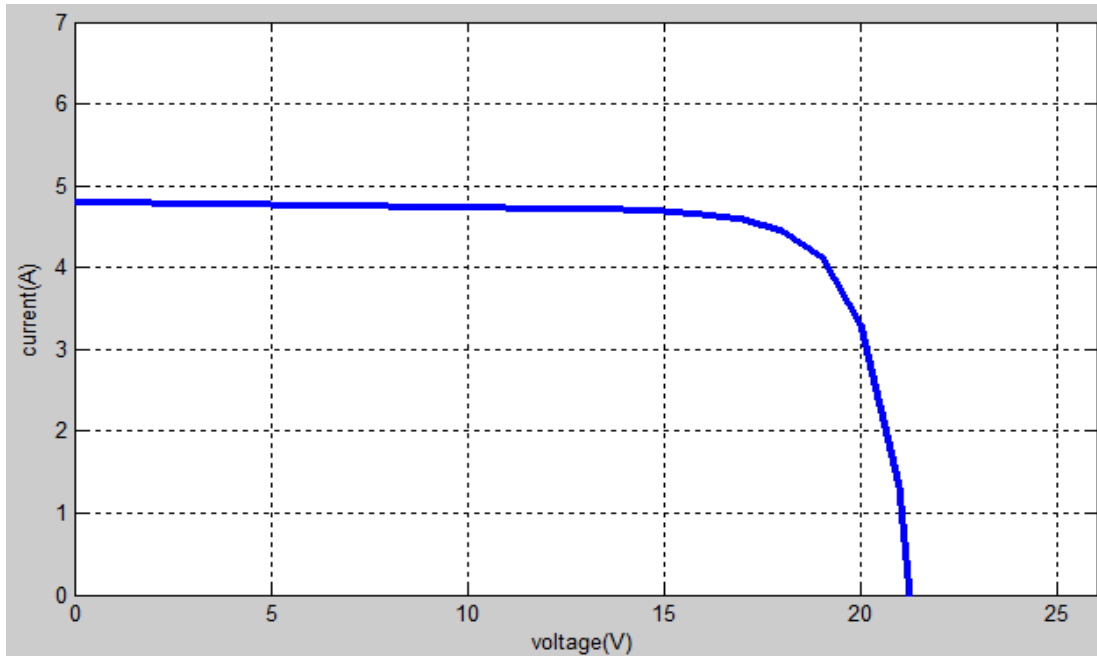


Figure 3.1 : Caractéristique intensité-tension du module BP 380

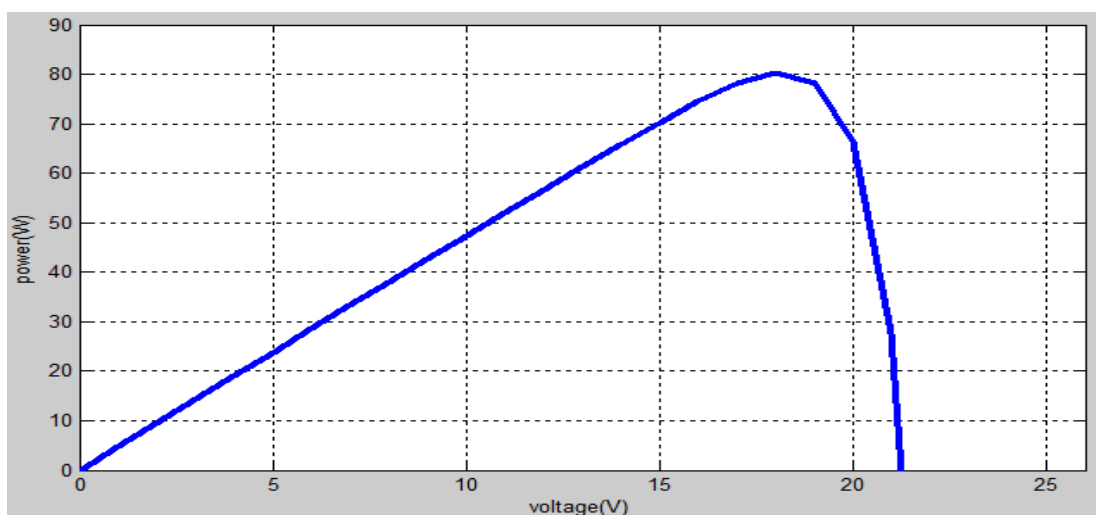


Figure 3.2 : Caractéristique puissance-tension du module BP 380

3.2 Étude des paramètres externes sur les caractéristiques du module BP 380

3.2.1 Étude de la caractéristique du module en fonction de l'irradiation solaire

L'augmentation d'ensoleillement (flux lumineux) (figure 3.3) se traduit par un déplacement de la caractéristique $I=f(V)$ suivant l'axe des courants. L'accroissement du courant de court-circuit est supérieur et plus important que celui de la tension de circuit

ouvert. Ceci est dû au fait que le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement, alors que celle de la tension à circuit ouvert est logarithmique. Quand l'ensoleillement augmente, l'intensité du courant photovoltaïque croît, les courbes I(V) se décalent vers les valeurs croissantes permettant au module de produire une puissance électrique plus importante. De même les courbes P(V) (figure 3.4) croissent de façon à produire une puissance électrique plus importante. La puissance délivrée par le module sous une irradiation de 1000 W/m^2 est d'environ 80 Watts.

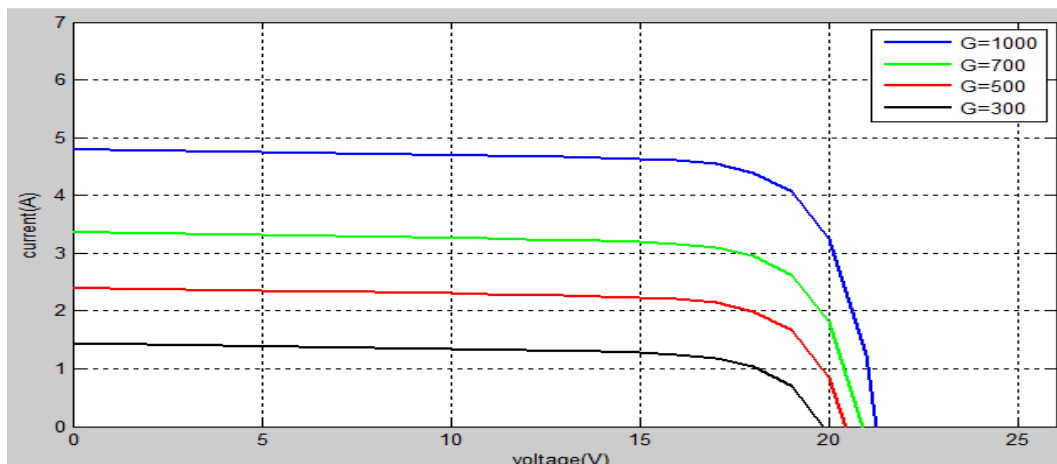


Figure 3.3 : Caractéristiques I(V) pour différentes irradiances solaires à 25°C

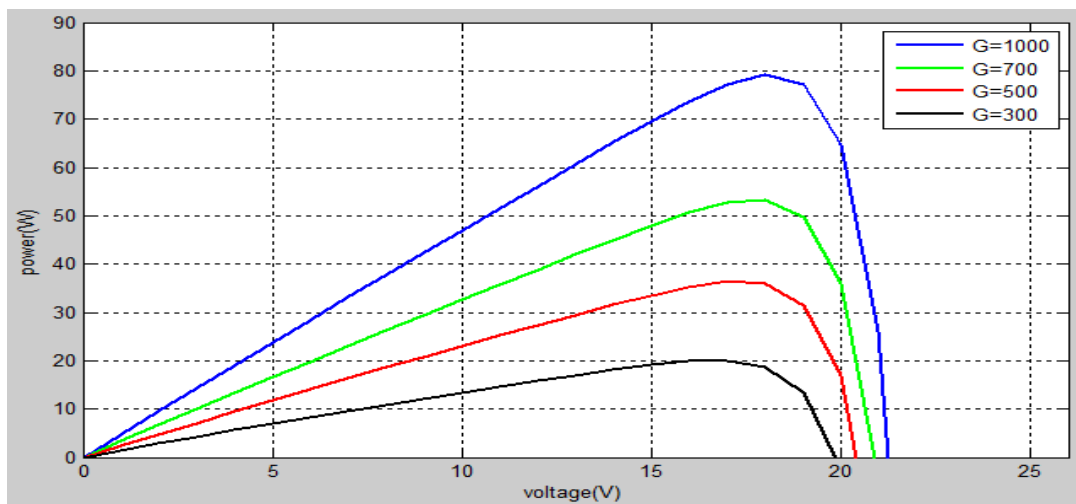


Figure 3.4 : Caractéristique P(V) pour différents irradiances solaires à 25°C

3.2.2 Étude de la caractéristique du panneau en fonction de la température

Si la température de la cellule augmente (figure 3.5), le photo- courant I_{ph} augmente également due principalement à la diminution de la largeur de la bande interdite du matériau. Le courant direct de la jonction augmente aussi, mais beaucoup plus vite entraînant une diminution importante de la tension de circuit ouvert. Nous observons également une très

faible augmentation du courant de court-circuit. La figure 3.6 met en exergue une diminution considérable de la puissance maximale délivrée par le module. L'augmentation de la température contribue plutôt à baisser le rendement du module PV.

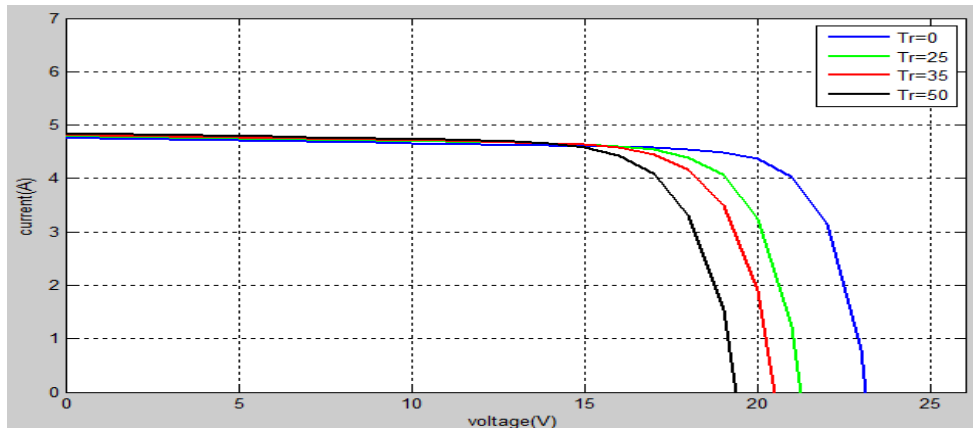


Figure 3.5 : Caractéristique I(V) pour différentes températures sous une irradiation $G = 1000 \text{ W/m}^2$

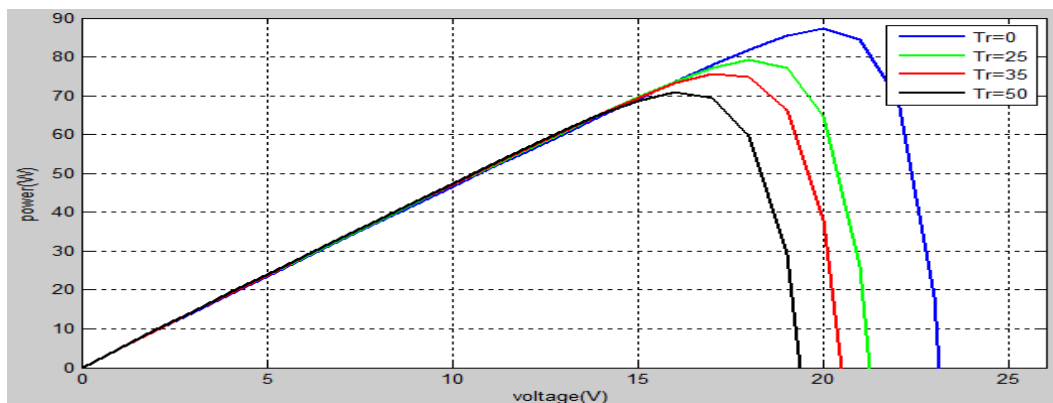


Figure 3.6 : Caractéristique P(V) en fonction de la température sous une irradiation $G = 1000 \text{ W/m}^2$

3.3 Étude des paramètres internes sur la caractéristique du module BP 380

Ces courbes sont obtenues sous une irradiation de 1000 W/m^2 et une température de 25°C .

3.3.1 Étude des caractéristiques I(V) et P(V) en fonction du facteur d'idéalité

Le type de cellule varie avec le facteur d'idéalité de la jonction. De la cellule silicium monocristallin au silicium amorphe, en passant par le polycristallin, ce facteur varie de 1 à 2. La figure (3.7) montre une légère diminution de la pente de la caractéristique dans la zone où le module fonctionne en générateur de courant presque constant lorsque le facteur d'idéalité augmente. La figure (3.8) montre également une diminution de la puissance maximale délivrée par le module lorsque le facteur d'idéalité augmente. Le facteur d'idéalité influence sur la puissance maximale réelle d'un module PV par conséquent sur la tension V_{pmax} et

I_{pmax} . Il est le paramètre responsable des choix des panneaux PV lors de l'achat pour une meilleure puissance.

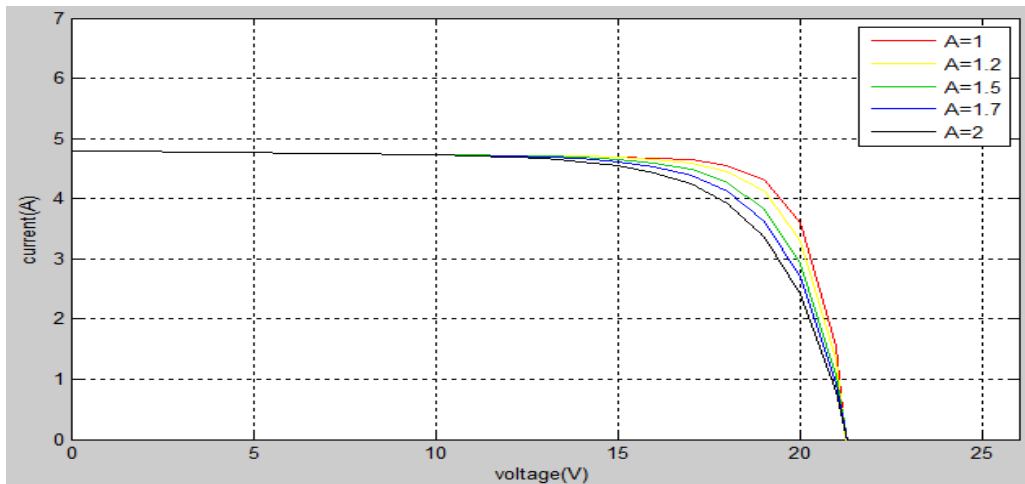


Figure 3.7 : Caractéristique I(V) en fonction du facteur d'idéalité

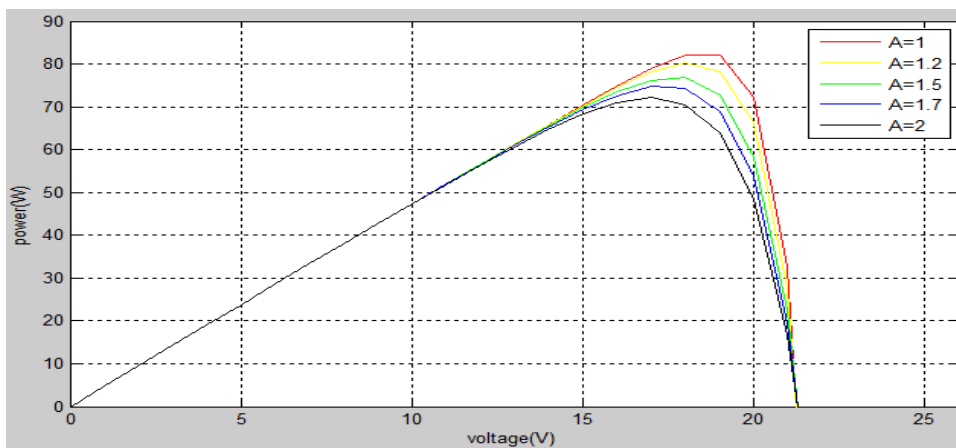


Figure 3.8 : Caractéristique P(V) en fonction du facteur d'idéalité

3.3.2 Étude des caractéristiques I(V) et P(V) en fonction de la résistance shunt R_p

Les courbes sont obtenues sous une irradiation de 1000 W/m^2 et une température de 25°C . La figure (3.9) montre une légère augmentation de l'arrondi de la caractéristique dans la zone où elle fonctionne en générateur de courant presque constant lorsque R_p augmente. La figure (3.10) montre également une légère augmentation de la puissance maximale délivrée par le module lorsque R_p augmente. Ceci montre que le rendement du module est meilleur lorsque la valeur de la résistance shunt est bien élevée.

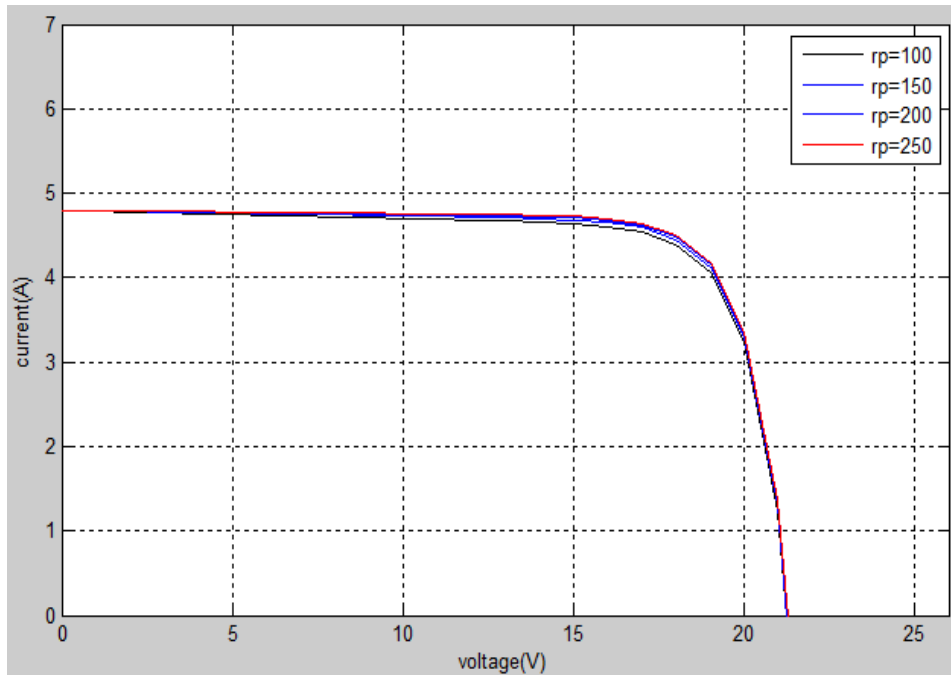


Figure 3.9 : caractéristiques I(V) en fonction de la résistance shunt Rp

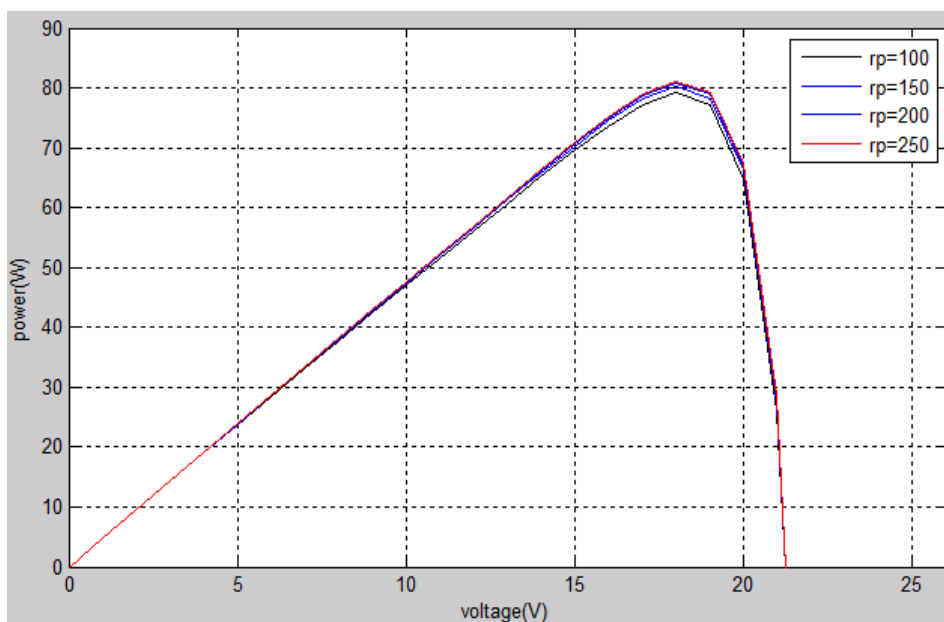


Figure 3.10 : caractéristiques P(V) en fonction de la résistance shunt Rp

3.4 Étude des caractéristiques I(V) et P(V) en fonction du type de connexion

Les courbes sont obtenues sous une irradiation de 1000 W/m^2 et une température de 25°C . La figure (3.11) montre que la valeur du courant de court-circuit augmente avec le nombre de parallèle tandis que la tension de circuit ouvert diminue. La meilleure tension de circuit ouvert correspond au groupement où toutes les cellules sont en série. Le meilleur courant de court-circuit correspond au groupement où le nombre de cellules en série (ns) est

égale au nombre de branches (np). La figure (3.12) montre que la puissance maximale la plus élevée du groupement mixte est obtenue lorsque le nombre de cellules en série (ns) est égal au nombre branches (np). Ce groupement où la puissance maximale est meilleure présente un inconvénient majeur : sa tension de circuit ouvert est très faible. Elle est inférieure à 5V. Ce groupement ne présente pas un intérêt pratique puisque les appareils que nous utilisons fonctionnent sous une tension de 220V. L'association série permet ainsi d'augmenter la tension du module PV. Quant à l'association parallèle, elle accroît l'intensité du courant.

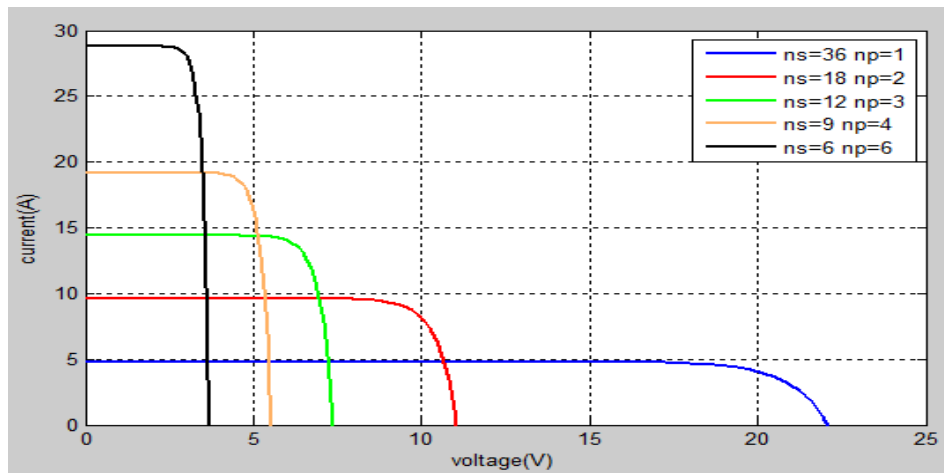


Figure 3.11 : caractéristiques I(V) en fonction du type de connexion

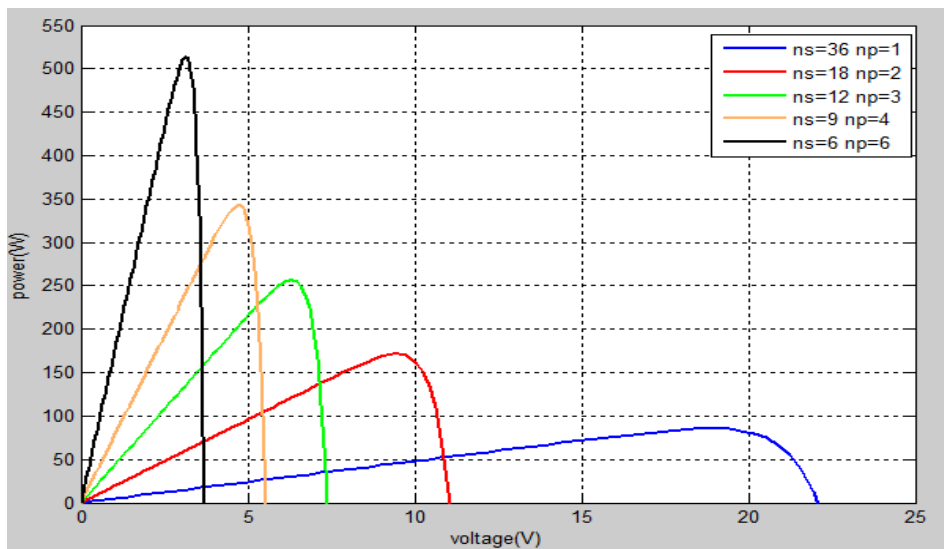


Figure 3.12 : caractéristiques P(V) en fonction du type de connexion

Conclusion

Dans ce chapitre, un code Matlab a été élaboré à partir de l'équation de la caractéristique intensité-tension. Ce code a permis de simuler numériquement le comportement d'un module photovoltaïque. Les courbes obtenues sont validées après comparaison des valeurs caractéristiques obtenues avec celles du constructeur. Les résultats obtenus montrent l'influence de la température, de l'éclairement, du facteur d'idéalité de la jonction, de la résistance shunt et du type de connexion sur le rendement du module. Un groupement mixte de cellules PV est optimisé lorsque le nombre de cellules en série est égal au nombre de branches mais cette association présente l'inconvénient de réduire considérablement la tension aux bornes du module PV. Afin qu'il y ait adéquation du sujet traité avec la formation enseignante, le prochain chapitre va montrer l'implication sur le système éducatif des systèmes PV.

Chapitre 4 : IMPLICATION SUR LE SYSTÈME ÉDUCATIF DU SUJET

Introduction

La formation de l'élite enseignante au Cameroun est achevée par une soutenance de mémoire portant sur un sujet d'étude quelconque, propre à chaque filière de formation. Le sujet traité doit en outre refléter les aspects pédagogique et didactique en relations avec le cursus de formation. Ce chapitre traite de l'implication du sujet sur le système éducatif. Il serait donc opportun de présenter dans un premier temps une fiche pédagogique qui fait le lien entre la recherche menée et le métier d'enseignant du secondaire pour lequel nous avons reçu une formation. Par la suite, il sera question de montrer l'intérêt didactique du sujet.

4.1 Fiche pédagogique

Nous avons conçu une fiche pédagogique comprenant un ensemble de quinze questions portant sur les énergies renouvelables et les systèmes photovoltaïques. Cette fiche permettra à un élève des classes de 4^{ème} et 3^{ème} de se familiariser avec l'énergie photovoltaïque.

Objectif général : Découvrir l'énergie solaire, ses atouts et ses défis, mieux comprendre son rôle dans le mélange énergétique de demain.

CONNAISSANCES ET SAVOIR-FAIRE	EXEMPLE D'ACTIVITÉS ENSEIGNEMENT-APPRENTISSAGE									
1. Identifier les types d'énergies renouvelables	<p>Question n°1 : identifier les énergies renouvelables dans les propositions ci-dessous :(rayer les mauvaises réponses)</p> <p>Réponse : Hydraulique, gaznaturel, biomasse, géothermie, nueléaire, charbon, éolien, pétrole, solaire.</p> <p>Question n°2 : pourquoi ces énergies sont-elles dites « renouvelables » ?</p> <p>Réponse : on parle d'énergies renouvelables car ces ressources sont inépuisables (il y aura toujours du vent pour les éoliennes, de l'eau pour les barrages et du soleil pour alimenter les panneaux solaires).</p> <p>Question n°3 : compléter le tableau en indiquant le type d'énergie correspondant à la source d'énergie :</p> <table border="1"><thead><tr><th>SOURCE</th><th>TYPE D'ÉNERGIE</th><th>UTILISATION</th></tr></thead><tbody><tr><td>soleil</td><td></td><td>Électricité et chaleur</td></tr><tr><td>vent</td><td></td><td>électricité</td></tr></tbody></table>	SOURCE	TYPE D'ÉNERGIE	UTILISATION	soleil		Électricité et chaleur	vent		électricité
SOURCE	TYPE D'ÉNERGIE	UTILISATION								
soleil		Électricité et chaleur								
vent		électricité								

	Mouvement de l'eau (chute d'eau ou courant)		électricité
	Bois, végétaux, déchets biodégradables		électricité, chaleur, transport (biogaz ou biocarburant)
	Chaleur de la terre (sous forme d'eau chaude ou de vapeur d'eau)		Chaleur et électricité
2. Prendre conscience des enjeux énergétique du monde de demain et de la protection de l'environnement	<p>Question n°4 : Pourquoi l'énergie est-elle un enjeu majeur pour demain ?</p> <p>Réponse : - L'énergie est au cœur de toutes les activités humaines. Pour se nourrir, se divertir, bouger, s'éclairer, se chauffer, construire...l'homme a besoin d'énergie.</p> <p>- Avec l'augmentation de la population mondiale, l'émergence de nouveaux pays industrialisés, les besoins en énergie vont continuer d'augmenter fortement.</p> <p>- Cette consommation d'énergie est une des causes principales du réchauffement climatique de la planète.</p> <p>Question n°5 : Quelles énergies faut-il utiliser pour réduire les émissions de gaz à effet de serre ?</p> <p>Réponse : Les énergies renouvelables n'émettent pas de CO₂ lors de leur utilisation. Un recours croissant à ces énergies pour produire l'électricité devrait contribuer à réduire globalement ces émissions.</p> <p>Question n°6 : D'après vous, quels sont les atouts de l'énergie solaire photovoltaïque pour la production d'électricité ?</p> <p>Réponse : Elle est abondante, inépuisable et largement répandue sur la planète, certes à des degrés variables selon la localisation géographique. Elle n'émet pas de gaz à effet de serre lors de son utilisation.</p> <p>Elle offre une grande flexibilité car elle peut être injectée dans le réseau électrique ou être consommée sur place ou bien les deux.</p> <p>Elle est accessible même dans les zones éloignées des réseaux électriques, car elle peut être produite et consommée sur place.</p> <p>Elle offre un potentiel d'utilisation varié pour satisfaire des besoins privés ou collectifs. Toits ou murs des maisons, des bâtiments collectifs ou au sol dans des centrales solaires</p>		

3. Connaître les composants et le cycle de fabrication des panneaux photovoltaïques
4. connaître les différents types de cellules et leurs caractéristiques

Question n°7 : Où trouve-t-on le silicium ?

Réponse : On trouve le silicium dans le sable. Le silicium est en effet issu de la silice qui est le principal composant du quartz et du sable.

Question n°8 : Pourquoi utilise-t-on du silicium ?

Réponse : Très bon semi-conducteur, c'est la matière première des cellules photovoltaïques les plus utilisées aujourd'hui. Pour être utilisable, il faut le purifier à 99,999999% en utilisant des réactions chimiques.

Question n°9 : Est-il facile de trouver du silicium sur terre ?

Réponse : Le silicium est le 2^{ème} élément le plus abondant sur terre après l'oxygène.

Question n°10 : Citer les 3 grandes familles de technologies photovoltaïques :

Réponse :

- **Famille silicium cristallin** : la plus répandue. C'est aujourd'hui la plus fiable et celle qui produit le plus d'électricité, mais elle reste chère.

- **Famille couches minces** : elle commence à se développer. Pour réduire les coûts de matière première, on la projette en fines couches sur un support. Elle produit moins d'électricité que la technologie précédente mais permet d'autres applications, comme les panneaux souples par exemple.

- **Famille organique** : encore au stade du laboratoire. Moins chères, flexibles, transparentes et recyclables, ces cellules utilisent des polymères. On pourra les utiliser sur des vêtements, sacs, emballages.

Question n°11 : Quels sont les objectifs de la recherche sur les cellules photovoltaïques ?

Réponse : - Réduire les coûts de production pour diminuer le prix de vente.

- Augmenter le rendement, c'est-à-dire la part d'énergie solaire transformée en électricité.

Question n°12 : Quelle est la durée de vie d'un panneau

	<p>photovoltaïque ?</p> <p>Réponse : La durée de vie d'un panneau photovoltaïque est d'environ 30 ans.</p>
<p>5. Connaître les caractéristiques et le fonctionnement d'un système autonome</p>	<p>Question n°13 : Dans quels cas a-t-on besoin d'une installation autonome ?</p> <p>Réponse : Lorsqu'on est isolé, et qu'on n'a pas accès à un réseau électrique, ou bien que cet accès coûterait plus cher à installer que le système photovoltaïque.</p> <p>Question n°14 : Pourquoi dit-on qu'un système est autonome ?</p> <p>Réponse : On dit qu'un système est autonome lorsqu'il n'est pas raccordé au réseau local d'électricité. On consomme directement l'énergie produite par le panneau solaire</p> <p>Question n°15 : Quels sont les éléments qui permettent d'avoir une autonomie et de l'électricité pendant la nuit ?</p> <p>Réponse : Les batteries permettent de stocker l'électricité produite afin de la restituer pendant la nuit, lorsque le système ne produit pas d'électricité.</p>

4.2 Intérêt didactique

Cet intérêt peut se retrouver à plusieurs niveaux :

4.2.1 Physique-chimie

- Travail sur les atomes, notamment sur les atomes de silicium ;
- à l'aide d'un ampèremètre, mesure de l'intensité et de la tension du courant électrique sur les panneaux solaires sous différentes conditions : lumière électrique, lumière extérieure grand soleil, lumière extérieure nuages, ombre sur une partie du panneau ;
- Travail sur les branchements en série et en dérivation des cellules au sein d'un panneau et réflexion sur les conséquences d'une mauvaise soudure ou d'un ombrage partiel d'un panneau photovoltaïque ;
- Travail sur la tension et le calcul du schéma électrique nécessaire pour réaliser les maisonnettes photovoltaïques en cours de technologie ;
- Travail sur les électrons et la conduction électrique : les semi-conducteurs ;
- L'atome de silicium : noyau et électrons. Principe photovoltaïque : déplacement des électrons ;

- Compréhension de la notion de puissance électrique.

4.2.2 Technologie

- Représentation fonctionnelle de l'objet à construire (fonctionnement, composants et fonctions, schéma du circuit) ;
- Connaissance des matériaux utilisés et de leur fabrication ;
- Évolution de la technique solaire, différentes familles technologiques ;
- Soudure des fils de connexion d'un panneau solaire ;
- Réalisation d'une maisonnette photovoltaïque fonctionnant également dans l'obscurité (gestion des batteries) ;
- Travail plus détaillé sur les matériaux et leur disponibilité ;
- Travail sur les formes d'énergie et leur impact sur l'environnement ;
- Cycle de vie d'un panneau solaire ;
- Progrès technique et inventions ;
- Réalisation du projet technique.

Conclusion

Ce chapitre a porté sur l'implication des systèmes photovoltaïques sur le système éducatif. L'énergie en général et le solaire en particulier est un domaine incontournable pour le développement d'un pays. Cette forme d'énergie sonne comme une solution directe à l'éclairage des zones rurales. Dans le contexte actuel au Cameroun où on parle de plus en plus de la professionnalisation des enseignements, il serait indiqué d'introduire les systèmes photovoltaïques dans les programmes scolaires.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce travail a porté sur l'étude d'inventaire des systèmes photovoltaïques en vue d'optimiser leur fonctionnement. Une revue détaillée des systèmes recensés est faite. Le générateur photovoltaïque étant au cœur de ces systèmes, nous lui avons consacré l'essentiel de notre attention. Les performances d'un générateur PV sont fortement influencées par les conditions climatiques, particulièrement l'irradiation solaire et la température du module PV. Dans cette étude, nous avons utilisé le modèle empirique à une diode pour simuler le fonctionnement des modules PV pour différentes conditions d'ensoleillement, de température, de facteur d'idéalité, de résistance shunt et de type de connexion. La simulation numérique sous MATLAB de l'équation de la caractéristique intensité-tension du module BP 380 a permis de montrer l'influence non moins négligeable des paramètres cités plus haut. Le rendement d'un module PV croît avec l'ensoleillement. Il décroît lorsque la température augmente. L'accroissement du facteur d'idéalité fait décroître le rendement du module PV. Par contre, l'accroissement de la résistance shunt provoque son augmentation. L'association série des cellules permet d'augmenter la tension du module PV. Quant à l'association parallèle, elle accroît l'intensité du courant de court-circuit. L'association mixte ayant autant de cellules en série que de branches permet d'obtenir le meilleur rendement mais ce montage n'est pas pratique car possède une faible tension à ses bornes. Quelle que soit la structure d'une cellule photovoltaïque, une optimisation de ses paramètres est nécessaire pour avoir un bon rendement. Les valeurs des paramètres optimaux dépendent de la structure de la cellule solaire et de la qualité du matériau du substrat (duré de vie, mobilité). Ces valeurs dépendent aussi de la qualité des contacts ohmiques et de la vitesse de recombinaison en surface (faces avant et arrière).

Comme perspective, nous pensons à l'étude d'une optimisation de la puissance produite par les modules photovoltaïques en utilisant des architectures de gestion distribuée. Comme nous avons pu le constater, l'architecture classique d'un module solaire nécessite une association de nombreuses cellules élémentaires en série. Cette association rend fragile l'ensemble du système de production vis-à-vis de diverses perturbations arrivant même au niveau d'une seule cellule. Les cas d'ensoleillements inhomogènes, un dysfonctionnement ou des salissures au niveau d'une seule cellule peuvent faire baisser considérablement la production d'électricité du module.

BIBLIOGRAPHIE

- Alain RICAUD (2007) Convertisseurs photovoltaïques. Cours de 5^{ème} année Polytech'Savoie, École d'Ingénieurs, France, 84 p.
- Alain RICAUD (2008) Modules et systèmes photovoltaïques. Cours de 5^{ème} année Polytech'Savoie, École d'Ingénieurs, France, 161 p.
- Alain RICAUD (2011) Systèmes photovoltaïques. Cours de 5^{ème} année Polytech'Savoie, École d'Ingénieurs, France, 155 p.
- BP Solar, Module_80wc.pdf, www.bpsolar.com (02/2004), available from: www.asr-fluidelec.com/files/module_80wc.pdf, (accessed: 16/05/2016).
- Clarence SEMASSOU (2011) Aide à la décision pour le choix de sites et systèmes énergétiques adaptés aux besoins du Benin. Thèse de Doctorat de l'Université de Bordeaux 1, École doctorale : Sciences Physiques pour l'Ingénieur (SPI), Spécialité : Mécanique, France, 224 p.
- DHAKER Abbes (2012) Contribution au dimensionnement et à l'optimisation des systèmes hybrides éoliens-photovoltaïques avec batteries pour l'habitat résidentiel autonome. Thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers, École nationale supérieure d'ingénieurs (Poitiers), France, 274 p.
- Équipements Scientifiques SA, Département Bio-Tests et Industries, solarimètre SAM30, www.es-france.com (02/2009), available from : www.es-france.com/pdf/sam30.pdf, (accessed : 11/05/2016).
- BELGHITRI Houda (2010) Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque. Mémoire de Magister, Université ABOU-BAKR BELKAID DE TLEMENEN, Faculté de Sciences, Algérie, 106 p.
- KHERIDLA Youcef, KHINECHE Kaddour (2014) Modélisation et simulation d'un système de production d'hydrogène par voie photovoltaïque. Mémoire MASTER, Université KASDI MERBAH OUARGLA, Faculté des Sciences Appliquées, Département de Génie Électrique, Algérie, 83 p.
- KOUMI NGOH Simon, NJOMO Donatien, MOUNGNUTOU MFETOUM Inoussah (2012) Comparison of Predictive Models for Photovoltaic Module Performance under Tropical Climate. TELKOMNIKA, Vol.10, No.2, June 2012, pp. 245~256, ISSN: 1693-6930.
- Othmane BENSEDDIK, Fathi DJALOUH (2012) Étude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque. Mémoire de Master, Université KASDI

MERBAH OUARGLA, Faculté des Sciences et Technologie et Sciences de la matière,
Département de Génie Électrique, Algérie, 75 p.

- OULD MOHAMED Yahya, A. OULD MAHMOUD et I. YOUM (2008) Étude et modélisation d'un générateur photovoltaïque. *Revue des Énergies Renouvelables Vol. 11 N°3 (2008) 473 – 483* (reçu le 19 Juillet 2008 – accepté le 30 Septembre 2008).

ANNEXES

Annexe 1 : Programme pour tracer I(V) et P(V) en fonction de l'irradiance(G)

```
k = 1.381e-23;%Boltzman constant
q = 1.602e-19;%electron charge
A=1.2;%ideality factor
Eg=1.12;
G = [1000 700 500 300];
ki=0.0017;
rs=0.01;
rp=100;

iccr= 4.8;
vcor=22.1;
vpm= 17.6;
ipm= 4.55;
ns= 36;
np=1;
Trk=25+273;
Tr =25;
T=Tr+273;
V=[0:1:25];
for i=1:4
    iph=(iccr+ki*(T-Trk))*(G(i)/1000);
    ion=iccr/(exp(q*22.1/(ns*k*A*Trk))-1);
    B=(1/Trk)-(1/T);
    io=ion*((T/Trk)^3)*exp(q*B*Eg/(k*A));
    I=np*iph-np*io*(exp(q*V./(k*T*A*ns))-1)-V/rp;

    P=V.*I;
    figure(1)
    plot(V,I);
    axis([0 26 0 7]);
    xlabel('voltage(V)');
    ylabel('current(A)');
    legend('G=1000','G=700','G=500','G=300')
    hold on
    figure(2)
    plot(V,P);
    axis([0 26 0 90]);
    xlabel('voltage(V)');
    ylabel('power(W)');
    legend('G=1000','G=700','G=500','G=300')
    hold on
end
```

Annexe 2 : Programme pour tracer I(V) et P(V) en fonction de la température

```
k = 1.381e-23;%Boltzman constant
q = 1.602e-19;%electron charge
A=1.2;%ideality factor
Eg=1.12;%
G =1000;
ki=0.0017;
rs=0.01;
rp=100;

iccr= 4.8;
vcor=22.1;
vpm= 17.6;
ipm= 4.55;
ns= 36;
np=1;
Trk=25+273;
Tr =[0 25 35 50];
T=Tr+273;
V=[0:1:25];
for i=1:4
    iph=(iccr+ki*(T(i)-Trk))*(G/1000);
    ion=iccr/(exp(q*22.1/(ns*k*A*Trk))-1);
    B=(1/Trk)-(1/T(i));
    io=ion*((T(i)/Trk)^3)*exp(q*B*Eg/(k*A));
    I=np*iph-np*io*(exp(q*V./(k*T(i)*A*ns))-1)-V/rp;

    P=V.*I;
    figure(1)
    plot(V,I);
    axis([0 26 0 7]);
    xlabel('voltage(V)');
    ylabel('current(A)');
    legend('Tr=0','Tr=25','Tr=35','Tr=50')
    hold on
    figure(2)
    plot(V,P);
    axis([0 26 0 90]);
    xlabel('voltage(V)');
    ylabel('power(W)');
    legend('Tr=0','Tr=25','Tr=35','Tr=50')
    hold on
end
```


Annexe 3 : Programme pour tracer I(V) et P(V) en fonction de rp

```
k = 1.381e-23;%Boltzman constant
q = 1.602e-19;%electron charge
A=1.2;%ideality factor
Eg=1.12;%
G =1000;
ki=0.0017;
rs=0.01;
rp=[100 150 200 250];

iccr= 4.8;
vcor=22.1;
vpm= 17.6;
ipm= 4.55;
ns= 36;
np=1;
Trk=25+273;
Tr =25;
T=Tr+273;
V=[0:1:25];
for i=1:4
    iph=(iccr+ki*(T-Trk))*(G/1000);
    ion=iccr/(exp(q*22.1/(ns*k*A*Trk))-1);
    B=(1/Trk)-(1/T);
    io=ion*((T/Trk)^3)*exp(q*B*Eg/(k*A));
    I=np*iph-np*io*(exp(q*V./(k*T*A*ns))-1)-V/rp(i);

    P=V.*I;
    figure(1)
    plot(V,I);
    axis([0 26 0 7]);
    xlabel('voltage(V)');
    ylabel('current(A)');
    legend('rp=100','rp=150','rp=200','rp=250')
    hold on
    figure(2)
    plot(V,P);
    axis([0 26 0 90]);
    xlabel('voltage(V)');
    ylabel('power(W)');
    legend('rp=100','rp=150','rp=200','rp=250')
    hold on
end
```

Annexe 4 : Programme pour tracer I(V) et P(V) en fonction du type de connexion

```
k = 1.381e-23;%Boltzman constant
q = 1.602e-19;%electron charge
A = 1.2;%ideality factor
Eg = 1.12;
G = 1000;
ki=0.0017;
rs=0.01;
rp=150;
iccr= 4.8;
vcor=22.1;
vpm= 17.6;
ipm= 4.55;
ns= [36 18 12 9 6];
np= [1 2 3 4 6];
Trk=25+273;
Tr =25;
T=Tr+273;
V=[0:1:25];
for i=1:5;
    iph=(iccr+ki*(T-Trk))*(G/1000);
    ion=iccr/(exp(q*22.1/(ns(i)*k*A*Trk))-1);
    B=(1/Trk)-(1/T);
    io=ion*((T/Trk)^3)*exp(q*B*Eg/(k*A));
    I=np(i)*iph-np(i)*io*(exp(q*V./(k*T*A*ns(i)))-1)-V/rp;

    P=V.*I;
    figure(1)
    plot(V,I);
    axis([0 32 0 32]);
    xlabel('voltage(V)');
    ylabel('current(A)');
    legend('ns=36 np=1','ns=18 np=2','ns=12 np=3','ns=9 np=4','ns=6 np=6')
    hold on
    figure(2)
    plot(V,P);
    axis([0 32 0 610]);
    xlabel('voltage(V)');
    ylabel('power(W)');
    legend('ns=36 np=1','ns=18 np=2','ns=12 np=3','ns=9 np=4','ns=6 np=6')
    hold on
end
```