

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE
N° :2018/ESEM10/87



**DOMAINE : SCIENCES ET
TECHNOLOGIE**
FILIERE : ELECTRONIQUE
**OPTION : ELECTRONIQUE DES
SYSTEMES EMBARQUE**

**Mémoire présenté pour l'obtention
du diplôme de Master Académique**

Par:BOUKAF Tarek
BOUTERAA Ala-Eddine

Intitulé

**Etude comparative des techniques de
caractérisation des modules photovoltaïques
en polarisation directe**

Soutenu devant le jury composé de :

DJAZIA Kamel	Université de M'sila	Président
SAIGAA Djamel	Université de M'sila	Encadreur
DRIF Mahmoud	Université de M'sila	Co-Encadreur
BENHAMADOUCHE A/W	Université de Msila	Examineur

Année universitaire : 2017 /2018

Remerciements

Nous remercions en premier lieu Dieu qui nous a donné ce bien là et pour que nous vivions ce jour et la force et la patience pour terminer ce travail.

Nous tenons à exprimer nos remerciements à nos encadrants Messieurs D. SAIGAA et M. DRIF ont proposé et dirigé ce travail.

Nous remercions Monsieur le président du jury, ainsi que les membres de jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Le travail que nous avons réalisé doit beaucoup à certaines personnes que nous tenons à les remercier sincèrement.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à notre formation et à l'élaboration de ce modeste mémoire.

Dédicaces

Au terme de toutes ces longues périodes d'études, nous dédions ce modeste travail en titre de respect, de reconnaissance et de remerciement à :

Nos très chers parents pour leurs soutiens durant la formation.

Nos frères

Nos familles

Tous nos amis(es) sans exception

Sans oublier nos professeurs avec tout le respect et l'appréciation pour eux.

Table des matières

Introduction général.....	1
Chapitre 01 : Généralités sur les dispositifs de conversion photovoltaïque	
1.1. Introduction	3
1.2.Principe de la conversion photovoltaïque.....	4
1.3.Modélisation des cellules solaires.....	5
1.3.1. Modèles implicites usuels.....	5
1.3.2. Modèle simplifié.....	7
1.3.3. Caractéristiques courant-tension (I-V).....	8
1.3.4. Paramètres de la cellule solaire.....	9
1.4.Modules photovoltaïques.....	10
1.4.1. Effet de l'éclairement sur la caractéristique I-V.....	11
1.4.2. Effet de la température sur la caractéristique I-V.....	11
1.5. Connexions des modules photovoltaïques.....	12
1.5.1. Modules en série.....	12
1.5.2. Modules en parallèle.....	13
1.6. Générateur ou champ photovoltaïque.....	13
1.6.1. Effets de l'éclairement et de température sur la caractéristique I-V.....	13
1.6.2. Caractéristique Puissance-Tension (P-V).....	14
1.7.Conclusion.....	15
Chapitre 02:Techniques de caractérisation des dispositifs photovoltaïques	
2.1.Introduction.....	16
2.2. Différentes techniques.....	17
2.2.1. Résistance variable.....	17
2.2.2. Charge capacitive.....	18

2.2.3. Charge électronique.....	19
2.2.4. Charge de quatre quadrants.....	20
2.2.5. Charges à base de convertisseurs DC/DC.....	21
2.2.5.1. Convertisseur DC-DC abaisseur (Buck)	22
2.2.5.2. Convertisseur DC-DC élévateur (boost).....	24
2.2.5.3. Convertisseur DC-DC abaisseur-élévateur (buck-boost)	26
2.3. Conclusion.....	28

Chapitre 03 : Etude de simulation des différentes techniques de caractérisation.

3.1. Introduction.....	29
3.2. Modélisation et simulation du module photovoltaïque	30
3.3. Simulation des différentes techniques de caractérisation des modules PV.....	33
3.3.1. Caractérisation par résistance variable.....	33
3.3.2. Caractérisation par charge capacitive.....	36
3.3.3. Caractérisation par convertisseurs DC/DC.....	39
3.4. Discussion des résultants.....	48
3.5. Conclusion.....	51
Conclusion générale.....	52
Référence.....	54

Abréviations

CCM : Continuous Conduction Mode

DC : Courant Continu (Direct Current)

DCM : Discontinuous Conduction Mode

FF : Facteur de forme

GPV : Générateur Photovoltaïque

PV : Photovoltaïque.

STC : Standard Tests Conditions

list de tableau

	Page
Tableau 3.1. Caractéristiques électriques aux STC du module photovoltaïque étudié	32
Tableau 3.2. Paramètres électriques obtenus à partir de la caractérisation par résistance variable.	36
Tableau 3.3. Paramètres électriques obtenus à partir de la caractérisation par charge capacitive	38
Tableau 3.4. Expressions de la tension, le courant de sortie et l'impédance d'entrée dans les deux modes fonctionnement continu (CCM) et discontinu (DCM)	40
Tableau 3.5. Paramètres électriques obtenus à partir de la caractérisation par convertisseur buck	42
Tableau 3.6. Expressions de la tension, le courant de sortie et l'impédance d'entrée dans les deux modes fonctionnement continu (CCM) et discontinu (DCM)	42
Tableau 3.7. Paramètres électriques obtenus à partir de la caractérisation par convertisseur boost	45
Tableau 3.8. Expressions de la tension, le courant de sortie et l'impédance d'entrée dans les deux modes fonctionnement continu (CCM) et discontinu (DCM)	45
Tableau 3.9. Paramètres électriques obtenus à partir de la caractérisation par convertisseur buck-boost	47

Liste des figures

		Page
Figure 1.1	Description d'une cellule	5
Figure 1.2	Circuits électriques équivalents de cellules :(a)modèle simple-diode ;(b) modèle double-diode.	6
Figure 1.3	Modèle simplifié d'une cellule solaire.	7
Figure 1.4	Caractéristique courant-tension (I-V) d'une cellule solaire.	9
Figure 1.5	Module photovoltaïque	11
Figure 1.6	Effet de l'ensoleillement sur la caractéristique du module I-V (à T=25°C).	11
Figure 1.7	Effet de la température sur la caractéristique du module I-V(à 1000W/m ²).	12
Figure 1.8	Caractéristiques I-V des modules en série	12
Figure 1.9	Caractéristiques I-V de N modules connectés en parallèle	13
Figure 1.10	Caractéristiques I-V en fonction de l'ensoleillement et la température des cellules	14
Figure 1.11	Caractéristiques P-V du GPV en fonction des différents ensoleillements (a) et différentes températures de la cellule (b)	14-15
Figure 2.1	Caractérisation à l'aide d'une charge résistive.	18
Figure 2.2	Caractérisation à l'aide d'une charge capacitive	19
Figure 2.3	Caractérisation à l'aide d'une charge électronique	20
Figure 2.4	Courbe I-V dans les quadrants I, II et IV	21
Figure 2.5	Schéma fonctionnel d'une charge de quatre quadrants	21
Figure 2.6	Schéma synoptique du caractériser à base d'un convertisseur DC-DC.	22
Figure 2.7	Convertisseur DC-DC buck	22
Figure 2.8	Circuits équivalents du buck, S fermé en (a), S ouvert en (b)	23
Figure 2.9	Convertisseur DC-DC boost .	24

Figure 2.10	Circuits équivalents du boost, S fermé (a), S ouvert (b)	25
Figure 2.11	Convertisseur DC-DC buck-boost .	26
Figure 2.12	Circuits équivalents du buck-boost, S fermé (a), S ouvert (b)	27
Figure 3.1	Circuit électrique équivalent du modèle simple-diode	30
Figure 3.2	Schéma synoptique du modèle du module PV	31
Figure 3.3	Schéma Bloc du module PV dans l'environnement Matlab-Simulink	31
Figure 3.4	Caractéristiques I-V et P-V pour différentes températures et un éclairement $G=1000\text{W}/\text{m}^2$	33
Figure 3.5	Caractéristiques I-V et P-V pour différents éclairement et une température $T=25^\circ\text{C}$.	33
Figure 3.6	Schéma de principe de la caractérisation par résistance variable	34
Figure 3.7	Schéma bloc de la caractérisation par résistance variable.	35
Figure 3.8	Caractéristiques I(V) et P(V) obtenues à partir de la technique de résistance variable à $T=25^\circ\text{C}$ et aux éclairements :	36
Figure 3.9	Schéma de principe de la caractérisation par charge capacitive.	37
Figure 3.10	Schéma bloc de la caractérisation par charge capacitive.	37
Figure 3.11	Caractéristiques I(V) et P(V) obtenues à partir de la technique de résistance variable à $T=25^\circ\text{C}$ et aux éclairements :	38
Figure 3.12	Schéma de principe du convertisseur Buck	39
Figure 3.13	Schéma bloc de la caractérisation par convertisseur buck.	40
Figure 3.14	Signal commande de rapport cyclique croissant	41
Figure 3.15	Caractéristique I(V) et P(V) relevées à $T=25^\circ\text{C}$ et $G1=1000\text{W}/\text{m}^2$, $G2=900\text{W}/\text{m}^2$, $G3=800\text{W}/\text{m}^2$	41
Figure 3.16	Schéma de principe du convertisseur boost.	42
Figure 3.17	Schéma bloc de la caractérisation par convertisseur boost.	43
Figure 3.18	Signal commande de rapport cyclique croissant	44
Figure 3.19	Caractéristique I(V) et P(V) relevées à $T=25^\circ\text{C}$ et $G1=1000\text{W}/\text{m}^2$, $G2=900\text{W}/\text{m}^2$, $G3=800\text{W}/\text{m}^2$	44
Figure 3.20	Schéma de principe du convertisseur buck-Boost.	45

Figure 3.21	Schéma bloc de la caractérisation par hacheur buck-Boost.	46
Figure 3.22	Signal commande de rapport cyclique fixe.	46
Figure 3.23.	Caractéristiques I-V et P-V relevées à $T=25^{\circ}\text{C}$ $G1 : 1000\text{W}/\text{m}^2$ $G2 : 900\text{W}/\text{m}^2$ $G3 : 800\text{W}/\text{m}^2$	47
Figure 3.24	Caractéristique I-V relevée à 25°C et $1000\text{W}/\text{m}^2$ par une résistance variable	48
Figure 3.25	Caractéristique I-V relevée à 25°C et $1000\text{W}/\text{m}^2$ par une charge capacitive	49
Figure 3.26	Caractéristique I-V relevée à 25°C et $1000\text{W}/\text{m}^2$ par un convertisseur buck	49
Figure 3.27	Caractéristique I-V relevée à 25°C et $1000\text{W}/\text{m}^2$ par un convertisseur boost	49
Figure 3.28	Caractéristique I-V relevée à 25°C et $1000\text{W}/\text{m}^2$ par un convertisseur buck-boost	50

Liste des symboles

G : Eclairement de référence (1000 W/m^2).

k : Constante de Boltzman ($1.38.10^{-23} \text{ J / k}$).

I_{mp} : Courant optimum (A).

I_{ph} : Courant photo généré ou phot-courant (A).

I_o : Courant de saturation(A).

I_{sc} : Courant de court-circuit (A).

N_p : Nombre de modules dans le panneau en parallèle.

N_s : Nombre de modules dans le panneau en série.

P_{mp} : Puissance maximale produite PV (W).

R_p : Résistances parallèle shunt (Ω)

R_s : Résistance série (Ω).

T : Température de référence ($298 \text{ }^\circ\text{k}$).

T_c : Température de la cellule (C°).

V_{mp} : Tension qui correspond à la puissance maximale (V).

V_{oc} : Tension à circuit ouvert (V).

q : Charge de l'électron ($1.602.10^{-19} .C$).

α : Coefficient de courant en fonction de température ($\text{A}/^\circ\text{C}$).

β : Le coefficient de tension en fonction de température ($\text{V}/^\circ\text{C}$).

η : Rendement du module (%).

Introduction générale

Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée qui regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenu.

Aujourd'hui l'énergie solaire fournit un bon rendement de conversion énergétique, alors que le rendement d'un système fondé sur la combustion d'un minerai fossile est au mieux de 30 à 35% [1].

Dans le temps présent, cette utilisation doit être encouragée par des mesures appropriées et une politique énergétique des états. Dans les pays industrialisés, les lois sur les énergies renouvelables ont permis de booster fortement le marché du photovoltaïque.

L'Algérie, pays du soleil et de l'espace, peut s'inspirer de ces programmes pour une exploitation à grande échelle de l'énergie solaire. Elle a les moyens humains et financiers à la mesure de ces programmes. L'enjeu est grand, et vital. L'Algérie est dans le monde l'un des pays de fort potentiel d'exportation de l'énergie électrique solaire [2].

Le générateur photovoltaïque est le seul convertisseur direct pour transformer la lumière en énergie électrique [3], et offre la possibilité de produire de l'électricité directement à partir d'une ressource renouvelable et largement disponible.

Leurs développements constituent de ce fait, un enjeu majeur dans la perspective d'un approvisionnement énergétique compatible avec la contrainte d'environnement local et global. Le champ d'utilisation des systèmes photovoltaïques est large avec beaucoup de configurations autonomes et reliées au réseau de distribution. Les applications de l'énergie solaire incluent le pompage d'eau, réfrigération, climatisation, sources lumineuses, véhicules électriques, centrales photovoltaïques, utilisation militaire, domaine spatial [4], et dans les systèmes hybrides [5].

La nécessité de caractériser ces éléments est devenu un aspect de plus en plus important et fondamentalement pour les exigences de qualité, de durabilité et d'efficacité exigés par le marché.

La caractéristique courant-tension en polarisation directe (ou courbe I-V en éclairage) est l'élément clé de l'analyse des performances d'un dispositif photovoltaïque (cellule solaire, module ou champ de modules) par le fait celle-ci comprend tous les paramètres électriques inhérents au fonctionnement de tel dispositif PV (I_{sc} , V_{oc} , I_{mp} , V_{mp} , P_{mp}). En théorie, la mesure de caractéristique I-V pourra se faire par le biais d'une résistance variable allant de 0 à ∞ permettant ainsi le parcours de cette courbe I-V du point de court-circuit ($0, I_{sc}$) au point de circuit-ouvert ($V_{oc}, 0$). En effet, sur le plan pratique, la caractérisation pourra se faire moyennant quatre types de charges : une résistance variable, une charge capacitive ou une charge électronique, qui est un simple interrupteur statique (BJT, MOSFET, ...) ou carrément un convertisseur DC/DC.

Le présent projet de Master se veut une étude comparative entre cinq techniques usuelles de caractérisation des modules photovoltaïques. L'étude de simulation sera réalisée à l'aide du logiciel de simulation dynamique Matlab/Simulink.

Pour décrire cela, ce mémoire est présenté en trois chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous présentons généralités sur les dispositifs de conversion photovoltaïque, ainsi que le principe de la conversion photovoltaïque, modélisation des cellules solaires, modules photovoltaïques, générateur photovoltaïque, et les connexions entre les modules photovoltaïques.
- Dans le deuxième chapitre, nous présentons l'aspect théorique des quelques techniques usuelles utilisées dans la caractérisation des dispositifs de conversion photovoltaïques (cellule, module et champ photovoltaïque) entre les techniques.
- Dans le troisième chapitre, nous présentons une étude de modélisation et simulation du module photovoltaïque, une étude de simulation des différentes techniques de caractérisation, ainsi qu'une étude comparative entre des différentes techniques de caractérisation des modules PV.

Enfin, on termine ce mémoire par une conclusion générale.

Généralités sur les dispositifs de conversion photovoltaïque

1.1. Introduction

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie.

C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque.

Cette énergie solaire est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et malgré une atténuation importante lorsqu'elle traverse l'atmosphère, la quantité qui reste est encore assez importante quand elle arrive au sol. On peut ainsi compter sur 1000 w/m² crête dans les zones tempérées et jusqu'à 1400 W/m² lorsque l'atmosphère est faiblement polluée [6][7].

Pour comprendre le fonctionnement de cette énergie et en optimiser son utilisation, nous effectuons dans ce chapitre un bref rappel sur le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et ses performances ainsi le générateur solaire photovoltaïque et leurs performances.

1.2. Principe de la conversion photovoltaïque

La possibilité de transformer directement l'énergie lumineuse, et en particulier le rayonnement solaire en énergie électrique est apparue en 1954 avec la découverte de l'effet photovoltaïque. Cet effet utilise les propriétés quantiques de la lumière permettant la transformation de l'énergie incidente en courant électrique dont la cellule solaire ou photopile, est l'élément de base de cette conversion photovoltaïque.

Comment fonctionne une cellule solaire ?

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 (figure 1.1), 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 donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction (dite p-n) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi un pair électron - trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel le courant électrique circule.

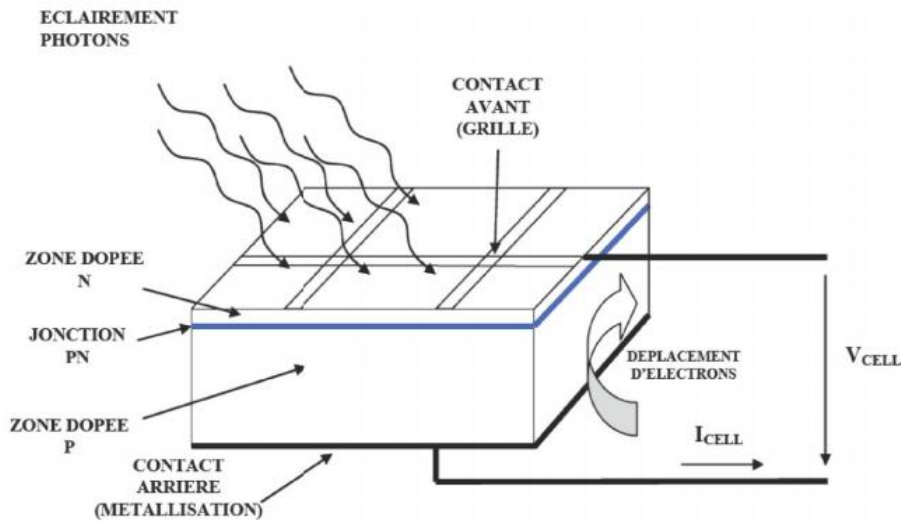


Figure 1.1. Description d'une cellule [8].

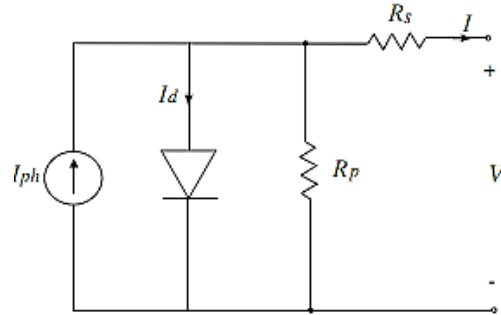
Il est à noter que la conversion est limitée par le spectre de la radiation solaire qui peut être utilisée. Afin d'être protégé contre l'eau, le tiret, l'humidité et la chaleur, les cellules solaires sont placées dans une encapsulation en verre plat, simple ou double. Les types de technologie les plus employées dans la production des cellules solaires sont : silicium monocristallin, poly cristallin et amorphe, avec des rendements qui s'étendent de 15%, 13% et 7% respectivement.

1.3. Modélisation des cellules solaires

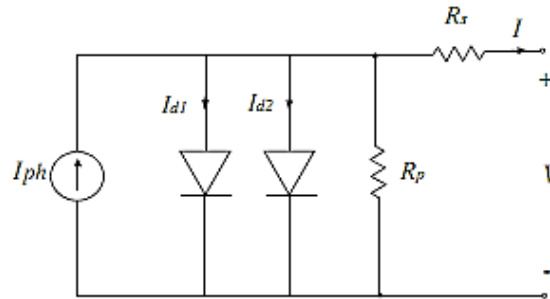
1.3.1. Modèles implicites usuels

Les circuits équivalents traditionnels de la cellule solaire, représentés par une source de courant parallèlement à une ou deux diodes sont montrés sur le figure1.2. Le modèle simple de diode comprend quatre composants : une source de photo-courant, une diode parallèle à la source, une résistance en série R_s et une résistance de shunt R_p Comme montré dans figure1.2(a), le modèle de double diode figure1.2(b) inclut une diode additionnelle pour un meilleur ajustement de courbes. Ce modèle exige la connaissance de quatre paramètres aux conditions standards de l'ensoleillement et de la température. Les paramètres sont généralement donnés par le fabricant ou peuvent être obtenus à partir des essais de module sous trois conditions : courant à court-circuit (I_{sc}), tension à circuit ouvert (V_{oc}) et la tension (V_{mpp}) et le courant (I_{mpp}) au point maximum de puissance. Des coefficients de la température sont également nécessaires dans cette

technique de modélisation pour considérer l'effet de la température sur les paramètres importants de la cellule solaire.



(a)



(b)

Figure 1.2.Circuits électriques équivalents de cellules :(a)modèle simple-diode ;
(b) modèle double-diode.

Le modèle mathématique relatif au circuit électrique équivalent simple diode d'une cellule solaire peut être décrit par l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_o \left(\exp \left(\frac{V + I R_s}{m \frac{kT}{q}} \right) - 1 \right) - \frac{V + I R_s}{R_p} \quad (1.1)$$

Où

I_{ph} est le courant photogénéré ou phot-courant, I_o est le courant de saturation de la diode; m est le facteur d'idéalité de la diode; R_s et R_p sont respectivement la résistance série et la résistance parallèle, T est la température absolue en Kelvin.

L'équation contient également la charge élémentaire constante q ($1,602 \cdot 10^{-19} .C$) et la constante de Boltzmann k ($1,380 \cdot 10^{-23} J/K$).

Quant au circuit électrique équivalent double diode d'une cellule solaire, on peut utiliser la même équation 1.1 en rajoutant le second terme de la deuxième diode.

$$I = I_{ph} - I_{o1} \left(\exp \left(\frac{V+I R_s}{kT} \right) - 1 \right) - I_{o2} \left(\exp \left(\frac{V+I R_s}{2kT} \right) - 1 \right) - \frac{V+I R_s}{R_p} \quad (1.2)$$

1.3.2. Modèle simplifié

Comme le montre la figure 1.3, le circuit électrique équivalent d'une cellule solaire ne tient pas compte de l'effet de la résistance shunt ($R_p \rightarrow \infty$). La relation du courant en fonction de la tension peut être approximativement exprimée par les équations de 1.3 à 1.9[9][10]:

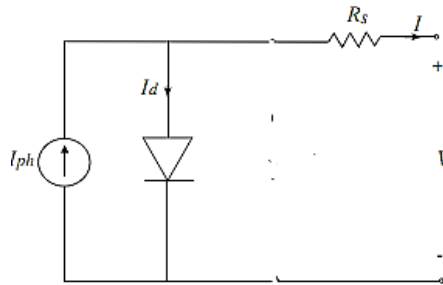


Figure 1.3. Modèle simplifié d'une cellule solaire.

$$I = I_{sc} \left[1 - C_1 \left(\exp \left(\frac{V}{C_2 V_{oc}} \right) - 1 \right) \right] \quad (1.3)$$

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}} \right) \exp \left(\frac{-V_{mp}}{C_2 V_{oc}} \right) \quad (1.4)$$

$$C_2 = \frac{\frac{V_{mp}}{V_{oc}} - 1}{\ln \left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}} \right)} \quad (1.5)$$

Pour d'autres niveaux d'ensoleillement $G(\text{W}/\text{m}^2)$ et des températures $T(^{\circ}\text{C})$, le modèle décale n'importe quel point (V_{ref}, I_{ref}) des courbes de référence (V-I) à un nouveau point (V, I) sur la base des équations (1.4) à (1.8).

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (1.6)$$

$$\Delta I = \alpha \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) \Delta T + \left(\frac{G}{G_{ref}} - 1 \right) I_{sc} \quad (1.7)$$

α : est défini comme étant le coefficient de variation du courant en fonction de température, (en $\text{A}/^{\circ}\text{C}$)

$$\Delta V = -\beta \Delta T - R_s \Delta I \quad (1.8)$$

Où

β : est défini comme étant le coefficient de variation de la tension en fonction de la température, (en $\text{A}/^{\circ}\text{C}$)

$$I_{new} = I_{ref} + \Delta I \quad (1.9)$$

$$V_{new} = V_{ref} - \Delta V \quad (1.10)$$

1.3.3. Caractéristiques courant-tension (I-V)

La caractéristique courant-tension (I-V) de la cellule solaire qui présente comment la cellule photovoltaïque réagit à toutes les charges possibles sous des conditions particulières d'éclairement et de température, est montrée en figure 1.4. On peut distinguer trois points importants :

- Point 1 : Il correspond au courant maximum que peut fournir la cellule solaire à la tension nulle (courant de court-circuit ; I_{sc}).
- Point 2 : Il correspond à la tension maximale de la cellule solaire sans charge ; (Tension de circuit ouvert ; V_{oc}).
- Point 3: Il correspond à la puissance maximale que peut délivrer la cellule solaire (P_{mp}) .

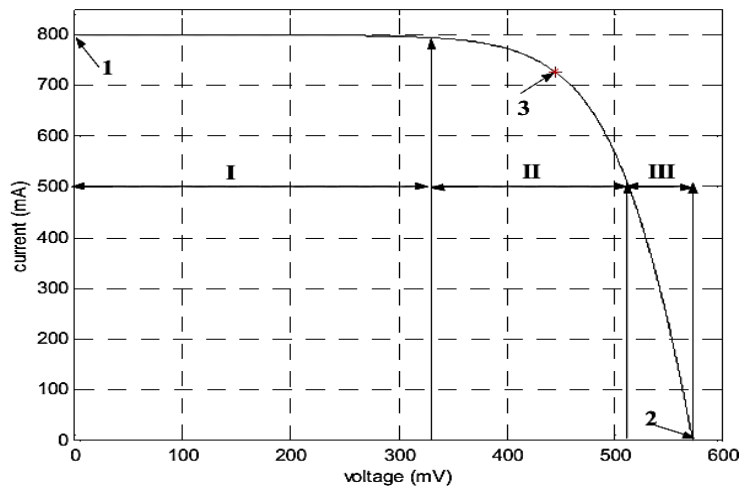


Figure 1.4. Caractéristique courant-tension (I-V) d'une cellule solaire.

Par ailleurs, la caractéristique I-V peut être divisée en trois intervalles différents :

- L'intervalle où la cellule solaire se comporte comme une source, i.e. le courant est constant alors la tension est variable (Intervalle I).
- L'intervalle, où la cellule solaire, n'est ni considéré comme source de courant ni source de tension (intervalle II).
- L'intervalle où la cellule solaire est considéré comme une source de tension, i.e. la tension est constante alors le courant est variable, (Intervalle III).

Une fois qu'une cellule solaire est chargée avec une charge résistive constante, la charge est présentée avec un point quelque part sur la caractéristique de cellules I-V. Quand la charge augmente, le point de fonctionnement se déplace le long de la caractéristique vers la droite. Cependant, une diminution de la charge fait monter le point de fonctionnement de la caractéristique vers la gauche de la direction.

1.3.4. Paramètres de la cellule solaire

La cellule solaire est caractérisée par le rendement de conversion η , une tension à circuit ouvert V_{oc} , un courant à court-circuit I_{sc} et un facteur de suffisance FF . Ces paramètres sont déterminés à partir des caractéristiques courant-tension. Leurs déterminations permettent les comparaisons de différentes cellules éclairées en conditions identiques.

- **Courant de court-circuit, I_{sc}**

Le courant de court-circuit est le courant obtenu quand les bornes de cellules sont court-circuitées ($V=0$). Il augmente linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et est relié sur la surface éclairée, le spectre du rayonnement solaire et la température.

- **Tension de circuit ouvert, V_{oc}**

La tension de circuit ouvert est obtenue quand le courant de cellules est nul. Il est lié à la résistance de shunt et à la barrière d'énergie. Sa valeur diminue avec la température et change peu avec l'insolation.

- **Facteur de Suffisance, FF**

Le facteur de suffisance d'une cellule solaire est défini comme le rapport d'une puissance maximale à la puissance calculée en multipliant la tension de circuit-ouvert par le courant de court-circuit. Cela reflète combien de résistances en série et peu de résistances shunt dans la cellule solaire. Pendant que la cellule solaire se dégrade avec l'âge, sa résistance en série tend à augmenter le résultat en un facteur inférieur de suffisance.

$$FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{I_{sc} V_{oc}} \quad (1.11)$$

- **Rendement de la cellule**

Le rendement d'une cellule solaire est défini comme le rapport de la puissance maximale fournie par la cellule à la puissance lumineuse d'incident.

$$\eta = \frac{V_{mp} I_{mp}}{G A} \quad (1.12)$$

A est la surface active de la cellule solaire (en m^2) et G est l'éclairement (en W/m^2)

1.4. Modules photovoltaïques

Le module photovoltaïque se compose d'un certain nombre de cellules solaires, qui est installé en série et en parallèle dans une armature comme est représenté sur la figure 1.5. Comme le module se compose de groupe de cellules, le modèle d'un module photovoltaïque est basé sur le modèle de la cellule solaire.

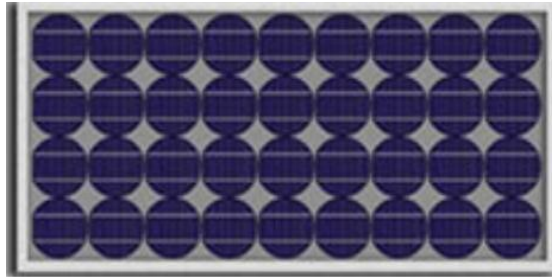


Figure 1.5.Module photovoltaïque

1.4.1. Effet de l'éclairement sur la caractéristique I-V

La figure 1.6 présente la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque pour différents ensoleillements à la température fixe. Comme on peut voir sur la figure, le courant du module est proportionnel à l'ensoleillement, tandis que la tension de circuit-ouvert change légèrement avec l'ensoleillement.

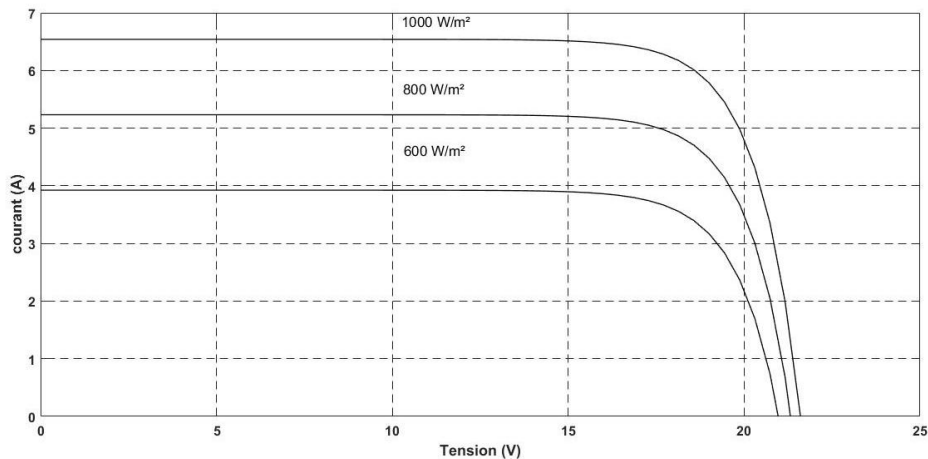


Figure 1.6.Effet de l'ensoleillement sur la caractéristique du module I-V (à $T=25^{\circ}\text{C}$).

1.4.2. Effet de la température sur la caractéristique I-V

On peut observer l'effet de la température sur la caractéristique I-V du module sur la figure 1.7. Comme le montre cette figure, la température a un léger effet sur le courant, mais une augmentation de la température cause une diminution apparente sur la tension de circuit-ouvert.

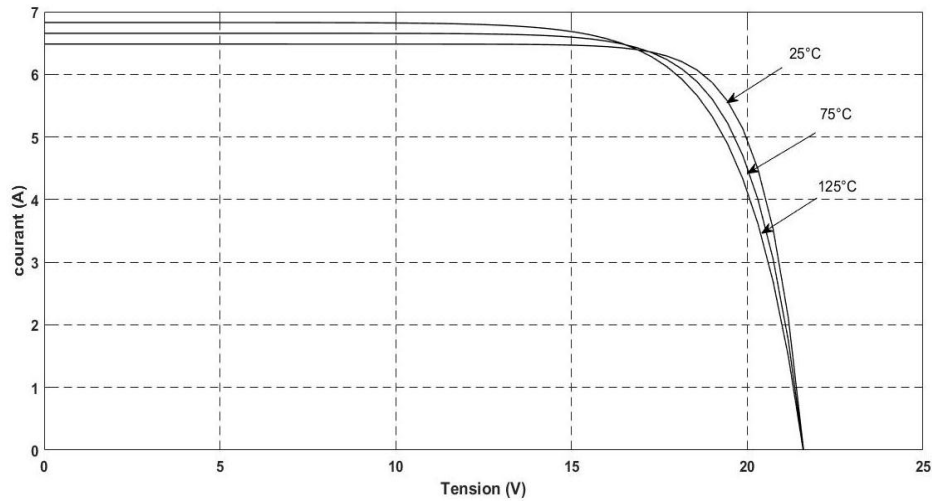


Figure 1.7. Effet de la température sur la caractéristique du module I-V (à 1000W/m²)

1.5. Connexions des modules photovoltaïques

1.5.1. Modules en série

Dans le cas idéal, quand le nombre (N) de modules photovoltaïques identiques sont reliés en série, la tension de circuit-ouvert est égale à la N^{ième} tension du module individuel. La tension de sortie du sous-générateur photovoltaïque V_{SG} et du circuit ouvert V_{SG}^{oc} peuvent être données par les relations suivantes :

$$V_{SG} = \sum_{i=1}^N V_i = V_1 + V_2 + \dots + V_N \quad (1.13)$$

$$V_{SG}^{oc} = N V_{oc1} = N V_{oc2} = \dots = N V_{ocN} \quad (I = 0) \quad (1.14)$$

Les caractéristiques courant-tension de N modules identiques en série sont présentées sur la figure 1.8.

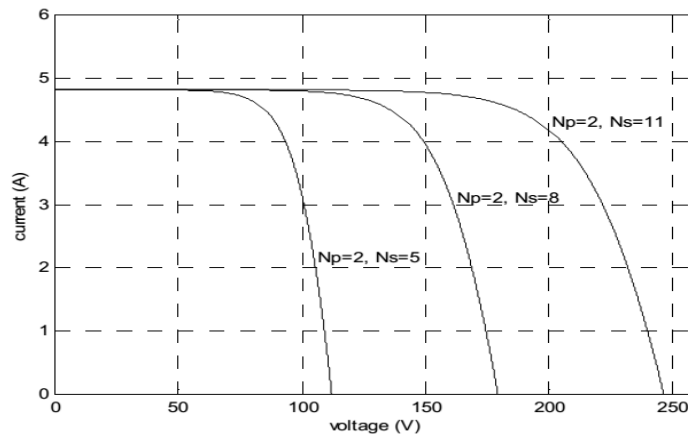


Figure 1.8. Caractéristiques I-V des modules en série

1.5.2. Modules en parallèle

Si un nombre (N) de modules identiques sont connectés en parallèle, la tension résultante V_{SG} est la même pour chaque module et le courant résultant I_{SG} est la somme des courants.

$$I_{SG} = \sum_{i=1}^N I_i = I_1 + I_2 + \dots + I_N \quad (1.15)$$

$$V_{SG} = V_1 = V_2 = \dots = V_N \quad (1.16)$$

Les caractéristiques courant - tension de N modules identiques en parallèle sont présentées sur la figure 1.9.

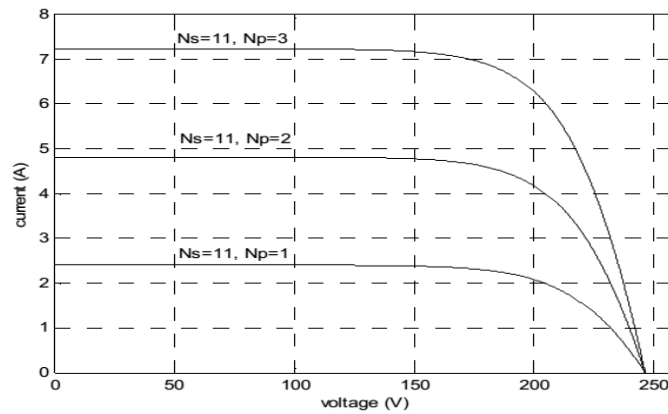


Figure 1.9.Caractéristiques I-V de N modules connectés en parallèle

1.6. Générateur ou champ photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque se compose d'un certain nombre de modules formés par un certain nombre de cellules photovoltaïques, connectées ensemble en série et en parallèle pour fournir le courant et la tension nécessaires. La performance du générateur dépend de la variabilité des modules que comprend le générateur et les cellules comprises par les modules. La tension de sortie du générateur photovoltaïque dépend du nombre de modules en série alors que le courant de sortie dépend du nombre de modules en parallèle. L'ensemble intégré des modules photovoltaïques ainsi que la structure de soutènement est défini comme rangée photovoltaïque.

1.6.1. Effets de l'éclairement et de température sur la caractéristique I-V

L'effet double de l'ensoleillement et de la température des cellules sur les caractéristiques I-V, est montré sur la figure 1.10. On peut observer que la tension de circuit-ouvert diminue légèrement avec l'augmentation de la température de cellules de 25°C à 55°C, tandis que le courant augmente à mesure que l'ensoleillement augmente de 200 W/m² à 1000 W/m².

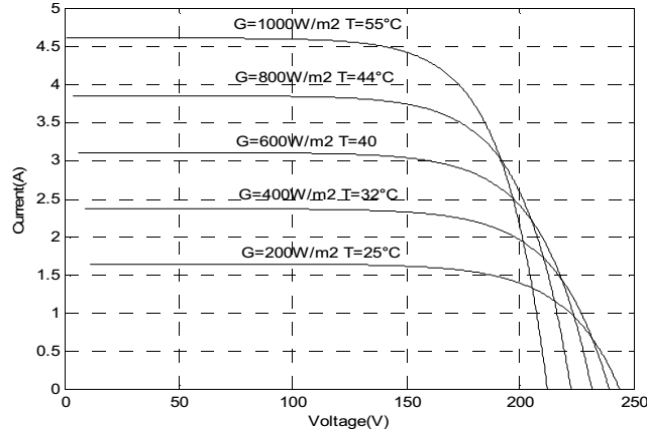
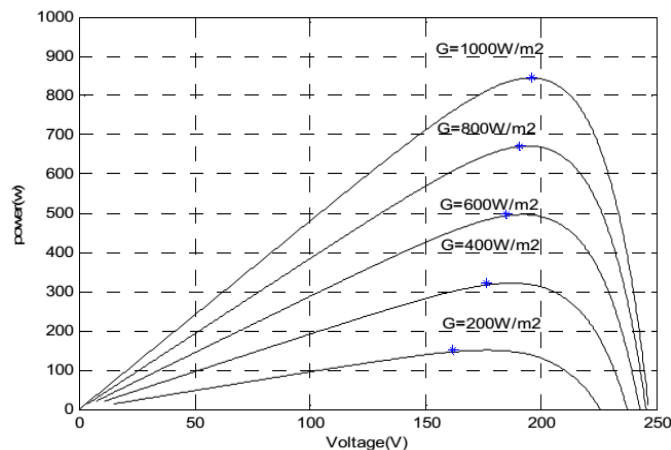


Figure 1.10. Caractéristiques I-V en fonction de l'ensoleillement et la température des cellules

1.6.2. Caractéristique Puissance-Tension (P-V)

Sans tenir compte des caractéristiques I-V, le générateur photovoltaïque peut être défini avec ses caractéristiques de tension-puissance (P-V). Figure 1.11(a) montre les caractéristiques photovoltaïques P-V de générateur pour des valeurs différentes d'ensoleillement à une température fixe, alors que la figure 1.11(b) présente les caractéristiques P-V pour différentes valeurs de températures à un ensoleillement fixe.



(a)

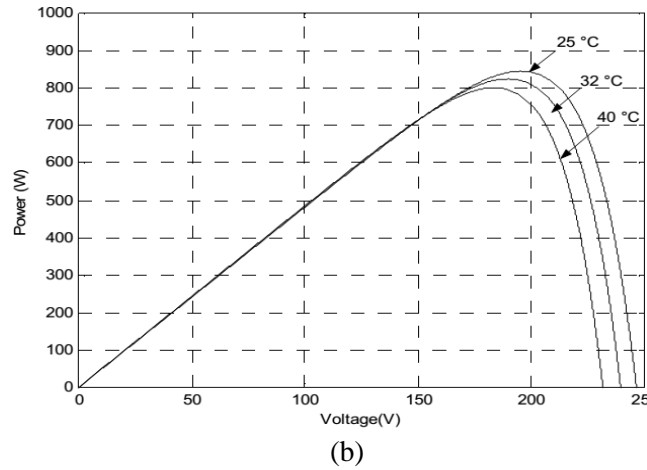


Figure 1.11.Caractéristiques P-V du GPV en fonction des différents ensoleillements (a) et différentes températures de la cellule (b)

1.7. Conclusion

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par la cellule photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules en série et/ou parallèle donnent lieu à un module photovoltaïque qui a une caractéristique courant-tension non linéaire présentant un point de puissance maximale.

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

Techniques de caractérisation des dispositifs photovoltaïques

2.1. Introduction

L'efficacité d'un dispositif photovoltaïque est définie comme puissance maximale générée P_m divisé par le produit de l'irradiance d'entrée et sa superficie. Cette conversion l'efficacité dépend de nombreux facteurs, tels que l'irradiation et température. Les processus de fabrication habituellement causé des différences dans les paramètres électriques, même dans les cellules du même type. De plus, si les pertes dues à la cellule les connexions dans un module sont prises en compte, il est difficile de trouver deux modules photovoltaïques identiques. Par conséquent, seule la mesure expérimentale de l'I-V courbe nous permet de connaître avec précision les électriques paramètres d'un dispositif photovoltaïque. Cette mesure fournit des informations très pertinentes pour la conception, installation et maintenance de systèmes PV.

Compte tenu du un grand nombre de méthodes pour la mesure I-V, une enquête d'entre eux serait très bénéfique pour les chercheurs en PV systèmes. Nous avons compilé plus de 26 articles catégorisation. Le document se termine par une discussion sur les différentes méthodes basées sur leur flexibilité, fidélité et frais. Un tableau qui résume les principales caractéristiques des méthodes est également fourni.

2.2. Différentes techniques

Le principe de base pour relever la courbe I-V est basé sur le contrôle du courant fourni par le générateur PV entre le point de circuit-ouvert ($V=V_{oc}$, $I=0$) et le point de court-circuit ($V=0$, $I=I_{sc}$). Il existe différentes méthodes pour effectuer cette tâche.

2.2.1. Résistance variable

La méthode la plus simple et la plus connue dans la caractérisation des modules PV est l'utilisation d'une charge résistive pure R comme le montre la figure 2.1. La variation de cette résistance R se fait par étapes ; de zéro à l'infini (de 0 à ∞) avec un pas régulier ou irrégulier afin de parcourir toute la courbe I-V du court-circuit au circuit ouvert, en relevant la tension et le courant dans chaque étape. Cette méthode n'est applicable qu'aux GPV de faible puissance, à cause de l'indisponibilité des résistances pour une puissance plus élevée[1]. De plus, la variation de la résistance de charge se fait par étape et manuellement, ce qui rend le processus très lent de sorte que le rayonnement solaire et les conditions thermiques pourraient être modifiées pendant la mesure[2]. Dans chaque étape, la mesure de la tension et du courant se réalise à l'aide d'une paire de multimètre numérique.

Par ailleurs, sur le plan pratique, on utilise un ensemble de résistances comme charge. Un tableau de relais contrôlé par ordinateur, est utilisé pour sélectionner la combinaison de résistances pour obtenir une résistance bien spécifique[3][4]. Les résistances sont choisies de telle sorte que la diffusion de points soit autour du 'coude' de la courbe I-V. Deux canaux A/D de la carte d'ordinateur sont utilisés afin de mesurer chaque paire I-V. Avec cette approche, le fonctionnement manuel sur la résistance est évité et le temps d'acquisition est amélioré.

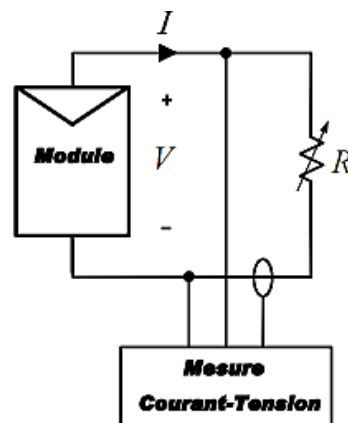
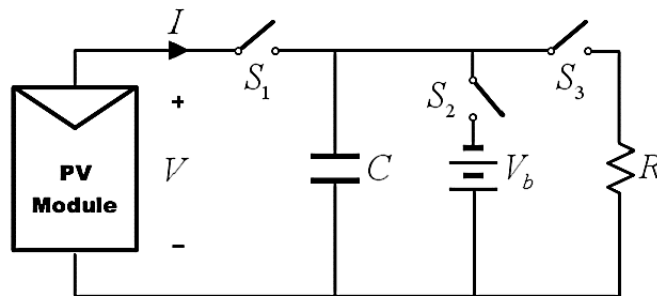


Figure 2.1. Caractérisation à l'aide d'une charge résistive**2.2.2. Charge capacitive.**

La deuxième technique de mesure de la caractéristique I-V d'un dispositif photovoltaïque (module ou GPV) se base sur l'utilisation d'une charge capacitive, i.e. la polarisation du dispositif par un grand condensateur, initialement déchargé. Le condensateur commence à se charger dès l'ouverture des deux switches S2 et S3, avec une tension croissante et un courant décroissant qui s'annulera en fin de charge correspondant ainsi la condition de circuit-ouvert ($V=V_{oc}$).

**Figure 2.2.** Caractérisation à l'aide d'une charge capacitive

Au lieu de commencer la deuxième charge avec le courant de court-circuit, nous pourrions commencer avec S2 fermé, de sorte que le condensateur serait initialement chargé à une tension négative et le balayage de la courbe I-V se ferait à partir du 2^{ème} quadrant afin d'obtenir le courant de court-circuit I_{sc} . Par ailleurs, pour effectuer une nouvelle mesure, le condensateur doit se décharger préalablement à travers la résistance R par le biais de la fermeture de l'interrupteur S3. Il est à noter que les trois interrupteurs doivent être activés avec une séquence appropriée

Le temps de charge du condensateur est directement proportionnel à la valeur de C et la tension de circuit-ouvert du module ou GPV à caractériser et inversement proportionnel au courant de court-circuit [5].

En se basant sur cette techniques, deux variantes ont été proposées sont rapportées dans la littérature [6].

• **Variante 1** : la tension et le courant sont mesurés à l'aide d'une carte d'acquisition pilotée par ordinateur. La mesure commence quand la carte envoie un signal de déclenchement à l'interrupteur qui connecte le condensateur au dispositif PV.

• **Variante 2** : Il s'agit d'une charge capacitive portable à base de transistors bipolaires à grilles isolées (IGBT) permettant la mesure la caractéristique I-V des champs PV en conditions réelles du site. Les interrupteurs de la figure 2.2 sont substitués par des IGBT et le condensateur est une association en parallèle des capacités et des résistances.

2.2.3. Charge électronique

La méthode de charge électronique (figure 2.3) utilise un transistor (habituellement un MOSFET) en tant que charge. En variant la tension grille-source, la résistance entre drain et la source est et par conséquent le de courant fourni par le module l'est aussi [7]. Lorsque le balayage de la courbe I-V est réalisé, le MOSFET doit fonctionner dans ses trois régimes de fonctionnement (coupure, linéaire ou triode et saturation). En conséquence, la plus grande partie de l'énergie fournie par le module devra être dissipée par cet appareil, qui limite son application à la puissance moyenne [8][9].

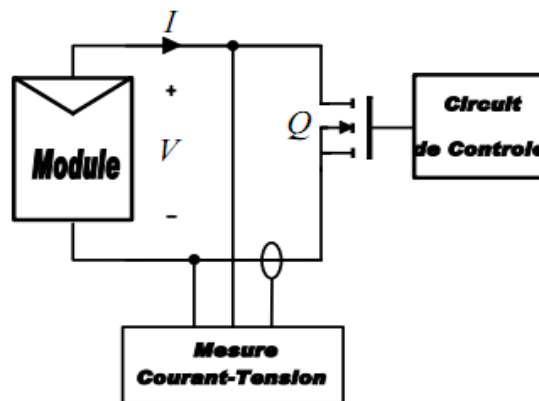


Figure 2.3. Caractérisation à l'aide d'une charge électronique.

2.2.4. Charge de quatre quadrants

Une charge de quatre quadrants est une alimentation capable de délivrer et de dissiper de l'énergie ; en d'autres termes, elle peut fonctionner comme source ou générateur de courant bidirectionnel et appliquer une tension positive ou négative, ce qui permet son utilisation comme charge réglable. En figure 2.4 est illustrée la courbe I-V qui peut générer une charge de quatre quadrants et en figure 2.5 est illustré le schéma

fonctionnel du circuit qu'on peut implémenter pour réaliser une charge de quatre quadrants.

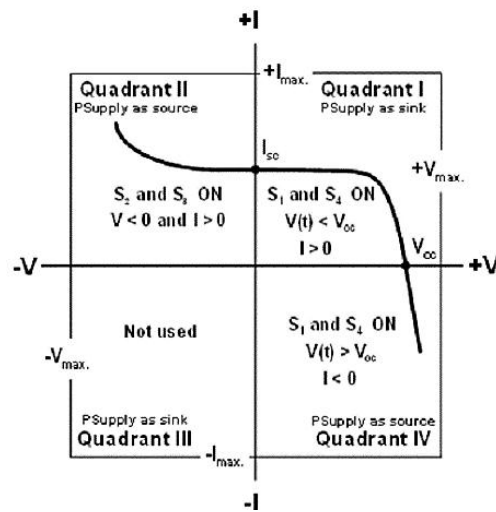


Figure 2.4. Courbe I-V dans les quadrants I, II et IV

Pour un module photovoltaïque, l'intérêt principal est d'obtenir la courbe I-V dans le premier quadrant. Mais, l'exploration des points situés dans le 2^{ème} et 4^{ème} quadrants pourraient servir comme outil de diagnostic important afin de détecter la désadaptation dans le fonctionnement du module PV tels que : l'ombrage, le mis match, le hot-spot,... etc. [10]

Le principe de fonctionnement d'une charge de quatre quadrants se base sur une alimentation où sa tension de sortie dépendant d'un signal de référence. Ce peut être modifié par une autre référence extérieure ou programmée, pour pouvoir réaliser un balayage de différentes valeurs [11].

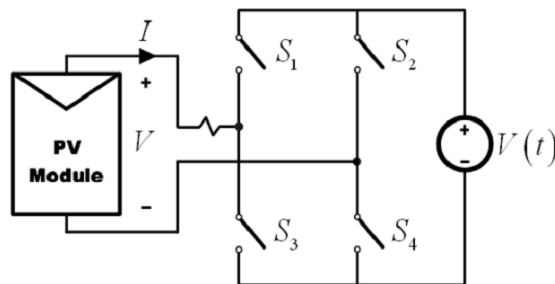


Figure 2.5. Schéma fonctionnel d'une charge de quatre quadrants

2.2.5. Charges à base de convertisseurs DC/DC

La capacité des convertisseurs DC-DC à émuler une résistance variable a été étudiée et analysé dans plusieurs applications. Cette propriété des convertisseurs DC-DC d'agir comme résistance a été appliquée pour obtenir des courbes I-V des modules photovoltaïques. Les trois configurations usuelles de convertisseurs DC/DC (buck, boost et buck-boost) sont similaires à un transformateur DC fonctionnant en mode continu (CCM : Continuous Conduction Mode) et en mode discontinu (DCM : discontinuous Conduction Mode). Dans un transformateur à courant continu, la relation de transformation peut être contrôlée par voie électronique en changeant le rapport cyclique de 0 à 1 [12][13]. La figure 2.6 montre le schéma servant comme caractériser pour les modules PV au moyen d'un convertisseur DC-DC [14]. qui émule une résistance R_i aux bornes du . Son principe réside dans l'émulation d'une résistance R_i aux bornes du dispositif PV à caractériser qui pourrait théoriquement varier de 0 (cas du court-circuit) à l'infini (cas du circuit-ouvert) [15][16].

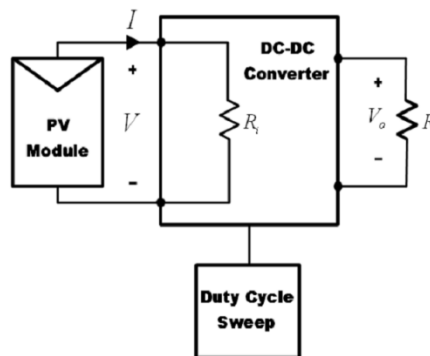
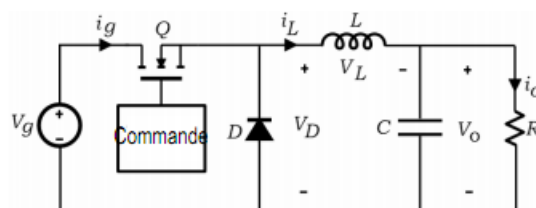


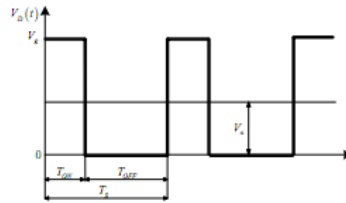
Figure 2.6. Schéma synoptique du caractériser à base d'un convertisseur DC-DC.

2.2.5.1. Convertisseur DC-DC abaisseur (Buck)

Comme son nom l'indique, le convertisseur DC-DC abaisseur fournit une tension moyenne de sortie inférieure à la tension d'entrée. La figure 2.7 montre le schéma électrique de ce convertisseur [17][18].



a) Schéma électrique d'un convertisseur buck



b) Tension à l'entrée du filtre

Figure 2.7. Convertisseur DC-DC buck

La charge est constituée par l'impédance Z . Les éléments L et C forment un filtre dont le but est de limiter l'ondulation résultante du découpage sur la tension et le courant de sortie. Si ces éléments sont correctement calculés, on peut supposer que i_s et v_s sont continus (on néglige l'ondulation résiduelle). L'ensemble (filtre+charge) peut être composé différemment, mais nous raisonnerons sur cet exemple par la suite.

- **Fonctionnement**

Le cycle de fonctionnement, de période de hachage T_s ($T_s = 1/f_s$), comporte deux étapes. Lors de la première, on rend le transistor passant, la diode se bloque car elle sera polarisée en inverse. Cette phase dure de 0 à αT_s , avec α compris entre 0 et 1 . α est appelé rapport cyclique. Lors de la seconde, on bloque le transistor. La diode devient passante. Cette phase dure de αT_s à T_s .

- **Modélisation mathématique**

Nous allons être amenés à distinguer deux cas : la conduction continue et la conduction discontinue.

- Dans le premier, le courant de sortie est suffisamment fort et le courant dans l'inductance ne s'annule jamais, même avec l'ondulation due au découpage.
- Dans le second, le courant de sortie moyen est bien entendu positif, mais, en raison de sa faible valeur moyenne, l'ondulation du courant dans l'inductance peut amener ce dernier à s'annuler. Or, les interrupteurs étant unidirectionnels, le courant ne peut changer de signe et reste à 0 .

Les modélisations données par la suite supposent que le fonctionnement est dans le cas de la conduction continue.

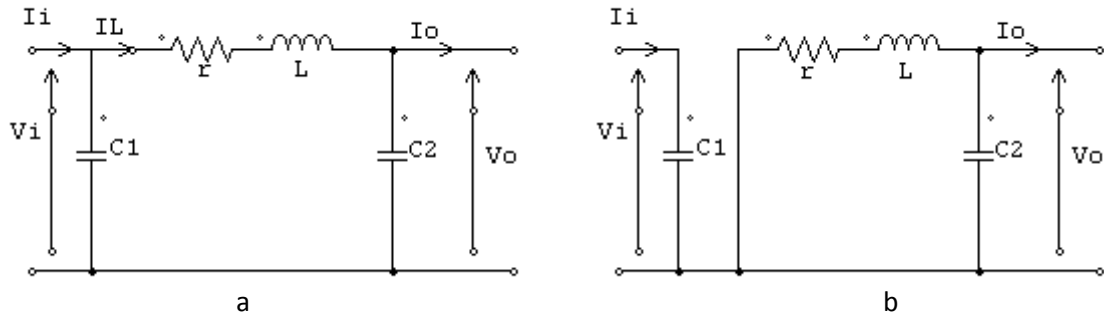


Figure 2.8 : Circuits équivalents du buck, S fermé en (a), S ouvert en (b)

En appliquant les lois des courants et des tensions de Kirchhoff sur les deux circuits de la figure 2.8, on obtient les systèmes d'équations suivants :

$$\begin{cases} i_{C1} = C_1 \frac{dvi}{dt} = i_i - i_L \\ i_{C2} = C_2 \frac{dv_o}{dt} = i_L - i_o \\ v_L = L \frac{di_L}{dt} + r.i_L = v_i - v_o \end{cases} \quad 0 < t < \alpha Ts \quad (2.1)$$

Pour : $\alpha Ts < t < Ts$

$$\begin{cases} i_{C1} = C_1 \frac{dvi}{dt} = i_i \\ i_{C2} = C_2 \frac{dv_o}{dt} = i_L - i_o \\ v_L = L \frac{di_L}{dt} + r.i_L = -v_o \end{cases} \quad (2.2)$$

Pour trouver une représentation dynamique valable pour toute la période Ts , on utilise généralement l'expression suivante :

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle Ts = \frac{dx}{dt}_{(\alpha Ts)} . \alpha Ts + \frac{dx}{dt}_{((1-\alpha)Ts)} . (1-\alpha)Ts \quad (2.3)$$

En appliquant la relation (2.3) sur les systèmes d'équations (2.1) et (2.2), et après arrangement, on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière:

Pour : $0 < t < Ts$

$$\begin{cases} i_o = i_L - C_2 \frac{dv_o}{dt} \\ i_L = \frac{1}{\alpha} (i_i - C_1 \frac{dv_i}{dt}) \\ v_i = \frac{1}{\alpha} (v_o + r.i_L + L \frac{di_L}{dt}) \end{cases} \quad (2.4)$$

2.2.5.2. Convertisseur DC-DC élévateur (boost)

C'est un convertisseur direct DC-DC, la tension moyenne de sortie est supérieure à la tension d'entrée, comme son nom l'indique. Cette structure demande un interrupteur à amorçage et blocage commandé (Bipolaire, MOS, IGBT...) et une diode (amorçage et blocage spontanés).

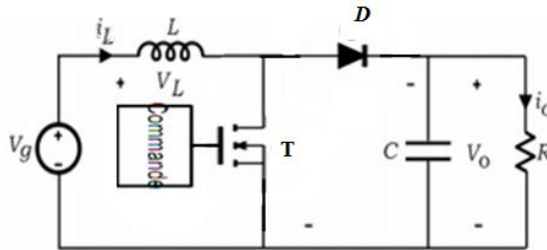


Figure 2.9. Convertisseur DC-DC boost .

L'inductance permet de lisser le courant appliqué par la source. La capacité C permet de limiter l'ondulation de la tension en sortie.

- **Fonctionnement.**

Lors de la première partie du cycle de fonctionnement, de 0 à $\alpha.T_s$, l'interrupteur commandé est fermé (passant). Cette fois, la source et la charge ne sont pas en contact durant cette phase. La diode est alors bloquée.

Lors de la seconde partie du cycle, de $\alpha.T_s$ à T_s , on ouvre l'interrupteur commandé et la diode devient passante. C'est alors que la source et la charge sont reliées.

- **Modélisation mathématique**

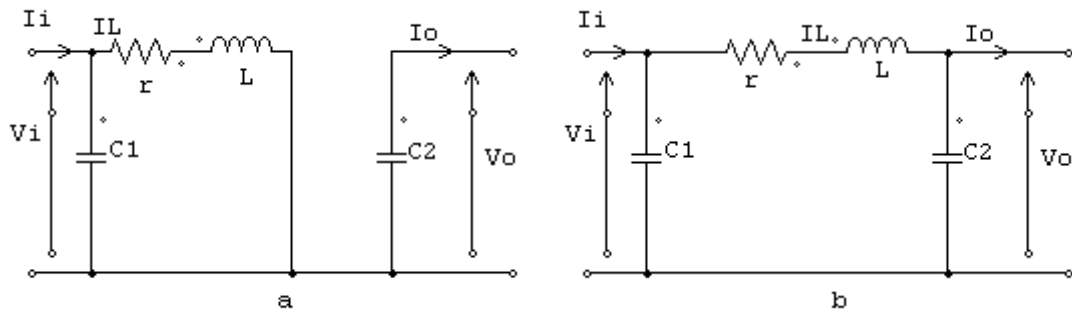


Figure 2.10: Circuits équivalents du boost, S fermé (a), S ouvert (b)

Comme pour le circuit buck, l'application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents (voir figure 2.10) des deux phases de fonctionnement nous donne:

Pour $0 < t < \alpha T_s$:

$$\begin{cases} i_{C1} = C_1 \frac{dvi}{dt} = i_i - i_L \\ i_{C2} = C_2 \frac{dv_o}{dt} = -i_o \\ v_L = L \frac{di_L}{dt} = v_i - r.i_L \end{cases} \quad (2.5)$$

Pour $\alpha T_s < t < T_s$:

$$\begin{cases} i_{C1} = C_1 \frac{dvi}{dt} = i_i - i_L \\ i_{C2} = C_2 \frac{dv_o}{dt} = i_L - i_o \\ v_L = L \frac{di_L}{dt} = v_i - v_o - r.i_L \end{cases} \quad (2.6)$$

En appliquant la relation (2.3) sur les systèmes d'équations (2.5) et (2.6), comme pour le buck, on trouve le modèle en valeur moyenne du boost:

$$\begin{cases} i_L = i_i - C_1 \frac{dv_i}{dt} \\ i_o = (1-\alpha)i_L - C_2 \frac{dv_o}{dt} \\ v_i = (1-\alpha)v_o + r.i_L + L \frac{di_L}{dt} \end{cases} \quad (2.7)$$

2.2.5.3. Convertisseur DC-DC abaisseur-élevateur (buck-boost).

Le convertisseur buck-boost combine les propriétés des deux convertisseurs précédents, il est utilisé comme un transformateur idéal de n'importe quelle tension d'entrée pour n'importe quelle tension de sortie désirée .

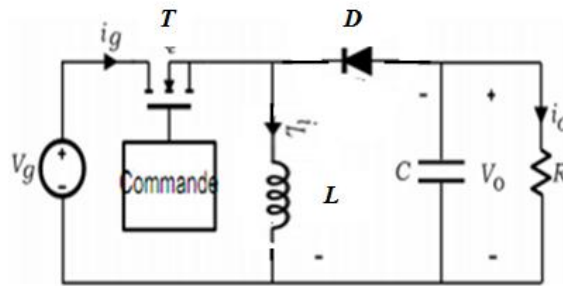


Figure 2.11. Convertisseur DC-DC buck-boost .

- **Fonctionnement**

Lors de la première partie du cycle de fonctionnement, de 0 à $\alpha.T_s$, l'interrupteur commandé est fermé (passant) .La diode est ouverte et l'inductance stocke l'énergie fournie par le générateur d'entrée.

Lors de la seconde partie du cycle, de $\alpha.T_s$ à T_s , on ouvre l'interrupteur commandé et la diode devient passante. L'inductance restitue son énergie à la charge.

Il faut noter que le sens de la tension de sortie est inversé par rapport à la tension d'entrée (contrairement aux deux convertisseurs précédents).

a- Modélisation mathématique

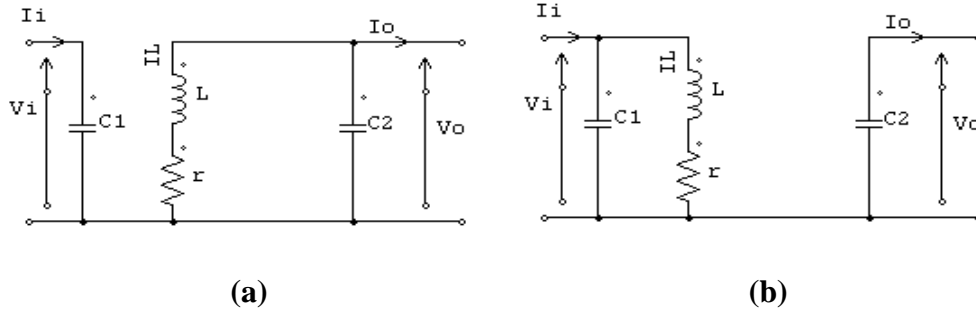


Figure 2.12: Circuits équivalents du buck-boost, S fermé (a), S ouvert (b)

La figure 2.12 montre les deux schémas équivalents du buck-boost pour les deux cycles de fonctionnement.

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents précédents, on obtient :

Pour $0 < t < \alpha T_s$:

$$\begin{cases} i_{C1} = C_1 \frac{dvi}{dt} = i_i - i_L \\ i_{C2} = C_2 \frac{dv_o}{dt} = -i_o \\ v_L = L \frac{di_L}{dt} = v_i - r.i_L \end{cases} \quad (2.8)$$

Pour $\alpha T_s < t < T_s$:

$$\begin{cases} i_{C1} = C_1 \frac{dvi}{dt} = i_i \\ i_{C2} = C_2 \frac{dv_o}{dt} = -i_o - i_L \\ v_L = L \frac{di_L}{dt} = v_o - r.i_L \end{cases} \quad (2.9)$$

En appliquant la relation (2.3) sur les systèmes d'équations (2.8) et (2.9), on trouve le modèle en valeur moyenne du buck-boost :

$$\begin{cases} i_L = \frac{1}{\alpha} \left[ii - C1 \frac{dvi}{dt} \right] \\ i_o = -(1-\alpha)i_L - C2 \frac{dv_o}{dt} \\ v_i = \frac{1}{\alpha} \left[-(1-\alpha)v_o + r.i_L + L \frac{di_L}{dt} \right] \end{cases} \quad (2.10)$$

2.3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur l'aspect théorique des méthodes les plus utilisées dans la caractérisation des modules PV, à savoir : méthode de la résistance variable, méthodes de la charge capacitive, méthode de la charge de la charge de quatre quadrants et méthode utilisant les convertisseurs statiques (hacheur buck , boost et buck-boost).

Etude de simulation des différentes techniques de caractérisation

3.1. Introduction

Comme on a vu dans le chapitre précédent, les caractéristiques d'un module photovoltaïque montrent bien que la puissance maximale générée dépend fortement de l'intensité du rayonnement solaire ainsi que de la température.

La caractéristique courant-tension en polarisation directe (ou courbe I-V en éclairage) est l'élément clé de l'analyse des performances d'un dispositif photovoltaïque (cellule solaire, module ou champ de modules) par le fait celle-ci comprend tous les paramètres électriques inhérents au fonctionnement de tel dispositif PV (I_{sc} , V_{oc} , I_{mp} , V_{mp} , P_{mp} , FF et Rendement). En théorie, la mesure de caractéristique I-V pourra se faire par le biais d'une résistance variable allant de 0 à ∞ permettant ainsi le balayage de cette courbe I-V du point de court-circuit (0, I_{sc}) au point de circuit-ouvert (V_{oc} , 0). En effet, sur le plan pratique, la caractérisation pourra se faire moyennant quatre types de charges : une résistance variable, une charge capacitive, une charge électronique, qui est un simple interrupteur statique (BJT, MOSFET, ...) ou carrément un convertisseur DC/DC.

Le présent chapitre se veut une étude comparative entre quatre techniques usuelles de caractérisation des modules photovoltaïques. L'étude de simulation est réalisée grâce au logiciel de simulation dynamique Matlab/Simulink.

En effet, dans ce chapitre nous présenterons un modèle Simulink d'un module PV qui servira par la suite comme le dispositif PV à caractériser. Ensuite, nous présenterons

l'implémentation de chaque technique séparément et enfin, une étude comparative entre ces quatre techniques sera présentée.

3.2. Modélisation et simulation du module photovoltaïque

Pour simuler le dispositif de conversion PV à caractériser dans le cadre de cette étude, le modèle mathématique de la cellule solaire adopté est celui d'une seule exponentielle ou simple diode (eq. 1.1) dont le circuit électrique équivalent est donné en figure 3.1

$$I = I_{ph} - I_o \left(\exp \left(\frac{V + I R_s}{m \frac{kT}{q}} \right) - 1 \right) - \frac{V + I R_s}{R_p} \quad (3.1)$$

Où

I_{ph} est le courant photo-généré ou phot-courant, I_o est le courant de saturation de la diode ; m est le facteur d'idéalité de la diode ; R_s et R_p sont respectivement la résistance série et la résistance parallèle, T est la température absolue en Kelvin. L'équation contient également la charge élémentaire constante q ($1,602 \cdot 10^{-19} \cdot C$) et la constante de Boltzmann k ($1,380 \cdot 10^{-23} J/K$).

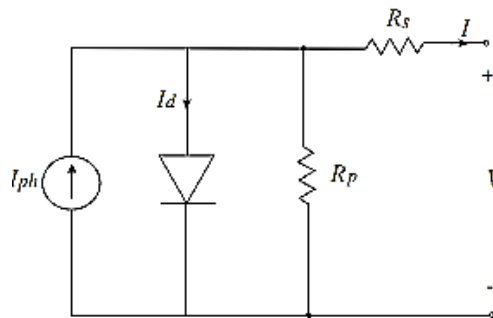


Figure 3.1. Circuit électrique équivalent du modèle simple-diode

Comme il s'agit d'un module photovoltaïque, et comme un module PV commercial, n'est généralement qu'une association de N_s cellules en série, donc l'équation I-V d'un module PV sera comme suit :

$$I_M = I_{ph} - I_o \left(\exp \left(\frac{\frac{V_M}{N_s} + I_M R_s}{m \frac{kT}{q}} \right) - 1 \right) - \frac{\frac{V_M}{N_s} + I_M R_s}{R_p} \quad (3.2)$$

Où :

V_M et I_M sont respectivement la tension et le courant du module PV ($V_M = N_s V$ et $I_M = I$)

Sous forme de schéma bloc (figure 3.2), le modèle doit posséder comme entrées les paramètres climatiques (éclairage et température cellule) et en sorties la borne positive et la borne négative.

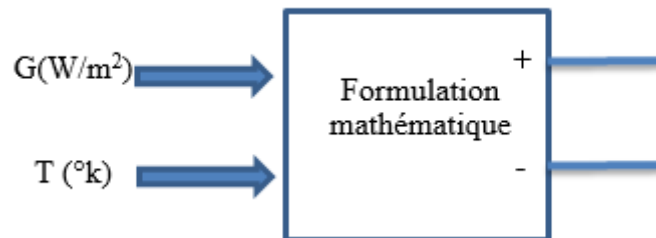


Figure 3.2. Schéma synoptique du modèle du module PV

Pour pouvoir implémenter ce modèle dans l'environnement Matlab-Simulink, nous avons exploité toutes possibilités qu'offre le logiciel dans sa librairie, à savoir : Simulink, Powersim, etc. Le schéma bloc du modèle en Matlab-Simulink est donné en figure 3.3

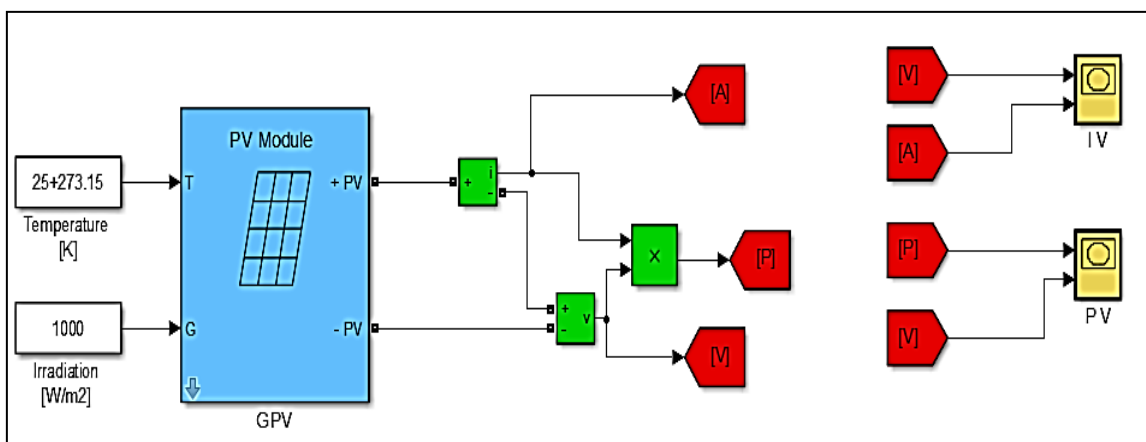


Figure 3.3. Schéma Bloc du module PV dans l'environnement Matlab-Simulink

Le module PV faisant l'objet de cette étude possède les caractéristiques électriques suivantes :

Eclairement standard, G	1000W/m²
Température standard, T	25°C
Courant de court-circuit I_{sc}	6.54 A
Tension à circuit ouvert Voc	21.6 V
Nombre des cellules en séries, N_s	36
Coefficient de température de I_{sc}	2.3 mA/°C
Coefficient de température de Voc	-74 mV/°C
Facteur de qualité(-)	1.3
résistance en série R_s (ohm)	0.1Ω
résistance en parallèle R_p (ohm)	110

Tableau 3.1. Caractéristiques électriques aux STC du module photovoltaïque étudié

Les résultats de simulation du module photovoltaïque sont représenté en figures 3.4 et 3.5. Ces figures représentent les caractéristiques courant-tension et puissance-tension pour différents températures et éclairements.

La figure 3.4 montre que la tension de circuit-ouvert du module photovoltaïque diminue avec l'augmentation de la température. Le courant de court-circuit, par contre, augmente légèrement avec la température du module PV.

Ces figures montrent clairement la baisse du rendement causée par l'augmentation de la température cellule. On peut remarquer également sur la figure 3.4 que l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible.

La figure 3.5 montre l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension. A une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement, car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique.

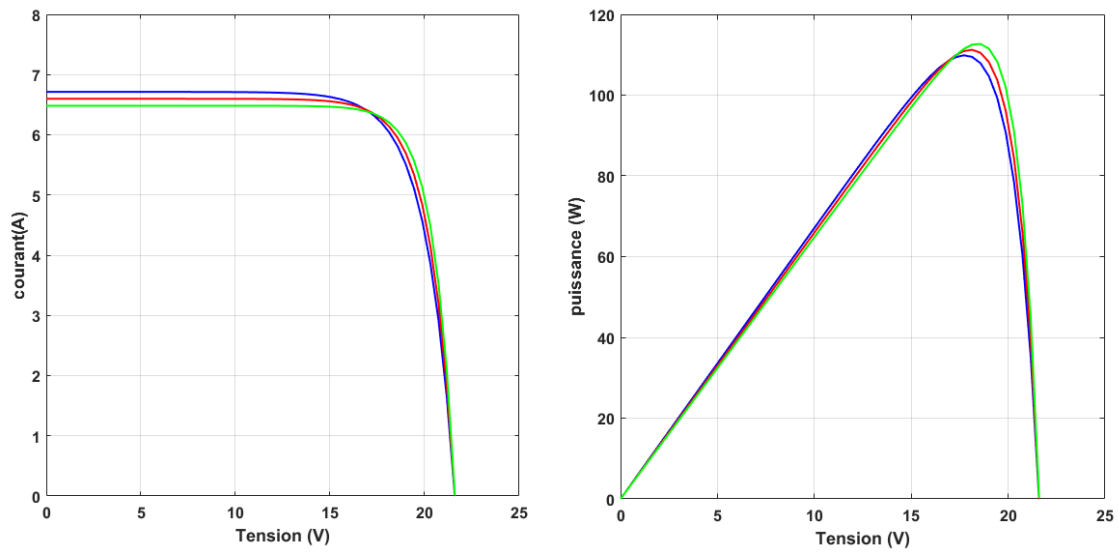


Figure 3.4. Caractéristiques I-V et P-V pour différentes températures et un éclairement $G=1000W/m^2$

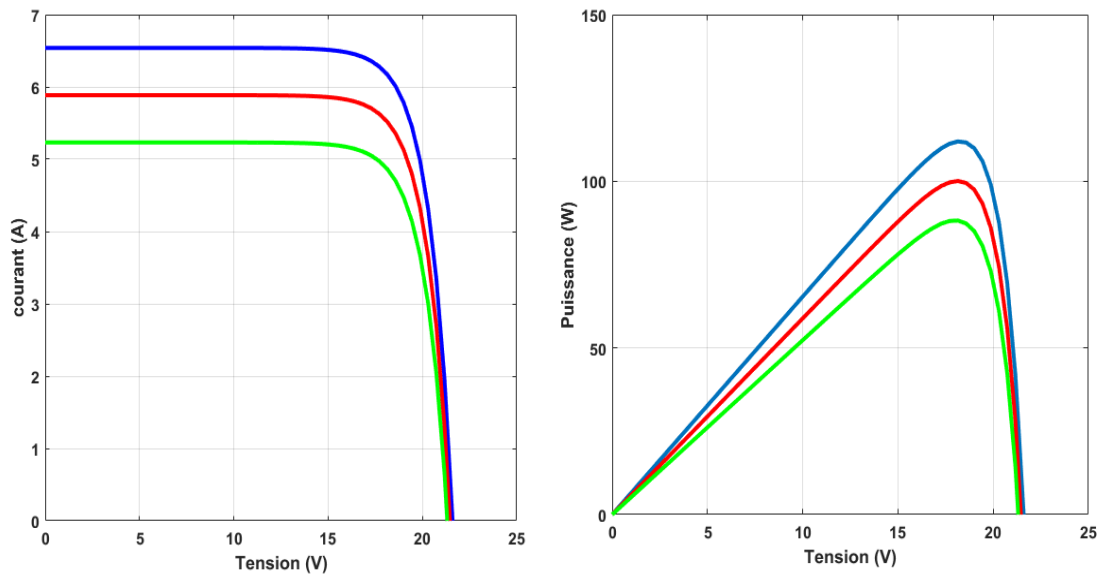


Figure 3.5. Caractéristiques I-V et P-V pour différents éclairement et une température $T=25^{\circ}C$.

3.3. Etude et simulation des différentes techniques de caractérisation des modules PV

3.3.1. Caractérisation par résistance variable

Dans l'aspect théorique, la technique de caractérisation par résistance variant de 0 à l'infini pour parcourir la courbe I-V ou P-V du point de court-circuit ($V=0$, $I=I_{sc}$) au

point de circuit-ouvert ($V=V_{oc}$, $I=0$) paraît la plus simple, or sur le plan pratique la variation d'une résistance de 0 à l'infini demeure difficile à réaliser. Pour pallier à ce problème, on a recours aux résistances normalisées qui doivent être connectées au module PV par le biais d'interrupteurs. Il est à noter que la connexion et la déconnexion d'une résistance correspond à un point de mesure (V , I) et le nombre total de points de mesure correspond au nombre de résistances utilisées. Dans ce sens, deux configurations peuvent être envisagées dans ce type de caractérisation (figure 3.6.a et figure 3.6.b)

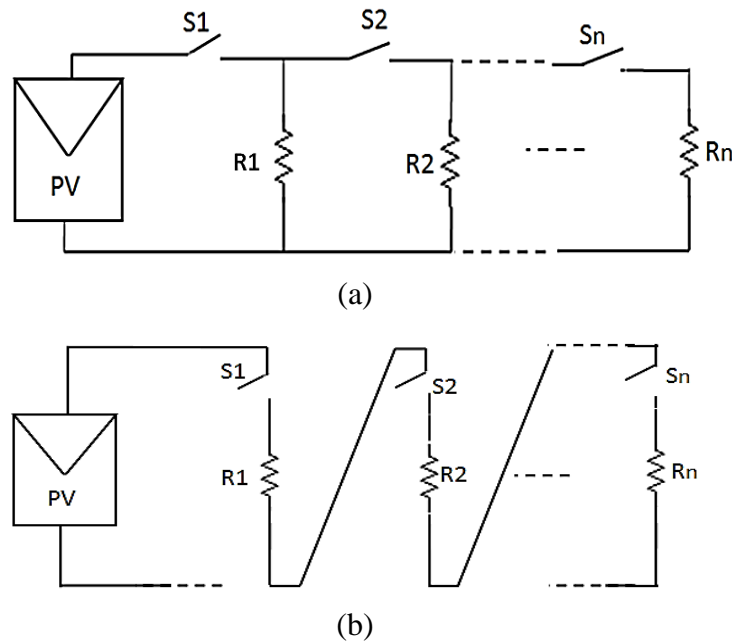


Figure 3.6. Schéma de principe de la caractérisation par résistance variable.

Pour pouvoir relever la caractéristique I-V du module photovoltaïque décrit précédemment, nous avons implémenté cette technique de caractérisation dans l'environnement Matlab-Simulink (figure 3.7). Nous avons opté pour la configuration de 11 résistances (de 15 ohms chacune) associées en parallèle par le biais de 11 interrupteurs (S1, S2, ..., S11). Chaque interrupteur est commandé en fermeture et en ouverture pendant une durée de :

$$D_i = (i - 1) \Delta T ; \text{ (en secondes)} \quad (3.3)$$

Où $i \geq 2$ est le numéro de l'interrupteur et $T=1s$, quant à l'interrupteur S1, il est toujours fermé grâce à niveau logique 1.

Il est à noter que dans cette approche, la résistance varie par palier, d'une valeur maximale de $R1=15\text{Ohms}$ jusqu'à une valeur minimale équivalente à 11 résistances en

parallèle ($R1//R2//...//R11$).

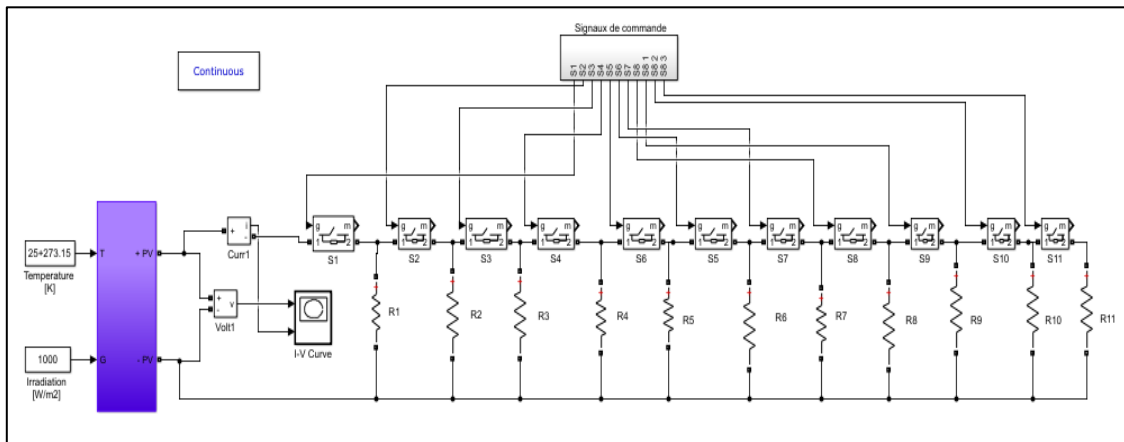


Figure 3.7. Schéma bloc de la caractérisation par résistance variable.

Les résultats de simulation obtenus sont illustrés en figure 3.8. Nous avons relevé les caractéristiques I-V et P-V du module PV en question à trois niveaux d'éclairement. Les remarques qu'on peut tirer de cette méthode de caractérisation peuvent se résumer dans les points suivants :

- Le nombre de points de mesure (V , I) est égal au nombre de résistances connectés au module PV à caractériser.
- Le balayage de la caractéristique I-V n'est pas complet. Il se fait à partir d'un point proche du circuit-ouvert ($V=21.31V$; $I=1.42A$), qui est obtenu pour une valeur de la résistance de charge $R1=150\Omega$, néanmoins, le court-circuit n'est pas atteint, par le fait que la résistance minimale appliquée au module PV est équivalente à $R=R1//R2//...//R11=1.36\Omega$ ne réalise pas le court-circuit et le point obtenu correspond à $V=11.53V$ et $I=6.54A$, i.e. le nombre de résistances connectées est insuffisant.
- L'extraction des trois points caractérisant un module PV, à savoir : $(0, I_{sc})$; (V_{mp}, I_{mp}) et $(V_{oc}, 0)$ ne peut se faire qu'après un ajustement 'fitting' d'une courbe des données mesurées obtenues.

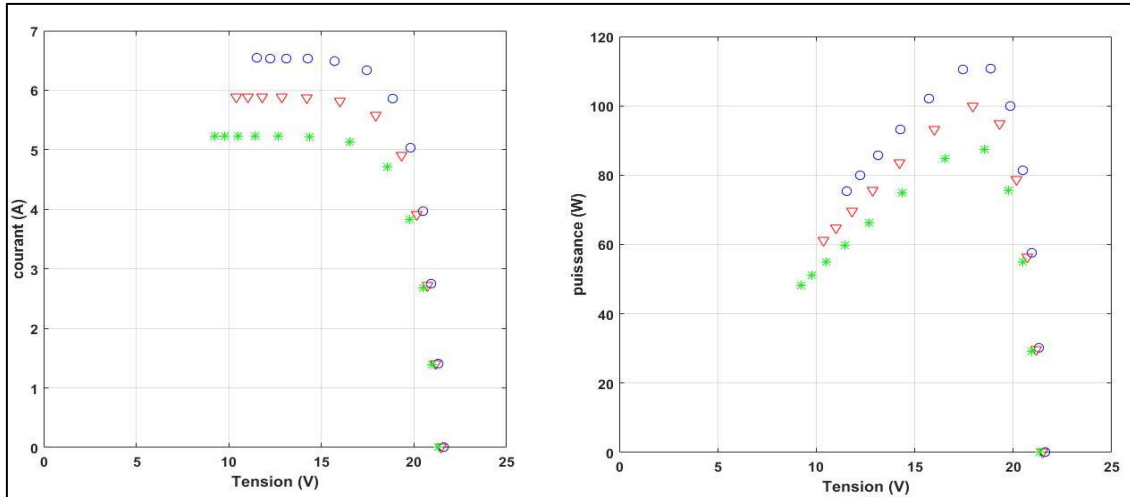


Figure 3.8.Caractéristiques I(V) et P(V) obtenues à partir de la technique de résistance variable à $T=25^{\circ}\text{C}$ et aux éclairements : $G1=1000\text{W/m}^2, G2=900\text{W/m}^2, G3=800\text{W/m}^2$

Les paramètres électriques (I_{sc} , V_{oc} , I_{mp} , V_{mp} , P_{mp}) obtenus à partir de la caractérisation par résistance variable sont regroupés dans le tableau suivant :

Paramètres	Valeurs sous (1000W/m^2 , 25°C)	Valeurs sous (900W/m^2 , 25°C)	Valeurs sous (800W/m^2 , 25°C)
Puissance maximale P_{mp} (W)	110.6	99.99	87.43
Tension nominale V_{mp} (V)	18.87	17.94	18.55
Courant nominale I_{mp} (A)	5.86	5.57	4.71
Tension à circuit ouvert V_{oc} (V)	21.31	21.47	21.33
Courant de court-circuit I_{sc} (A)	6.54	5.88	5.23

Tableau 3.2. Paramètres électriques obtenus à partir de la caractérisation par résistance variable.

3.3.2. Caractérisation par charge capacitive

La deuxième technique de mesure de la caractéristique I-V d'un dispositif photovoltaïque se base sur l'utilisation d'une charge capacitive. En effet, nous avons opté pour le montage simple de la figure 3.9. Son principe de fonctionnement se base sur la polarisation du dispositif PV par un grand condensateur, initialement déchargé. Le condensateur commence à se charger dès la fermeture de l'interrupteur S1, et l'ouverture du S2, avec une tension croissante et un courant décroissant qui s'annulera en fin de charge correspondant ainsi la condition de circuit-ouvert ($V=V_{oc}$).

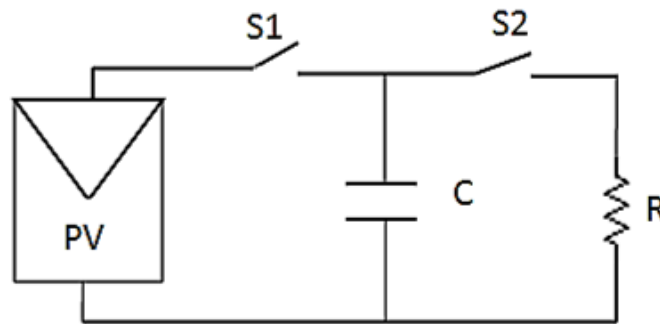


Figure 3. 9. Schéma de principe de la caractérisation par charge capacitive.

Par ailleurs, pour effectuer une nouvelle mesure, le condensateur doit se décharger préalablement à travers la résistance R par le biais de la fermeture de l'interrupteur S2 au lieu de commencer à partir du courant de court-circuit, et sa charge se fera de nouveau par le biais de l'interrupteur S1. Il est à noter que les deux interrupteurs doivent être activés avec une séquence appropriée.

Le temps de charge du condensateur est directement proportionnel à la valeur de C et la tension de circuit-ouvert du module ou GPV à caractériser et inversement proportionnel au courant de court-circuit.

Pour pouvoir relever la caractéristique I-V du module photovoltaïque décrit précédemment, nous avons implémenté cette technique de caractérisation dans l'environnement Matlab-Simulink (figure 3.10). Nous avons opté pour une capacité $C=0.05F$ et une résistance $R=20\text{ ohm}$ et en utilisant deux interrupteurs dont chacun est commandé en fermeture et en ouverture pour la charge et la décharge pendant une période de 1 seconde.

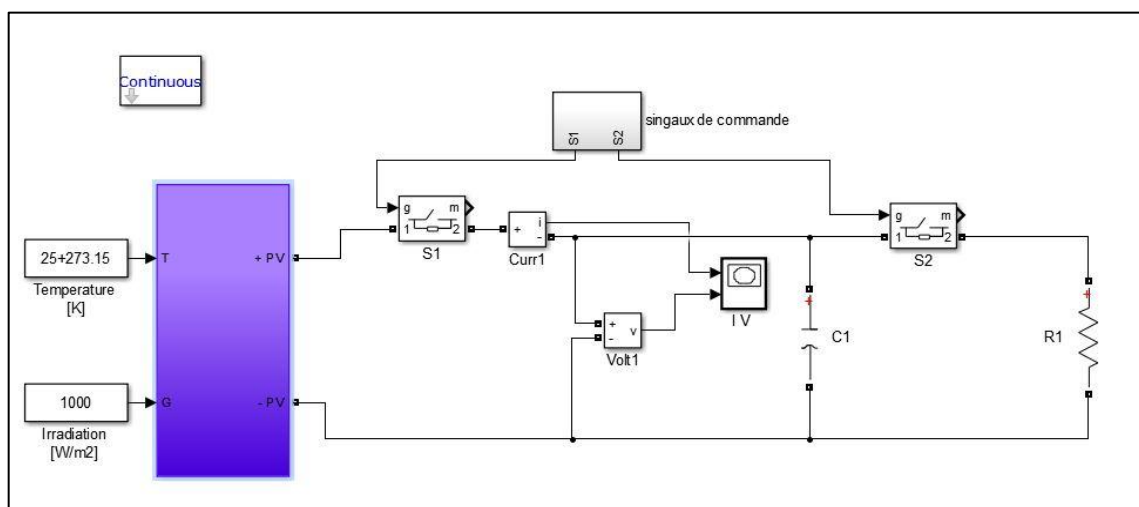


Figure3.10.Schéma bloc de la caractérisation par charge capacitive.

Les résultats de simulation obtenus sont illustrés en figure 3.11 Nous avons relevé les caractéristiques I-V et P-V du module PV en question à trois niveaux d'éclairement. Les remarques qu'on peut tirer de cette méthode de caractérisation peuvent se résumer dans les points suivants :

- Le nombre de points de mesure (V, I) est important
- Le balayage de la caractéristique I-V est complet. Il se fait à partir du point de circuit-ouvert ($V=21.6V$; $I=0$) au point de court-circuit ($V=0V$; $I=6.54A$),

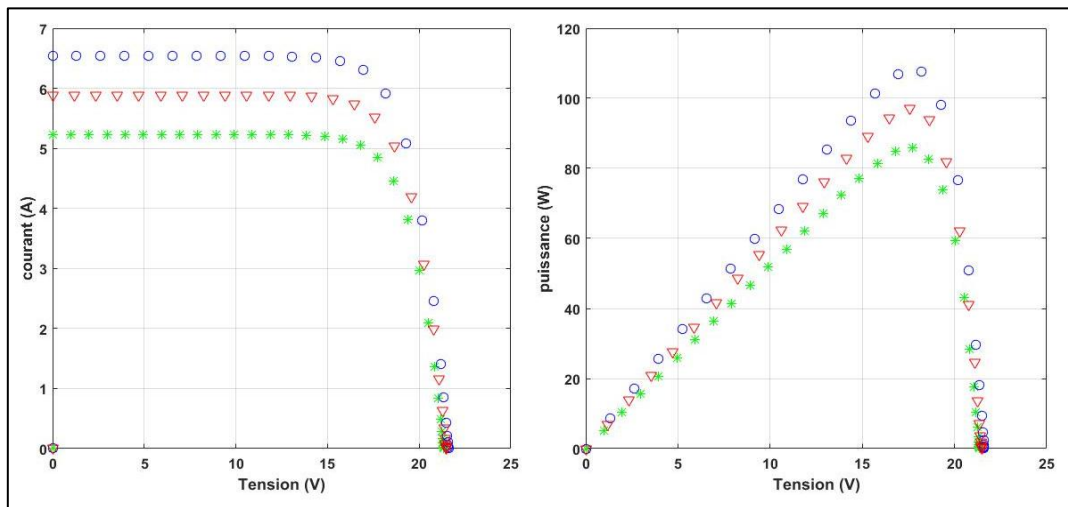


Figure 3.11. Caractéristiques I(V) et P(V) obtenues à partir de la technique de résistance variable à $T=25^{\circ}C$ et aux éclairements : $G1=1000W/m^2$, $G2=900W/m^2$, $G3=800W/m^2$

Les paramètres électriques (I_{sc} , V_{oc} , I_{mp} , V_{mp} , P_{mp}) obtenus à partir de la caractérisation par charge capacitive sont regroupés dans le tableau suivant :

Paramètres	Valeurs sous ($1000W/m^2$, $25^{\circ}C$)	Valeurs sous ($900W/m^2$, $25^{\circ}C$)	Valeurs sous ($800W/m^2$, $25^{\circ}C$)
Puissance maximale P_{mp} (W)	107.6	97.03	84.81
Tension nominale V_{mp} (V)	18.18	17.58	17.72
Courant nominale I_{mp} (A)	5.91	5.52	4.84
Tension à circuit ouvert V_{oc} (V)	21.6	21.47	21.33
Courant de court-circuit I_{sc} (A)	6.54	5.88	5.23

Tableau 3.3. Paramètres électriques obtenus à partir de la caractérisation par charge capacitive

3.3.3. Caractérisation par convertisseurs DC/DC

Contrairement aux deux premiers procédés de caractérisation qui utilisent des éléments passifs, soit une résistance variable ou un condensateur pour parcourir toute la courbe I-V d'un dispositif PV, la caractérisation par convertisseurs DC/DC veut dire l'utilisation d'une charge non linéaire de telle sorte l'impédance vue par le dispositif à caractériser Z_i doit varier de 0 (cas du court-circuit) à l'infini (cas du circuit-ouvert) en ajustant le rapport le rapport cyclique.

Dans cette étude, on se limitera aux trois convertisseurs DC/DC : - Convertisseur série ou abaisseur (buck converter), - Convertisseur parallèle ou élévateur (boost converter), - Convertisseur parallèle ou élévateur (buck-boost converter).

Pour ces trois types de convertisseurs, on doit déterminer Z_i pour deux modes de fonctionnement :

- 1) Mode de conduction continu (CCM : Continuous Conduction Mode) : En ce mode le courant parcourant l'inductance L ne s'annule jamais,
- 2) Mode de conduction discontinu (DCM : Discontinuous Conduction Mode) : En ce mode le courant parcourant l'inductance L s'annule dans l'intervalle de non conduction.

a) Caractérisation par convertisseur abaisseur (Buck converter)

Son nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie est inférieure à celle de l'entrée. Il comporte un interrupteur à amorçage et à blocage commandés (transistor bipolaire, transistor MOS ou IGBT...) et un interrupteur à blocage et amorçage naturels (diode). La figure3.12 présente le schéma de principe du convertisseur buck.

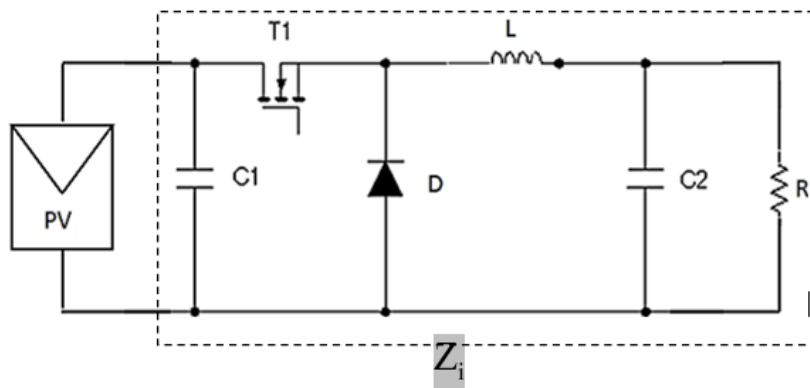


Figure3.12. Schéma de principe du convertisseur Buck

Le tableau ci-dessous regroupe le rapport entre les grandeurs électriques (courant et tension) de sortie et d'entrée ainsi que l'impédance d'entrée du convertisseur Z_i en fonction de la résistance de charge R et du rapport cyclique α .

MODE	V_o	I_o	Z_i
CCM	$\propto V_G$	$\frac{I_G}{\alpha}$	$\frac{R}{\alpha^2}$
DCM	$\frac{2 V_G}{\left(1 + \sqrt{1 + \frac{8 L}{R \alpha^2 T}}\right)}$	$\frac{I_G}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{8 L}{R \alpha^2 T}}\right)$	$\frac{R}{4} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4(1-\alpha)}{\alpha^2}}\right)^2$

Tableau 3.4. Expressions de la tension, le courant de sortie et l'impédance d'entrée dans les deux modes fonctionnement continu (CCM) et discontinu (DCM)

Pour que le convertisseur fonctionne en mode continu, il faut que la valeur de l'inductance L du filtre soit supérieure à $\frac{RT}{2} (1 - \alpha)$, où T est la période de commutation de l'interrupteur. D'autre part, on remarque que si $\alpha \in [0 \ 1]$, l'impédance $Z_i \in [R \infty]$. Cela veut pour qu'on puisse relever la caractéristique I-V du module photovoltaïque décrit précédemment, on doit bien choisir la valeur de la résistance de charge R , qui doit être la plus petite possible, et ce pour s'approcher du point de court-circuit ($I_{sc}, 0$).

Pour valider cette approche, nous avons implémenté cette technique de caractérisation dans l'environnement Matlab-Simulink (figure 3.13). Nous avons opté pour une capacité $C=1\mu F$, une inductance $L=10mH$ une résistance de charge $R=0.5$ ohms et une fréquence de commutation de $f=10Hz$.

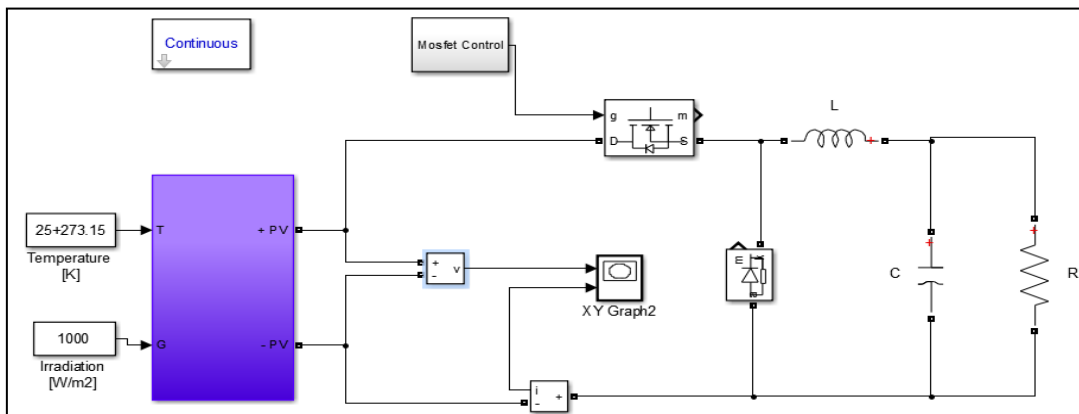


Figure 3.13. Schéma bloc de la caractérisation par convertisseur buck.

La commande du convertisseur est assurée par un circuit de commande conçu de telle sorte que le signal de commande généré soit avec un rapport cyclique variable (figure 3.14)

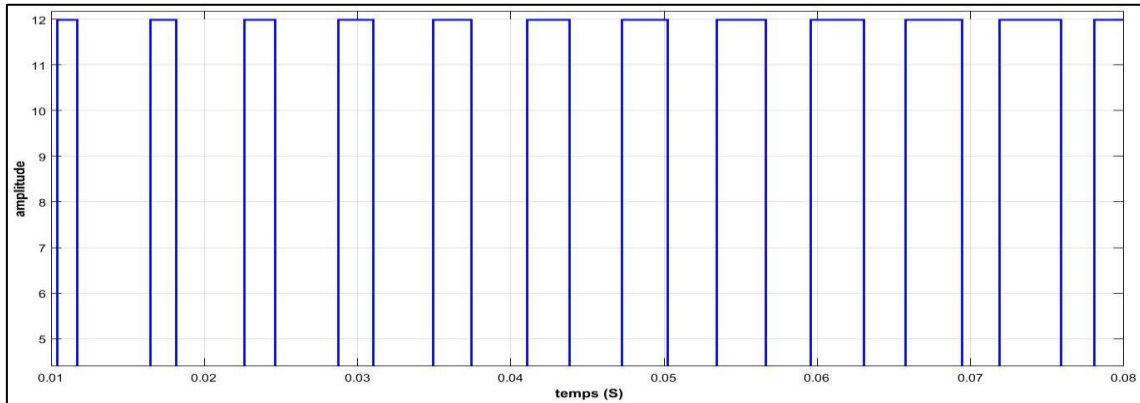


Figure 3.14. Signal commande de rapport cyclique croissant

Les résultats de simulation obtenus sont représentés par la figure.3.15 et le tableau 3.4 et concernent trois caractéristiques I-V et P-V à trois niveaux d'éclairement : $G_1=1000\text{W/m}^2$, $G_2=900\text{W/m}^2$ et $G_3=800\text{W/m}^2$. Les remarques qu'on peut tirer de telle méthode de caractérisation peuvent se résumer dans les points suivants :

- Le nombre de points de mesure (V, I) est fini,
- Le balayage de la caractéristique I-V n'est pas complet. Il commence à partir du point de circuit-ouvert ($V=21.6\text{V}$; $I=0\text{A}$), et s'arrête à un point proche du court-circuit ($V=2.65\text{V}$; $I=6.54\text{A}$).

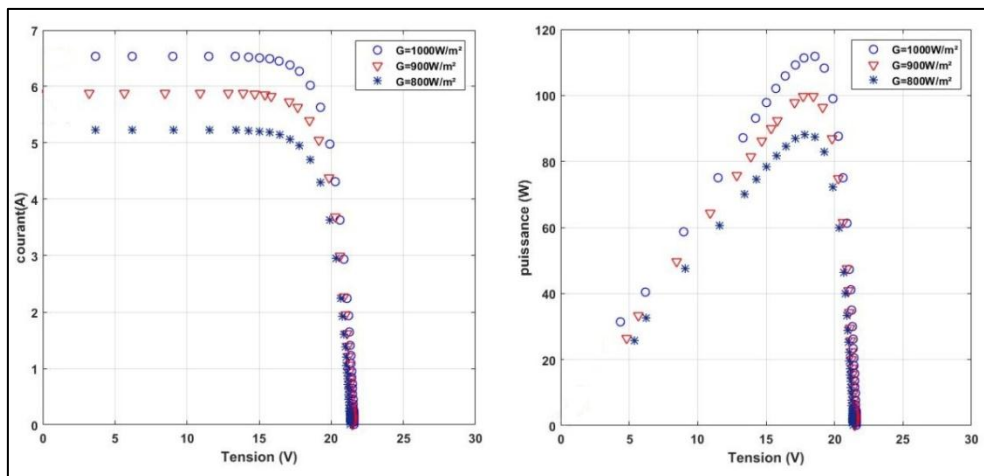


Figure 3.15. Caractéristique I(V) et P(V) relevées à $T=25^\circ\text{C}$
et $G_1=1000\text{W/m}^2$, $G_2=900\text{W/m}^2$, $G_3=800\text{W/m}^2$

Paramètres	Valeurs sous (1000W/m ² , 25°C)	Valeurs sous (900W/m ² , 25°C)	Valeurs sous (800W/m ² , 25°C)
Puissance maximale P_{mp} (W)	107.6	97.03	84.81
Tension nominale V_{mp} (V)	18.18	17.58	17.72
Courant nominale I_{mp} (A)	5.91	5.52	4.84A
Tension à circuit ouvert V_{oc} (V)	21.6	21.47	21.33
Courant de court-circuit I_{sc} (A)	6.54	5.88	5.23

Tableau 3.5. Paramètres électriques obtenus à partir de la caractérisation par convertisseur buck

b) Caractérisation par convertisseur élévateur (Boost converter)

Dans ce convertisseur, la tension moyenne de sortie est supérieure à la tension d'entrée, comme son nom l'indique. Cette structure demande un interrupteur à amorçage et blocage commandé (Bipolaire, MOS, IGBT,...) et une diode (amorçage et blocage naturels). La figure 3.16 le schéma de principe du convertisseur boost.

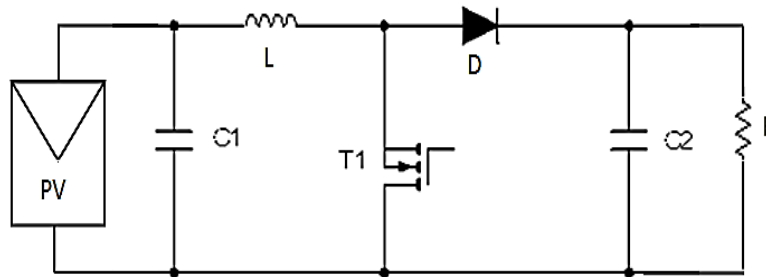


Figure 3.16. Schéma de principe du convertisseur boost.

Le tableau ci-dessous regroupe le rapport entre les grandeurs électriques de sortie et d'entrée (courant et tension) ainsi que l'impédance d'entrée du convertisseur Z_i en fonction de la résistance de charge R et du rapport cyclique α .

MODE	V_o	I_o	Z_i
CCM	$\frac{V_G}{1 - \alpha}$	$(1 - \alpha)I_G$	$(1 - \alpha)^2 R$
DCM	$\frac{V_G}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2R \alpha^2 T}{L}} \right)$	$\frac{2 I_G}{\left(1 + \sqrt{1 + \frac{2R \alpha^2 T}{L}} \right)}$	$\frac{4 R}{\left(1 + \sqrt{1 + \frac{2R \alpha^2 T}{L}} \right)^2}$

Tableau 3.6. Expressions de la tension, le courant de sortie et l'impédance d'entrée dans les deux modes fonctionnement continu (CCM) et discontinu (DCM)

Pour que le convertisseur fonctionne en mode continu, il faut que la valeur de l'inductance L du filtre soit supérieure à $\frac{RT}{2} \alpha (1-\alpha)^2$, où T est la période de commutation de l'interrupteur. D'autre part, on remarque que si $\alpha \in [0 \ 1]$, l'impédance $Z_i \in [0 \ R]$. Cela veut pour qu'on puisse relever la caractéristique I-V du module photovoltaïque décrit précédemment, on doit bien choisir la valeur de la résistance de charge R , qui doit être la plus grande possible, et ce pour s'approcher du point de court-circuit ($I_{sc}, 0$).

Pour valider cette approche, nous avons implémenté cette technique de caractérisation dans l'environnement Matlab-Simulink (figure 3.17). Nous avons opté pour une capacité $C=1\mu\text{F}$, une inductance $L=10\text{mH}$ une résistance de charge $R=15$ ohms et une fréquence de commutation de $f=10\text{Hz}$.

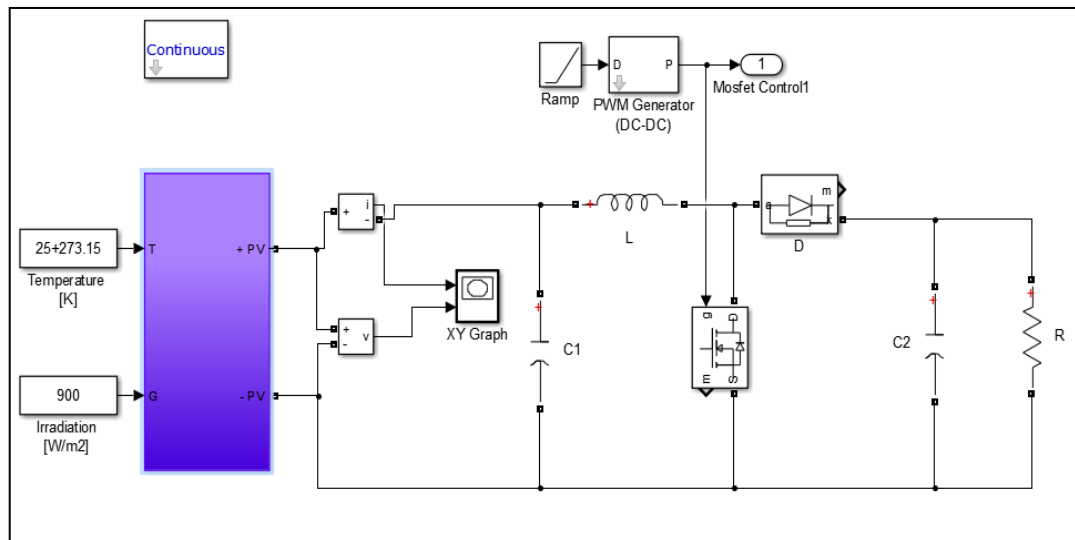


Figure 3.17. Schéma bloc de la caractérisation par convertisseur boost.

La commande du convertisseur est assurée par un circuit de commande conçu de telle sorte que le signal de commande généré soit avec un rapport cyclique variable (figure 3.18)

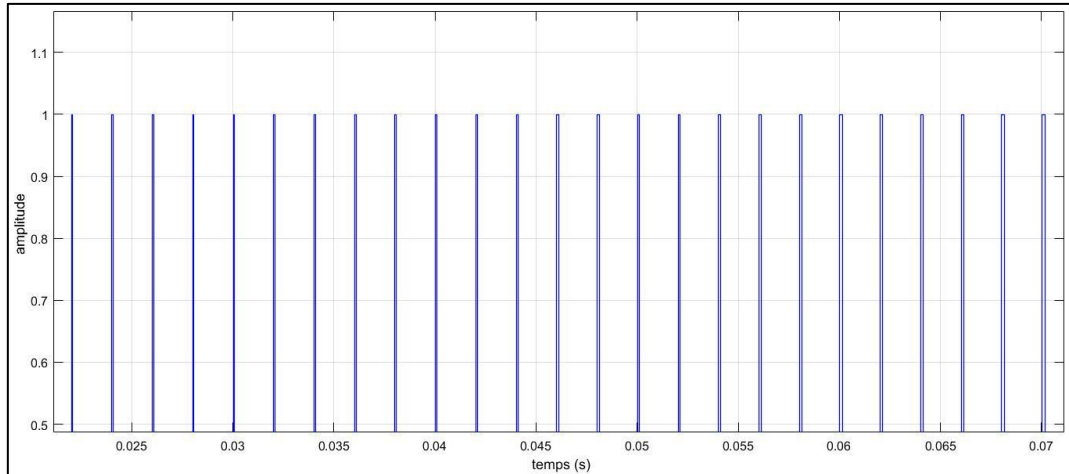


Figure 3.18. Signal commande de rapport cyclique croissant

Nous avons relevé les caractéristiques I-V et P-V du module PV en question à trois niveaux d'éclairement, $G_1=1000\text{W/m}^2$, $G_2=900\text{W/m}^2$ et $G_3=800\text{W/m}^2$. Les remarques qu'on peut tirer de cette méthode de caractérisation peuvent se résumer dans les points suivants :

- Le nombre de points de mesure (V, I) est important.
- Le balayage de la caractéristique I-V n'est pas complet. A titre d'exemple à $G=1000\text{W/m}^2$, Il commence d'un point proche du circuit-ouvert ($V=21.25\text{V}$; $I=1.63\text{A}$), et s'arrête au point de court-circuit ($V=0\text{V}$; $I=6.54\text{A}$).
- Donc l'extraction des trois points caractérisant un module PV, à savoir : $(0, I_{sc})$; (V_{mp}, I_{mp}) et $(V_{oc}, 0)$ ne sera possible qu'après ajustement (fitting) de la courbe des données.

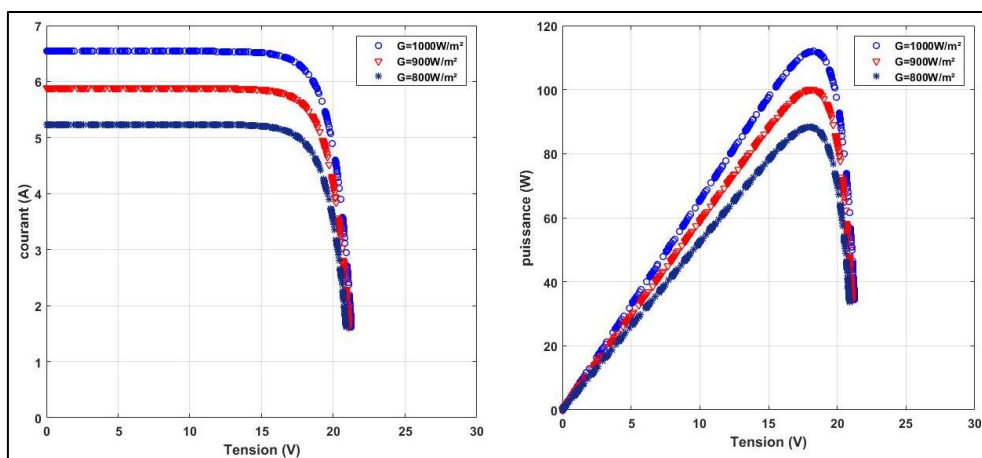


Figure 3.19. Caractéristique I(V) et P(V) relevées à $T=25^\circ\text{C}$
et $G_1=1000\text{W/m}^2$, $G_2=900\text{W/m}^2$, $G_3=800\text{W/m}^2$

Paramètres	Valeurs sous (1000W/m ² , 25°C)	Valeurs sous (900W/m ² , 25°C)	Valeurs sous (800W/m ² , 25°C)
Puissance maximale P_{mp} (W)	112	100.1	88.26
Tension nominale V_{mp} (V)	18.29	18.06	18.06
Courant nominale I_{mp} (A)	6.12	5.53	4.88
Tension à circuit ouvert V_{oc} (V)	21.6	21.09	20.89
Courant de court-circuit I_{sc} (A)	6.54	5.88	5.23

Tableau 3.7. Paramètres électriques obtenus à partir de la caractérisation par convertisseur boost

c) Caractérisation par convertisseur abaisseur-élevateur(Buck-boost convertier)

Le convertisseur abaisseur-élevateur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents. Il est utilisé comme un transformateur idéal de n'importe quelle tension d'entrée pour n'importe quelle tension de sortie désirée. La figure3.20 présente le schéma de principe du convertisseur buck-boost.

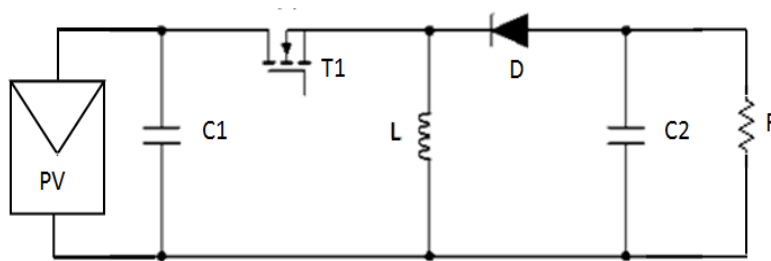


Figure3.20. Schéma de principe du convertisseur buck-Boost.

Le tableau ci-dessous regroupe le rapport entre les grandeurs électriques de sortie et d'entrée (courant et tension) ainsi que l'impédance d'entrée du convertisseur Z_i en fonction de la résistance de charge R et du rapport cyclique α .

MODE	V_o	I_o	Z_i
CCM	$\frac{\alpha V_G}{1-\alpha}$	$\frac{(1-\alpha)I_G}{\alpha}$	$\frac{(1-\alpha)^2 R}{\alpha^2}$
DCM	$\alpha V_G \sqrt{\frac{R T}{2 L}}$	$\frac{I_G}{\alpha \sqrt{\frac{R T}{2 L}}}$	$\frac{2L}{\alpha^2 T}$

Tableau 3.8. Expressions de la tension, le courant de sortie et l'impédance d'entrée dans les deux modes fonctionnement continu (CCM) et discontinu (DCM)

Pour que le convertisseur fonctionne en mode continu, il faut que la valeur de l'inductance L du filtre soit supérieure à $\frac{RT}{2}(1-\alpha)^2$, où T est la période de commutation de l'interrupteur. D'autre part, on remarque que si $\alpha \in [0 \ 1]$, l'impédance $Z_i \in [0 \ \infty]$. Cela veut que peu importe la valeur de la résistance R on peut relever la caractéristique I-V du module photovoltaïque décrit précédemment du court-circuit ($I_{sc}, 0$) au circuit-ouvert ($V_{oc}, 0$).

Pour valider cette approche, nous avons implémenté cette technique de caractérisation dans l'environnement Matlab-Simulink (figure 3.21). Nous avons choisi comme paramètres du circuit : $C=1\mu F$, $L=50mH$ et $R=15$ ohms. La fréquence de commutation est de $f=10Hz$.

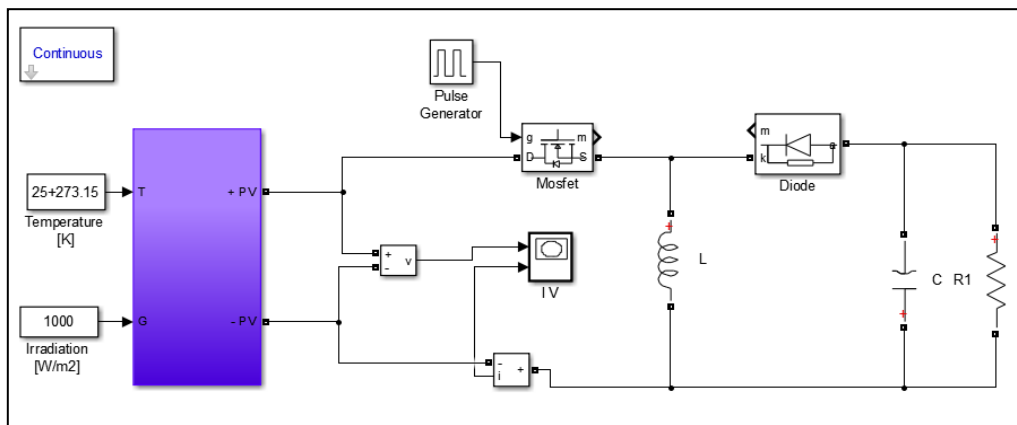


Figure 3.21 : Schéma bloc de la caractérisation par hacheur buck-Boost.

Par ailleurs, la commande du convertisseur est assurée par un circuit de commande conçu de telle sorte que le signal de commande généré soit avec un rapport cyclique variable (figure 3.22)

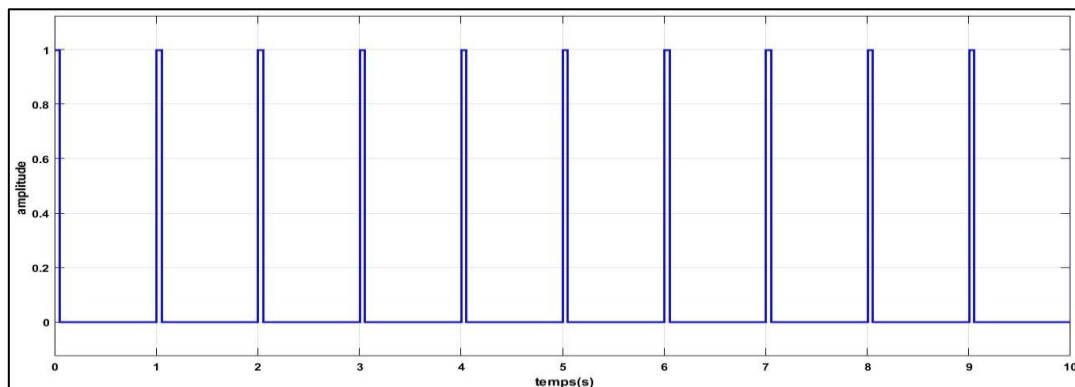


Figure 3.22.Signal commande de rapport cyclique fixe

Les résultats de simulation obtenus sont illustrés en figure 3.23. Nous avons relevé les caractéristiques I-V et P-V du module PV en question à trois niveaux d'éclairement. Les remarques qu'on peut tirer de cette méthode de caractérisation peuvent se résumer dans les points suivants :

- Le nombre de points de mesure (V, I) est infini
- Le balayage de la caractéristique I-V est n'a pas complet. Il se fait à partir d'un point du circuit-ouvert ($V=21.6V$; $0A$), et point du court-circuit ($V=0V$; $I=6.54A$).
- L'extraction des trois points caractérisant un module PV, à savoir : $(0, I_{sc})$; (V_{mp}, I_{mp}) et $(V_{oc}, 0)$

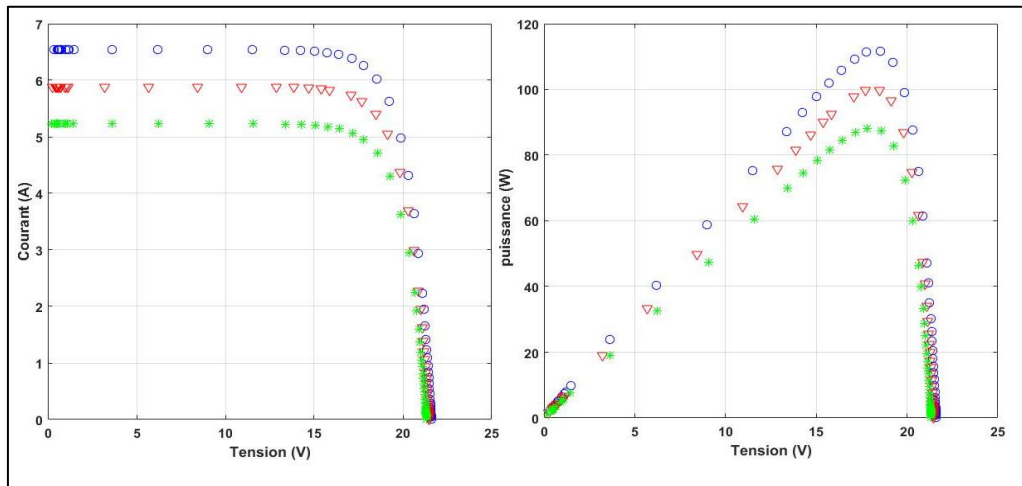


Figure 3.23: Caractéristiques(I-V)et P-V relevées à T=25°C

G1 :1000W/m² G2 :900W/m² G3 :800W/m²

Paramètres	Valeurs sous (1000W/m ² , 25°C)	Valeurs sous (900W/m ² , 25°C)	Valeurs sous (800W/m ² , 25°C)
Puissance maximale P_{mp} (W)	111.7	99.73	88.18
Tension nominale V_{mp} (V)	18.54	18.48	17.8
Courant nominale I_{mp} (A)	6.02	5.93	4.95
Tension à circuit ouvert V_{oc} (V)	21.6	21.47	21.33
Courant de court-circuit I_{sc} (A)	6.54	5.88	5.23

Tableau 3.9. Paramètres électriques obtenus à partir de la caractérisation par convertisseur buck-boost

3.4. Discussion des résultats

Cette dernière partie est consacrée à la comparaison entre ces cinq techniques de caractérisation des modules PV, qui se base les paramètres fondamentaux suivants :

1) Balayage de la courbe I-V

Le balayage est un facteur important de comparaison et joue un rôle important afin de sélectionner une méthode. Il s'agit de parcourir complètement ou partiellement la courbe I-V du module à caractériser. Guidés par les résultats issus de la simulation et qui sont représentés en figures 3.24-3.28, nous pouvons tirer les remarques suivantes :

- La courbe I-V est complètement balayée si on opte pour la caractérisation par charge capacitive et par convertisseur buck-boost, sinon pour les autres méthodes méthode pour combler les lacunes on a recours aux méthodes numériques d'ajustement 'fitting' des données mesurées-Possibilité d'avoir un écart important entre la puissance crête relevée de la courbe I-V et la valeur réelle, telle est le cas de la caractérisation par charge capacitive où on un écart aux alentours de 5W par rapport aux autres méthodes.

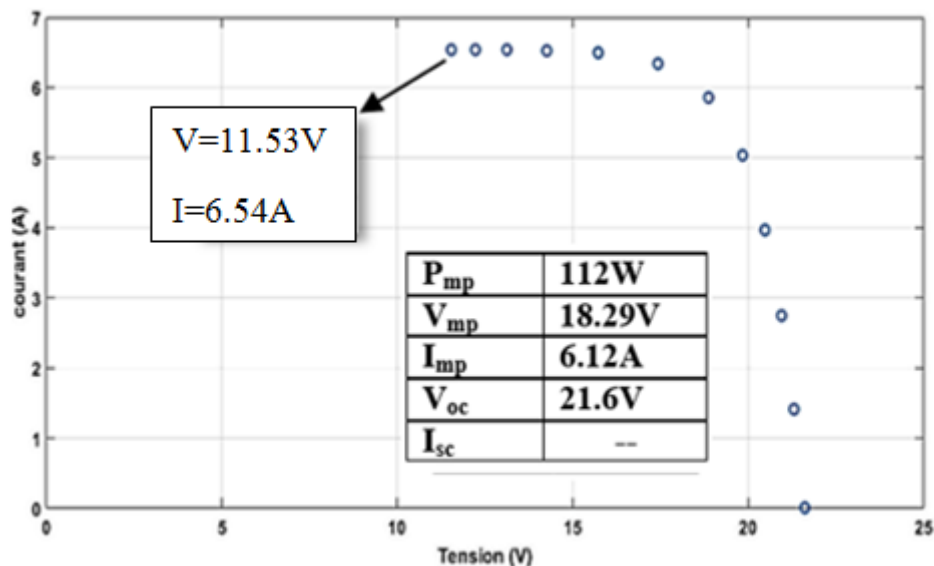


Figure 3.24. Caractéristique I-V relevée à 25°C et 1000W/m² par une résistance variable

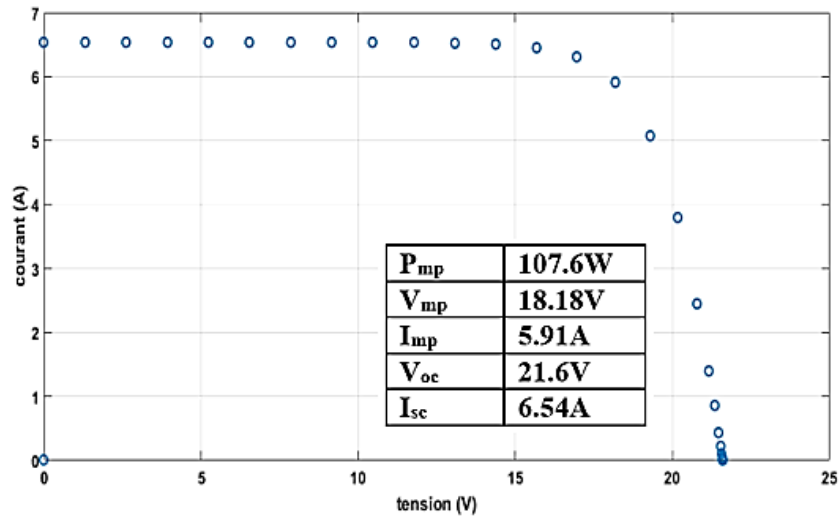


Figure 3.25. Caractéristique I-V relevée à 25°C et 1000W/m² par une charge capacitive

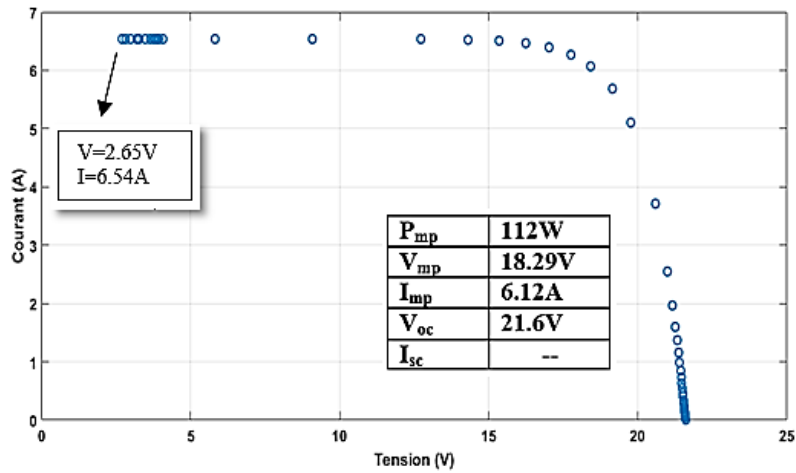


Figure 3.26. Caractéristique I-V relevée à 25°C et 1000W/m² par un convertisseur buck

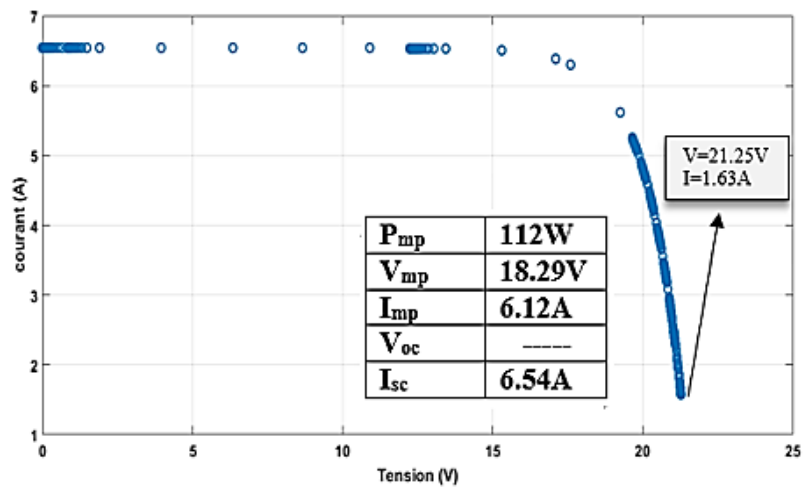


Figure 3.27. Caractéristique I-V relevée à 25°C et 1000W/m² par un convertisseur boost

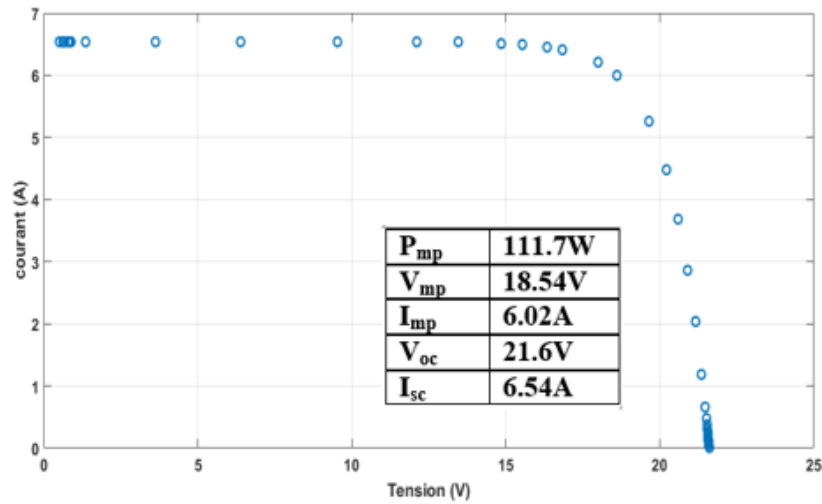


Figure 3.28.Caractéristique I-V relevée à 25°C et 1000W/m² par un convertisseur buck-boost

2) Flexibilité

Le convertisseur DC/DC permet la configuration de la vitesse et de la direction du balayage. En modifiant le rapport cyclique, les zones spécifiques de la courbe I-V peuvent être partiellement atteintes. Par la méthode de charge capacitive, la reproduction de la courbe I-V n'est pas cyclique et une reproduction partielle de la courbe I-V n'est pas possible.

3) Fidélité

Il est difficile d'évaluer quelle méthode est la plus fiable, parce que cette fonctionnalité dépend largement du système d'acquisition des données. Il est aussi très difficile de reproduire exactement le point court-circuit ($V=0$, $I=I_{sc}$). Dans la méthode de charge capacitive, l'interpolation peut être appliquée. Avec variable méthode de résistance et méthode de chargement électronique seulement l'extrapolation est possible.

4) Mise en œuvre pratique (implémentation)

Les méthodes de caractérisation par charge résistive variable et charge capacitive présentent l'avantage de la simplicité d'implémentation et de la commande. Néanmoins, l'inconvénient majeur de la première méthode est le nombre importants de résistance et d'interrupteurs, ce qui rend le circuit encombrant. Quant aux méthodes utilisant les convertisseurs DC/DC (buck, boost et buck-boost) , la seule difficulté réside dans complexité du circuit de commande.

3.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une étude de simulation pour quelques méthodes de caractérisation des modules PV. Nous avons également présenté les particularités, les avantages et les inconvénients de chaque méthode et enfin, nous avons effectué un comparatif technique entre ces méthodes selon quatre paramètres principaux, à savoir : balayage de la courbe, flexibilité, fidélité et mise en œuvre pratique.

Guidés par cette étude comparative, il s'avère que la méthode utilisant le convertisseur DC/DC buck-boost est la plus fiable et la plus concluante.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne une application des plus actuelles des énergies renouvelables, celle de l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque. Une meilleure rentabilité de ce système à énergies renouvelables implique forcément un meilleur conditionnement, donc adaptation. Avant d'aborder la problématique de conversion, nous avons tout d'abord étudié le contexte et la problématique de l'énergie solaire photovoltaïque. Ceci s'avère nécessaire pour acquérir une connaissance approfondie du comportement d'un générateur photovoltaïque.

Nous avons établi des programmes de calculs sous l'environnement Matlab permettant de tracer la caractéristique I-V pour différents éclairagements et températures solaires et de calculer la puissance maximale délivrée par la cellule photovoltaïque correspondante.

De ce qui précède, on peut conclure que l'énergie produite par le photovoltaïque est difficile à exploiter, cela est dû à la non linéarité de la caractéristique statique, de plus cette caractéristique change, si la température ou l'éclairagement varie. Ce dernier changement entraîne une variation du point de fonctionnement, d'où la nécessité de concevoir des régulateurs pour le suivi du point de puissance maximale, quel que soit la valeur de l'éclairagement ou de la température.

Dans ce mémoire est représentée une étude comparative entre les différentes méthodes pour la mesure I-V.

- En première partie, nous avons étudié le principe du système photovoltaïque où on a présenté le modèle des différents éléments constitutifs (module, GPV, ...).
- En deuxième partie, nous avons brièvement présenté les différentes techniques de caractérisation des dispositifs photovoltaïques.
- Dans la troisième partie, on a présenté une étude de simulation à l'aide du logiciel Matlab/Simulink de l'ensemble « générateur PV, charge résistive

variable, charge capacitive et convertisseurs DC-DC (buck , boost et buck-boost) .

Le choix de la technique de caractérisation a été basé sur les paramètres fondamentaux suivants pour les systèmes de mesure : Balayage de la courbe I-V, Flexibilité, Fidélité, Mise en œuvre pratique. D'après les résultats de simulation on n'a pu conclure que les meilleures méthodes de caractérisation des dispositifs de conversion photovoltaïque sont : la caractérisation par charge capacitive et la caractérisation par convertisseur DC-DC buck-boost

Références

- [1] R. Jimmy et al., Le pompage photovoltaïque, Édition Multi mondes, 1999.
- [2] B. Flèche & D. Delagnes, Energie solaire photovoltaïque, juin 2007.
- [3] S. Masoum et al., Microprocessor-controlled new class of optimal battery chargers for photovoltaic application, Vol. 19, September 2004.
- [4] A. Oi, Design and simulation of photovoltaïque water pumping système, Thèse de Magister de l'université California, USA, Septembre 2005.
- [5] A. Fortin, Analyse numérique pour ingénieurs, 2^{ème} édition, Presses internationales polytechnique, 1996.
- [6] S. M. Ait-Cheikh, «Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques», Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.
- [7] M. Adouane, «Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique», Mémoire de magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.
- [8] A. Cid Pastor, "conception et réalisation de modules photovoltaïques électrique", thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées, Toulouse, 2006.
- [9] Weidog .Xiao, A novel modeling method for photovoltaic cells, 35th annual IEEE Power Electronics Specialists conference, Aachen, Germany 2004, pp 1950-1956.
- [10] Weiner.D An optimal design of a photovoltaic D.C motor coupled water pumping system. IEEE, conférence, 1990, pp 268-274.
- [11] A.Q. Malik, S.J. Bin Haji Damit, "Outdoor testing of single crystal silicon solar cells ", Renewable Energy, 28, 2003, pp. 1433-1445
- [12] M.M. Mahmoud, "Transient analysis of a PV power generator charging a capacitor for measurement of the I-V characteristics ", Renewable Energy, 31, 2006, pp. 2198-2206
- [13] E.E. Van Dyk, A.R. Gxasheka, E.L. Meyer, "Monitoring current-voltage characteristics of photovoltaic modules", IEEE PVSC, 2002, pp. 1516-1519.
- [14] E.E. Van Dyk, A.R. Gxasheka, E.L. Meyer, "Monitoring current-voltage characteristics and energy output of silicon photovoltaic modules", Renewable Energy, 30, 2005, pp. 399-411

- [15] F. Recart, H. Mäckel, et al., "Simple data acquisition of the current-voltage and illumination-voltage curves of solar cells ", IEEE WCPEC, 2006, pp. 1215-1218.
- [16] J. Muñoz, E. Lorenzo, "Capacitive load based on IGBTs for on-site characterization of PV arrays ", Solar Energy, 80, 2006, pp. 1489-1497.
- [17] Y. Kuai, S. Yuvarajan, "An electronic load for testing photovoltaic panels", Journal of Power Sources, 154, 2006, pp. 308-313.
- [18] N. Forero, J. Hernández, G. Gordillo, "Development of a monitoring system for a PV solar plant", Energy Conversion & Management, 47, 2006, pp. 2329-2336.
- [19] J. Salmon, R. Phelps et al., "Solar cell measurement system for NPS Spacecraft Architecture and Technology Demonstration Satellite NPSAT1", 17th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2003.
- [20] L.A. Hecktheuer, A. Krenzinger, C.W.M. Prieb, "Methodology for photovoltaic modules characterization and shading effects analysis "; Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, 24(1), 2002.
- [21] J. Fernández-Reche, I. Cañadas et al., "PSA Solar furnace, A facility for testing PV cells under concentrated solar radiation", Solar Energy Materials & Solar Cells, 90, 2006, pp. 2480-2488
- [22] J.M. Andújar E. Durán et al., "Automatic generation system for I-V curves and monitoring of PV modules" (in Spanish), XXV Jornadas de Automática, 2004.
- [23] J.M. Enrique, E. Durán, M. Sidrach-de-Cardona, J.M. Andújar, M.A. Bohórquez, J.E. Carretero, "A new approach to obtain I-V and P-V curves of PV panels by using DC-DC converters", 31st IEEE PVSC, 2005, pp. 1769-1772.
- [24] E. Durán, J. Galán, M. Sidrach-de-Cardona, J.M. Andújar, "A new Application of the Buck-Boost-Derived Converters to obtain the I-V curve of PV Modules", 38th IEEE PESC, 2007, pp. 413-417.
- [25] E. Durán, J.M. Enrique, M.A. Bohórquez, M. Sidrachde-Cardona, J.E. Carretero, J.M. Andújar, "A new Application of the Coupled-Inductors SEPIC Converter to obtain I-V and P-V Curves of Photovoltaic Modules", 11th EPE, 2005.
- [26] E. Durán, J. Galán, M. Sidrach-de-Cardona, "Interleaved DC-DC converters to obtain the I-V characteristic curve of PV modules", 22th Eur. Phot. Solar Energy Conference, 2007, pp. 318-321.
- [27] M.A. Bohórquez, J.M. Enrique, E. Durán, M. Sidrachde-Cardona, J.E. Carretero, J.M. Andújar, "Analysis and monitoring of failures in PV panels by means of I-V and P-V curves using DC-DC converters", WREC 2005, 2005, pp. 477-483.

[28] M. Kazerani, "A High-Performance Controllable DC Load"; IEEE ISIE, 2007, pp. 1015-1020.

الملخص:

في الوقت الحاضر ، يتزايد توليد الطاقة الكهربائية عبر مسار الطاقة الشمسية الكهروضوئية .هذه الزيادة هي واحدة من أعلى المعدلات في مجال الطاقات المتجددة وتتبع الاتجاه الذي يجب أن يستمر في السنوات القادمة .ونتيجة لذلك ، فإن عددًا متزايدًا من المكونات الضوئية الجديدة تغزو سوق الخلايا الكهروضوئية ، مثل الوحدات الكهروضوئية ومحولات التيار المستمر .

أصبحت الحاجة إلى توصيف هذه العناصر جانبًا هامًا ومتزايد الأهمية لمتطلبات الجودة والمتانة والكفاءة التي يتطلبها السوق.

في هذه الأطروحة، هي دراسة مقارنة بين التقنيات المعتادة لتحديد خصائص وحدات الضوئية .سيتم تنفيذ نتائج الدراسة والمحاكاة باستخدام برنامج المحاكاة الديناميكية Matlab/Simulink .

الكلمات المفتاحية : النظام الكهروضوئية ، وحدات الكهروضوئية ، المحولات.

Résumé

De nos jours, la génération de l'énergie électrique par la voie solaire photovoltaïque ne cesse d'augmenter. Cette augmentation est l'une des plus élevées dans le domaine des énergies renouvelables et suit une tendance qui devrait se poursuivre dans les prochaines années. En conséquence, un nombre croissant de nouveaux composants photovoltaïques envahissent le marché PV, à l'image des modules PV et des convertisseurs DC/DC.

La nécessité de caractériser ces éléments est devenu un aspect de plus en plus important et fondamentalement pour les exigences de qualité, de durabilité et d'efficacité exigés par le marché.

Cette étude, se veut une étude comparative entre les techniques usuelles de caractérisation des modules photovoltaïques. L'étude et les résultats de simulation sont réalisés à l'aide du logiciel de simulation dynamique Matlab/Simulink.

Mots clés : Photovoltaïque, modules PV, Caractérisation, polarisation directe

Abstract

Nowadays, the generation of electrical energy by the photovoltaic solar path is increasing. This increase is one of the highest in the field of renewable energies and follows a trend that should continue in the coming years. As a result, a growing number of new photovoltaic components are invading the PV market, like PV modules and DC/DC converters.

The need to characterize these elements has become an increasingly important and fundamental aspect of the quality, durability and efficiency requirements demanded by the market.

This work is a comparative study between the usual techniques of characterization of photovoltaic modules. The study and simulation results will be performed using Matlab/simulink dynamic simulation software.

Key words: photovoltaic, PV modules, Characterisation, Forward bias