



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences de la Matière

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine des Sciences de la Matière
Filière de Physique
Spécialité physique énergétique et énergies renouvelables

Réf. :

Présenté et soutenu par :
Amina Benslim

Le : samedi 22 juin 2019

Simulation des caractéristiques électriques des panneaux photovoltaïques.

Jury :

N. Messei	M.C. « B »	Université Med Khider- Biskra	Président
T. Tibermacine	M.C. « A »	Université Med Khider- Biskra	Rapporteur
F. Bouhdjar	M.C. « B »	Université Med Khider - Biskra	Examineur

Année universitaire : 2018/2019

Remerciements

Je remercie premièrement Dieu qui m'a donné ce bien là et que je vie ce jour et la force et la patience pour terminer ce travail.

Je voudrais remercier, mon encadreur de mémoire Dr. T. Tibermacine, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Le travail de mémoire que nous avons effectué doit beaucoup à certaines personnes que nous tenons à les remercier sincèrement.

Enfin, nous remercions toutes les personnes, qui ont contribué de près ou de loin, directement ou indirectement à l'aboutissement de ce travail.



*D*édicace

*Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il
faut...*

*Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour
et Le respect...*

Je dédie cette mémoire à ...

A mes très chers parents

Mes sœurs. Mes frères.

A mes amis et mes camarades.



Résumé

Nous présentons dans ce travail, la simulation des caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) d'un panneau photovoltaïque sous le logiciel MATLAB/Simulink. En particulier, l'influence de l'irradiation solaire, de la température, de l'ombrage partiel, de facteur d'ombrage et de la diode bypass sur les caractéristiques I-V et P-V des panneaux photovoltaïques. Nous comparons ensuite les résultats obtenus par simulation à ceux obtenus par expérimentation au laboratoire des matériaux semi-conducteur et métalliques LMSM de l'université de Biskra.

Mots-clés : Panneau photovoltaïque, Simulation, MATLAB/Simulink, Courant-Tension, Puissance-Tension, Effet d'ombrage partiel, Diode bypass.

Table des matières

Remerciements	ii
Dédicace	iii
Résumé	iv
Table des matières	v
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur la conversion photovoltaïque et les panneaux solaires	2
I.1 Introduction	3
I.2 Rayonnement solaire	3
I.2.1 Masse d'air.....	4
I.2.2 Spectre du rayonnement.....	5
I.3 Principe de la conversion photovoltaïque.....	6
I.3.1 Absorption de la lumière dans le matériau	6
I.3.2 Transfert de l'énergie des photons aux charges électriques	7
I.3.3 Collecte des charges.....	7
I.3.4 Diffusion et les recombinaisons des porteurs	8
I.4 Cellules photovoltaïques	9
I.4.1 Structure d'une cellule photovoltaïque à haut rendement.....	9
I.4.2 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque.....	11
I.4.3 Paramètres d'une cellule solaire	13
I.4.4 Paramètres qui influent sur la caractéristique I-V.....	14
I.5 Panneaux solaires	16
I.5.1 Encapsulation des cellules photovoltaïque	16
I.5.2 Association de cellules photovoltaïques	17
I.5.3 Déséquilibres au sein d'un panneau photovoltaïque et effet de l'ombre.....	18
Chapitre II : Introduction à MATLAB & Simulink	22
II.1 Introduction	23
II.2 Qu'est-ce que Simulink ?.....	23
II.3 Barre d'outils Simulink.....	24
II.4 Travailler avec des blocs	24
II.4.1 Ajout des blocs au modèle.....	24
II.4.2 Vue d'ensemble des bibliothèques.....	25
II.5 Réglage des blocs	26

II.5.1 Paramètres de bloc	26
II.5.2 Propriétés du bloc	26
II.5.3 Modèles Simulink et variables MATLAB.....	27
II.6 Annotation du modèle	27
II.6.1 Annotation de texte et d'image	27
II.6.2 Menu d'affichage	27
II.6.3 Diagramme menu	28
II.7 Solveur	28
II.8 Quelques blocs dans les bibliothèques	29
II.9 Librairies de Simscape (Foundation library).....	31
II.9.1 Électrique (Electrical).....	31
II.9.2 Signaux physiques (Physical Signals)	33
Chapitre III : Résultats et discussion	34
III.1 Introduction.....	35
III.2 Simulation d'un panneau photovoltaïque	35
III.3 Analyse et discussion des résultats	36
III.3.1 Données de simulation	36
III.3.2 Effet de l'éclairement.....	37
III.3.3 Effet de la température	39
III.3.4 Effet d'ombrage partiel	41
III.3.5 Effet de facteur d'ombrage.....	44
III.3.6 Effet de diode bypass	46
III.3.7 Effet de facteur d'ombrage et diode bypass	47
III.4 Comparaison entre la simulation et les résultats expérimentaux	48
III.4.1 Caractéristiques I-V et P-V	48
III.4.2 Effet d'ombrage partiel	48
Conclusion générale	52
Références	53

Introduction générale

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain. Elles proviennent de phénomènes naturels cycliques ou constants induits par les astres : le soleil essentiellement pour la chaleur et la lumière qu'il génère, mais aussi l'attraction de la lune (marées) et la chaleur générée par la terre (géothermie). Le soleil est la principale source des différentes formes d'énergies renouvelables : son rayonnement est le vecteur de transport de l'énergie utilisable directement ou indirectement. Cette énergie permet de produire de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires. À la différence des énergies fossiles, le photovoltaïque ne rejette pas de CO₂ et ne participe donc pas au réchauffement climatique.

Ce mémoire présente la simulation de panneaux photovoltaïques à l'aide du logiciel MATLAB / Simulink en prenant en compte l'effet d'irradiation, de température et des conditions d'ombrage partiel avec et sans diode de dérivation.

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

- ✚ Dans le premier chapitre, on présente une généralité sur les panneaux photovoltaïques.

- ✚ Dans le deuxième chapitre, on présente quelques informations simples sur l'utilisation de logiciel MATLAB/Simulink.

- ✚ Dans le dernier chapitre, nous présentons les résultats de la simulation avec la discussion, l'analyse et la comparaison de certains résultats de simulation avec les résultats expérimentaux mesurés au laboratoire des matériaux semi-conducteurs et métalliques (LMSM) de l'université de Biskra.

- ✚ A la fin, on termine ce mémoire par une conclusion générale

Chapitre I : Généralités sur la conversion photovoltaïque et les panneaux solaires

Chapitre I : Généralités sur la conversion photovoltaïque et les panneaux solaires

I.1 Introduction

Depuis très longtemps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil, l'étoile la plus proche de la terre. Le soleil est une étoile de forme pseudo-sphérique composée de matière gazeuse (l'hydrogène et de l'hélium). Il est le siège de réactions nucléaires permanentes et sa température de cœur atteint 10^7 K. Comme tout corps chaud, il va rayonner et c'est la portion du spectre émis arrivant à la surface de la terre qui nous intéresse [1]. L'énergie solaire est la source la plus importante parce que les convertisseurs photovoltaïques convertissent directement l'énergie des rayonnements solaires en énergie électrique. Dans ce chapitre on va présenter généralités sur la conversion photovoltaïque et les panneaux solaires.

I.2 Rayonnement solaire

Il est nécessaire de connaître le spectre du rayonnement solaire reçu sur sol pour quantifier l'énergie développée par le générateur photovoltaïque dans une application donnée. En effet, quatre types de rayonnement ont été répertoriés dans la littérature [2] :

- ✓ **Rayonnement direct** : Le rayonnement direct est le rayonnement solaire atteignant directement la surface terrestre depuis le soleil.
- ✓ **Rayonnement diffus** : Il est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire global par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages et les aérosols.
- ✓ **Rayonnement réfléchi** : C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc...).
- ✓ **Rayonnement global** : Le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et réfléchi par le sol.

Dans la figure ci-dessous figure (I.1) est schématisé l'ensemble des rayonnements solaires reçus sur une surface terrestre.

Chapitre I : Généralités sur la conversion photovoltaïque et les panneaux solaires

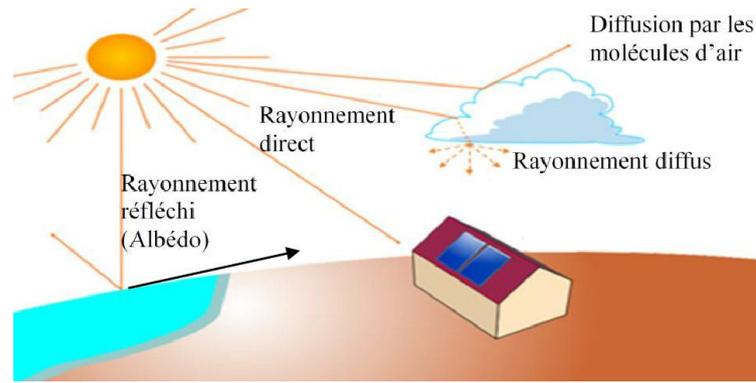


Figure I.1 : Types de rayonnement solaire reçus au sol.

L'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan quelconque à un moment donné est appelée irradiation ou éclairement (noté par la lettre G), il s'exprime en watt par mètre carré (W/m^2).

Le rayonnement solaire atteint son intensité maximale lorsque le plan du module photovoltaïque est perpendiculaire aux rayons.

Dans la figure (I.2) ci-après est illustré l'effet de l'inclinaison des modules photovoltaïques sur l'intensité de l'éclairement reçu sur leurs surfaces du levé au couché du soleil [2].

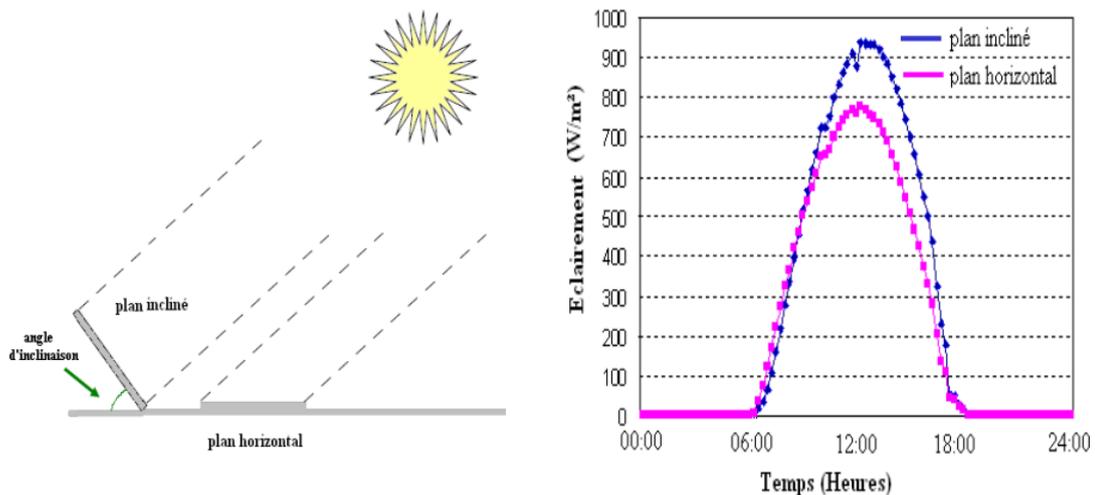


Figure I.2 : Intensité de l'ensoleillement reçu sur un plan horizontal et incliné.

I.2.1 Masse d'air

En fonction de la position du soleil, la trajectoire des rayons sera plus ou moins longue dans l'atmosphère. Pour tenir compte de ce phénomène, on définit la masse d'air AM , comme le rapport entre l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement solaire direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu [1], comme illustré sur la Figure (I.3).

Chapitre I : Généralités sur la conversion photovoltaïque et les panneaux solaires

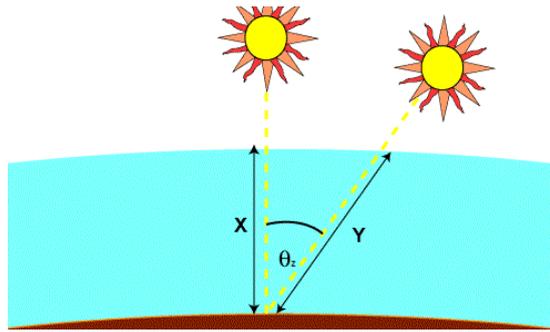


Figure I.3 : Représentation schématisée de la quantité d'atmosphère traversée par les rayons solaires.

$$AM = \frac{Y}{X} = \frac{1}{\cos(\theta_z)} \quad (I-1)$$

Où :

θ_z : Est l'angle zénithal.

Afin d'évaluer la puissance délivrée par les cellules photovoltaïques, des spectres de références AMx ont été imposés (avec $x = 0, 1, 1.5, 2$). AM0 correspond au rayonnement solaire hors atmosphère, AM1 à un soleil au zénith (au niveau de la mer), AM1.5D et AM1.5G correspondent respectivement au flux direct et au flux global pour un soleil à 48.5° (choisi comme référence pour le photovoltaïque) et AM2 à un soleil à 60° .

I.2.2 Spectre du rayonnement

Le photon est une énergie quantique associée aux ondes électromagnétiques. Son énergie est liée à la longueur d'onde λ elle est donnée par la formule suivante :

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda} \quad (I-2)$$

Où :

h : La constante de Planck. Égale à $6,62 \times 10^{-34} \text{ J s}^{-1}$

C : La vitesse de propagation. Égale à $3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$.

λ : La longueur d'onde (m)

v : La fréquence de l'onde (Hz)

Chapitre I : Généralités sur la conversion photovoltaïque et les panneaux solaires

Le rayonnement lumineux composé de plusieurs couleurs (photons d'énergies différentes) aura donc une plage de longueurs d'onde. Par conséquent, une partie du spectre lumineux sera transmise, une partie réfléchi et une autre partie absorbée lorsque la lumière rencontrera le matériau:

- **Partie réfléchi** : Dépend de l'indice de réfraction (n) des matériaux traversés. Cet indice dépend lui-même de la longueur d'onde du rayonnement mais aussi des caractéristiques du milieu. Le coefficient de réflexion entre deux matériaux d'indice n_1 et n_2 respectivement, s'écrit comme suit [3] :

$$R = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \quad (\text{I-3})$$

- **Partie absorbée** : Est celle qui permettra la transformation de l'énergie lumineuse en électricité. La lumière est absorbée par le matériau suivant la loi de Beer-Lambert [3] :

$$G = G_{inc} e^{-\alpha d}$$

Où :

G_{inc} : L'intensité lumineuse incidente (W/m^2)

α : Le coefficient d'absorption (cm^{-1})

d : L'épaisseur traversée (cm)

- **Partie transmise** : Représente les photons qui traversent le matériau sans interaction et leur énergie est très faible. Le matériau est transparent pour ces photons.

Nous nous intéresserons tout particulièrement au phénomène d'absorption car c'est grâce à lui qu'une partie du flux lumineux sera restituée sous forme d'électricité.

I.3 Principe de la conversion photovoltaïque

I.3.1 Absorption de la lumière dans le matériau

Pour l'absorption de la lumière, une caractéristique importante du matériau est son gap. C'est l'écart entre le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction d'un matériau. La bande de valence est entièrement occupée par des électrons et la bande de conduction entièrement vide. Il existe deux types de gap : le gap direct et le gap indirect.

Chapitre I : Généralités sur la conversion photovoltaïque et les panneaux solaires

- **Gap direct** : Lorsque le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence correspondent à la même valeur du vecteur d'onde (k), le gap est direct. Les transitions inter bandes s'effectuent verticalement, et sont donc radiatives [3].

- **Gap indirect** : on remarque cette fois-ci sur Figure (I.4.b) La transition des extrema des bandes ne se fait pas verticalement mais de façon oblique : les transitions électroniques sont non radiatives [3].

Lorsque l'énergie du photon est inférieure à celle du gap du matériau, la transition n'est pas possible et le photon n'est pas absorbé ($h\nu \geq E_g$).

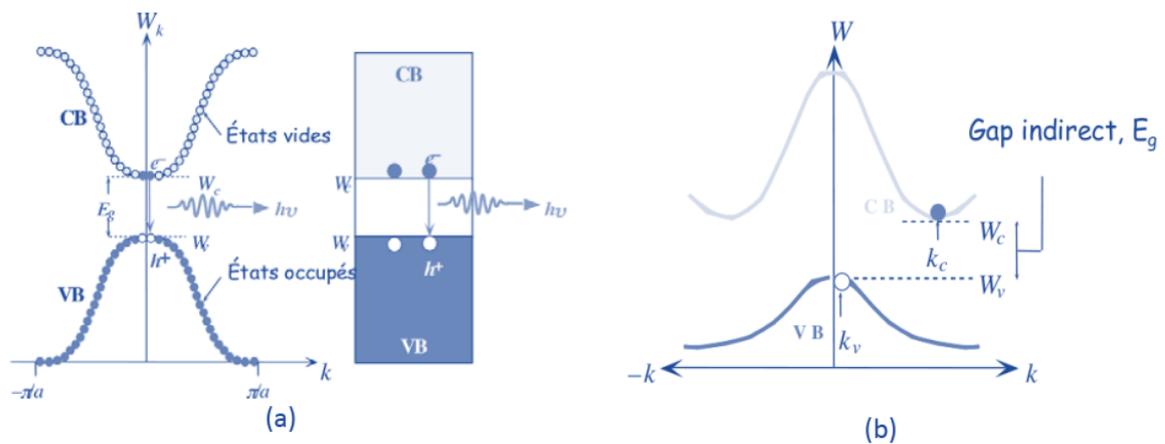


Figure I.4 : Représentations schématiques du gap direct (a) et du gap indirect (b)

I.3.2 Transfert de l'énergie des photons aux charges électriques

Les photons absorbés vont transférer leur énergie aux électrons de la matière, si l'énergie apportée par le photon est supérieure à celle du gap du matériau. Il y aura donc création d'une paire d'électrons et d'un trou.

Il y a donc deux phénomènes qui limitent le rendement :

1. L'impossibilité de convertir des photons d'énergie inférieure au gap.
2. La perte de l'énergie du photon qui dépasse celle du gap optique.

I.3.3 Collecte des charges

Le matériau semi-conducteur comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone dopée n devient chargée positivement, et

Chapitre I : Généralités sur la conversion photovoltaïque et les panneaux solaires

la zone 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 [2].

Dans la zone n ou p , les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont envoyés par le champ électrique dans la zone p (pour les trous) ou dans la zone n (pour les électrons) où ils seront majoritaires. Il y aura un courant de diffusion. Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons-trous créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique. Les électrons vont aller dans la région n et les trous vers la région p . Il y aura un photo-courant de génération. On réalise ainsi ce que l'on appelle une jonction p - n , c'est-à-dire une barrière de potentiel dans le semi-conducteur. La hauteur de barrière de potentiel et donc l'intensité du champ électrique sont diminuées par polarisation de la jonction en direct qui permet le passage de porteurs. Une polarisation inverse augmentera la hauteur de barrière. Le fonctionnement de la jonction p - n est illustré sur la Figure (I.5) [4].

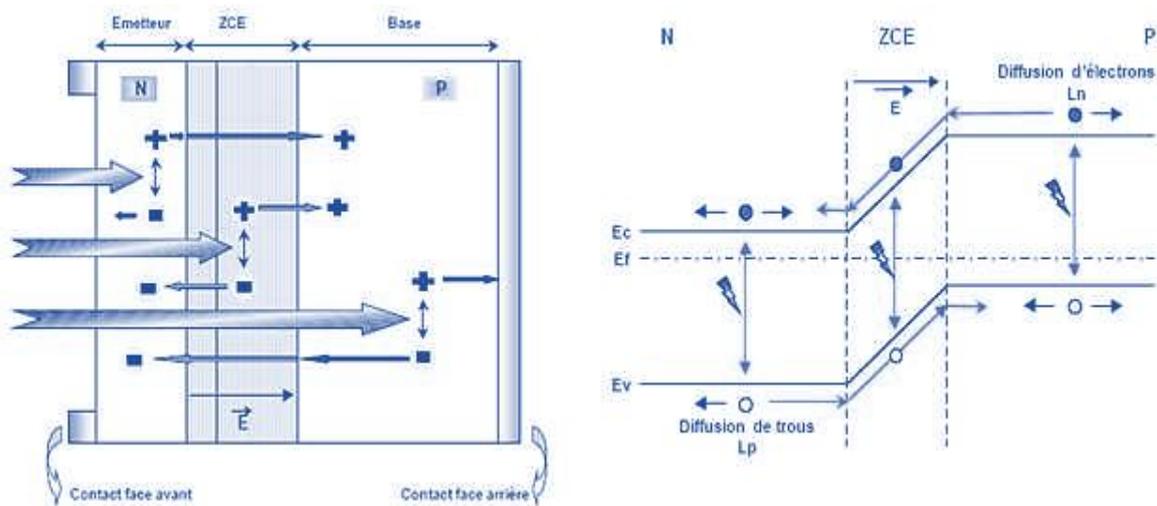


Figure I.5 : Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque.

I.3.4 Diffusion et les recombinaisons des porteurs

Malgré le champ électrique créé par la jonction p - n , des recombinaisons au sein de la cellule auront tout de même lieu. Pour évaluer ces recombinaisons, qui dépendent de la qualité du matériau, on utilise la longueur de diffusion des porteurs de charge (L_d). Elle correspond à la distance moyenne que les porteurs peuvent parcourir avant de se recombiner. Elle dépend essentiellement de la qualité du matériau utilisé ainsi que de la mobilité (μ) du porteur concerné [4] :

$$L_d = \sqrt{\tau D_{n,p}} = \sqrt{\tau \mu_{n,p} \frac{k_B T}{q}} \quad (\text{I-4})$$

Chapitre I : Généralités sur la conversion photovoltaïque et les panneaux solaires

Où

L_d : Longueur de diffusion des porteurs (cm)

$D_{n,p}$: coefficient de diffusion des porteurs, électrons ou trous (cm^2s^{-1})

k_B : constante de Boltzmann (JK^{-1})

T : température (K)

q : charge électronique (C)

τ : durée de vie des porteurs, électrons ou trous, dans le matériau (s)

$\mu_{n,p}$: Mobilité des porteurs, électrons ou trous, ($cm^2V^{-1}s^{-1}$)

Les mécanismes principaux de recombinaisons sont les recombinaisons radiatives, Auger et Shockley-Read-Hall [3] :

Les recombinaisons radiatives : elles correspondent aux recombinaisons bande à bande d'un électron de la bande de conduction avec un trou de la bande de valence et s'accompagnent de l'émission d'un photon.

Les recombinaisons Auger : ce type de recombinaisons intervient lorsqu'une paire électron-trou se recombine en transférant son énergie cinétique à une autre charge libre (électron ou trou). C'est un phénomène qui implique trois particules.

Les recombinaisons Shockley-Read-Hall : des centres recombinants induits par des défauts présents dans le volume du matériau peuvent être le siège de recombinaisons. Elles dépendent du niveau énergétique introduit par le défaut et de sa section efficace de capture.

I.4 Cellules photovoltaïques

I.4.1 Structure d'une cellule photovoltaïque à haut rendement

La structure de la cellule photovoltaïque à haut rendement en silicium monocristallin est présentée sur la figure suivante [4]:

Chapitre I : Généralités sur la conversion photovoltaïque et les panneaux solaires

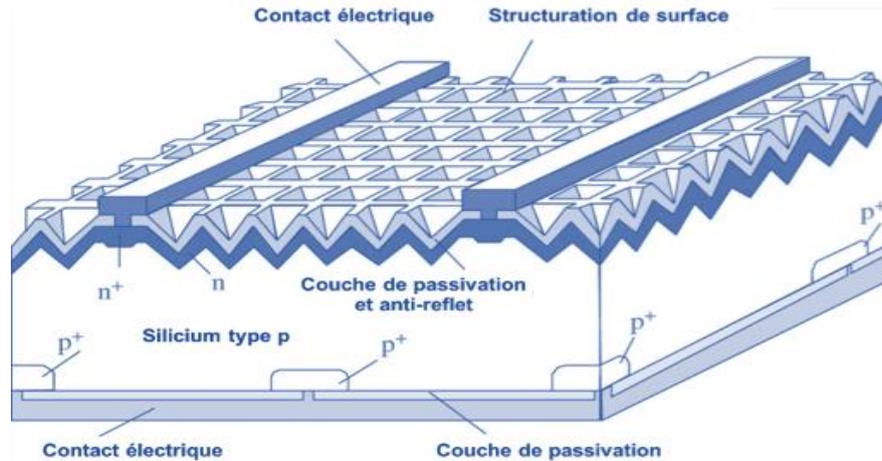


Figure I.6 : Structure d'une cellule photovoltaïque en Silicium monocristallin à haut rendement (24.7%) [4].

Cette cellule est réalisée sur un substrat de Si FZ (Float Zone) de type p. La face avant (face éclairée) de la cellule est texturée en « pyramides inversées » figure (I.7). Ce type de texturation permet une réduction importante de réflexion et ainsi des pertes optiques dans la cellule.

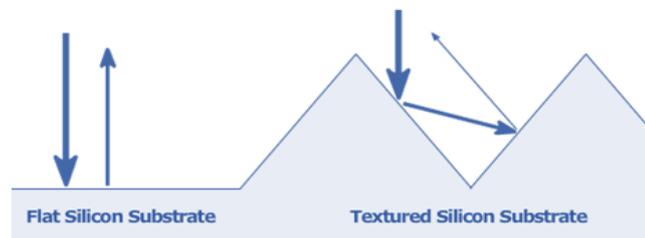


Figure I.7 : La texturation de la surface en petites pyramides

Une jonction p-n peu profonde est réalisée sur toute la surface avant pour assurer la séparation des porteurs de charge.

L'émetteur ainsi réalisé est peu dopé afin de limiter les recombinaisons.

Le contact ohmique sur l'émetteur est déposé sous forme de grille. La géométrie de cette grille doit assurer une faible résistance série tout en limitant l'ombragement de la cellule. Pour obtenir un contact ohmique, la région sous le contact avant est surdopée n^+ .

Une fine couche d'oxyde thermique (couche de passivation) est formée sur l'émetteur pour réduire la recombinaison sur la face avant de la cellule. Sur l'oxyde, une double couche anti-réfléchissante est déposée pour réduire les pertes par réflexion.

Chapitre I : Généralités sur la conversion photovoltaïque et les panneaux solaires

De même que la face avant, la face arrière de la cellule est passivée par de l'oxyde thermique avec des trous pour prendre le contact. Pour assurer un bon contact arrière, la région du contact est dopée p^+ .

Actuellement le rendement record obtenu pour une cellule photovoltaïque à base de silicium est de 24.7% dans les conditions d'illumination AM1.5 [4].

I.4.2 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

La figure (I.8) présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairage. Il correspond à un générateur de courant I_{ph} monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma [2].

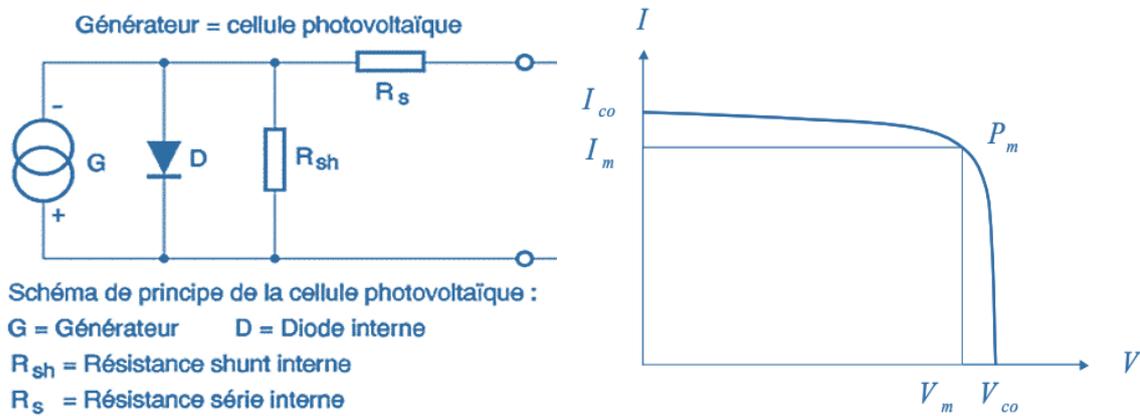


Figure I.8 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Pour la cellule,

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (I-5)$$

Où I_d : Courant de la diode (A) :

$$I_d = I_s \left(e^{\frac{q(v+IR_s)}{AKT}} - 1 \right) \quad (I-6)$$

Où : I_{ph} : Le photo courant (A) [5] :

$$I_{ph} = (I_{cc} + K_i(T - 298)) \frac{G}{1000} \quad (I-7)$$

Où I_{sh} : Le courant de la résistance shunt (A).

$$I_{sh} = \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (I-8)$$

Chapitre I : Généralités sur la conversion photovoltaïque et les panneaux solaires

Où :

$$\frac{kT}{q} = 26 \text{ mV à } 300 \text{ K pour le silicium.}$$

A : Coefficient d'idéalité de la diode.

R_s : la résistance série (Ω).

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

G : l'ensoleillement (W/m^2).

K_i : coefficient de température.

T : température de la cellule (k).

R_{sh} : la résistance shunt.

I_s : Le courant de saturation I_s :

Ce courant varie avec la température et est donné par [5]:

$$I_s = I_{rs} \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^3 \exp\left[\frac{qE_g}{AK} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (\text{I-9})$$

Où

E_g : Énergie de gap du semi-conducteur (eV).

T_{ref} : Température de référence 298°k.

I_{rs} : Le courant de saturation inverse de la diode (courant de fuite) [5] :

$$I_{rs} = \frac{I_{cc}}{\exp\left(\frac{qV_{co}}{AKT}\right) - 1} \quad (\text{I-10})$$

À partir des expressions décrites précédemment, on peut déduire le courant délivré par une cellule [5]:

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{q(v+IR_s)}{AKT}\right) - 1 \right] - I_{sh} \quad (\text{I-11})$$

Les quatre grandeurs caractéristiques principales du fonctionnement des cellules solaires :

- Le courant de court-circuit I_{cc} .
- La tension en circuit ouvert V_{co} .
- Le facteur de qualité A .
- Le facteur de forme FF .

Chapitre I : Généralités sur la conversion photovoltaïque et les panneaux solaires

I.4.3 Paramètres d'une cellule solaire

I.4.3.1 Tension à circuit ouvert V_{co} :

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle est proportionnelle à la barrière d'énergie, elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse [6].

$$V(I = 0) = V_{co} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{I_{cc}}{I_s}\right) \quad (\text{I-12})$$

I.4.3.2 Courant de court-circuit I_{cc}

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant $V=0$). Il croît avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température. On peut écrire [6]:

$$I_{cc} = I_{ph} \quad (\text{I-13})$$

I.4.3.3 Puissance maximale P_{max}

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale P_{max} , correspondrait donc à la tension de circuit ouvert [6]:

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

I.4.3.4 Facteur de forme FF

C'est le rapport entre la puissance maximale que peut fournir une cellule et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (puissance optimale) [6]:

$$FF = \frac{V_m \times I_m}{V_{co} \times I_{cc}} \quad (\text{I-15})$$

I.4.3.5 Rendement énergétique maximum η

Le rendement de la cellule qui correspond au rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule et la puissance solaire incidente [6]:

$$\eta = \frac{V_m \times I_m}{P_{incidente}} = \frac{P_{max}}{E.S} \quad (\text{I-16})$$

Où : S : Surface de cellule solaire.

E : Flux incident.

Chapitre I : Généralités sur la conversion photovoltaïque et les panneaux solaires

I.4.4 Paramètres qui influent sur la caractéristique I-V

Quatre paramètres influent sur le comportement électrique d'une cellule solaire ou un générateur photovoltaïque :

- La résistance série R_s
- La résistance shunt R_{sh}
- L'éclairement G
- La température T

I.4.4.1 Influence de la résistance série et la résistance shunt

Les performances d'une cellule solaire sont d'autant plus dégradées que la résistance série est grande ou que la résistance shunt est faible. La figure (I.9.a) montrée l'influence de la résistance série sur la caractéristique I-V de la cellule. Cette influence est traduite par l'impédances de tension sur la résistance des joints entre le métal et le semi-conducteur et sur la résistance des joints métalliques à l'avant et à l'arrière de la cellule [2].

Quant à la résistance shunt, elle est liée directement au processus de fabrication, et son influence ne se fait sentir que pour de très faibles valeurs de courant. La figure (I.9.b) montre que cette influence se traduit par une augmentation de la pente de la courbe de puissance de la cellule [2].

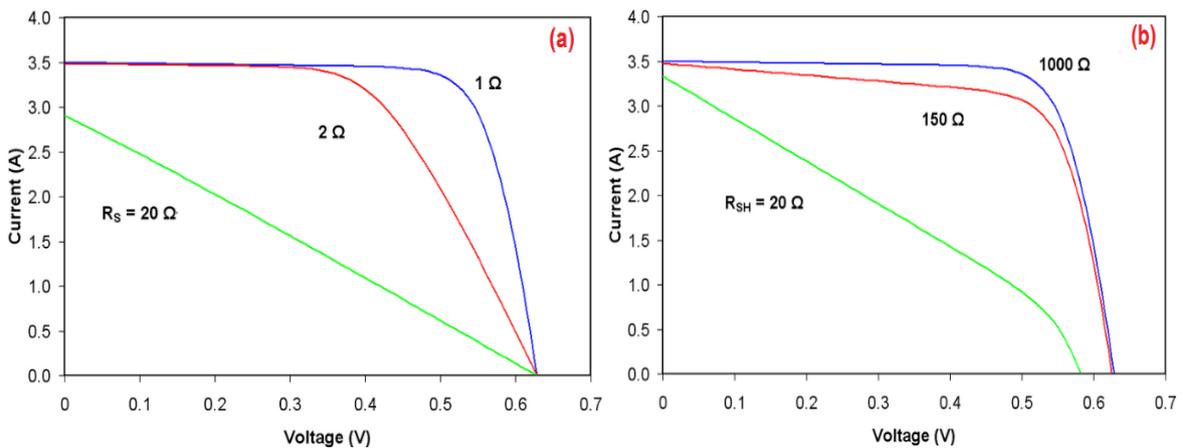


Figure I.9 : Influence de la résistance.

Chapitre I : Généralités sur la conversion photovoltaïque et les panneaux solaires

I.4.4.2 Influence de l'éclairement

La figure (I.10) présente la caractéristique I-V d'un panneau 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 [7].

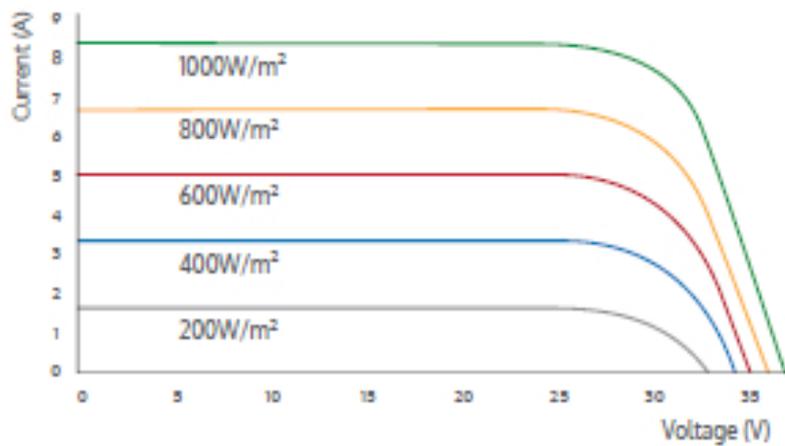


Figure I.10 : Influence de l'éclairement sur I-V.

I.4.4.3 Influence de la température

On peut observer l'effet de la température sur la caractéristique I-V. Comme le montre la figure (I.11), 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 [7].

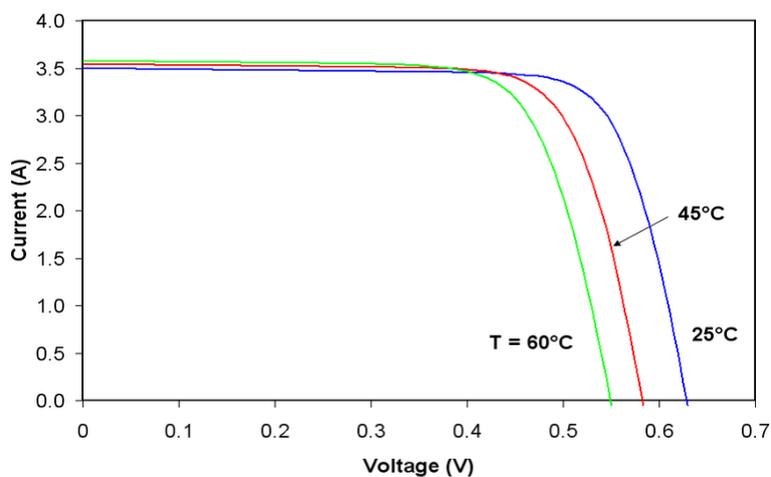


Figure I.11: Influence de la température sur I-V.

Chapitre I : Généralités sur la conversion photovoltaïque et les panneaux solaires

I.5 Panneaux solaires

Le panneau photovoltaïque est donc composé de plusieurs cellules associées en série et/ou parallèle, disposées en rangées. Cet assemblage de cellules se fait de manière différente suivant les technologies et peut entraîner des pertes supplémentaires à celles déjà évoquées précédemment au sein de la cellule (pertes optiques et électriques) [1].

I.5.1 Encapsulation des cellules photovoltaïque

Pour connecter les cellules en série, on relie grâce à un contact à base d'étain Sn ou d'argent Al le contact (-) en face avant d'une cellule au (+) de la face arrière de la cellule suivante. Une fois ces connexions faites, on encapsule les cellules, la plupart du temps de l'EVA (éthylène-vinyle acétate), transparente et d'indice proche de celui du verre. Cette enrobage est pris en sandwich entre deux supports : en face avant, du verre trempé à haute transmission dans la bande de longueur d'onde de 350 à 1200 nm, en général de 3-4 mm d'épaisseur, et, en face arrière, un film plastique, souvent une feuille de tedlar-aluminium-tedlar. La face avant doit pouvoir résister à la grêle, aux UV et à toutes les intempéries. Il faut aussi protéger la face arrière, la sortie des connexions ainsi que les bords du panneau contre toutes les agressions atmosphériques, l'humidité, etc. L'encapsulation affecte également le rendement des panneaux en raison de ses propriétés optiques qui peuvent parfois se dégrader au cours du temps [1].

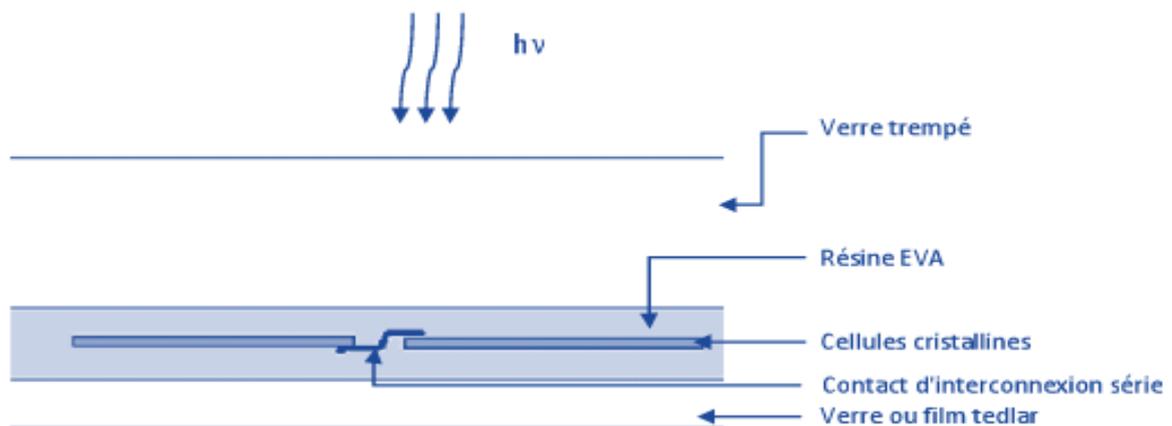


Figure I.12 : Représentation schématique d'une vue en coupe d'un panneau au silicium cristallin

Chapitre I : Généralités sur la conversion photovoltaïque et les panneaux solaires

I.5.2 Association de cellules photovoltaïques

La caractéristique I-V d'une association quelconque de cellules est homothétique de la courbe I-V classique d'une cellule de base.

I.5.2.1 Association en série

Lorsque l'on associe des cellules photovoltaïques en série N_s , les tensions de ces cellules s'additionnent et le courant généré est le même dans toute la branche. La Figure (I.13) montre la caractéristique I-V résultante de l'association en série et le schéma équivalent d'un panneau photovoltaïque [1].

Pour des cellules montées en série on peut écrire : $V_{chaîne} = V_i \times N_s$

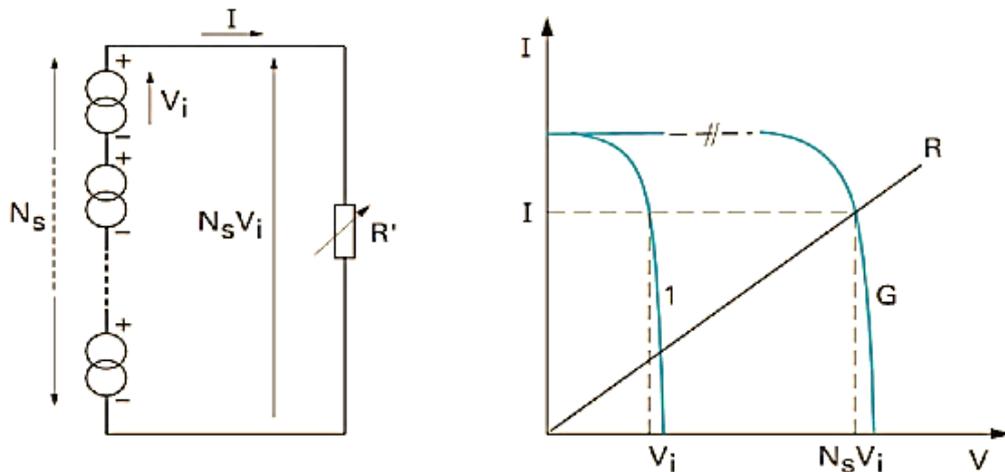


Figure I.13 : Association de N_s cellules en série.

I.5.2.2 Association en parallèle

Cette fois-ci, c'est la tension de chaque cellule qui doit être identique, les courants s'ajoutant. La Figure (I.14) montre la caractéristique I-V résultante de l'association en parallèle et le schéma équivalent d'un panneau photovoltaïque [1].

Pour des cellules montées en parallèle on peut écrire : $I_{chaîne} = N_p \times I_i$

Chapitre I : Généralités sur la conversion photovoltaïque et les panneaux solaires

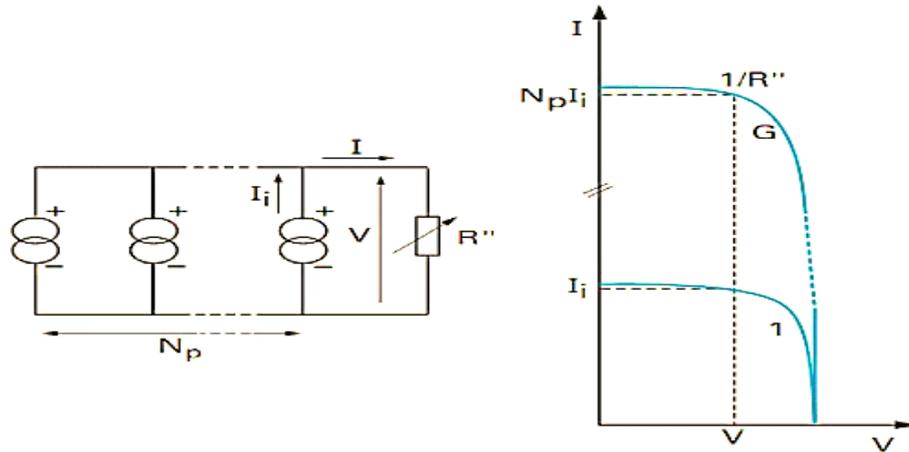


Figure I.14 : Association de N_p cellules en parallèle.

I.5.3 Déséquilibres au sein d'un panneau photovoltaïque et effet de l'ombre

Le phénomène de déséquilibres se produit lorsque les propriétés électriques d'une cellule solaire changent considérablement par rapport au reste des cellules. Le problème de ces assemblages est que le groupement est limité par la cellule la plus faible : Celle de plus faible courant, dans le cas de la mise en série, et de plus faible tension, dans le cas de la mise en parallèle. C'est pour cette raison qu'il est important de sélectionner des cellules les plus identiques possibles lors de la fabrication d'un module [1].

I.5.3.1 Déséquilibre dans une association en série

Considérons maintenant N_s cellules connectées en série, dont l'une est moins performante que l'autre, ainsi elles présentent deux caractéristiques différentes. Le courant généré par N_s cellules photovoltaïques en série étant le même dans toute la branche et limité par le courant de la cellule la plus faible [1].

Il suffit d'additionner les tensions pour tracer la courbe résultante (1) + (2). La cellule ombrée devient polarisée en inverse. Pour une charge nulle (court-circuit) cette cellule sera soumise à une tension inverse égale à la somme des tensions de toutes les autres cellules, d'où le risque de destruction [8]

Chapitre I : Généralités sur la conversion photovoltaïque et les panneaux solaires

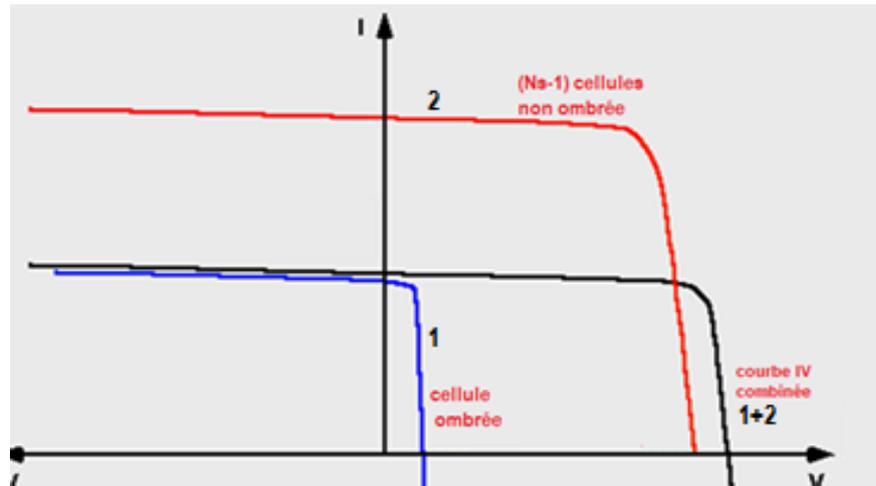


Figure I.15 : Groupement en série avec une cellule occultée.

I.5.3.2 Déséquilibre dans une association en parallèle

On considère N_p cellules connectées en parallèle. Le groupement est limité par la cellule la plus faible : Celle de plus faible tension, dans le cas de la mise en parallèle.

Dans ce cas la tension de circuit ouvert de l'ensemble est inférieure à la tension de circuit ouvert des éléments performants. Une cellule se trouvant dans la branche occultée peut donc être amenée à dissiper une grande puissance électrique entraînant sa dégradation [8].

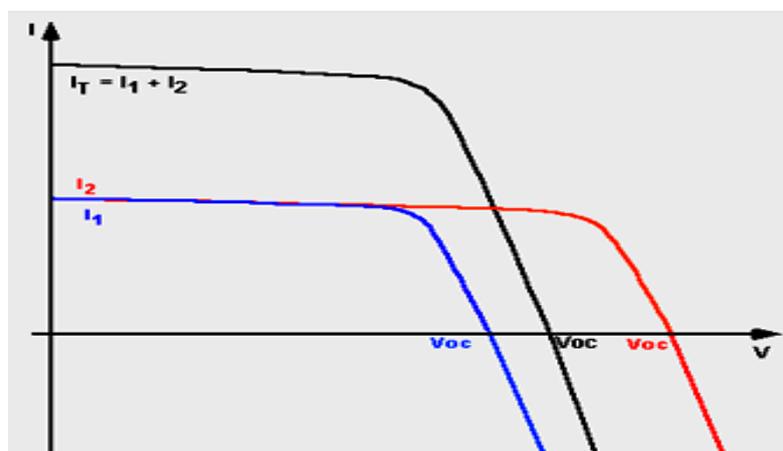


Figure I.16 : Groupement en parallèle avec des cellules occultées.

I.5.3.3 Points chauds (Hot spots)

Un point chaud est une zone d'un panneau photovoltaïque qui a une température très élevée et qui pourrait endommager la cellule ou n'importe quel autre élément du module. Le point chaud pourrait être la cause de plusieurs défauts de la cellule, y compris l'ombrage partiel, la différence entre les cellules [9]. à I_{cc} (Courant de court-circuit), une grande quantité de

Chapitre I : Généralités sur la conversion photovoltaïque et les panneaux solaires

puissance des cellules non ombrées est dissipée dans la cellule ombrée. La chaleur peut craquer le module.

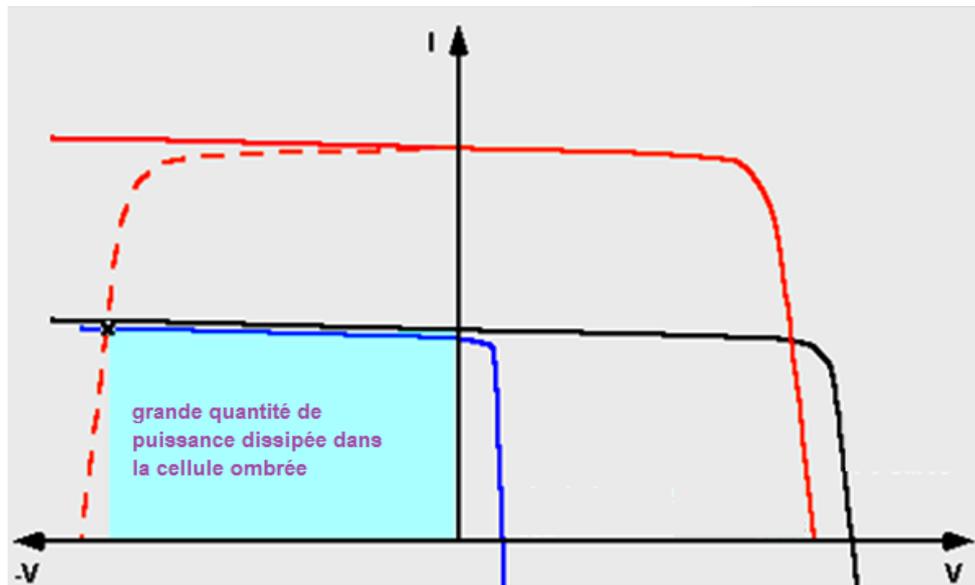


Figure I.17 : Zone ombrée indique la valeur de la capacité perdue dans la cellule ombrée.

I.5.3.4 Protection par diode de dérivation

Pour protéger les panneaux de ce phénomène de hot spot, on installe des diodes de dérivation (by-pass). Si une cellule ou un groupe de cellule est ombragé, le courant passera par la diode de by-pass et on évite ainsi un échauffement trop intense de ces cellules [9].

Les diodes de dérivation sont connectées en inverse entre les bornes de sortie positive et négative d'une cellule solaire et n'ont aucun effet sur sa sortie [10].

En mode de fonctionnement normal, chaque cellule solaire sera polarisée avec polarisation directe et par conséquent les diodes de dérivation se polariseront de manière inverse. Cependant, si une cellule solaire est polarisée en inverse (déséquilibre dans une association en série), sa diode bypass sera polarisée en directe et permettra au courant de circuler depuis les bonnes cellules du circuit extérieur. Ainsi, la diode de dérivation connectée à travers la cellule ombragée maintient le fonctionnement des autres cellules photovoltaïques en créant un chemin électrique pour le courant généré.

Chapitre I : Généralités sur la conversion photovoltaïque et les panneaux solaires

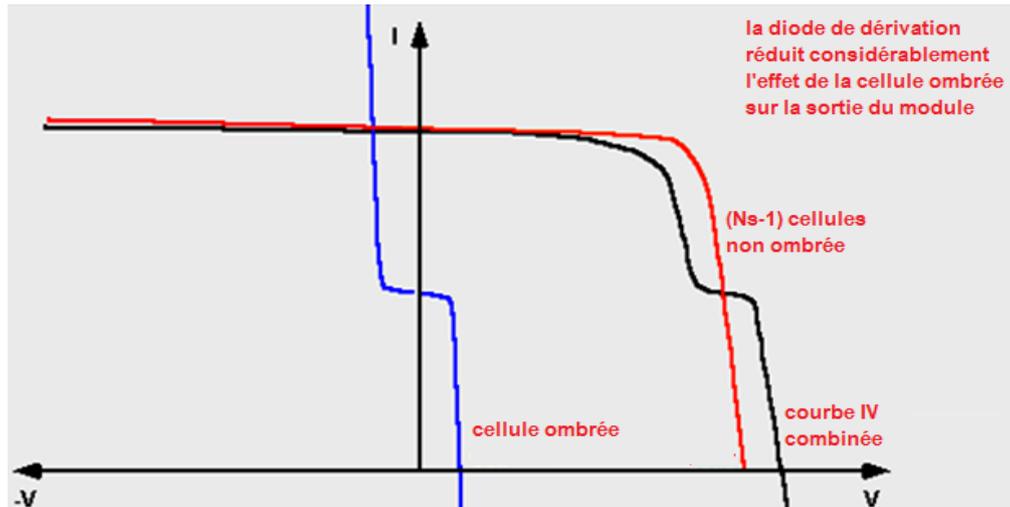


Figure I.18 : Effet de la diode de by-pass sur la caractérisation I-V.

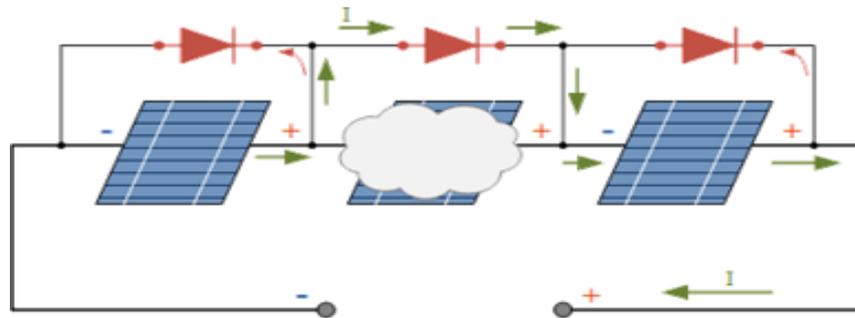


Figure I.19 : Diode de dérivation (by-pass).

Chapitre II : Introduction à MATLAB & Simulink

II.1 Introduction

MATLAB est un logiciel de calcul matriciel à syntaxe simple. Avec ses fonctions spécialisées, MATLAB peut être aussi considéré comme un langage de programmation adapté pour les problèmes scientifiques. Et Simulink c'est l'extension graphique de MATLAB permettant de travailler avec des diagrammes en blocs [11]. Afin d'étudier l'effet de diverses propriétés sur un panneau solaire, nous avons choisi logiciel MATLAB/Simulink. Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques informations simples sur l'utilisation de ce logiciel.

II.2 Qu'est-ce que Simulink ?

Simulink est une interface de programmation visuelle conçue pour rendre les systèmes de modélisation intuitifs. Il offre un moyen de résoudre les équations numériquement à l'aide d'une interface utilisateur graphique, plutôt que d'exiger du code.

Les modèles contiennent des blocs, des signaux et des annotations sur un arrière-plan [12]:

Les blocs : sont des fonctions mathématiques, ils peuvent avoir un nombre variable d'entrées et de sorties.

Les signaux : sont des lignes reliant des blocs, transférant des valeurs entre elles. Les signaux sont des données différentes types, par exemple des nombres, des vecteurs ou des matrices.

Les annotations : de texte ou d'images peuvent être ajoutées au modèle et non utilisées dans les calculs.

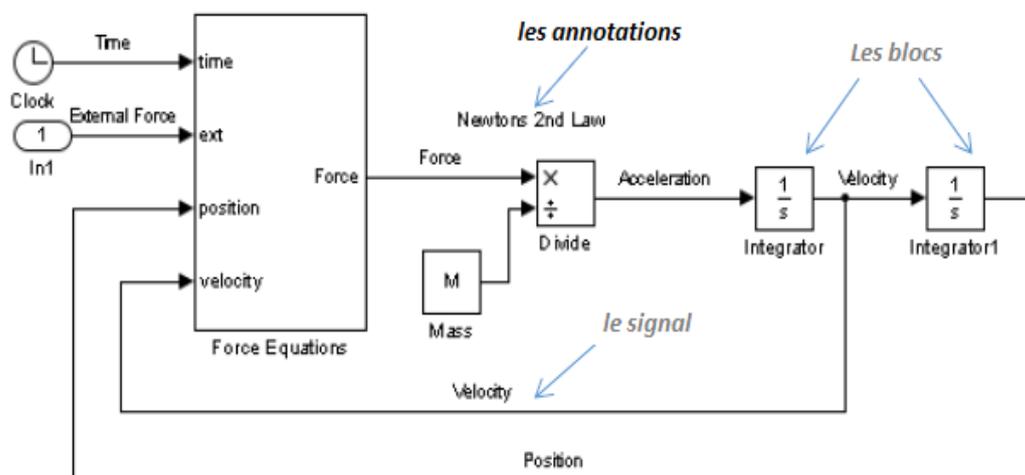


Figure II.1 : Modèle Simulink.

II.3 Barre d'outils Simulink

Au-dessus du fenêtr principal d'un modèle Simulink, se trouve la barre d'outils [12] :

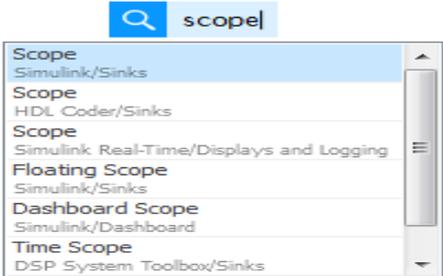


<p>Paramètres du modèle : Tous les paramètres liés à résoudre numériquement les équations du modèle se trouvent dans “Model Configuration Paramètres”.</p>	<p>Exécuter le modèle : Pour exécuter la simulation, appuyez sur le bouton Flèche verte. Sachez qu'il y a différents modes, par exemple 'Normal'. Si vous travaillez avec du matériel le mode sera ‘External’. La zone de texte est combien secondes vous voulez la simulation courir pour.</p>	<p>Construire le modèle : Si votre modèle est en interaction avec le matériel, vous aurez besoin construire le modèle avant peut courir. Le statut actuel est montré en bas à gauche de la Fenêtr Simulink.</p> 
---	--	--

II.4 Travailler avec des blocs

II.4.1 Ajout des blocs au modèle

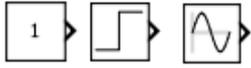
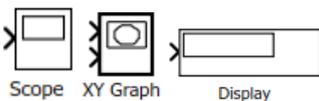
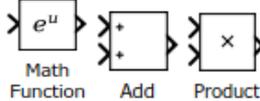
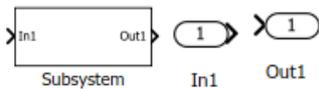
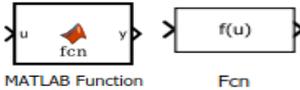
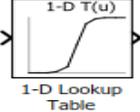
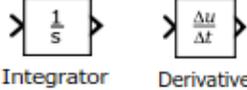
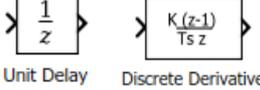
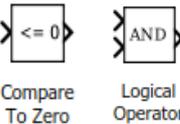
Il existe deux manières d’ajouter des blocs à un modèle : le navigateur de bibliothèque ou la recherche rapide [12] :

	<p>Navigateur de la bibliothèque : Affiche tous les blocs disponibles dans Simulink, triés par dossiers.</p>
	<p>Recherche rapide : Recherchez directement des blocs en cliquant simplement sur l'arrière-plan de votre modèle et en tapant un terme de recherche. Sélectionnez un bloc dans les résultats de la recherche pour l'ajouter rapidement à votre modèle.</p>

Chapitre II :Introduction à MATLAB & Simulink

II.4.2 Vue d'ensemble des bibliothèques

Il existe de nombreuses bibliothèques à Simulink, notamment :

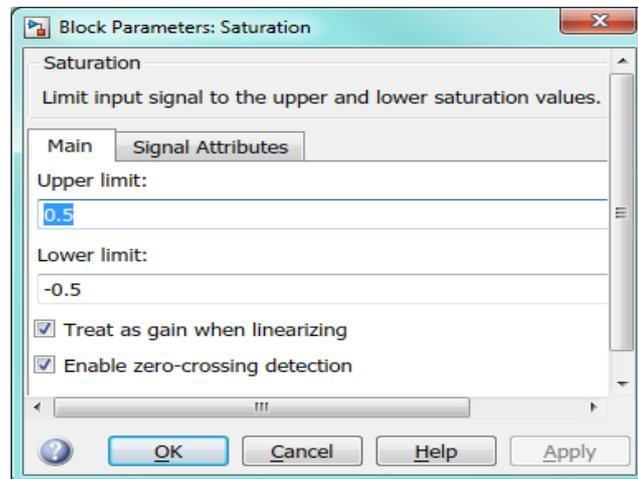
Nom de la bibliothèque	Type de Blocs	Exemples de blocs
 Sources	Fournir des entrées à votre modèle.	 Constant Step Sine Wave
 Sinks	Fournir des moyens d'afficher ou d'exporter des données.	 Scope XY Graph Display
 Math Operations	Fonctions mathématiques communes à appliquer aux données.	 Math Function Add Product
 Ports & Subsystems	Créer différents sous-systèmes.	 Subsystem In1 Out1
 Use Defined Functions	Implémenter des fonctions personnalisées.	 MATLAB Function Fcn
 Lookup Tables	Utiliser des fonctions définies en tant que données discrètes.	 1-D Lookup Table
 Signal Routing	Organiser les signaux des blocs.	 Switch Mux Demux
 Continuous	Systèmes à états continus	 Integrator Derivative
 Discrete	Systèmes à états discrets	 Unit Delay Discrete Derivative
 Logical and Bit Operations	Opérateurs booléens pour les comparaisons	 Compare To Zero Logical Operator

II.5 réglage des blocs

Chaque bloc a ses propres réglages dans paramètres de bloc et propriétés du bloc.

II.5.1 Paramètres de bloc

Double-cliquez sur un bloc pour ouvrir les paramètres de bloc, dans lequel vous modifiez les paramètres de ce bloc spécifique. Par exemple, dans un bloc de saturation, vous pouvez définir les limites supérieure et inférieure [12].

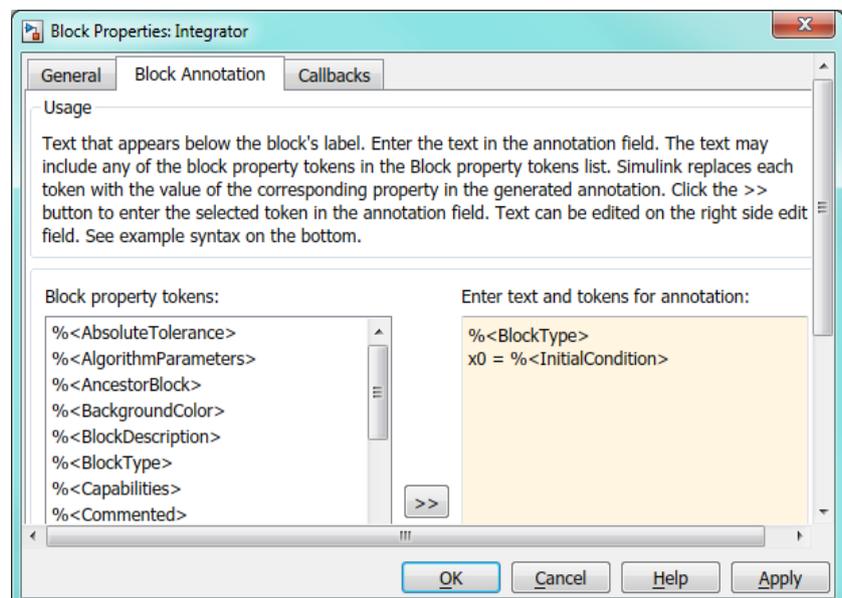


II.5.2 Propriétés du bloc

Faites un clic droit et sélectionnez « Propriétés... » pour ouvrir les propriétés du bloc. Cela contient des paramètres relatifs au fonctionnement du bloc dans le modèle plus grand [12].

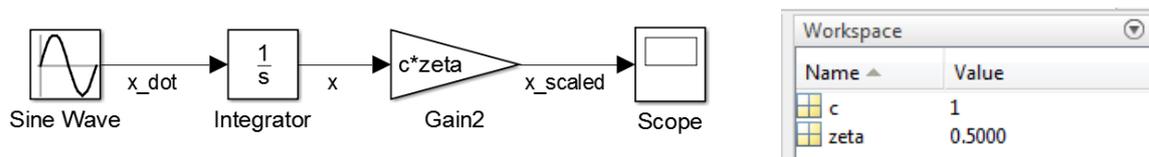
Vous pouvez modifier les informations affichées sur le bloc dans l'onglet Annotation de bloc.

Pour que les propriétés s'affichent sous un bloc dans votre modèle, déplacez-les de gauche à droite à l'aide de la double flèche (>>). Vous pouvez également ajouter votre propre texte autour des différents Propriétés.



II.5.3 Modèles Simulink et variables MATLAB

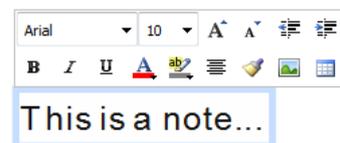
Les blocs Simulink peuvent contenir des variables MATLAB. Ces variables doivent être définies dans l'espace de travail MATLAB avant d'exécuter le modèle Simulink. Dans le cas contraire, une erreur indiquera qu'il existe une fonction ou une variable non définie. Par exemple [12] :



II.6 Annotation du modèle

II.6.1 Annotation de texte et d'image

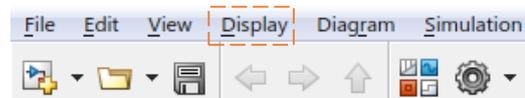
Vous pouvez faire un double-clic n'importe où sur l'arrière-plan de votre modèle et taper un commentaire.



Vous pouvez utiliser les raccourcis à gauche pour afficher l'outil d'annotation. Il existe de nombreuses options de formatage. Vous pouvez insérer texte et images.

II.6.2 Menu d'affichage

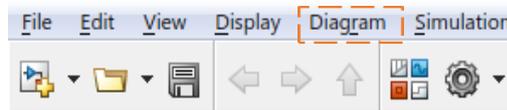
Le menu affichage (Display), vous permet d'activer et de désactiver facilement les informations relatives à vos signaux [12] :



- **Display > Signals & Ports > Port Data Types** : Vous indique le type de données sur chaque signal.
- **Display > Signals & Ports > Signal Dimensions** : Vous montre les dimensions de chaque signal, par exemple. [3 4] vecteur utile si vous avez une erreur d'incompatibilité de dimension.
- **Display > Signals & Ports > Wide Non-scalar Lines** : Donne différentes épaisseurs à chaque signal qui est en réalité une combinaison de signaux. Utile si vous avez une erreur d'incompatibilité de dimension.

II.6.3 Diagramme menu

Vous pouvez faire pivoter un bloc de 90 degrés, ombrer le bloc ou modifier la police du nom du bloc. En sélectionnant l'une de ces commandes dans le menu diagramme (Diagram) [12].

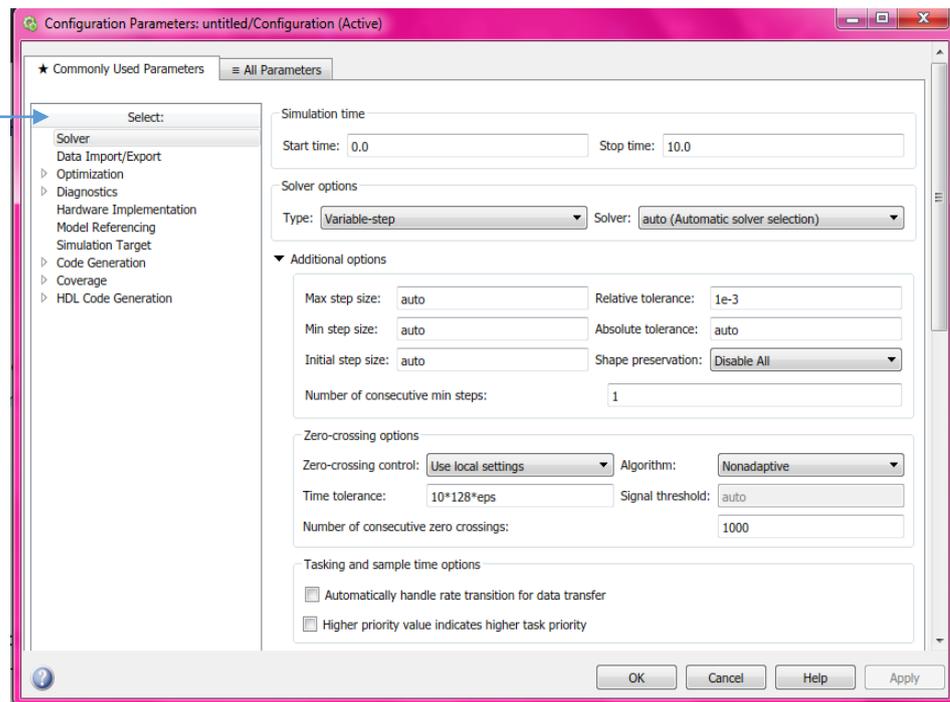


II.7 Solveur

La plupart du temps, vous pouvez simplement utiliser les paramètres par défaut pour exécuter votre modèle. Cependant, vous constaterez parfois que vous souhaitez que le modèle utilise des étapes plus petites ou des étapes de largeur fixe. Tout cela est configurable sur la page de *Solver* des **Configuration Parameters** [12].

Dans la barre de menus de votre modèle, sélectionnez **Simulation ► Model Configuration Parameters**, ou utilisez simplement le raccourci de la barre d'outils 

Une fois ouvert, sélectionnez solveur. Il existe de nombreux paramètres configurables.



-Start/Stop time : Il est suggéré de laisser l'heure de début nulle. Le temps d'arrêt est identique à celui de la barre d'outils située en haut de votre modèle.

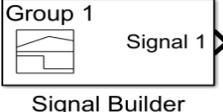
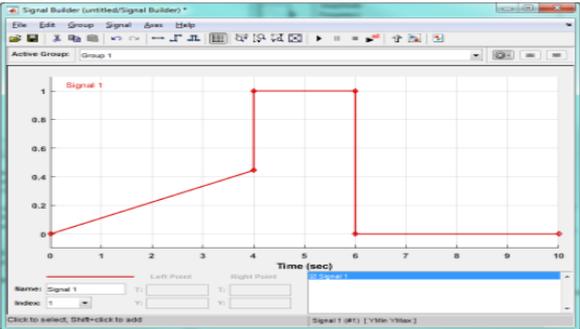
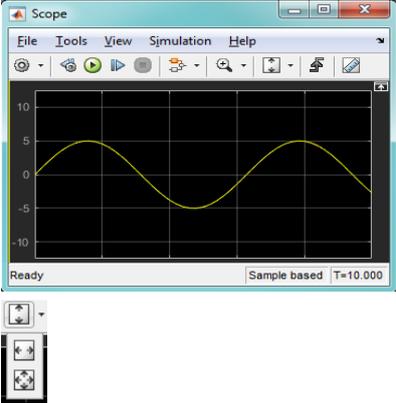
Chapitre II :Introduction à MATLAB & Simulink

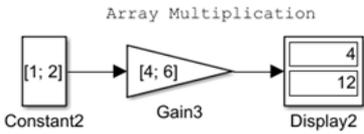
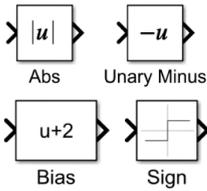
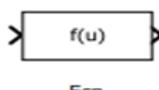
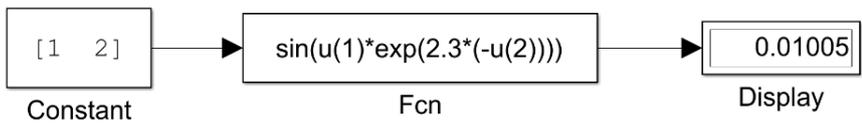
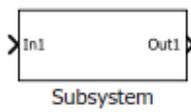
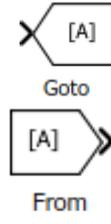
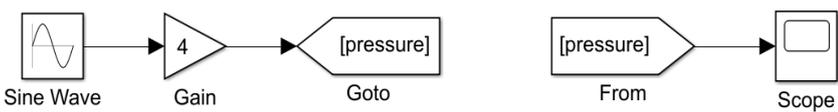
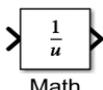
-Il existe deux **types de solveur** [12] :

- **Variable step solver** (par défaut) : Ceci ajustera automatiquement la taille de pas en fonction du modèle. Si vous utilisez pas à pas variable, conservez généralement le solveur par défaut (ode45).
- **Fixed step solver** sera nécessaire pour les modèles à composants discrets. S'il ne comporte pas non plus de composants continus.

II.8 Quelques blocs dans les bibliothèques

Dans le tableau suivant, on présente quelques blocs avec leur fonction [12] :

Bloc	Fonction
 <p>Constant</p>	<p>Constant : est La source la plus simple ; Un bloc qui fournit une valeur constante.</p>
 <p>Signal Builder</p>	<p>Signal Builder : permet de générer des signaux personnalisés à l'aide d'une interface utilisateur graphique (voir à droite).</p> 
 <p>Scope</p>	<p>Scope : trace les entrées en fonction du temps. Il a une barre d'outils étendue.</p> <ul style="list-style-type: none"> • L'icône en forme de loupe vous permet d'effectuer un zoom avant et arrière. • Les icônes de mise à l'échelle 
 <p>Display</p>	<p>Display : Affiche les valeurs dans une zone de texte pendant l'exécution de la simulation.</p>

 <p>XY Graph</p>	<p>XY Graph :Trace l'entrée supérieure X par rapport à l'entrée inférieure Y dans une figure de Simulink.</p>
 <p>Gain</p>	<p>Le bloc Gain peut être utilisé pour multiplier un signal par une valeur constante.</p> 
	<p>Math operations :</p> <p>Il y a beaucoup de blocs pour des fonctions mathématiques spécifiques :</p> <p>Le bloc Abs trouve l'amplitude ou la valeur absolue d'un signal, le bloc Unary Minus rend le signal négatif et le bloc Bias ajoute une constante à un signal. Le bloc sign émet +/- 1 en fonction du signe de l'entrée.</p>
 <p>Fcn</p>	<p>Fcn : Cela vous permet de saisir une expression mathématique à l'aide d'un ensemble restreint d'opérateurs et de fonctions.</p> 
 <p>Subsystem</p>	<p>Subsystem : sont un ensemble de blocs regroupés pour effectuer une tâche particulière. Ils aident à garder les modèles organisés et plus faciles à comprendre.</p>
	<p>Goto / From Blocks : Une autre façon de déplacer les signaux consiste à utiliser les blocs Goto et From.</p> 
 <p>Math Function</p>	<p>Le bloc Math Function peut remplir de nombreuses fonctions différentes: carré, racine carrée, log, réciproque, etc.</p>

II.9 Bibliothèques de Simscape (Foundation library)

Simscape est la plateforme de modélisation physique et multi physique de Simulink. On va retrouver des composants physiques sous forme de bloc de modélisation physique dans la catégorie, le monde Simscape (résistance, condensateur, sources, amortisseur etc...) [13].

On trouve différents blocs dans différents domaines :



Figure II.2 : Librairie de Simscape.

Dans la librairie fondation, on trouve les éléments essentiels des domaines de l'électricité, la mécanique, la thermique, les signaux physiques, etc.

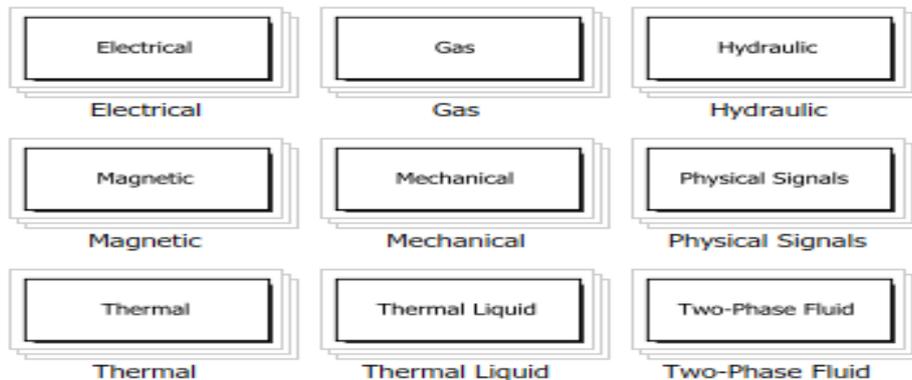


Figure II.3 : Librairie « Foundation Library ».

II.9.1 Électricité (Electrical)

On y trouve les éléments, les sources et les capteurs électriques.

II.9.1.1 Éléments électriques (Electrical Elements)

C'est une bibliothèque dans laquelle on trouve les éléments de base de l'électricité tels des résistances, des capacités, diode, self, amplificateur opérationnel, switch, ainsi que des éléments électromécaniques, de translation et de rotation [13].

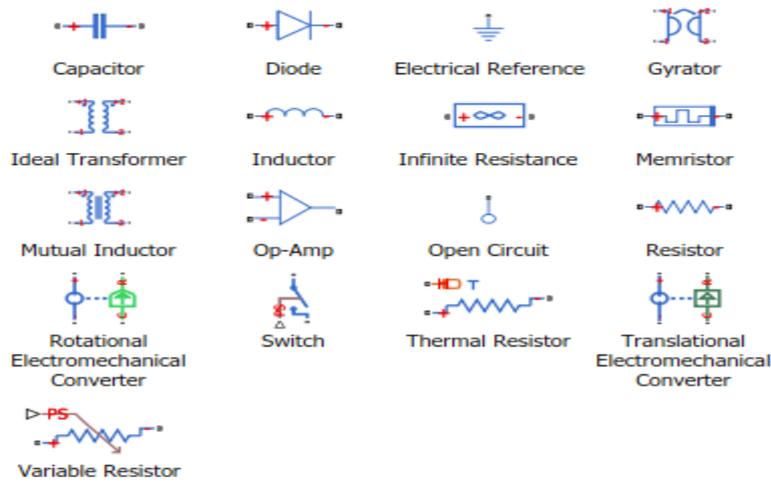


Figure II.4 : Blocs de la bibliothèque « Electrical elements ».

II.9.1.2 Capteurs électriques (Electrical Sensors)

Pour mesurer le courant et la tension, nous avons besoin de capteurs de tension et de courant qu'on trouve dans cette bibliothèque.

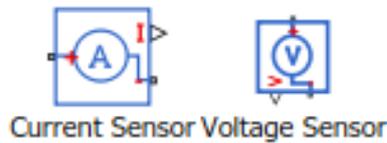


Figure II.5 : Blocs de la bibliothèque « Electrical Sensors ».

II.9.1.3 Sources électriques (Electrical Sources)

Dans cette bibliothèque on trouve différentes sources de tension, de courant, continues ou alternatives et des sources de tension, de courant contrôlées par un courant ou tension.

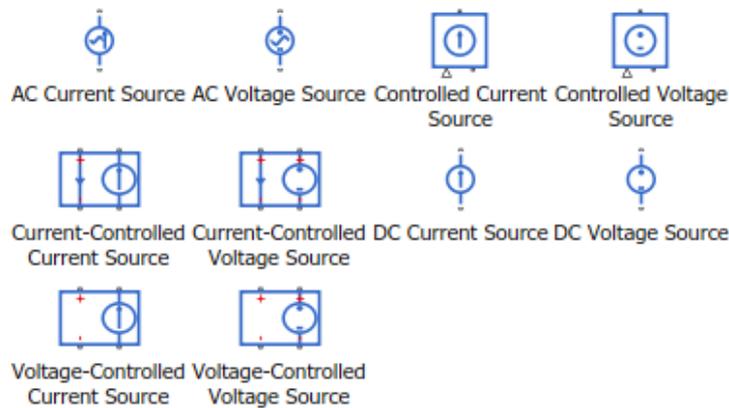
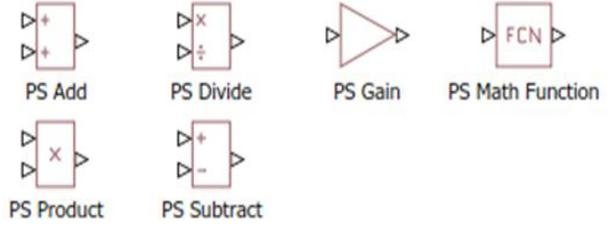
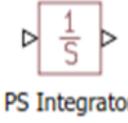


Figure II.6 : Blocs de la bibliothèque « Electrical sources ».

Chapitre II :Introduction à MATLAB & Simulink

II.9.2 Signaux physiques (Physical Signals)

Cette librairie reprend, pour les signaux de type physique de Simscape, quelques blocs équivalents à ceux de Simulink pour réaliser : des opérations mathématiques, une intégration, une constante, etc... [13].

Librairie	Symbole
<p>Functions : Ce sont des fonctions mathématiques de base qui opèrent sur des signaux physiques (entrées/sorties).</p>	 <p>PS Add PS Divide PS Gain PS Math Function</p> <p>PS Product PS Subtract</p>
<p>Linear Operators : Cette librairie se résume à l'intégrateur analogique PS Integrator.</p>	 <p>PS Integrator</p>

Chapitre III : Résultats et discussion

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de la simulation des caractéristiques électrique des panneaux photovoltaïques à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink et on compare avec les résultats expérimentaux mesurés au laboratoire des matériaux semi-conducteurs et métalliques LMSM de l'université de Biskra [14]. L'effet de l'éclairement, la température, l'ombrage partiel et la diode bypass seront aussi étudiés. Nous déterminerons ensuite les paramètres externes du panneau à savoir le courant de court-circuit (I_{cc}), la tension de circuit ouvert (V_{co}), le facteur de forme (FF) et le rendement de conversion photovoltaïque (η).

III.2 Simulation d'un panneau photovoltaïque

Différents modèles peuvent être trouvés dans la littérature pour la simulation de panneaux photovoltaïques. Nous avons choisi l'environnement MATLAB/Simulink pour étudier les effets de l'irradiation, la température et de l'ombrage sur les performances des panneaux photovoltaïque car MATLAB est aujourd'hui un outil universel pour les applications mathématiques et a déjà été utilisé dans la simulation de panneaux photovoltaïques et l'extraction de paramètres de cellules solaires.

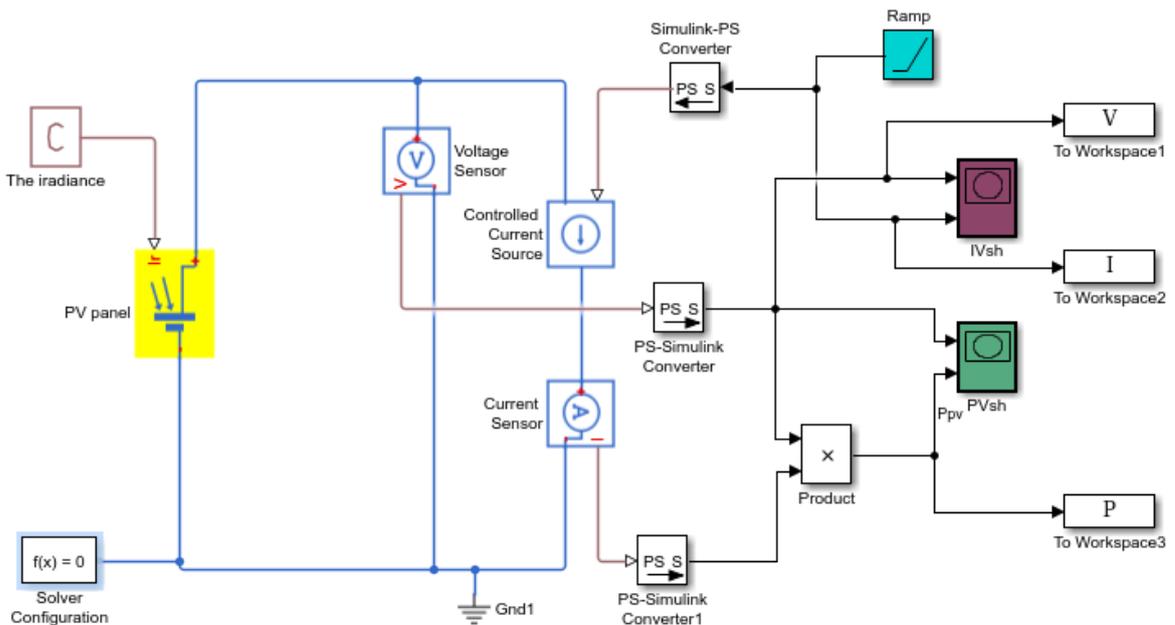


Figure III.1 : *Modèle de panneau photovoltaïque dans l'environnement de Matlab/Simulink.*

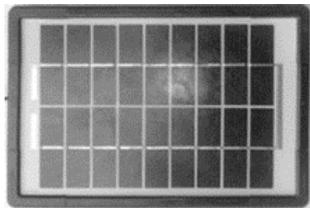
Chapitre III : Résultats et discussion

La figure (III.1) montre un modèle développé pour simuler un panneau photovoltaïque [15]. Après avoir introduire les paramètres nécessaires du panneau photovoltaïque (nombre des cellules, V_{co} , I_{cc} , R_s , R_{sh} , T et G), les simulations sont exécutées à l'aide du ode23t solver. Pendant les simulations, le bloc *Controlled Current Source* balaye le courant de sortie et le bloc *Voltage Sensor* mesure la tension de sortie du module photovoltaïque. Le bloc de produit (*Product*) est utilisé pour multiplier la tension de sortie et le courant de sortie du module photovoltaïque afin d'obtenir la puissance de sortie du module photovoltaïque. Le bloc *To Workspace* envoie la puissance, la tension et le courant de sortie du module photovoltaïque à l'espace de travail MATLAB afin de tracer les courbes des caractéristiques I-V et P-V.

III.3 Analyse et discussion des résultats

III.3.1 Données de simulation

On a choisi le panneau à simuler dont les caractéristiques techniques données par le constructeur sous les conditions standard ($G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 25^\circ\text{C}$, AM1.5). Sont mentionnées sur le tableau suivant :

Panneaux solaire : GD-LIGHT NO.:MP-003WP	
Données techniques :	Puissance de sortie (P_{max}) : 3 W Courant maximal : 0.34 A Tension maximale : 9 V Courant de court-circuit : 0.38 A Tension de circuit ouvert : 11.06 V Poids : 420 g Couleur : noir Durée de vie estimée : 25 ans

Le panneau photovoltaïque choisi pour la simulation est constitué de 18 cellules connectées en série dont les caractéristiques données par le constructeur sont : tension de circuit ouvert

Chapitre III : Résultats et discussion

de 11.06 V, courant de court-circuit de 0.38 A, facteur d'idéalité de 2, résistance en série de 0.13 Ω , résistance en parallèle de 225 Ω .

La caractérisation du panneau photovoltaïque aux conditions standard ($G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 25^\circ\text{C}$, AM1.5) à savoir I-V et P-V sont représentées dans la figure suivante :

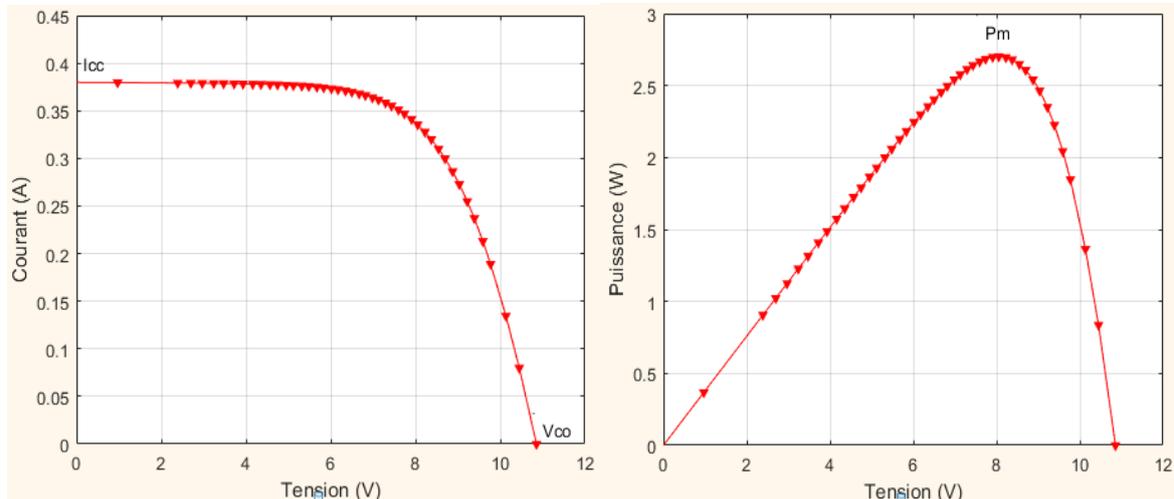


Figure III.2 : Caractéristiques I-V et P-V du panneau photovoltaïque.

On remarque que, dans des conditions de court-circuit, le courant généré est à son maximum (I_{cc}), tandis que lorsque le circuit généré est ouvert, la tension est à son maximum (V_{co}). Dans les deux conditions, l'énergie électrique produite dans la cellule est égale à zéro, alors que dans toutes les autres conditions, lorsque la tension augmente, l'énergie produite augmente également. Elle atteint tout d'abord son maximum (P_m) puis elle chute instantanément jusqu'à approcher la valeur de tension à circuit ouvert.

Les paramètres photovoltaïques externes du panneau sont résumés dans le tableau suivant avec les propriétés techniques donnés par le constructeur :

	I_{cc} (A)	V_{co} (V)	I_m (A)	V_m (V)	P_m (W)	P_{in} (W)	FF	$\eta\%$
Simulation	0.38	10.86	0.33	8.05	2.70	18.36	0.65	14.70
Constructeur	0.38	11.06	0.34	9.00	3.06	18.36	0.69	16.67

Tableau III.1 : Paramètres photovoltaïques externes du panneau.

Chapitre III : Résultats et discussion

III.3.2 Effet de l'éclairement

Pour visualiser l'influence de l'éclairement, on fixe la température ambiante $T = 25^{\circ}\text{C}$ et on fait varier l'éclairement de 400 W/m^2 à 1000 W/m^2 .

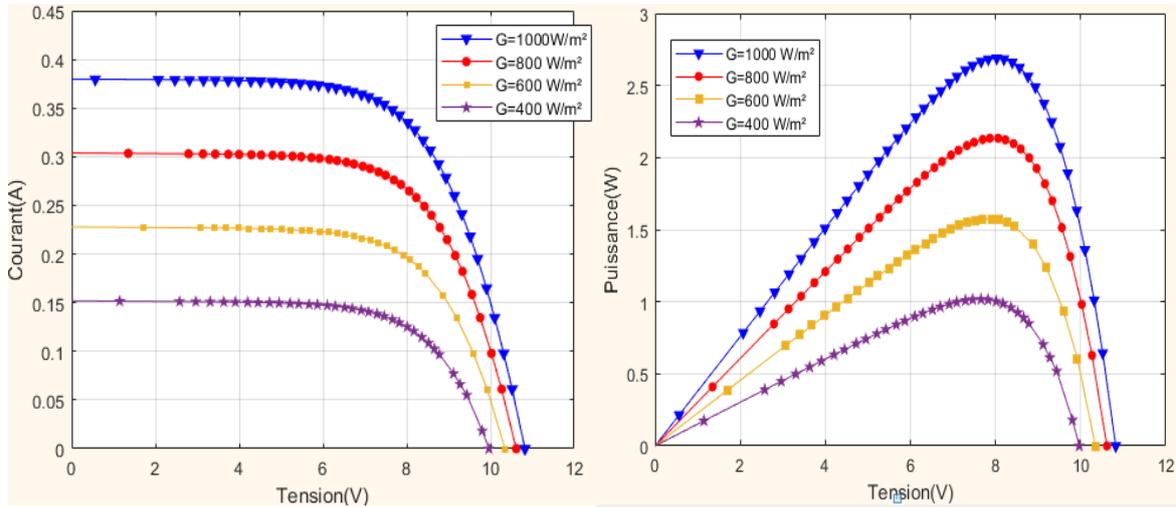


Figure III.3 : Résultats de simulation des caractéristiques I-V et P-V pour différents éclairements.

D'après la figure (III.3), on remarque une forte diminution du courant de court-circuit par rapport à l'éclairement (G) et une faible diminution de la tension du circuit ouvert. C'est qui prouve que le courant de court-circuit de la cellule dépend de l'éclairement (Le courant de court-circuit dépend du nombre de photons c'est-à-dire du nombre de paires générées cela dépend donc directement de l'intensité lumineuse). Par contre la tension de circuit ouvert subit une légère augmentation. On remarque aussi sur la figure (III.3) que, l'éclairement influe proportionnellement sur la puissance maximale.

Le tableau suivant donne les paramètres photovoltaïques externes déterminés à partir des caractéristiques I-V et P-V du panneau solaire en fonction de l'éclairement :

	$I_{cc}(\text{A})$	$V_{co}(\text{V})$	$I_m(\text{A})$	$V_m(\text{V})$	$P_m(\text{W})$	$P_{in}(\text{W})$	FF	$\eta\%$
$G = 1000 \text{ W/m}^2$	0.38	10.86	0.33	8.05	2.70	18.36	0.65	14.70
$G = 800 \text{ W/m}^2$	0.30	10.62	0.26	7.82	2.13	14.68	0.66	14.50
$G = 600 \text{ W/m}^2$	0.22	10.35	0.19	7.91	1.57	11.01	0.66	14.16
$G = 400 \text{ W/m}^2$	0.15	9.96	0.13	7.65	1.01	7.34	0.67	13.80

Tableau III.2 : Paramètres photovoltaïques externes pour différents éclairements.

Chapitre III : Résultats et discussion

La modification de l'éclairement sur une cellule solaire modifie tous les paramètres de la panneau photovoltaïque, notamment le courant de court-circuit I_{cc} , le facteur de forme FF et le rendement η .

III.3.3 Effet de la température

Pour visualiser l'influence de la température, on fixe l'éclairement $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et on fait varier la température de 0°C à 75°C .

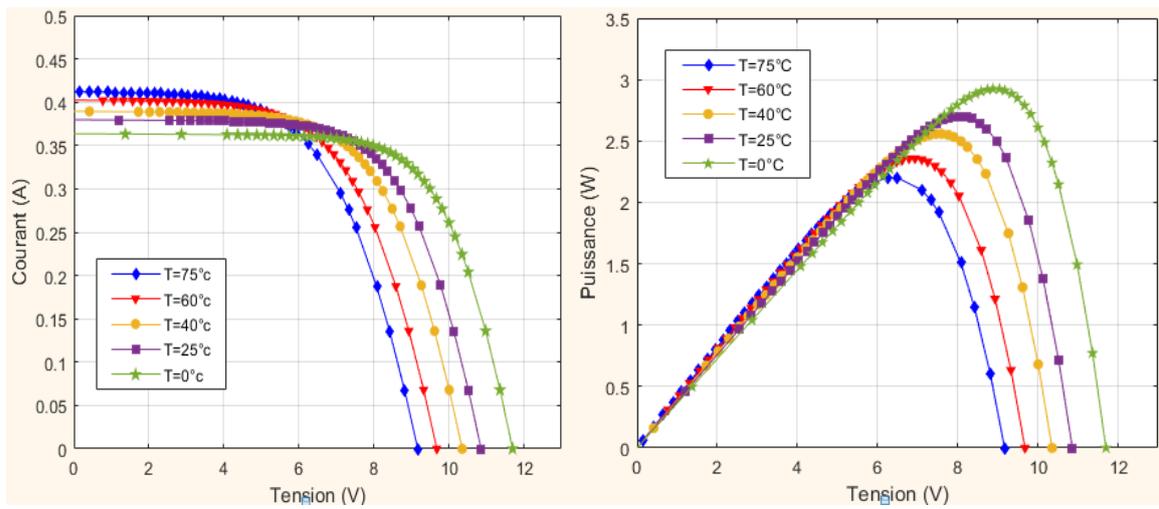


Figure III.4 : Résultats de simulation des caractéristiques I-V et P-V pour différents température.

On constate d'après la figure (III.4) que l'effet de l'augmentation de la température fait diminuer la tension du circuit ouvert, contrairement au courant de court-circuit qui augmente légèrement. En plus, on remarque que l'augmentation de la température entraîne la diminution de la puissance.

Le tableau suivant donne les paramètres photovoltaïques externes déterminés à partir des caractéristiques I-V et P-V du panneau solaire en fonction de la température :

	I_{cc} (A)	V_{co} (V)	I_m (A)	V_m (V)	P_m (W)	P_{in} (W)	FF	$\eta\%$
$T = 0^\circ\text{C}$	0.36	11.7	0.32	9.04	2.92	18.36	0.69	15.91
$T = 25^\circ\text{C}$	0.37	10.86	0.33	8.05	2.70	18.36	0.65	14.70
$T = 40^\circ\text{C}$	0.38	10.36	0.33	7.59	2.55	18.36	0.63	13.93
$T = 60^\circ\text{C}$	0.40	9.67	0.34	6.93	2.35	18.36	0.60	12.84
$T = 75^\circ\text{C}$	0.41	9.17	0.34	6.49	2.20	18.36	0.58	11.98

Tableau III.3 : Paramètres photovoltaïques externes pour différents températures.

Chapitre III : Résultats et discussion

La tension en circuit ouvert diminue avec la température en raison de la dépendance thermique de I_S :

$$V_{co} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{cc}}{I_S}\right) \quad (\text{III-1})$$

L'équation pour I_S d'un côté d'une jonction p-n est donnée par :

$$I_S = qS \frac{D_{n,p} n_i^2}{L_d N_D} \quad (\text{III-2})$$

Où :

n_i : est la concentration en porteurs intrinsèques pour le silicium :

$$n_i = N_C N_V e^{-\frac{E_g}{kT}} \quad (\text{III-3})$$

Où :

N_C : La densité d'états dans la bande de conduction.

N_V : La densité d'états dans la bande de valence.

Dans les équations ci-dessus, de nombreux paramètres ont une certaine dépendance à la température, mais l'effet le plus significatif est dû à la concentration intrinsèque en porteurs, n_i . La concentration en porteurs intrinsèques dépend de la température. En effet, la température plus élevées donnant les concentrations en porteurs intrinsèques plus élevées) [17].

Chapitre III : Résultats et discussion

III.3.4 Effet d'ombrage partiel

Dans cette partie, on présente les résultats de l'effet d'ombrage partiel du panneau photovoltaïque sur ces caractéristiques électriques en 4 cas :

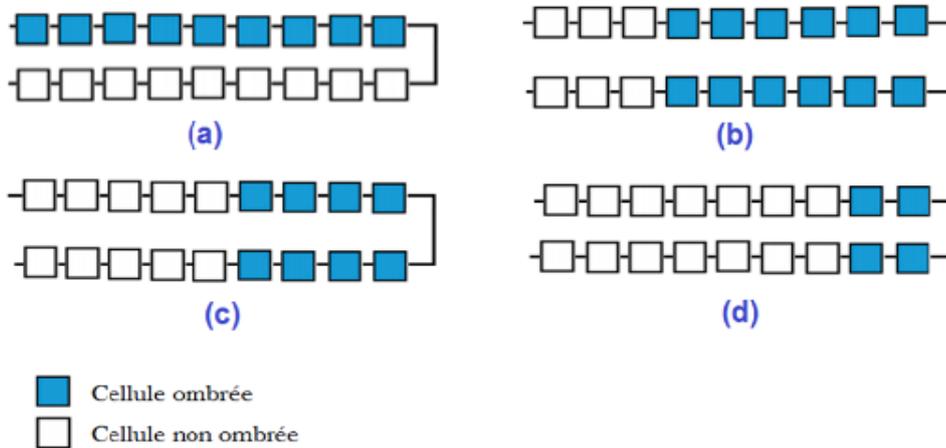


Figure III.5 : Cas de l'ombrage partiel :

Cas (a) : 9 cellules ombrées, Cas (b) : 12 cellules ombrées.

Cas (c) : 8 cellules ombrées, Cas (d) : 4 cellules ombrées.

Il faut noter qu'on doit réduire l'éclairement des cellules ombrées jusqu'à $G = 100 \text{ W/m}^2$ pour tous les cas.

Cas (a) : Dans ce cas, nous divisons le nombre de cellules en 9 cellules ombrées et 9 cellules non ombrées avec un faible éclairement pour les cellules ombrées.

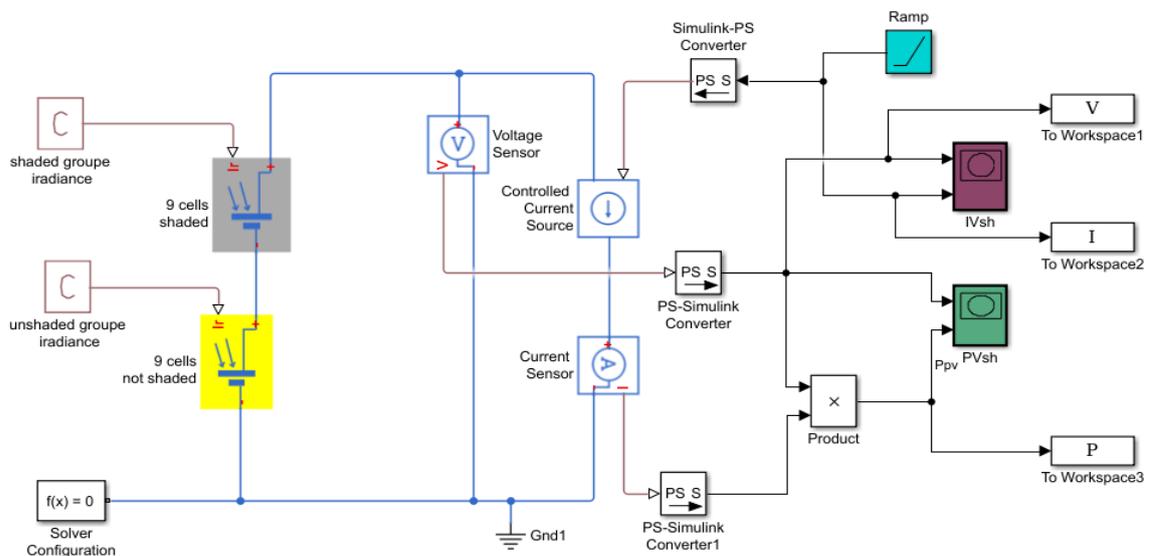


Figure III.6 : Modèle de panneau photovoltaïque (9 cellules ombrées).

Chapitre III : Résultats et discussion

La caractérisation du panneau photovoltaïque I-V et P-V de 18 cellules non ombrées et 9 cellules non ombrées. Les résultats de simulation à température ambiante et éclairement constants ($G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 25^\circ\text{C}$, AM1.5, l'éclairement des cellules ombrées $G = 100 \text{ W/m}^2$) sont montrés sur la figure (III.7).

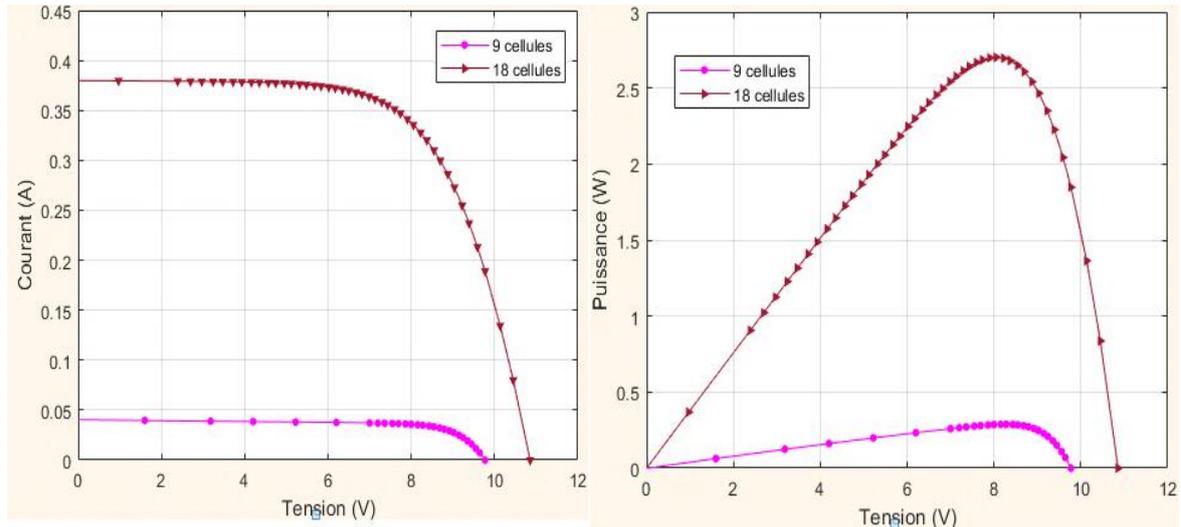


Figure III.7 : Résultats de simulation des caractéristiques I-V et P-V de 18 cellules non ombrées et 9 cellules non ombrées.

Le tableau suivant donne les paramètres photovoltaïques externes déterminés à partir des caractéristiques I-V et P-V du panneau solaire pour le cas (a) :

	I_{cc} (A)	V_{oc} (V)	I_m (A)	V_m (V)	P_m (W)	P_{in} (W)	FF	$\eta\%$
18 cellules	0.38	10.86	0.33	8.05	2.70	18.36	0.65	14.70
9 cellules	0.04	9.77	0.03	8.54	0.28	18.36	0.69	1.52

Tableau III.4 : Paramètres photovoltaïques externes de 18 cellules non ombrées et 9 cellules ombrées.

Chapitre III : Résultats et discussion

Pour le cas (b) (12 cellules ombrées) :

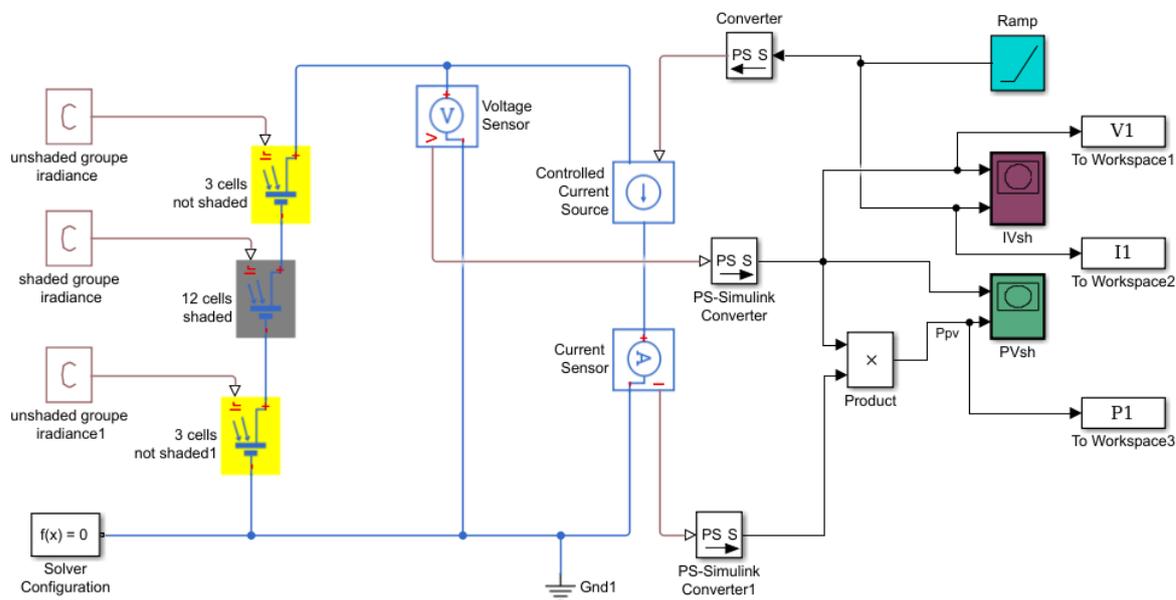


Figure III.8 : Modèle de panneau photovoltaïque (12 cellules ombrées).

De la même manière, on traite les autres cas (c et d).

Les courbes I-V et P-V pour les quatre cas sont illustrées par la figure ci-dessous :

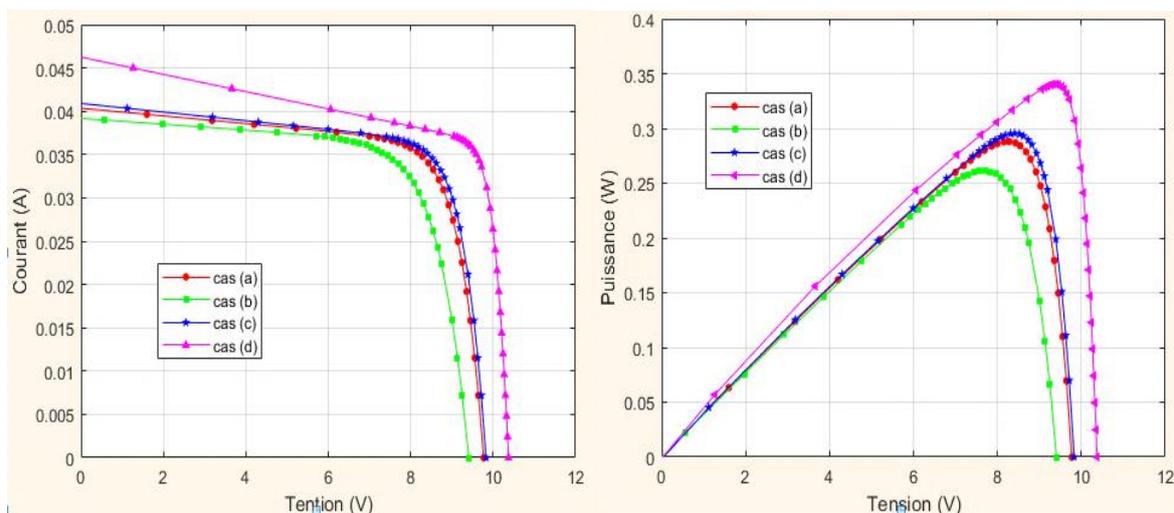


Figure III.9 : Résultats de simulation des caractéristiques I-V et P-V pour les cas (a), (b), (c) et (d).

Chapitre III : Résultats et discussion

Le tableau suivant donne les paramètres photovoltaïques externes déterminés à partir des caractéristiques I-V et P-V du panneau solaire pour les cas (a), (b), (c) et (d) :

	$I_{cc}(A)$	$V_{oc}(V)$	$I_m(A)$	$V_m(V)$	$P_m(W)$	$P_{in}(W)$	FF	$\eta\%$
Cas (a)	0.040	9.77	0.03	8.28	0.28	18.36	0.69	1.52
Cas (b)	0.039	9.4	0.033	7.71	0.26	18.36	0.70	1.41
Cas (c)	0.041	9.82	0.034	8.41	0.29	18.36	0.72	1.57
Cas (d)	0.046	10.37	0.035	9.45	0.34	18.36	0.71	1.85

Tableau III.5 : Paramètres photovoltaïques externes du panneau solaire pour les cas (a), (b), (c) et (d).

L'effet du nombre de cellules ombrées est évidemment clair sur les courbes caractéristiques I-V et P-V du panneau photovoltaïque.

On remarque que l'ombrage partiel étudiées affecte négativement les caractéristiques I-V et P-V du panneau solaire car les cellules sont liées en série. Le courant généré par 18 cellules solaire en série étant le même dans toute le panneau photovoltaïque et limité par le courant de la cellule la plus faible. Les cellules ombrées deviennent polarisées en inverse. Alors les cellules ombrées seront soumises à une tension inverse égale à la somme des tensions de toutes les autres cellules. Sous certaines conditions, les cellules les plus faible peut alors se comporter comme des cellules réceptrices, dissipant la puissance générée par les cellules les plus forte (déséquilibre dans une association en série) [17].

Pour résoudre ces problèmes, nous ajoutons une diode bypass dans le modèle de simulation pour les quatre cas (voir III.3.6).

III.3.5 Effet de facteur d'ombrage

Le facteur d'ombrage F_S est défini par l'équation suivant [15] :

$$F_S = \frac{G_{TS}}{G_T} \quad (\text{III-4})$$

Où :

G_{TS} : représente l'éclairement énergétique sur la surface ombrée.

G_T : représente l'éclairement énergétique sur la surface non ombrée.

Chapitre III : Résultats et discussion

Le tableau suivant présente les cas étudiés dans ce travail, avec des conditions de test standard, ce qui signifie que $G=1000 \text{ W/m}^2$, $T = 25 \text{ °C}$ et AM1,5, Avec 9 cellules ombrées et 9 cellules non ombrées (cas (a) sur la figure (III.5))

	Eclairement des cellules solaires (W / m^2)		Facteur d'ombrage %
	Groupe non ombrée (G_T)	Groupe ombrée (G_{TS})	
Cas 1	1000	800	80
Cas 2	1000	600	60
Cas 3	1000	400	40
Cas 4	1000	200	20
Cas 5	1000	10	1

Tableau III.6 : Cas étudiés pour l'effet de facteur d'ombrage.

Les courbes I-V et P-V pour les cas énumérés dans le tableau sont illustrées par la figure suivante :

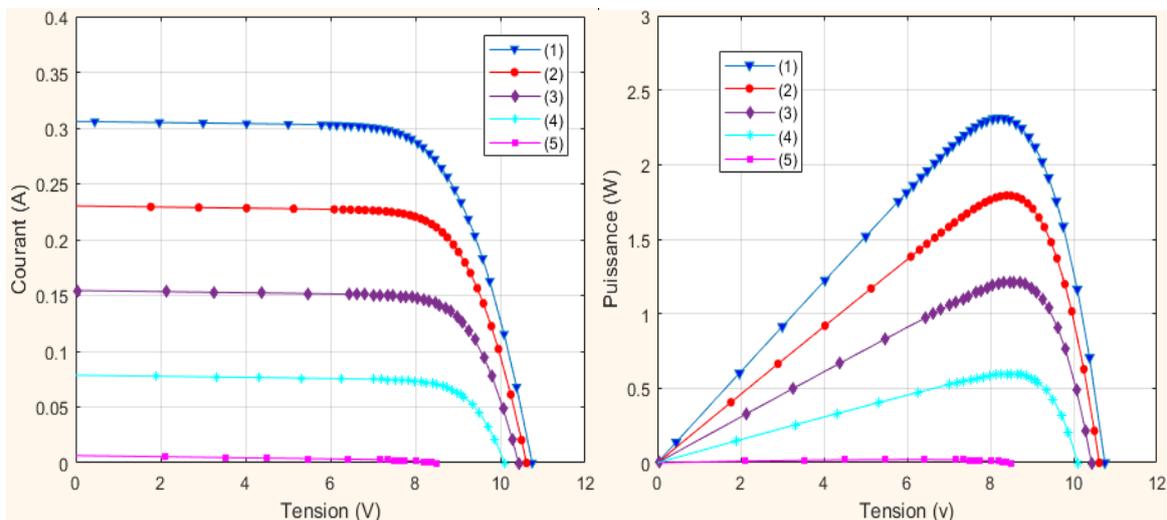


Figure III.10 : Effet de facteur d'ombrage.

On constate que chaque fois qu'on change le facteur d'ombrage du panneau photovoltaïque, le courant de court-circuit et la puissance maximale sont proportionnels au niveau d'éclairement du panneau tandis que la tension de circuit ouvert presque ne change pas.

Chapitre III : Résultats et discussion

Les variations de puissance peuvent être expliquées par les changements dans les conditions d'irradiation et de température pendant la simulation.

Pour résoudre ces problèmes, nous ajoutons une diode bypass du modèle de simulation pour tous les cas.

III.3.6 Effet de diode bypass

Le bloc de diode est connecté en antiparallèle au bloc de cellules solaires ombrées :

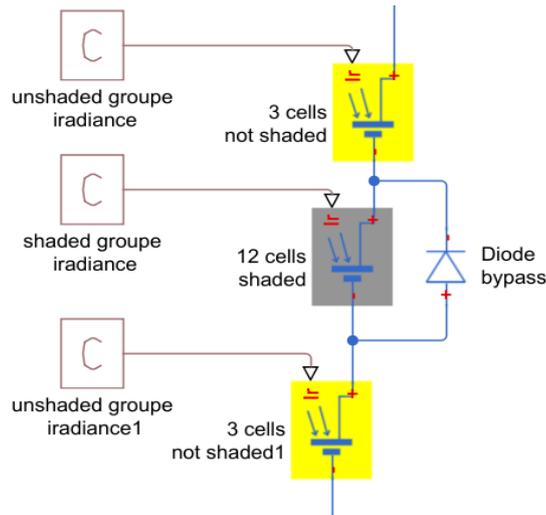


Figure III.11 : Bloc des cellules solaires avec diode de dérivation (bypass) [16].

Les courbes I-V et P-V pour les quatre cas sont illustrées par la figure suivante :

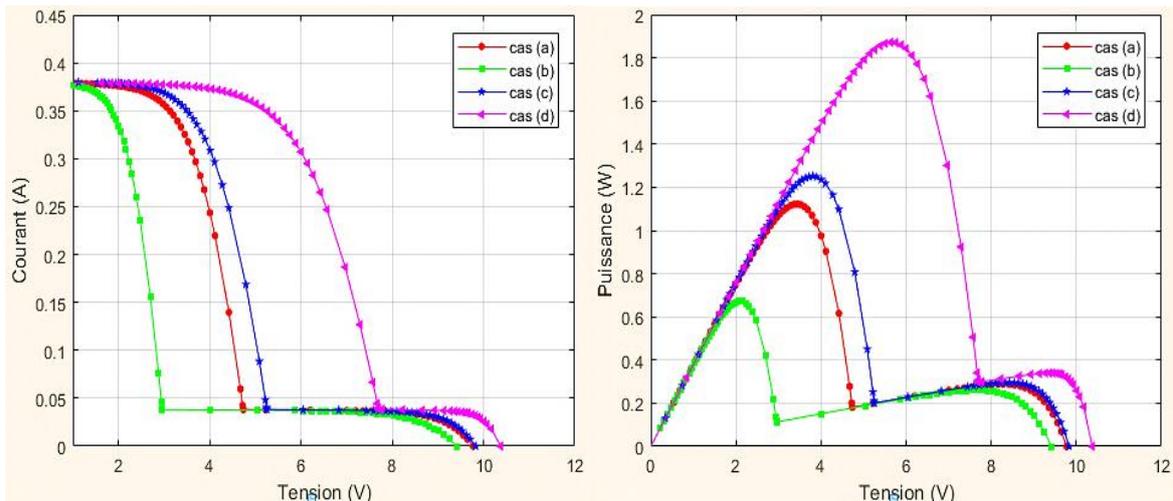


Figure III.12 : Résultats de simulation des caractéristiques I-V et P-V Pour les cas (a), (b), (c) et (d) avec la diode bypass.

Chapitre III : Résultats et discussion

L'effet d'une diode de dérivation (bypass) sur une courbe I-V peut être déterminé en recherchant tout d'abord la courbe I-V des cellules solaires ombrées avec une diode de dérivation, puis en combinant cette courbe avec d'autres courbes I-V des cellules solaires non ombrées, la même chose pour la courbe P-V. Néanmoins, l'utilisation de la diode bypass induit des perturbations de la courbe caractéristique, modifiant le point de puissance maximal du module.

III.3.7 Effet de facteur d'ombrage et diode bypass

Les courbes I-V et P-V pour les cinq cas avec la diode de dérivation sont illustrées par la figure suivante :

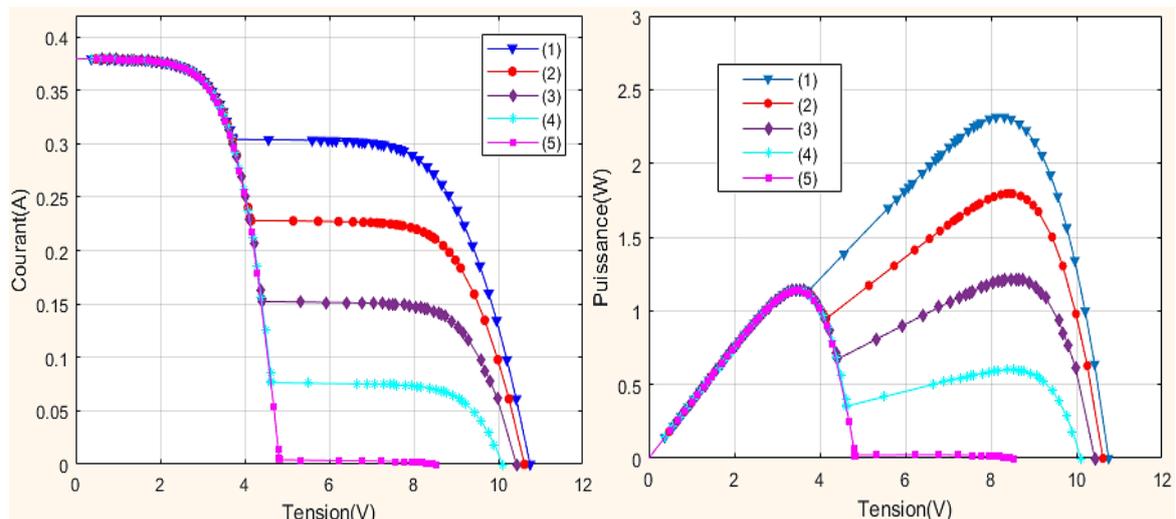


Figure III.13 : *Effet de facteur d'ombrage et diode bypass (cas (1), (2), (3), (4) et (5)).*

La figure (III.13) montre les caractéristiques I-V et P-V résultantes. Le courant de court-circuit du panneau ne semble pas être affecté par le facteur d'ombrage. Comme les deux groupes ne sont pas également éclairés, la puissance fournie par chaque groupe est différente. La présence d'une diode de dérivation permettra aux cellules non ombrées d'un groupe de conduire leur courant maximal à une irradiation et une température données.

Les résultats obtenus montrent que la puissance photovoltaïque maximale est affectée par l'ombrage partiel. Deux pics locaux apparaissent sur les caractéristiques P-V. Ces pics varient avec le taux de l'ombrage partiel.

Chapitre III : Résultats et discussion

III.4 Comparaison entre la simulation et les résultats expérimentaux

III.4.1 Caractéristiques I-V et P-V

Les caractéristiques I-V et P-V simulées et expérimentales à température et éclairement constants, pour la simulation ($G = 825 \text{ W/m}^2$, $T = 35^\circ\text{C}$).

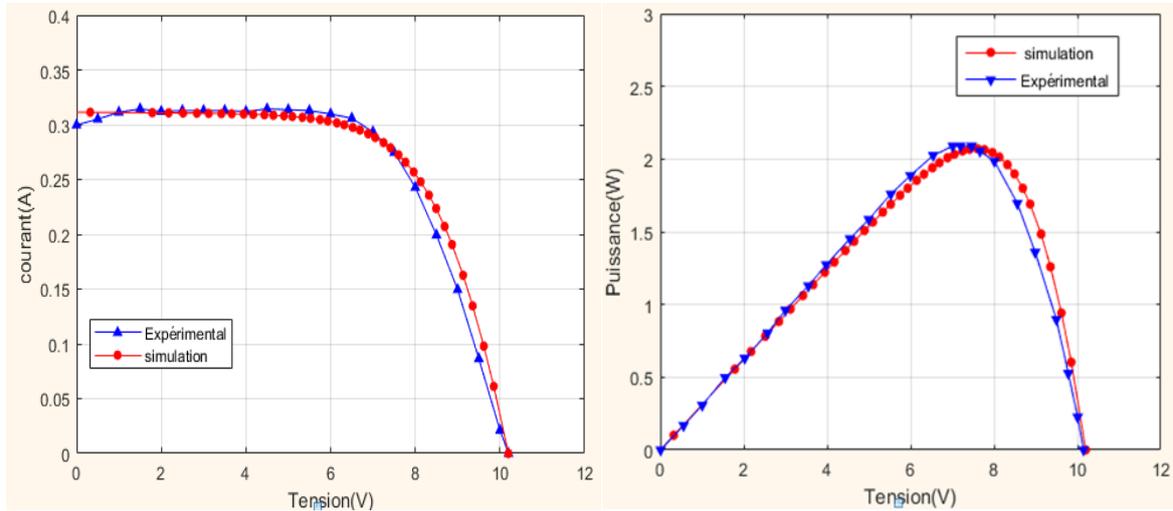


Figure III.14 : *Caractéristiques I-V et P-V du panneau solaire (simulation et expérimental).*

Les paramètres photovoltaïques externes du panneau sont résumés dans le tableau suivant :

	I_{cc} (A)	V_{co} (V)	I_m (A)	V_m (V)	P_{max} (W)	p_{in} (W)	FF	$\eta\%$
Expérimental	0.3	10.2	0.28	7.22	2.02	18.36	0.66	11.01
Simulation	0.31	10.24	0.26	7.66	2.05	15.14	0.64	13.56

Tableau III.7 : *Paramètres photovoltaïques externes du panneau (simulation et expérimental).*

La différence entre les résultats expérimentaux et obtenus par simulation sont acceptables.

III.4.2 Effet d'ombrage partiel

En simulation, on change la température à $T = 35^\circ\text{C}$ et on réduit l'éclairement des cellules ombrées jusqu'à $G = 10 \text{ W/m}^2$ pour les cas (b), (c) et (d), et $G = 25 \text{ W/m}^2$ pour le cas (a) afin d'obtenir des résultats proches des résultats expérimentaux.

Les cas étudiés sont les mêmes que ceux étudiés dans la simulation de la figure (III.5).

Chapitre III : Résultats et discussion

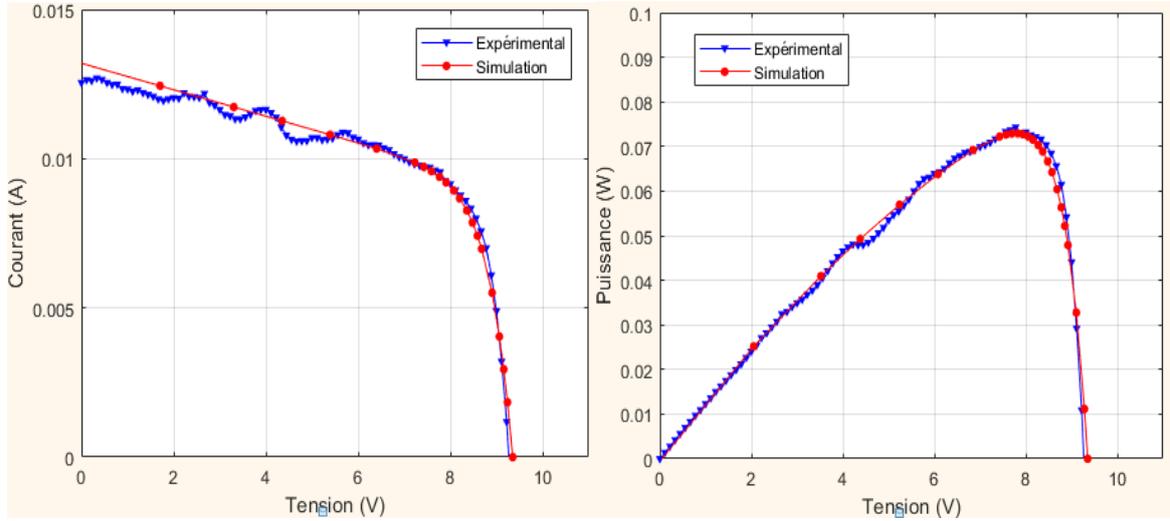


Figure III.15 : Caractéristiques I-V et P-V pour le cas (a) (simulation et expérimental).

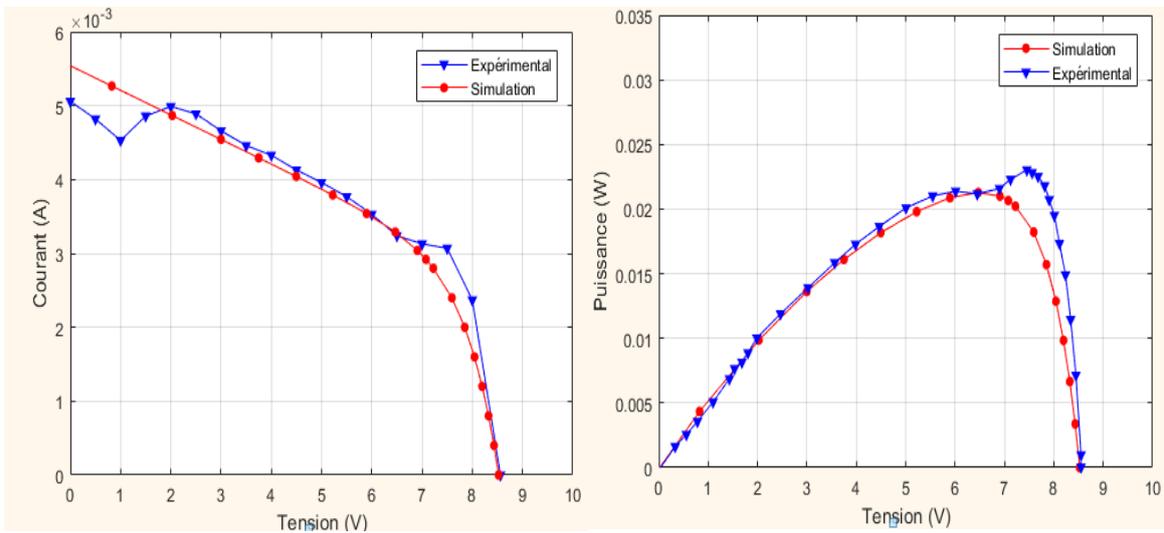


Figure III.16 : Caractéristiques I-V et P-V pour le cas (b) (simulation et expérimental).

Chapitre III : Résultats et discussion

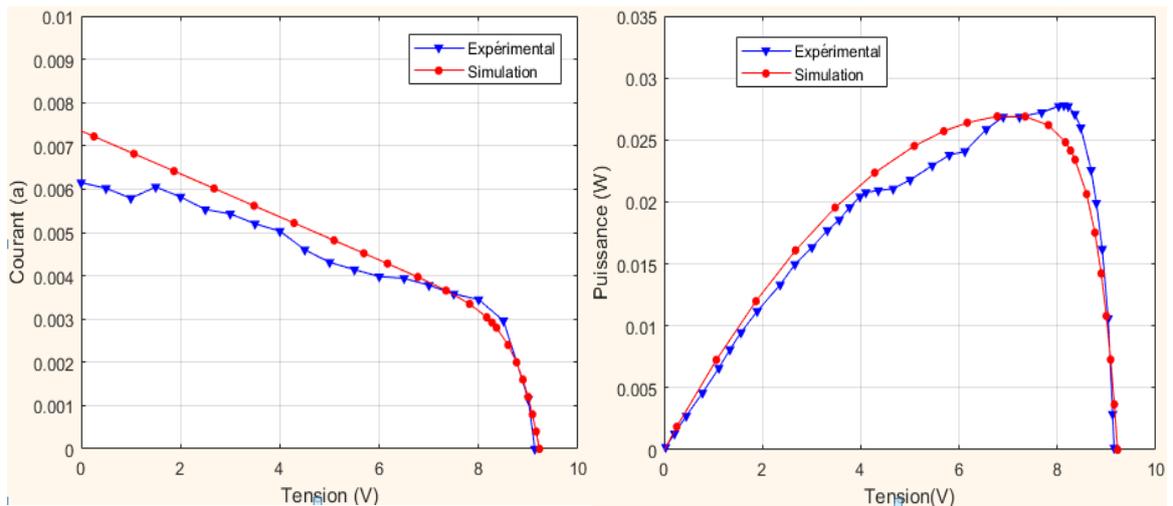


Figure III.17 : Caractéristiques I-V et P-V pour le cas (c) (simulation et expérimental).

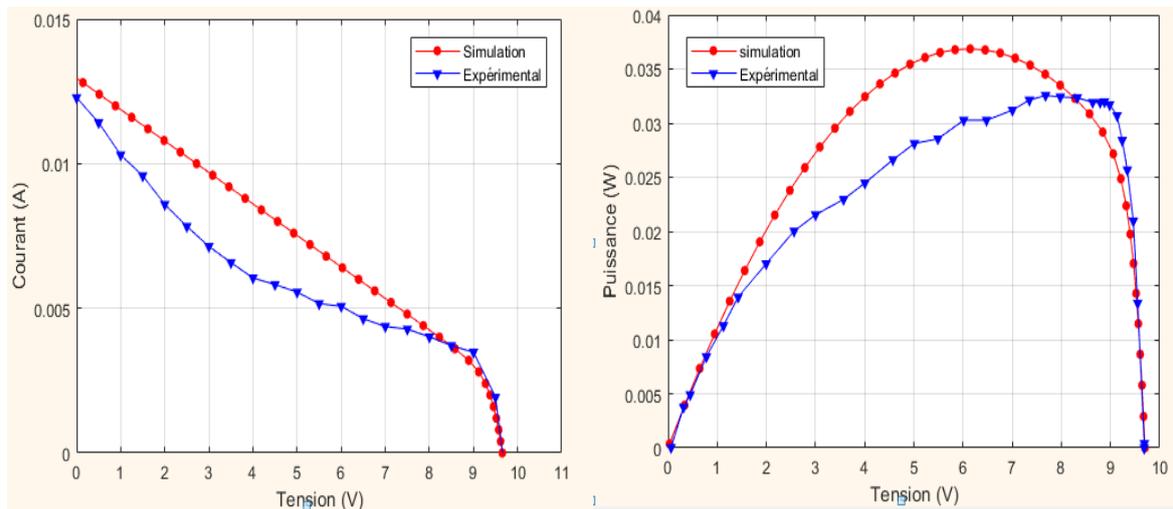


Figure III.18 : Caractéristiques I-V et P-V pour le cas (d) (simulation et expérimental).

Chapitre III : Résultats et discussion

Le tableau suivant donne les paramètres photovoltaïques externes déterminés à partir des caractéristiques I-V et P-V du panneau solaire en cours de caractérisation :

		$I_{cc}(mA)$	$V_{co}(V)$	$I_m(mA)$	$V_m(V)$	$P_m(mW)$	$P_{in}(W)$	FF	$\eta \%$
(a)	<i>Simulation</i>	13.21	9.35	9.32	7.82	72.93	9.18	0.59	0.79
	<i>Expérimental</i>	11.66	9.25	9.58	7.77	74.45	9.18	0.68	0.81
(b)	<i>Simulation</i>	5.51	8.52	3.29	6.46	21.28	4.50	0.45	0.47
	<i>Expérimental</i>	5.06	8.26	3.08	7.44	22.90	4.50	0.55	0.50
(c)	<i>Simulation</i>	7.31	9.22	3.65	7.34	26.88	4.50	0.40	0.59
	<i>Expérimental</i>	6.15	9.13	3.45	8.00	27.60	4.50	0.49	0.61
(d)	<i>Simulation</i>	12.91	9.66	6.01	6.14	36.87	4.50	0.29	0.82
	<i>Expérimental</i>	12.33	9.66	4.25	7.66	32.66	4.50	0.27	0.73

Tableau III.8 : Paramètres photovoltaïques externes pour les 4 cas (simulation et expérimental).

D'après les valeurs obtenues dans le tableau précédent, nous déduisons un bon accord entre les caractéristiques expérimentales mesurées et les caractéristiques obtenues par simulation.

Conclusion générale

Le soleil est la source d'énergie la plus prometteuse pour l'avenir, énergie propre, libre et infinie. L'utilisation photovoltaïque de l'énergie solaire consiste à convertir directement le rayonnement lumineux en électricité. Elle emploie pour cette raison, des modules ou panneaux photovoltaïques.

Notre objectif de ce travail est l'étude de l'influence de quelques paramètres sur les caractéristiques d'un panneau photovoltaïque à partir de la simulation de ce dernier sous MATLAB/Simulink.

D'après les résultats de la simulation obtenus, on peut dire que :

✚ Il a été constaté que le modèle Simscape est un outil simple pour simuler les systèmes photovoltaïques. Il est utile de se concentrer sur l'idéal du travail en saisissant toutes les variables d'entrée des cellules solaires.

✚ La performance du panneau solaire se dégradent avec l'augmentation de la température (La tension du circuit ouvert V_{oc} diminue), et avec l'augmentation de l'intensité de l'éclairement (Le courant de court-circuit I_{cc} augmente).

✚ L'ombrage partiel peut avoir des conséquences importantes sur la performance du panneau photovoltaïque. Les cellules solaires ombragées ne génèrent pas d'énergie, mais commencent à dissiper de l'énergie et se réchauffent. La température peut atteindre un niveau critique, les températures élevées entraînant une diminution de la production photovoltaïque.

✚ La diminution du facteur d'ombrage (degré d'ombre) affecte négativement l'énergie produite par le panneau solaire.

✚ La diode bypass sert à protéger les cellules contre leur fonctionnement en régime inverse, la plupart des fabricants incluent des diodes de dérivation dans leurs modules photovoltaïques afin d'empêcher la formation de points chauds.

Enfin, pour améliorer ce travail, nous préconisons ce qui suit :

- Étudier l'effet de l'ombrage sur un module photovoltaïque complet.
- Augmentation du nombre de diodes de dérivation (bypass) et étudiez leurs effets.

Références

- [1]. T. Mambrini, *Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies*, Paris 11, 2014.
- [2]. N. Debili, *Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage Photovoltaïque*, 2015.
- [3]. A. Chovet, P. Masson, *Physique des semi-conducteurs*. Cours de l'école polytechnique universitaire de Marseille, 2004.
- [4]. N. Oleksiy , *Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités*. Institut national des sciences appliquée de Lyon, 2005.
- [5]. E.T. Hahsim, A.J. Khaled, *Experimental and Simulation for the Effect of Partial Shading on Solar Panel Performance*. Journal of Engineering. 22(6): p. 87-99, 2016.
- [6]. S.M.Sze, M. K. LEE, *Semiconductor devices: physics and technology*: John Wiley & Sons, 2008.
- [7]. S. Brigand, *Les principes de l'énergie solaire photovoltaïque*. complément technique, Techniques de construction, 2008.
- [8]. A. Amazigh, I. Zahir, *Etude et simulation du comportement d'un générateur photovoltaïque en présence de problème de désadaptation*, Département d'Automatique, Télécommunication et électronique, Université A.MIRA-BEJAIA, 2016.
- [9]. R.Khenfer, *Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques*, 2018.
- [10]. Jäger, K.-D., et al.,: *Fundamentals, Technology and Systems, Solar Energy*: UIT Cambridge, 2016.
- [11]. H.LE HUY, *Introduction à MATLAB et Simulink*, Université Laval, Québec, Canada, 1998.
- [12]. E.Peasley, *An Introduction to Using Simulink*. Department of Engineering Science, University of Oxford, version 5.0, 2018.

- [13]. M. Mokhtari, N. Martaj, *Electronique Appliquée, Electromécanique sous Simscape & SimPowerSystems (Matlab/Simulink)*: Springer Science & Business Media, 2012.
- [14]. Y. Rahma, *caractérisation électrique des panneaux photovoltaïques par LabVIEW*, Mémoire de Master, Université de Biskra, 2018.
- [15]. J. C. Teo, Rodney H. G. Tan, V. H. Mok, Vigna K. Ramachandaramurthy, C. K. Tan, *Effects of bypass diode configurations to the maximum power of photovoltaic module*. Int. J. Smart Grids Energy. 6: p. 225-232, 2017.
- [16]. J. C. Teo , Rodney H. G. Tan , ID , V. H. Mok , Vigna K. Ramachandaramurthy ID and ChiaKwang Tan , *Impact of Partial Shading on the PV Characteristics and the Maximum Power of a Photovoltaic String*. Energies. 11(7): p. 1860, 2018.
- [17]. www.pveducation.org

ملخص

في هذا العمل، نقدم محاكاة الخصائص تيار- جهد (I-V) واستطاعة - جهد (P-V) للوح الضوئي باستخدام برنامج MATLAB/Simulink. على وجه الخصوص، تأثير درجة الإشعاع الشمسي، درجة الحرارة، التظليل الجزئي، عامل التظليل والصمام الثنائي على خصائص I-V و P-V للألواح الضوئية. ثم نقوم بمقارنة النتائج التي تم الحصول عليها عن طريق المحاكاة بتلك التي تم الحصول عليها عن طريق التجربة. في مختبر أشباه النواقل و المواد المعدنية LMSM في جامعة بسكرة.

الكلمات المفتاحية: لوح شمسي، محاكاة، MATLAB/Simulink، تيار-جهد، استطاعة-جهد، فعل التظليل الجزئي، ثنائي القطب للانتفاف.

Résumé

Nous présentons dans ce travail, la simulation des caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) d'un panneau photovoltaïque sous le logiciel MATLAB/Simulink. En particulier, l'influence de l'irradiation solaire, de la température, de l'ombrage partiel, de facteur d'ombrage et de la diode bypass sur les caractéristiques I-V et P-V des panneaux photovoltaïques. Nous comparons ensuite les résultats obtenus par simulation à ceux obtenus par expérimentation au laboratoire des matériaux semi-conducteur et métalliques LMSM de l'université de Biskra.

Mots-clés : Panneau photovoltaïque, Simulation, MATLAB/Simulink, Courant-Tension, Puissance-Tension, Effet d'ombrage partiel, Diode bypass.

Abstract

In this work, we present the simulation of the current-voltage (I-V) and power-voltage (P-V) characteristics of a photovoltaic panel under MATLAB / Simulink software. In particular, the influence of the solar irradiation, the temperature, the partial shading, the shading factor and the bypass diode on the I-V and P-V characteristics of the photovoltaic panels. We then compare the results obtained by simulation with those obtained by experimentation at the Semiconductor and Metallic Materials Laboratory LMSM at the University of Biskra.

Keywords: Photovoltaic panel, Simulation, MATLAB/Simulink, Current-Voltage, Power-Voltage, Partial shading effect, Bypass diode.