

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE
N°



FILIERE : ELECTRONIQUE
OPTION : MICROELECTRONIQUE

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

Par: BENHALIMA Abdenour

DJOUBAR Abdelhak

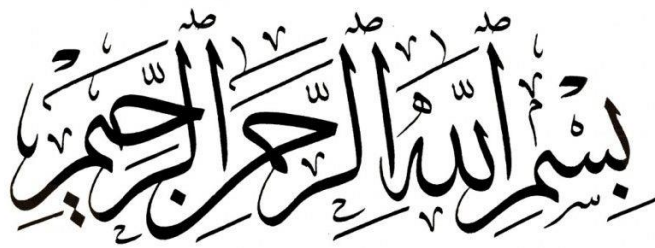
Intitulé

**ETUDE COMPARATIVE DES MODELES MATHEMATiques
EXPLICITES DE CARACTERISATION DES DISPOSITIFS
PHOTOVOLTAIQUES**

Soutenu devant le jury composé de:





| | | |
|--------------------|-------------------|------------|
| SAIGAA Djamel | Université M'sila | Président |
| DRIF Mahmoud | Université M'sila | Rapporteur |
| BOUCHELAGHEM Ahmed | Université M'sila | Examineur |

Année universitaire : 2020 /2021



Dédicaces

Je dédie ce travail :

-  *A mon cher père et ma chère mère.*
-  *A mes chers frères et sœurs.*
-  *A toute ma famille.*
-  *A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité.*

Remerciements

Nous remercions Dieu, le Tout Puissant, Dieu qui nous a donné force, patience, volonté et surtout courage pour élaborer ce travail.

Ainsi, Nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre Encadreur, **Dr. DRIF Mahmoud** pour avoir d'abord proposé ce thème, pour la disponibilité et la patience dont il a fait preuve et dont les précieux conseils et les remarques pertinentes et pour son suivi continué tout le long de la réalisation de ce mémoire.

Je remercie vivement Mr **CHIKH Badereddine** pour son aide, conseils et Suggestions tout au long de ce travail.

Nous tenons aussi à remercier avec la plus grande sincérité (AZIZ. K et Youcef. B , Abdenour, B) dans les meilleures conditions.

Nous sommes aussi redevables à tous les enseignants et personnel administratif du département d'Électrotechnique de l'Université de M'sila, qui ont instaurés un environnement d'entraide et de soutien tant au plan scientifique qu'au plan humain.

Nous tenons aussi à remercier l'ensemble des membres du jury qui nous fait l'honneur d'accepter de juger ce travail.

Sommaire :

| | |
|---|----|
| <i>Dédicaces</i> | 2 |
| <i>Remerciements</i> | 3 |
| Liste de figure : | 6 |
| Introduction Générale..... | 7 |
| Chapitre I :..... | 9 |
| I.1.Introduction : | 10 |
| I.2.Le principe de l'effet photovoltaïque | 10 |
| I.2.La cellule photovoltaïque | 10 |
| I.2.1. Définition d'une cellule solaire..... | 10 |
| I.2.2. Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque..... | 12 |
| I.2.3. La résistance série..... | 12 |
| I.2.4. Résistance parallèle | 12 |
| I.3. Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque | 14 |
| I.3.1. Le courant de court-circuit (I_{cc}) | 14 |
| I.3.2. Tension du circuit-ouvert (V_{co}) | 14 |
| I.3.3. Le Facteur de forme : | 16 |
| I.3.4. Le rendement | 17 |
| I.4. Structure des cellules solaires..... | 17 |
| I.4.1. Les filières technologiques d'une cellule photovoltaïque | 18 |
| I.4.2. Le silicium | 19 |
| I.4.3. Silicium monocristallin..... | 19 |
| I.4.4. Le silicium multicristallin..... | 19 |
| I.4.4.1. Le silicium amorphe | 20 |
| I.4.4.2. Les couches minces..... | 20 |
| I.4.5. Les cellules au Tellure de Cadmium (CdTe)..... | 21 |
| I.5. Le module photovoltaïque..... | 22 |
| I.5.1. Définition..... | 22 |
| I.5.2. Caractéristiques d'un module photovoltaïque..... | 22 |
| I.5.3. La constitution d'un module photovoltaïque | 24 |
| I.5.6. Regroupement de cellules en parallèle | 26 |
| I.5.7. Regroupement des cellules (série et parallèle) | 27 |
| I.6. Conclusion..... | 29 |
| Chapitre II : | 30 |

| | |
|--|------------------------------------|
| II.1. Introduction | 31 |
| II.2. Concepts de base de la modélisation..... | 31 |
| II.2.1. Présentation | 31 |
| II.2.2. Notion de modélisation | 31 |
| II.2.3. Analyse des systèmes pour la construction de modèles | 32 |
| II.2.4. Terminologie | 32 |
| II.2.5. Simulation | 33 |
| II.3. Modèle implicite | 34 |
| II.3.1. Modèle à une diode | 34 |
| II.3.2. Modèle à deux diodes..... | 35 |
| II.3.4. Modèle à deux paramètres..... | 35 |
| II.3.5. Modèle à cinq paramètres..... | Erreur ! Signet non défini. |
| II.3.5.1. Modèle d'Akbaba..... | Erreur ! Signet non défini. |
| II.3.5.2. El- Trayyan (2006)..... | 39 |
| II.3.5.3. Karmalkar & Haneefa (2008)..... | 40 |
| II.3.5.4. Das; Saetre et al. (2011)..... | 41 |
| II.3.5.5. Das (2013)..... | Erreur ! Signet non défini. |
| II.3.5.6. Pindado & Cuves (2017) | Erreur ! Signet non défini. |
| II.4. Conclusion: | 42 |

Liste des figures :

Chapitre I :

| | |
|--|----|
| Figure I . 1 : structure (gauche) et diagramme de bande (droite) d'une cellule photovoltaïque. | 11 |
| Figure I . 2 : Schéma électrique du modèle équivalent à deux diodes d'une cellule photovoltaïque [1] | 12 |
| Figure I . 3 : Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque. | 14 |
| Figure I . 4 : différents régimes selon la puissance d'éclairement. | 16 |
| Figure I . 5 : Structure d'une cellule photovoltaïque :..... | 17 |
| Figure I . 6 : Évolution de la production mondiale des différentes technologies de cellules PV [11]. | 18 |
| Figure I . 7 : Photos de cellules monocristallin(a) et multicristallin (b). | 19 |
| Figure I . 8 : Deux exemples de modules utilisant Sia (silicium amorphe). | 21 |
| Figure I . 9 : Structure d'une cellule photovoltaïque au CdTe. La couche d'absorbant dopé p (en mauve) repose sous un autre semi-conducteur dopé n (CdS). Ces deux couches forment une hétérojonction [10]. | 21 |
| Figure I . 10 : Les différentes zones de la caractéristique I(V). | 23 |
| Figure I . 11 : ruban métallique d'une cellule. | 24 |
| Figure I . 12 : Encapsulation des cellules [9]. | 24 |
| Figure I . 13 : caractéristiques résultantes d'un groupement de (Ns) cellules en série [6]. | 26 |
| Figure I . 14 : caractéristiques d'un groupement de (Np) cellules en parallèle [6]. | 26 |
| Figure I . 15 : (a) architecture classique d'un panneau solaire photovoltaïque avec diodes de protections. (b) défaillance d'une des cellules du module PV et activation de diode de circulation I _{pv} [6]. | 28 |
| Figure I . 16 : caractéristique (I _{pv} -V _p) d'un panneau photovoltaïque (BP585) et effet d'une des (36) cellules qui composent le module PV [6]. | 28 |

Chapitre II :

| | |
|--|------------------------------------|
| Figure II . 1 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque du modèle à une diode. ... | 34 |
| Figure II . 2 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque du modèle à deux diodes. | 35 |
| Figure II . 3 : Circuit équivalent du modèle à deux paramètres | 36 |
| Figure II . 4 : Circuit équivalent selon le modèle analytique à cinq paramètres..... | Erreur ! Signet non défini. |

Introduction Générale

La consommation mondiale d'électricité observée durant ces dernières décennies est fortement liée au développement de l'industrie, du transport et des moyens de communications. De nos jours, une grande partie de la production électrique est produite à partir de ressources non renouvelables comme le charbon, le gaz naturel, le pétrole et l'uranium. Leur vitesse de régénération est extrêmement lente à l'échelle humaine. Ce qui entraînera à plus ou moins courtéchéance un risque non nul d'épuisement de ces ressources. D'autant plus que la demande ne cesse de croître et tend dès à présent à être supérieure à l'offre, se traduisant par exemple par une forte fluctuation du prix mondial du pétrole.

D'autre part, ce type de consommation énergétique n'est pas neutre sur l'impact environnemental. Pour les hydrocarbures et le charbon par exemple, d'importantes émissions de gaz à effet de serre sont générées quotidiennement jouant un rôle prépondérant au niveau du dérèglement climatique et de l'augmentation de la pollution. Ce constat pousse à rechercher de plus en plus de solutions innovantes palliant le déficit énergétique et limitant l'impact négatif sur l'environnement. Ainsi, le développement des sources non polluantes à base d'énergie renouvelable est de plus en plus sollicité à la fois par les producteurs d'énergie et les pouvoirs publics.

À ce jour, le photovoltaïque a trouvé son utilité dans des applications à petites échelles et pour des systèmes de transmissions isolés. L'énergie photovoltaïque est une source d'énergie intéressante. Elle est renouvelable, inépuisable et non polluante. Pour qu'elle soit utilisée sur une large plage d'applications et pour satisfaire les contraintes du coût, le système devrait présenter une bonne exploitation des cellules photovoltaïques.

Le courant électrique produit d'un panneau photovoltaïque dépend du rayonnement solaire incident, la température de cellules, l'angle solaire d'incidence et la résistance de charge. Les fabricants ont typiquement tendance à fournir seulement des données opérationnelles limitées pour les panneaux photovoltaïques, tels que la tension de circuit ouvert V_{OC} , le courant de court-circuit I_{SC} , le courant et tension maximum de puissance (I_p , V_p), les coefficients de la température à la tension de circuit ouvert et au courant de court-circuit (μ_{Voc} et respectivement), et la température des cellules en fonction nominale (NOCT).

Ces données sont disponibles seulement aux états standard d'estimation (SRC), pour ce qui est de l'irradiation 1000 W/m^2 et la température de cellules $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule photovoltaïque, il est nécessaire de comprendre la configuration physique de chaque élément de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. Selon cette philosophie plusieurs modèles électriques ont été proposés pour représenter la cellule photovoltaïque.

Pour qu'elle soit utilisée sur une large plage d'applications et pour satisfaire les contraintes du coût, le système devrait présenter une bonne exploitation des cellules photovoltaïques.

Pour cela, il faut extraire le maximum de puissance du générateur photovoltaïque, et en général non puisée par la charge. Une bonne rentabilité du générateur photovoltaïque peut être réalisée si celui-ci travaille au maximum de puissance tout le temps. Or, le point de puissance maximum varie selon plusieurs paramètres comme l'irradiation solaire, la température et la nature de la charge. Ce type de variation est aléatoire. Une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quelque soient les conditions météorologiques (température et irradiation), et quelle que soit la charge, la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (I_{opt} , V_{opt}).

Chapitre I

Généralités sur la conversion photovoltaïque

I.1. Introduction

Dans ce chapitre nous décrivons en premier lieu le principe de fonctionnement des cellules solaires ainsi que leurs caractéristiques principales. Dans la deuxième partie nous étudions les différentes technologies des cellules solaires ainsi que la mise en œuvre des modules photovoltaïques.

I.2.Principe de l'effet photovoltaïque

C'est un phénomène physique qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et de vieillissement de la cellule

I.2.Cellule photovoltaïque

I.2.1. Définition

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

D'une fine couche semi-conductrice (matériau possède une bande interdite, qui joue le rôle de la barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.

D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.

D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.

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

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif;

Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur ;

Collecte des particules générées dans le dispositif ;

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque. Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électron/trou créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction P-N. D'autres structures, comme les hétérojonctions et les Schottky sont également être utilisées.

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure I.1.

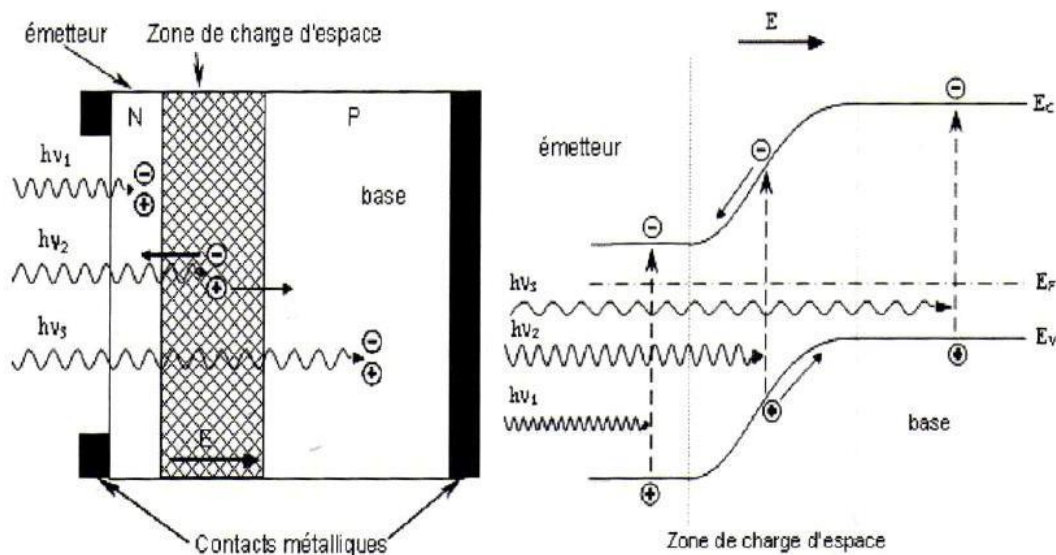


Figure I. 1 : structure (gauche) et diagramme de bande (droite) d'une cellule photovoltaïque.

Les dimensions respectives de différentes zones ne sont pas respectées.

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones N et P et dans la zone de charge d'espace. Les photo-porteurs auront un comportement différent suivant la région :

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) ou ils seront majoritaires. On aura un photo-courant de diffusion.

Dans la zone de charge d'espace, les paires électron/trou créés par les photons incidents sont dissociés par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région N, les trous vers la région P. on aura un photo-courant de génération [21].

I.2.2. Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque

Le schéma du circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque qu'est largement utilisé dans la littérature est représenté sur la figure I.2.

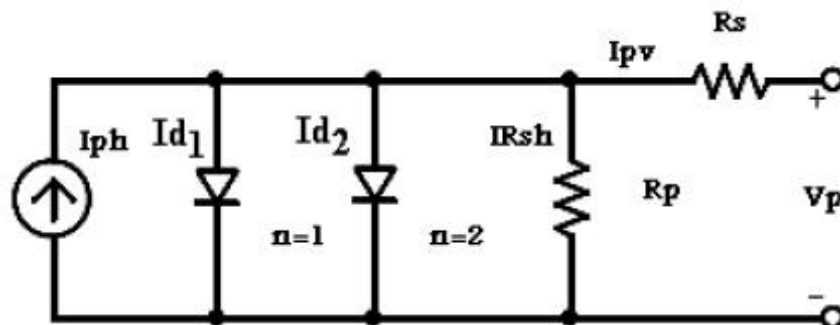


Figure I. 2 : Schéma électrique du modèle équivalent à deux diodes d'une cellule photovoltaïque [1]

Comme le montre le schéma de la figure une photopile comporte en réalité une résistance série (R_s) et une résistance de dérivation ou shunt (R_p). Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique (I_{pv} - V_p) de la photopile.

I.2.3. La résistance série

En pratique, la cellule PV, contient des résistances dans le matériel qui constitue des semi-conducteurs, et contacts, et autobus courant de rassemblement. L'ensemble des pertes dépend, de la résistance série (R_s). Son effet devient très remarquable en module composé de plusieurs cellules connectées en série, la valeur de cette résistance est multipliée par le nombre de cellules [3].

I.2.4. Résistance parallèle

Également, la résistance shunt, représente une partie des pertes liées à une petite fuite de courant par un chemin résistif parallèlement au dispositif intrinsèque. Ceci peut être représenté par une résistance parallèle (R_p). Son effet est beaucoup moins remarquable dans un module

photovoltaïque comparé à la résistance série. Qui devient seulement apparent quand un certain nombre de cellules sont reliées en parallèle pour créer un générateur photovoltaïque [3].

D'après la figure I.2 : l'équation mathématique (courant-tension) du circuit électrique équivalent de la cellule photovoltaïque est écrite comme suit [1].

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat1} \cdot \exp\left(\frac{qV_p R_s I_{pv}}{n_1 K_0 T}\right) - 1 - I_{sat2} \cdot \exp\left(\frac{qV_p R_s I_{pv}}{n_2 K_0 T}\right) - \frac{V_p R_s I_{pv}}{R_p} \quad (\text{I.1})$$

Il est possible de combiner entre les deux diodes (d1, d2), et la réécriture de l'équation précédente sous la forme suivante:

$$I_{pv} = I_{pH} - I_d - I_{Rsh} \quad (\text{I.2})$$

$I_{ph}=I_{cc}$ () : photo-courant de cellule, proportionnel à l'éclairement (G). Ce courant correspond également au courant de court-circuit [2].

$$I_d = I_{sat} \cdot \exp\left(\frac{V_p R_s I_{pv}}{n_0 V_t}\right) - 1 \quad (\text{I.3})$$

$$I_{Rsh} = \frac{V_p R_s I_{pv}}{R_p} \quad (\text{I.4})$$

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \cdot \exp\left(\frac{V_p R_s I_{pv}}{V_t}\right) - 1 - \frac{V_p R_s I_{pv}}{R_p} \quad (\text{I.5})$$

$V_t=n.K. T/q$: représente le potentiel thermodynamique. I_d : courant direct de la diode [4].

I_{sat} : le courant de saturation de la jonction.

K : la constante de Boltzmann ($1,381.10^{-23}$ Joules/Kelvin). T : la température de la cellule en kelvin.

q : la charge d'un électron.

I_{pv} : le courant fourni par la cellule. V_p : la tension aux bornes de la cellule. I_{cc} : le courant de court-circuit.

V_{co} : la tension du circuit-ouvert.

R_p : la résistance modélisant les courants de fuites de la jonction.

R_s : la résistance série caractérisant les diverses résistances de contacts et de connexions.

n: "facteur d'ideality" ; prend une valeur entre (1 et 2) [3].

I.3. Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser une cellule solaire. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique I(V). La figure I.3 représente une caractéristique courant-tension I(V) dans le noir et sous illumination typique d'une cellule photovoltaïque à jonction PN. Le tracé de cette courbe permet d'accéder à bon nombre de paramètres physiques caractéristiques du composant. Les premiers paramètres qui apparaissent sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque sont le courant de court-circuit (**I_{cc}**), la tension à circuit ouvert (**V_{co}**) et le facteur de forme FF du composant.

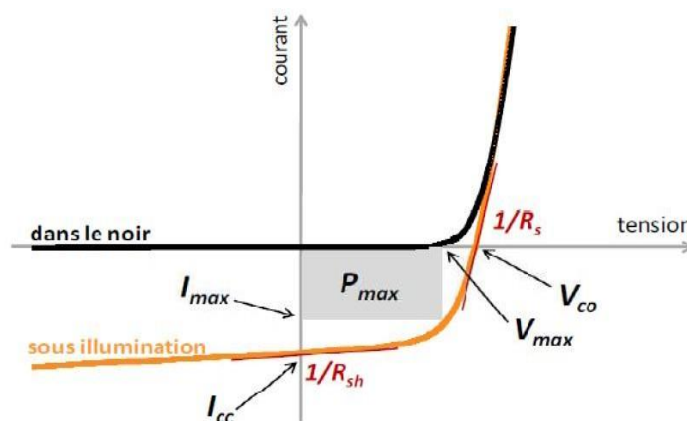


Figure I. 3 : Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque.

I.3.1. Le courant de court-circuit (I_{cc})

Il s'agit du courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul. C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Celui-ci est en fonction de la température, de la longueur d'onde du rayonnement, de la surface activée de la cellule, de la mobilité des porteurs. Ce courant est linéairement dépendu de l'intensité lumineuse reçue [9].

I.3.2. Tension du circuit-ouvert (V_{co})

Comme son nom indique, c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie. Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN, jonction Schottky), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts de la couche active-électrode. Elle dépend de plus de l'éclairement de la cellule [46].

$$V_{co} = \frac{KT_c}{q} \ln \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \quad (\text{I.6})$$

Avec :

KT_c/q : représentant le potentiel thermodynamique.

K : la constante de Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23}$ Joules/Kelvin). q : la charge d'un électron.

T_c : la température absolue. I_s : le courant de saturation. I_{ph} : le courant photonique

Deux régimes peuvent être observés suivant le degré d'éclairement figure I.4.

Régime des faibles flux lumineux : dans ce cas, $I_{ph} \ll I_s$, ce qui permet d'écrire :

$$\text{D'où :} \quad \frac{KT_c}{q} \ln \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 = \frac{I_{ph}}{I_s} \quad (\text{I.7})$$

$$V_{co} \approx \frac{KT_c}{q} \cdot \frac{I_{ph}}{I_s} \quad (\text{I.7})$$

$$V_{co} = R_0 \cdot I_{ph} \quad \text{En posant}$$

C'est la zone de comportement linéaire de la cellule. la formule précédente peut s'écrire aussi

$$[\text{9}] : \quad R_0 = \frac{KT_c}{q \cdot I_s} \quad (\text{I.8})$$

R_0 : est la résistance interne de la diode en polarisation externe nulle (circuit ouvert) est sous faible flux lumineux.

❖ Régime des flux lumineux suffisamment intenses pour que $I_{ph} \gg I_s$, soit [9] :

$$\frac{I_{ph}}{I_s} \gg 1. \quad (\text{I.9})$$

D'où :

$$V_{co} = \frac{KT_c}{q} \ln \frac{I_{ph}}{I_s}$$

C'est le domaine du comportement logarithmique (figure I.4) :

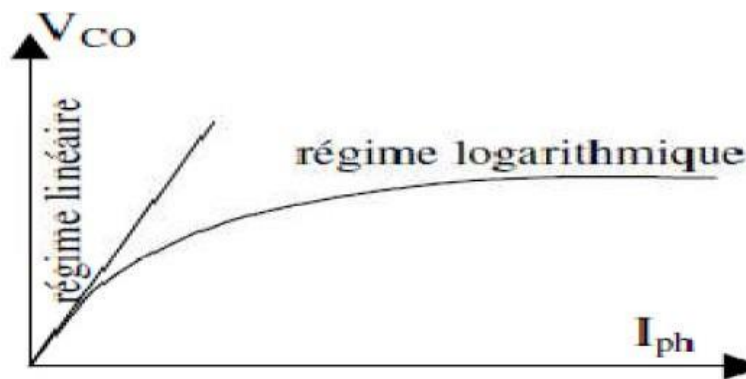


Figure I. 4 : différents régimes selon la puissance d'éclairement.

Il est important de remarquer que cette tension augmente avec le log d' I_{ph} , donc avec le log de l'illumination. En revanche, elle décroît avec la température, malgré le terme KT_c/q .

En effet, le courant de saturation, I_s dépend de la surface de la diode (donc de la cellule) et des caractéristiques de la jonction : il varie exponentiellement avec la température et cette dépendance en température compense largement le terme KT_c/q . donc la tension de circuit ouvert V_{co} baisse avec la température, ce qui est important dans le dimensionnement des systèmes.

I.3.3. Le facteur de forme

Un paramètre important souvent utilisé à partir de la caractéristique $I(V)$ pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de remplissage ou « fill factor (FF) ». Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} \cdot V_{co}$. Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable ne le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales [46]. Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (I.10)$$

La puissance des modules photovoltaïque s'exprime en Watts-Crète. Cette dernière représente la puissance qui peut fournir un module lorsqu'il est fermé sur sa charge nominale (optimale), sous un éclairement de 1000 W/m^2 et à une température de 25°C .

I.3.4. Le rendement

Le rendement η des cellules PV désigne le rendement en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in}

$$\frac{p_{max}}{p_{in}} = \frac{V_{oc} * FF * I_{cc}}{P_{IN}} \quad (I.11)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre essentiel. En effet, la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule.

I.4. Structure des cellules solaires

Une cellule photovoltaïque, en présence de lumière, ou plus exactement de photons, est capable d'orienter les électrons de façon à créer une différence de potentiel et ainsi de générer une tension électrique (énergie voltaïque). La couche supérieure de la cellule photovoltaïque est composée de silicium (figure I.5). Elle contient une quantité particulièrement importante d'électrons libres, donnant une charge négative. La couche inférieure, elle aussi composée de silicium, contient une quantité d'électrons libres inférieure à la normale, donnant ainsi une charge positive. C'est lorsque les deux couches entrent en contact qu'une zone de charge se crée et génère un champ électrique. Les cellules photovoltaïques sont composées d'un ou plusieurs matériaux semi-conducteurs et permettent la conversion directe de l'énergie solaire en énergie électrique.

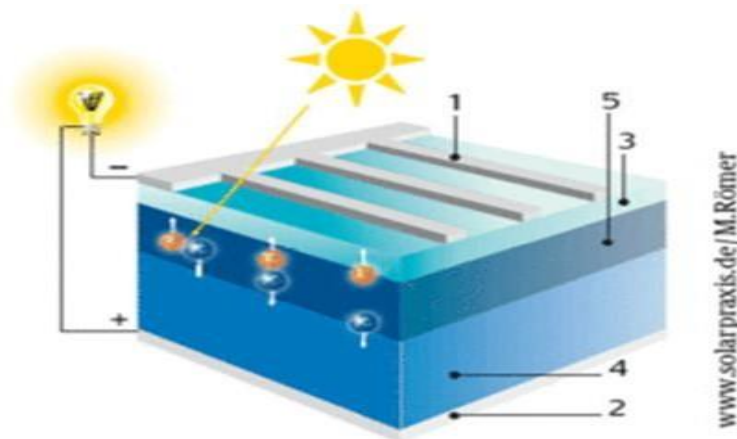


Figure I.5 : Structure d'une cellule photovoltaïque

- 1) Electrode négative.
- 2) Electrode positive.
- 3) Silicium dopé N.
- 4) Silicium dopé P.
- 5) Couche limite.

Pour provoquer cet effet photoélectrique, le matériau semi-conducteur doit être

« Dopé ». Du fait de l'apport d'éléments chimiques, deux couches se forment, une couche conductrice p avec un excédent de porteurs de charge positifs et une couche conductrice n avec un excédent de porteurs de charge négatifs. Du fait de ce déséquilibre, un champ électrique interne se forme et provoque une séparation de charge en cas d'incidence de la lumière. Les porteurs de charge ainsi libérés peuvent être évacués par des contacts métalliques et utilisés directement comme courant continu (DC) par un appareil électrique ou être alimentés dans le réseau comme courant alternatif (AC) via un convertisseur intercalé.

Pour les capacités plus élevées, les cellules photovoltaïques sont la plupart du temps interconnectées au module. Pour la fabrication de cellules photovoltaïques, on utilise actuellement avant tout du silicium, car c'est le second élément le plus courant sur terre et donc bon marché à valoriser. En plus du silicium, d'autres éléments, comme le cuivre, le gallium ou le cadmium, trouvent leur utilisation dans le photovoltaïque.

I.4.1. Les filières technologiques d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque peut être réalisée avec de nombreux semi-conducteurs. En réalité, il existe aujourd'hui deux principales filières technologiques: le silicium cristallin, les couches minces. Ces filières se partagent inégalement le marché comme le montre la figure I.6.

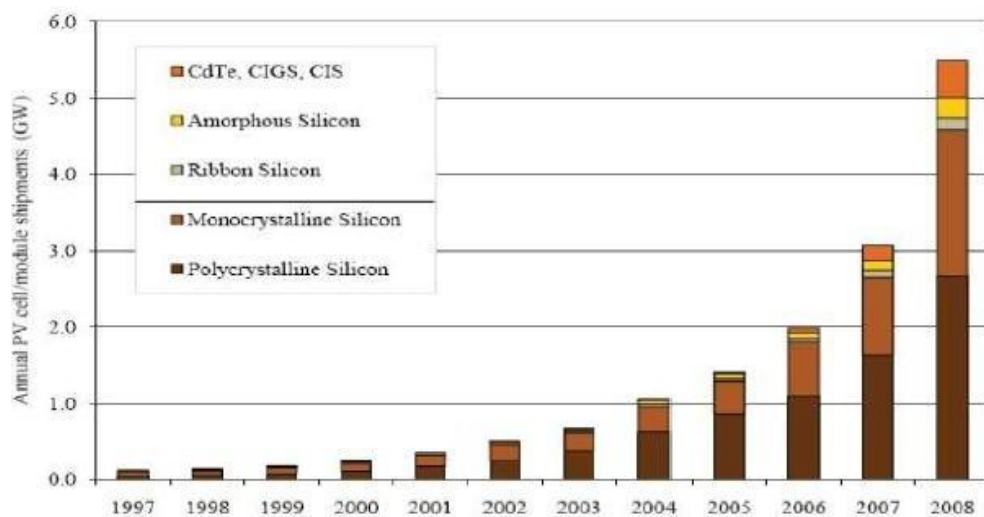


Figure I. 6 : Évolution de la production mondiale des différentes technologies de cellules PV [11]

Ces technologies coexistent sur le marché dans des proportions équivalentes depuis de nombreuses années malgré des prix et des rendements très différents. L'augmentation des rendements focalise particulièrement l'intérêt des chercheurs.

I.4.2. Le silicium

La filière silicium représente aujourd'hui l'essentiel de la production mondiale des panneaux photovoltaïques. Il s'agit d'un matériau extrêmement abondant, stable et non toxique. Cette filière est elle-même subdivisée en plusieurs technologies distinctes de part la nature du silicium employé et /ou sa méthode de fabrication. Cette filière comporte trois technologies: le silicium monocristallin et le silicium multicristallin, silicium amorphe [11].

I.4.3. Silicium monocristallin

Lors du refroidissement, le silicium se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme, intense et brillant. Elles sont utilisées, mais ne sont pas majoritaires sur le marché de l'énergie photovoltaïque.

Le rendement du silicium monocristallin est plus élevé, il est compris entre 12 et 20%

[9] pour les cellules industrielles. Son coût élevé est aujourd'hui un handicap et le silicium monocristallin perd du terrain devant le silicium multicristallin.

I.4.4. Le silicium multicristallin

Le silicium multicristallin (poly cristallin) est devenu aujourd'hui la technologie la plus utilisée (figure I.7). A elle seule elle représente près de 50% du marché [9]. Ces cellules sont obtenues par couplage de cristaux de silicium, ce qui rend sa structure hétérogène, son rendement est légèrement inférieur au silicium monocristallin, il est compris entre 10 et 14% selon les fabricants [9].

En revanche sa fabrication est beaucoup plus simple, les coûts de production sont donc plus faibles.



Figure I. 7 : Photos de cellules monocristallin(a) et multicristallin (b).

I.4.4.1. Le silicium amorphe

Le silicium intégré dans les cellules a-Si n'a pas fait l'objet d'une cristallisation. Ses atomes sont donc agencés sans réelle organisation, ce qui leur permet de mieux capter la lumière (par rapport au silicium cristallin). Problème : les charges générées ont plus de difficultés pour se déplacer à cause de la désorganisation de la matière, ce qui se traduit par un mauvais coefficient de conversion. Par conséquent, leur rendement est faible.

La désorganisation atomique a d'autres conséquences : les électrons de valence des atomes de Si ne forment pas toujours des liaisons covalentes au sein du semi-conducteur. Il apparaît alors des liaisons pendantes qui peuvent agir sur les propriétés électroniques du matériau. Pour limiter ce phénomène, les couches de silicium sont régulièrement passivées avec de l'hydrogène (a-Si:H). Des atomes d'hydrogène établissent des liaisons avec les électrons restés libres, et réduisent ainsi le nombre de liaisons pendantes.

I.4.4.2. Les couches minces

Le principal frein au développement du photovoltaïque à très grande échelle reste encore aujourd'hui. Malgré la baisse de ces dernières années, le prix trop élevé du kilo Watt crête KWc. Le kilo Watt crête (KWc) est l'unité qui définit la puissance d'un générateur PV aux conditions de test standards (1000W.m⁻² et 25°C).

La majorité du prix d'un générateur photovoltaïque provient du silicium et du procédé de purification. Plusieurs types de cellules photovoltaïques visant à diminuer la qualité de matière nécessaire à leur fabrication sont aujourd'hui développés et commencent à être industrialisés. Ces technologies appelées couches minces font appel à des procédés de fabrication (dépôt sur ruban) visant la diminution de l'épaisseur des cellules. La technologie à couche mince dont la plus mûre est celle du silicium amorphe (a-Si) représentait en 2008 plus de 7% du marché mondial [9].

L'avantage de cette technique est l'utilisation des substrats à bas coûts. Le silicium est déposé à basse température sur un substrat en verre. De plus, il est possible de déposer ces cellules sur des substrats souples (figure I.8) et fabriquer des cellules souples. Son prix est plus faible que celui des cellules cristallines, il est d'environ 7% [9].

L'utilisation de ce type de cellules nécessite l'utilisation d'une isolation galvanique entre les modules et le réseau. Sans cette isolation galvanique les cellules amorphes se dégradent très rapidement. La raison physique de ce phénomène reste encore obscure. Les cellules amorphes

captent très bien le rayonnement diffus et sont donc moins sensibles aux variations de rayonnement direct. Par conséquence, ces cellules sont une très bonne alternative aux cellules cristallines sur des sites soumis à des ombrages sévères.

D'autres matériaux sont également utilisés dans les filières à couches minces comme le Tellurure de Cadmium (CdTe), le diséléniure de cuivre et d'indium (CIS) et de gallium (CIGS). Ces technologies possèdent de bons rendements, pouvant aller jusqu'à 19% [9]. Malgré les potentialités de ces trois technologies, les problèmes de toxicité sur l'environnement et l'approvisionnement en matières premières qu'elles soulèvent les cloisonneront au laboratoire ou à des applications très spécifiques.



Module souple Unisolar (68Wc, 1,12 m²).

Module rigide Sharp (115Wc, 1,42 m²).

Figure I. 8 : Deux exemples de modules utilisant Sia (silicium amorphe).

I.4.5. Les cellules au Tellurure de Cadmium (CdTe)

Le coût de fabrication d'une cellule au tellurure de cadmium serait deux à trois fois moins important que celui d'une structure cristalline (figure I.9), notamment grâce à l'optimisation du procédé de fabrication, à la faible main-d'œuvre requise et aux économies d'échelle (baisse du coût à la suite de l'augmentation de la productivité).

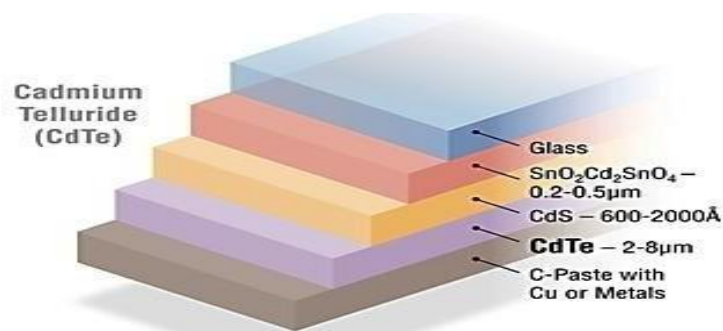


Figure I. 9 : Structure d'une cellule photovoltaïque au CdTe. La couche d'absorbant dopé p (en mauve) repose sous un autre semi-conducteur dopé n (CdS). Ces deux couches forment une hétérojonction [10].

Une cellule au CdTe se compose, de haut en bas :

- D'une vitre protectrice ;
- D'une couche conductrice transparente, par exemple faite d'oxyde d'indium-étain (ITO) ou d'oxyde de zinc (ZnO). Elle récolte les charges négatives sur une épaisseur de 0,2 à 0,5 μm ;
- De sulfure de cadmium CdS dopé n (épaisseur de 0,06 à 0,2 μm) ;
- De tellurure de cadmium dopé p (épaisseurs de 2 à 8 μm) ;
- De la couche conductrice inférieure métallique. Elle est parfois fabriquée à partir d'une pâte de carbone enrichie en cuivre ;
- Du substrat, dont la nature peut varier selon les propriétés désirées (souple ou rigide).

Les cellules au CdTe sont produites de différentes manières. "First Solar" utilise par exemple la méthode VTD (vapor transport deposition), car elle permet de déposer de faibles épaisseurs de matériaux sur des substrats mobiles [10]. Concrètement, du tellure et du cadmium sont chauffés indépendamment dans des chambres, puis des gaz inertes vont transporter les vapeurs générées. Elles sortent par des orifices situés à environ 1 cm des supports. La matière se dépose alors sur le substrat, qui est maintenu à une température inférieure à la température d'évaporation. Un panneau solaire complet peut être produit en deux heures et demi, avec des pertes de matière première estimées à seulement 2 % [10].

I.5. Le module photovoltaïque

I.5.1. Définition

Un générateur photovoltaïque ou module est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et /ou parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que la puissance, le courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert [5].

I.5.2. Caractéristiques d'un module photovoltaïque

Les caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque varient en fonction de la température, de l'éclairement et, de façon générale, des conditions de fonctionnement. Lorsqu'il est connecté à une charge donnée. Nous rappelons brièvement dans ce paragraphe le comportement du générateur soumis à diverses contraintes. Ces notions sont en effet

nécessaires pour comprendre le comportement d'un générateur PV et ensuite effectuer des optimisations de fonctionnement (figure I.10).

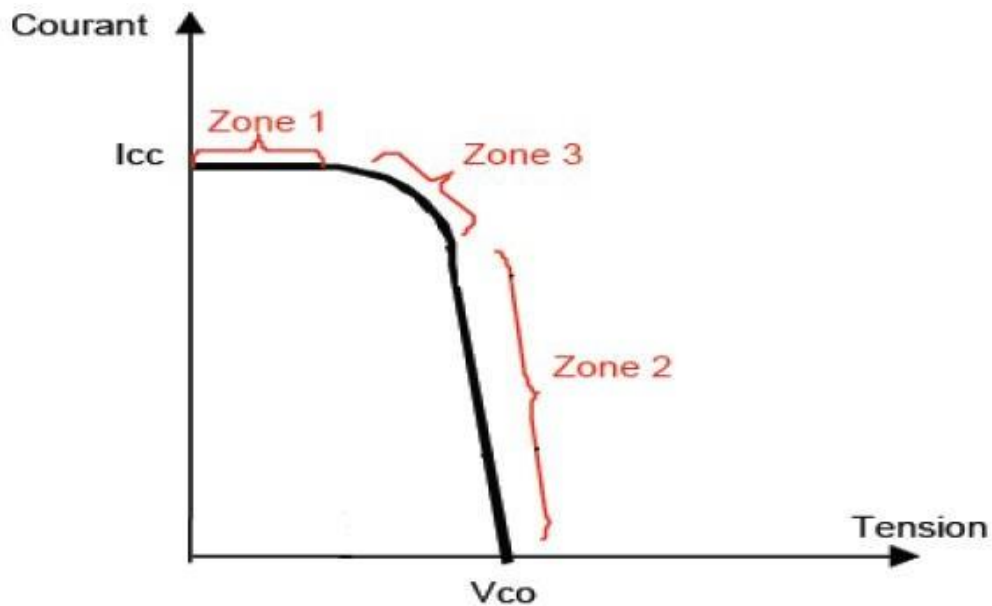


Figure I. 10 : Les différentes zones de la caractéristique I(V)

La caractéristique d'un générateur PV constitué de plusieurs cellules à une allure générale assimilable à celle élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule (irradiation et température uniforme).

Nous pouvons décomposer la caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque en 3 zones:

- ❖ Une zone assimilable à un générateur de courant I_{cc} proportionnel à l'irradiation, d'admittance interne pouvant être modélisée par $1/R_{sh}$ (zone 1).
- ❖ Une zone assimilable à un générateur de tension V_{co} d'impédance interne équivalente à la résistance série R_s (zone 2).
- ❖ Une zone où l'impédance interne du générateur varie très fortement de R_s à R_{sh} (zone3). C'est dans la zone 3 qu'est situé le point de fonctionnement pour lequel la puissance fournie par le générateur est maximale. Ce point est appelé point de puissance optimale, caractérisé par le couple I_{max} , V_{max} et seule une charge dont la caractéristique passe par ce point, permet d'extraire la puissance disponible dans les conditions considérées [7].

I.5.3. La constitution d'un module photovoltaïque

Câble des cellules photovoltaïques: les cellules sont connectées entre elles par un fin ruban métallique (cuivre étamé), du contact en face avant (-) au contact en face arrière (+) (figure I.11).

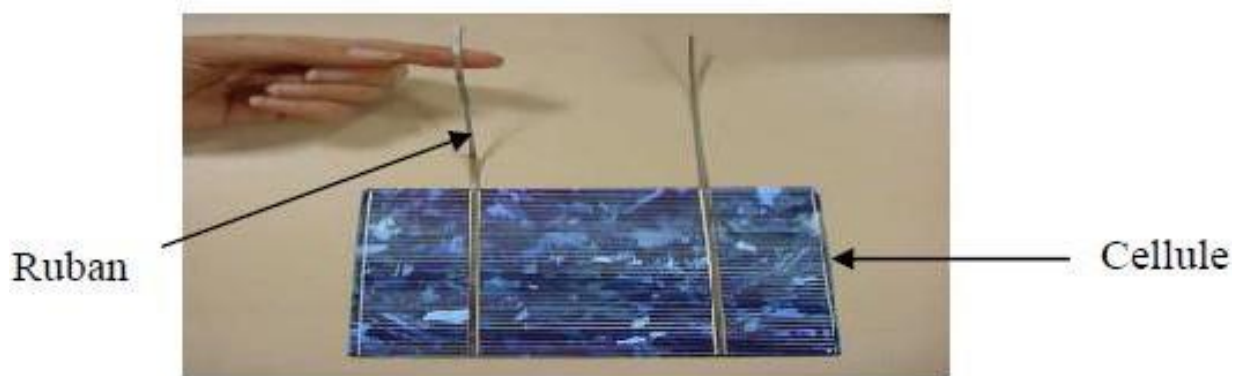


Figure I. 11 : ruban métallique d'une cellule.

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

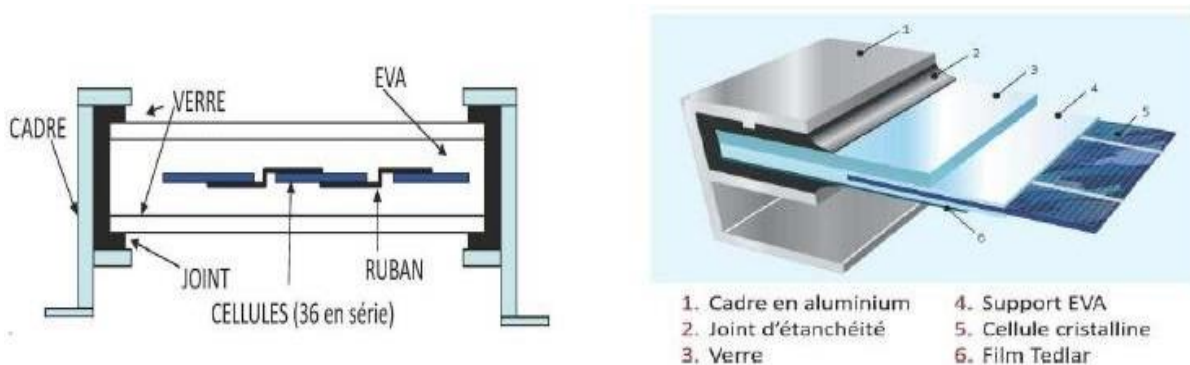


Figure I. 12 : Encapsulation des cellules [9].

La boîte de connexion étanche regroupe les bornes de raccordement, les diodes by-pass. Les deux câbles unipolaires sont raccordés.

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

série, constituant des branches elles même N_p en parallèles, la puissance disponible en série du générateur PV est donnée par :

$$P_{pv} = N_s \cdot V_{pc} \cdot N_p \cdot I_{pv} \quad (\text{I.12})$$

Avec:

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

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

I_{pv} : le courant de sortie du GPV.

Regroupement des cellules

I.5.4. Regroupement des cellules en série

Une association de (N_s) cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV) [6]. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultante de groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, un tel regroupement est représenté par la figure I.13.

L'équation (VI.2) résume les caractéristiques électriques d'une association série de (N_s)cellules [6].

$$V_{CONS} = N_s * V_{CO}; I_{CC} = I_{CCNS} \quad (\text{I.13})$$

$V_{CO}N_s$: la somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série.

$I_{CC}N_s$: courant de court-circuit de N_s cellules en série.

Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce.

Comme la surface de cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible.

L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble.

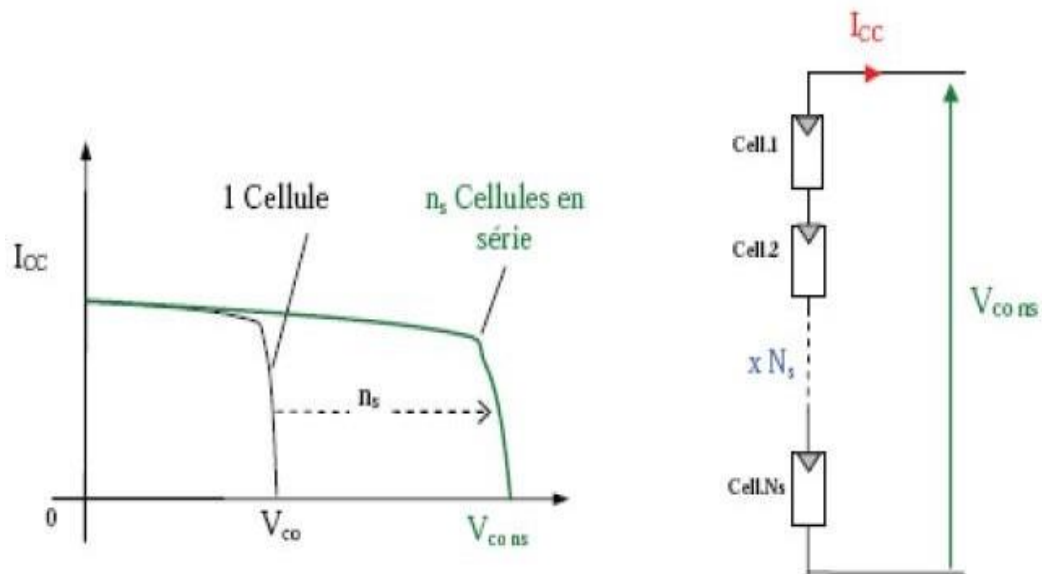


Figure I. 13 : caractéristiques résultantes d'un groupement de (N_s) cellules en séries [6].

I.5.6. Regroupement de cellules en parallèle

Une association parallèle de (N_p) cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créée. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants.

L'équation (I.13) et la figure I.14 résument les caractéristiques électriques d'une association parallèle de (N_p) cellules [6].

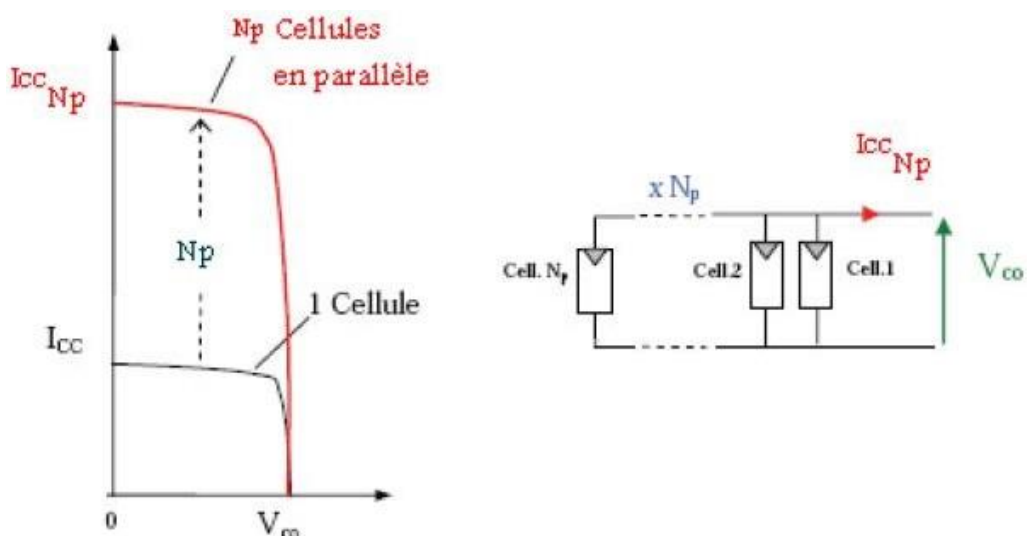


Figure I. 14 : caractéristiques d'un groupement de (N_p) cellules en parallèle [6].

Avec : $V_{ccNp} = N_p * I_{cc}; V_{CO} = V_{CONp}$

I_{ccNp} : la somme des courants de court-circuit de (N_p) cellules en parallèle.

V_{CO} : la tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle.

I.5.7. Regroupement des cellules (série et parallèle)

La caractéristique ($I_{pv} - V_p$) d'un générateur solaire peut être considérée comme le fruit d'une association d'un réseau de ($N_s * N_p$) cellules en série /parallèle. La caractéristique globale peut en outre, varier en fonction de l'éclairement, température, du vieillissement des cellules et les effets d'ombrage ou d'inhomogénéité de l'éclairement.

De plus, il suffit d'une occultation ou d'une dégradation d'une des cellules mises en série pour provoquer une forte diminution du courant produit par le module photovoltaïque. Lorsque le courant débité est supérieur au courant produit par la cellule faiblement éclairée, la tension de celle-ci devient négative et devient un élément récepteur. Celle-ci se trouve à dissiper une quantité trop importante de puissance électrique qui pourrait aboutir à sa destruction si le défaut persiste trop longtemps. C'est le phénomène du point chaud. Pour remédier à ce phénomène, on équipe donc les panneaux photovoltaïques des diodes by-pass qui ont pour rôle de protéger les cellules qui deviennent passives figure (I.15-a). Des mesures réalisées sur un module photovoltaïque commercial de (85Wc) sur lequel on occulte volontairement (à différents niveaux d'ombrage) une des (36) cellules qui composent se générateur sont consignées en figure (I.15).

On observe bien la déformation de la courbe ($I_{pv}-V_p$) liée à un effet d'ombrage partiel du module PV. La diode by-pass lorsqu'elle se met à fonctionner, court-circuite alors une partie du panneau comme indiqué en figure (I.15-b), évitant ainsi la circulation du courant inverse au sein des cellules défectueuses. Par contre, cette solution efficace réduit d'autant la puissance délivrée ainsi que la tension aux bornes du panneau. La dégradation d'une seule cellule condamne donc le groupe de cellules associées à la cellule défectueuse, elle est protégée par la diode (by-pass) à ne pas produire de puissance. Ce phénomène de perte parallèle de puissance est à comparer à la perte totale d'un panneau entier en cas de problème sur une cellule avec un panneau fonctionnant sans protection. Un tel regroupement des cellules (série et parallèle) avec diode de protection sont représentés par la figure qui suit [6].

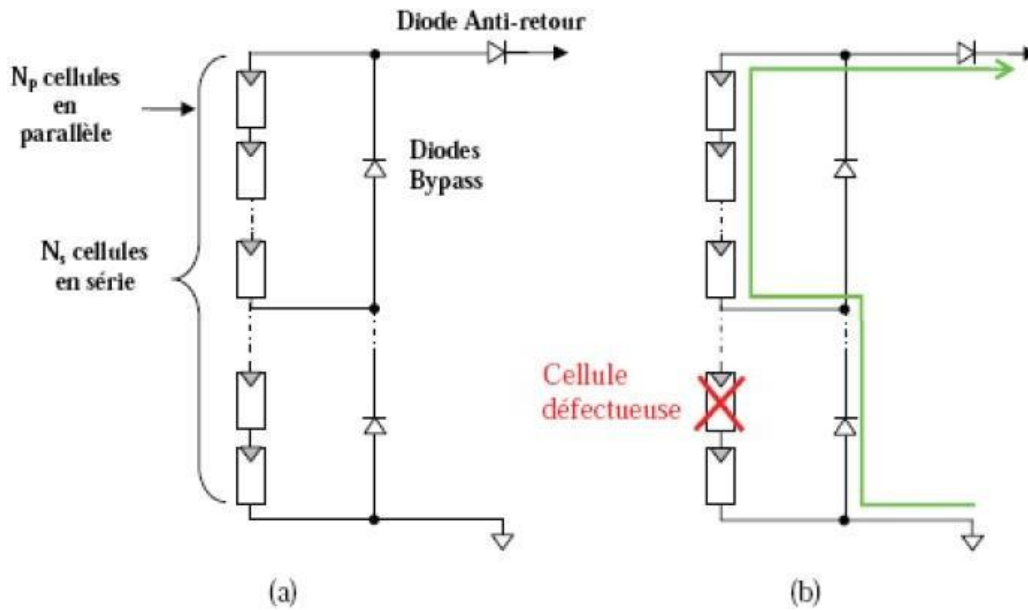


Figure I. 15 : (a) architecture classique d'un panneau solaire photovoltaïque avec diodes de protections. (b) défaillance d'une des cellules du module PV et activation de diode de circulation I_{pv} [6].

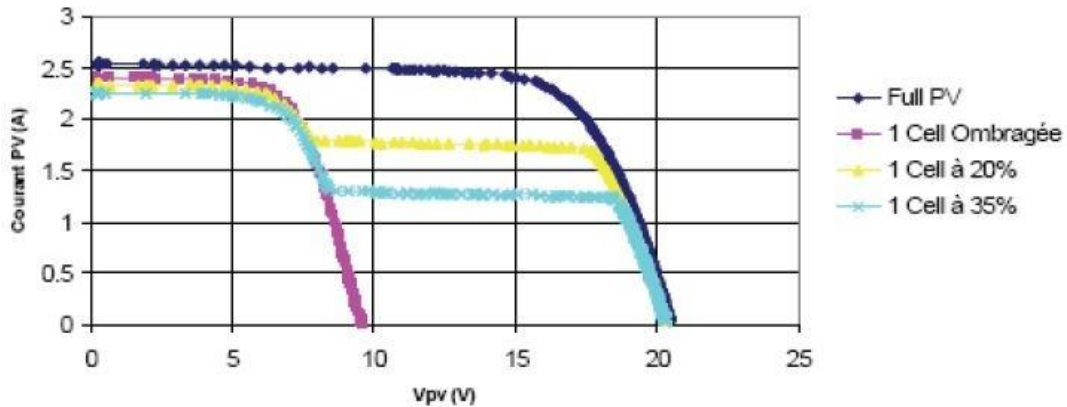


Figure I. 16 : caractéristique (I_{pv} - V_{pv}) d'un panneau photovoltaïque (BP585) et effet d'une des (36) cellules qui composent le module PV [6].

On s'aperçoit donc que la maîtrise de cette énergie photovoltaïque n'est pas aussi simple qu'il n'y paraît. La production de courant dans un module photovoltaïque du commerce est donc limitée par la cellule la plus faible de l'ensemble. Généralement, lors de l'assemblage des cellules, il est nécessaire de les trier en fonction de leurs caractéristiques électriques afin d'obtenir une association homogène et ainsi éviter de limiter la puissance fournie par le panneau à cause d'une dispersion des cellules. De plus, le vieillissement des cellules peut produire une dispersion des caractéristiques. Les conditions météorologiques auxquelles les modules sont soumis (ensoleillement inhomogène, température, salissures, neige, pluie, dépôt de feuilles mortes...) fait de l'énergie photovoltaïque une ressource difficilement maîtrisable [6].

I.6. Conclusion

Nous avons présenté dans ce présent chapitre les différentes notions qui entrent dans la constitution d'un système de captage photovoltaïque. Aussi que les principes de fonctionnement de chaque élément.

Chapitre II

Modélisation des cellules photovoltaïques

II.1. Introduction

Afin d'améliorer la connaissance des systèmes photovoltaïques, plusieurs voies sont possibles. L'expérimentation en vraie grandeur qui est longue et coûteuse ne permet pas de généraliser les résultats. L'autre voie fait appel à des programmes de simulation permettant de traiter un grand nombre de cas.

Dans la littérature, plusieurs modèles mathématiques permettent de décrire et de simuler le fonctionnement du générateur photovoltaïque. Ils tiennent en compte l'influence de la variation de l'éclairement et de la température durant la journée. Ces modèles se différencient par la procédure et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la caractéristique courant-tension [1]. En effet, on distingue deux catégories de modèles mathématiques décrivant la caractéristique courant-tension d'un dispositif photovoltaïque (cellule, module ou générateur PV) : modèles implicites $I=f(I, V)$ et modèles explicites $I=g(V)$.

Dans ce chapitre, nous donnerons des notions fondamentales sur la modélisation et la simulation et nous présenterons une revue des différents modèles couramment utilisés dans la simulation des dispositifs photovoltaïques.

II.2. Concepts de base de la modélisation

II.2.1. Présentation

L'analyse de processus physiques se fait via l'application de méthodes scientifiques pour la reconnaissance et la définition des problèmes ainsi qu'au développement de procédures pour leur solution. Autrement dit :

- Formulation mathématique du problème.
- Analyse détaillée pour l'obtention de modèles mathématiques.
- Synthèse et présentation de résultats.

Quand les erreurs sur le processus existent, la prise de décision devient plus délicate.

II.2.2. Notion de la modélisation

Qu'est-ce qu'un modèle ?

C'est une représentation de la réalité au moyen de concepts, d'équations mathématiques et, si nécessaire, d'algorithmes numériques [10] :

- Le modèle doit être correct d'un point de vue mathématique.
- Il doit représenter la réalité le mieux possible.

- Il doit être utile pour des applications concrètes..

Les modèles sont des imitations de la réalité, et sont utilisés pour représenter des situations réelles de manière à pouvoir permettre l'étude de quelques aspects particuliers, sous des conditions de contrôle impossibles à réaliser [10]. On distingue :

- Les modèles physiques ou iconiques qui représentent des modèles réduits de prototypes.
- Les modèles analogiques qui exploitent l'analogie entre des lois de divers phénomènes.
- Les modèles conceptuels ou symboliques basés sur les équations régissant les phénomènes en jeu.

Un modèle mathématique est une expression ou une formulation quantitative d'un processus ou d'un phénomène que l'on essaie d'observer, analyser ou prédire. Comme aucun processus ne peut réellement être complètement observé, toute formulation va impliquer un certain degré de socratismes. Un modèle mathématique ne sera conceptuel qu'à un certain degré et sa validité et sa fiabilité dépendront de sa vérification expérimentale [10].

II.2.3. Analyse des systèmes pour la construction de modèles

Un système est une structure, un appareil, un schéma ou une procédure reliant une entrée à une sortie dans un référentiel de temps donné.

Les concepts clés d'un système sont :

Un système est constitué d'éléments connectés entre eux selon un certain arrangement.

Un système a une référence de temps.

Un système à une relation cause

Un système a comme fonction principale de lier une entrée et une sortie

II.2.4. Terminologie

Une variable n'a pas de valeur fixe tandis qu'un paramètre a une valeur constante, fonction des circonstances de son application. Un système linéaire est régi par un système d'équations linéaires (des équations algébriques ou différentielles, ou des équations aux dérivées partielles). C'est un cas très important, car le principe de superposition des effets peut être utilisé.

Un système est dit non-linéaire s'il n'est pas linéaire. L'état d'un système est défini par les valeurs des variables du système à un certain temps. Un système invariant du temps est un système pour lequel la relation Entrée-Sortie ne dépend pas du temps auquel l'entrée est appliquée au système. Une variable ou un système global est un système pour lequel les variations spatiales n'existent

pas ou peuvent être négligées. On parle de système distribué si les variations spatiales sont prises en compte. Sur le plan mathématique, les modèles sont représentés par des équations différentielles ordinaires, et les modèles distribués par des équations aux dérivées partielles.

Un système est dit stochastique si pour une entrée donnée, il existe une certaine probabilité associée à l'entrée (on parle aussi de probabiliste). Par contre, un système déterministe n'est pas probabiliste ; pour une entrée donnée, on peut prédire complètement les résultats de sortie.

Un processus purement aléatoire n'a pas de composantes déterministes. Un modèle boîte noire relie l'entrée à la sortie par une fonction arbitraire et donc n'a pas de signification physique.

Un modèle conceptuel est par contre basé sur les équations régissant les phénomènes en jeu.

Un processus peut être continu ou discret.

Une variable discrète peut prendre des valeurs distinctes dans un intervalle.

II.2.5. Simulation

La simulation est un moyen pour observer le comportement d'un système sous diverses conditions de charge. Aucune solution dans le sens mathématique n'est cherchée. L'objectif est de comprendre les relations entre les composantes du système et de trouver les moyens de la meilleure réalisation.

La simulation ne donne pas la solution optimale directement, il est nécessaire d'itérer le processus pour atteindre l'optimum. Elle se résume en une analyse de scénarios, le modèle étant testé, calibré et opérationnel.

Le schéma général de mise en équation d'un problème de modélisation et de simulation consiste d'abord à décrire les trois composantes suivantes :

- Système physique : il est considéré comme étant le milieu ou le domaine d'étude, caractérisé par sa structure de forme, ses lois de comportement et ses concepts physiques.
- Système mathématique : il fait appel aux concepts mathématiques théoriques et aux axiomes constitutifs.
- Modèle : c'est le modèle conceptuel qui est basé sur les équations constitutives et les équations champs reliant les variables d'état aux paramètres du système.

II.3. Modèles implicites

II.3.1. Modèle à une diode

Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque est modélisé par le circuit électrique équivalent de la figure (II.1) [30]. Ce modèle est composé d'un générateur de courant dont la valeur du courant est proportionnelle à l'éclairement reçu à la surface de la cellule PV, d'une diode qui modélise la jonction PN présente dans une cellule PV, une résistance série qui modélise les pertes ohmiques dues au contact électrique et enfin d'une résistance shunt qui modélise les courants de fuite présents dans la cellule PV.

Ce schéma est représenté sur la figure ci-dessous :

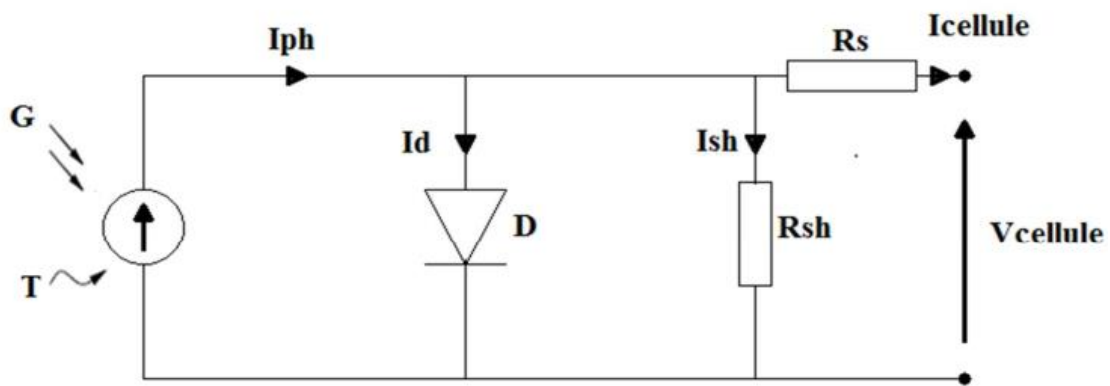


Figure II. 1 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque du modèle à une diode.

D'après Kirchoff (loi des nœuds), le courant délivré par la cellule PV est donné par l'expression ci-après :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (\text{II.1})$$

D'où, le courant de la diode est donné dans l'équation qui convient [31] :

$$I_D = \left(\exp\left(\frac{V+R_s I}{n.V_t}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.2})$$

Le courant aux bornes de la résistance shunt est exprimé par la relation suivante [31] :

$$I_D = \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.3})$$

L'équation caractéristique de la cellule PV sera donc donnée comme suit :

$$I = I_{ph} = I_0 \left(\exp\left(\frac{V+R_s I}{n.V_t}\right) - 1 \right) - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.4})$$

I_{ph} : Courant photovoltaïque, en Ampère (A).

I_0 : Courant de saturation de la diode, en Ampère (A).

n : Facteur d'idéalité de la diode.

R_s : Résistance série en Ohm (Ω).

R_{sh} : Résistance shunt en Ohm (Ω).

k : Constante de Boltzmann en Joule/Kelvin ($k = 38.1 \cdot 10^{-23} J.K^{-1}$).

q : Charge de l'électron en Coulomb ($q = 1.602 \cdot 10^{-19}$).

T : Température de la cellule en degré Kelvin (K).

V_t : Tension thermique : $V_t = \frac{KT}{q}$ en Joule/Coulomb ($J.C^{-1}$).

II.3.2. Modèle à deux diodes

Ce modèle se distingue du précédent par le fait qu'il comporte deux diodes. L'une modélise les pertes par diffusion dans la jonction, tandis que l'autre modélise les pertes par recombinaison [28,29].

Le circuit électrique équivalent est donné dans la figure ci-dessous :

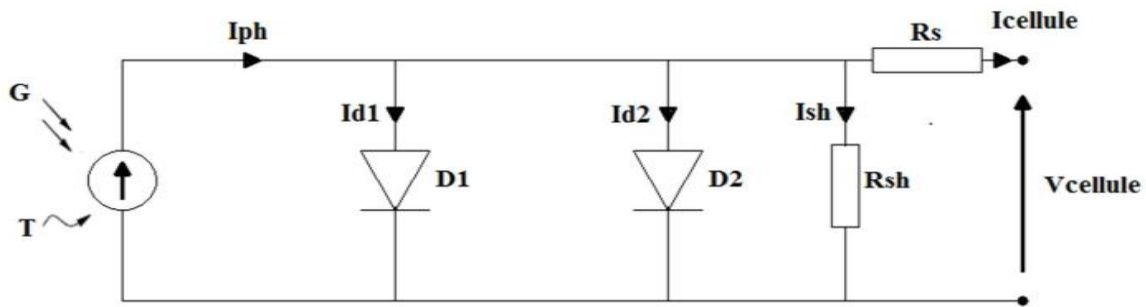


Figure II. 2 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque du modèle à deux diodes.

Ce modèle se traduit par l'équation suivante :

$$I = I_{ph} = I_0 \left(\left(\exp \left(\frac{V + I R_s}{V_t \cdot n_1} \right) - 1 \right) - I_{02} \left(\frac{V + I R_s}{V_t \cdot n_2} \right) - 1 \right) - \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \quad (II.5)$$

II.3.3. Modèle à deux paramètres

Dans ce modèle l'effet de la résistance shunt n'est pas pris en compte [12]. La figure (2.1) montre le circuit équivalent :

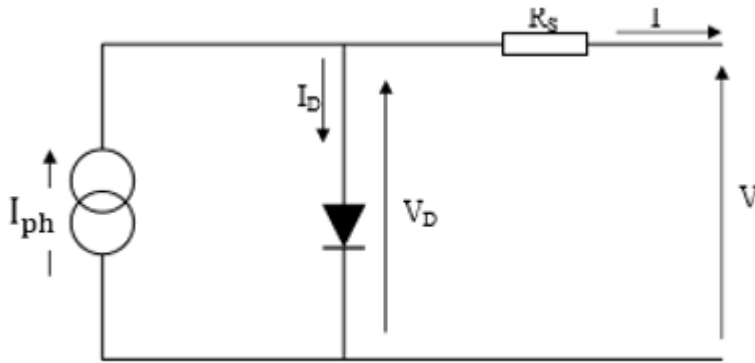


Figure II. 3 : Circuit équivalent du modèle à deux paramètres

Le courant de la diode est donné par :

$$I_D = I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (\text{II.6})$$

D'après la loi de Kirchhoff :

$$I_{ph} = I_D + I \quad (\text{II.7})$$

Ce qui donne :

$$I_D = I_{ph} + I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{kT} \right) - 1 \right] \quad (\text{II.8})$$

Avec : I_{ph} , I_0 , R_s n et T sont les paramètres habituels. Ils sont définis dans les sections précédentes

Les deux paramètres de ce modèle sont le courant correspondant à la puissance maximale (I_m) et la résistance série (R_s). Ces derniers sont déterminés à partir du courant de court-circuit (I_{sc}), de la tension à circuit ouvert (V_{oc}) et de la suivante approximation : $\exp \left(\frac{qV}{mkT} \right) \gg 1$, (i.e. $I_{ph} = I_{sc}$)

En posant $\xi = \frac{nkT}{q}$, l'expression (II.8) devient :

$$I = I_{sc} \left[1 - \left(\frac{I_0}{I_{sc}} \right) \exp \left(\frac{V + R_s I}{\xi} \right) \right] \quad (\text{II.9})$$

Comme ξ et R_s sont inconnus, deux conditions doivent être remplies pour résoudre cette équation.

- a) Pour $I = 0$: $V = V_{oc}$
- b) La courbe $P = f(V)$ est tangente à la caractéristique I-V au point de fonctionnement maximal

c) La condition (a) donne :

$$V_{oc} = V_{I=0} = \xi \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0}\right) \quad (\text{II.10})$$

Il a été montré que la valeur type du rapport I_0/I_{sc} pour les cellules au silicium aux conditions standards (1000 W/m² ; 25°C) varie dans la gamme de 10⁻⁸ à 10⁻¹⁰ cette valeur n'affecte que légèrement la précision du modèle [14,15]. On pose $I_0/I_{sc}=10^{-9}$, l'équation devient alors

$$I = I_{sc} \left[1 - 10^9 \exp\left(\frac{20.7}{V_{oc}}(R_s I)\right) \right] \quad (\text{II.11})$$

Ou également :

$$V = V_{oc} \left[\frac{1}{20.7} \ln\left(\frac{10^9(I_{sc}-I)}{I_{sc}}\right) \right] R_s I \quad (\text{II.12})$$

La condition (b) peut être exprimée par :

$$V \Big|_{I=I_m} = \frac{P_m}{I_m} \quad (\text{II.13})$$

$$\frac{\partial V}{\partial I} \Big|_{I=I_m} = \frac{\partial}{\partial I} \left(\frac{P_m}{I} \right) \Big|_{I=I_m} = \frac{P_m}{I_m^2} \quad (\text{II.14})$$

En remplaçant l'équation (II.13) dans (II.12), on obtient :

$$\frac{P_m}{I_m} = V_{oc} \left[I + \frac{1}{20.7} \ln\left(\frac{I_{sc}-I_m}{I_{sc}}\right) \right] - R_s I_m \quad (\text{II.15})$$

Si on dérive l'équation (II.13) selon l'équation (II.14) on trouve :

$$\frac{P_m}{I_m^2} = \frac{V_{oc}}{20.7} \left[\frac{1}{I_{sc}+I_m} \right] + R_s \quad (\text{II.16})$$

Si on combine les deux dernières équations on aura :

$$I_m \left[1 + \frac{1}{20.7} \left(\frac{I_m}{I_{sc}-I_m} + \ln\left(\frac{I_{sc}-I_m}{I_{sc}}\right) \right) \right] - \frac{2P_m}{V_{oc}} = 0 \quad (\text{II.17})$$

A partir de cette équation, on tire le courant I_m par une méthode numérique telle que la méthode de Newton-Raphson. Ensuite, la résistance R_s est calculée suivant l'équation (II.16). Cette valeur est substituée dans l'équation (5) pour avoir la caractéristique I-V.

II.4. Modèles explicites

Appelés aussi modèles de trois points (point de court-circuit, point de puissance maximale et point de circuit-ouvert), les modèles explicites sont régis par une fonction sous la forme $I=g(V)$ et nécessitent seulement quatre paramètres d'entrée, à savoir : le courant de court-circuit (I_{sc}), la tension de circuit-ouvert (V_{oc}), le courant maximal (I_m) et la tension maximale (V_m) [2].

La relation entre le courant I et la tension V est donnée par :

II.4.1. Modèle d'Akbaba et Alattawi

Akbaba & Alattawi (1995) ont suggéré un modèle mathématique explicite pour décrire le comportement des cellules et modules photovoltaïque basé sur l'équation suivante [15]:

$$I = \frac{V_{oc}+V}{A+BV^2-CV} \quad (\text{II.18})$$

Où A , B et C sont des paramètres d'ajustement.

Afin d'ajuster ces paramètres, on a recours aux conditions de court-circuit et de circuit-ouvert de la caractéristique I - V . Par conséquent, l'équation ci-dessus peut être réécrite en termes de variables non dimensionnelles $i = I / I_{sc}$ et $v = V / V_{oc}$ comme suit :

$$i = \frac{1-v}{1+av^2-bv} \quad (\text{II.19})$$

En gardant à l'esprit que

$$A = \frac{V_{oc}}{I_{sc}}; B = \frac{a}{I_{sc}V_{oc}}; C = \frac{b}{I_{sc}}. \quad (\text{II.20})$$

Il est à noter que le nombre de paramètres à ajuster dans l'équation (II.19) a été réduit à deux (a et b) dans l'équation (II.19).

Sont les deux équations suivantes (II.21) et (II.22) sont prises en compte,

$$A = (v, i) |_{mp} = (\alpha, \beta) \quad (\text{II.21})$$

$$\frac{\partial i}{\partial v} |_{mp} = -\frac{\alpha}{\beta} \quad (\text{II.22})$$

il est possible de dériver les équations suivantes :

$$B = \frac{1-\alpha}{1+\alpha^2-b\alpha} \quad (\text{II.23})$$

$$-\frac{\partial i}{\partial v} = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{(1+a\alpha^2-b\alpha)+(1-\alpha)(2a\alpha-b)}{(1-a\alpha^2-b\alpha)^2} \quad (\text{II.24})$$

Où, selon les équations (II.21) et (II.22), $\alpha=V/V_m$ et $\beta =I_m/I_{sc}$. Les solutions suivantes peuvent alors être obtenues :

$$a = \frac{\beta - \alpha}{\alpha^2 \beta} \quad (\text{II.25})$$

$$b = \frac{2\beta - 1}{\alpha\beta}$$

Par conséquent :les équations de A et B seront :

$$B = \frac{1}{V_{mp}} \left(\frac{V_{oc}}{I_{sc}V_{mp}} - \frac{1}{I_{mp}} \right) \quad (\text{II.26})$$

$$C = \frac{V_{oc}}{V_{mp}} \left(2 \frac{1}{I_{sc}} - \frac{1}{I_{mp}} \right) \quad (\text{II.27})$$

II.4.2. El-Tayyan

El-Tayyan (2006) a proposé une équation assez simple possédant seulement deux coefficients, C_1 et C_2 .

$$I = I_{sc} - C_1 \exp\left(\frac{V_{oc}}{C_2}\right) \left[\exp\left(\frac{V}{C_2}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.28})$$

Ces deux coefficients peuvent être estimés ou calculés à partir des points caractéristiques de la courbe I-V [11]. La solution approximative proposée par El-Trayan est la suivante :

$$c_1 = \frac{I_{sc}}{1-\exp\left(-\frac{V_{oc}}{C_2}\right)}. \quad (\text{II.29})$$

$$c_2 = \frac{I_{sc}-V_{sc}}{\ln\left(1-\frac{I_{mp}}{I_{sc}}\right)}. \quad (\text{II.30})$$

Si on remplace les deux variables adimensionnelles $i= I/ I_{sc}$ et $v= V/V_{oc}$, dans l'équation (II.29), celle-ci peut être réduite à une forme plus simple dépendant d'un seul paramètre ($a =V_{oc}/C_2$) sachant qu'aux conditions de court-circuit et circuit-ouvert, $(i,v)=(0,1)$.

$$i = 1 - \frac{\exp(av)-1}{\exp(a)-1}. \quad (\text{II.31})$$

La solution proposée par El-Tayyan remplit la première condition; c'est-à-dire qu'il correspond au point $(I, V) = (I_m, V_m)$.

Il y a aussi une autre solution qui remplit la deuxième condition :

$$\frac{\partial I}{\partial V} \Big|_{mp} = -\frac{I_m}{V_m} = \frac{C_1}{C_2} \exp\left(-\frac{V_{oc}}{C_2}\right) \exp\left(\frac{V_m}{C_2}\right). \quad (\text{II.32})$$

En utilisant l'expression pour C_1 dérivé de la condition de circuit-ouvert (II.29), il est alors possible de dériver l'équation suivante :

$$\frac{I_m}{V_m} C_2 \exp\left(-\frac{V_m}{C_2}\right) = -\frac{I_{sc}}{1-\exp\left(-\frac{V_{oc}}{C_2}\right)} \exp\left(-\frac{V_{oc}}{C_2}\right). \quad (\text{II.33})$$

Où, en supposant $V_{oc}/C_2 \gg 1$:

$$C_2 = \frac{I_{sc} V_m}{I_m} \exp\left(\frac{V_m - V_{oc}}{C_2}\right). \quad (\text{II.34})$$

Qui peut être résolu en utilisant la branche négative du fonction $W-1(z)$,

$$C_2 = \frac{I_{sc} V_{mp}}{W_{-1}\left[\left(1 - \frac{V_{oc}}{V_{mp}}\right) \frac{I_{mp}}{I_{sc}}\right]}. \quad (\text{II.35})$$

Il convient de mentionner qu'un modèle très similaire à l'équation d'El-Tayyan, qui prend également en compte les changements de température des cellules, a été proposé par Massi Pavan et al. [12,13].

II.4.3. Karmalkar & Haneefa

Karmalkar & Haneefa (2008) ont proposé le modèle suivant [16,24]:

$$i = 1 - (1 - \gamma) v - \gamma v^n \quad (\text{II.36})$$

Où i et v sont le courant de sortie adimensionnel et la tension de sortie respectivement, c et m sont des paramètres à calculer avec les niveaux de courant et de tension aux points $v=0.6$ et $i=0.6$. Compte tenu des points de la caractéristique I-V et les équations correspondant au point de puissance maximale, les équations suivantes peuvent être dérivées pour c et n :

$$\gamma = \frac{2\beta-1}{\alpha^{m(n-1)}} \pi r^2 \quad (\text{II.37})$$

$$m = \frac{W_{-1}\left(\frac{-\alpha^{-\frac{1}{c}} \ln \alpha}{c}\right)}{\ln \alpha} + \frac{1}{c} + 1. \quad (\text{II.38})$$

Où $\alpha = V_m/V_{oc}$ et $\beta = I_m/I_{sc}$, et le nouveau paramètre C est défini comme :

$$c = \frac{1-\beta-\alpha}{2\beta-1}. \quad (\text{II.39})$$

Ce sont les solutions exactes pour c et m obtenues à partir des conditions de puissance maximale. Néanmoins, si l'on prend en compte que $(1-\gamma) \ll 1$, des solutions approximatives peuvent être obtenues :

$$\gamma = 1 + \frac{1-\beta}{\alpha}. \quad (\text{II.40})$$

$$n = 1 + \frac{\ln(1-\beta)}{\ln \alpha}. \quad (\text{II.41})$$

De plus, compte tenu de l'approximation proposée par Deihimi al. [55]:

$$\left. \frac{\partial i}{\partial v} \right|_{v=1} \cong \left. \frac{\partial i}{\partial v} \right|_{v=0} 1. \quad (\text{II.42})$$

Une autre équation simple peut être obtenue pour γ , et la solution suivante peut être dérivée :

$$\gamma = \frac{2-n}{1-n}. \quad (\text{II.43})$$

$$n = 1 + \frac{\ln(1-\beta)}{\ln \alpha}. \quad (\text{II.44})$$

II.4.4. Das, Saetre et al.

Das (2011) [41] et Saetre et al [9] ont proposé indépendamment l'équation suivante :

$$\frac{I}{I_{sc}} = \left[1 - \left(\frac{v}{V_{oc}} \right)^f \right]^{\frac{1}{g}}. \quad (\text{II.45})$$

Où les paramètres du modèle f et g sont estimées avec des mesures de courant de sortie à $V/V_{oc}=0.8$ et $V/V_{oc} = 0.9$.

Il est aussi possible de trouver une solution pour les paramètres f et g à partir du point de puissance maximale. Les équations obtenues sont les suivantes :

$$\beta^g = 1 - \alpha^f. \quad (\text{II.46})$$

$$g\beta^g = f\alpha^f. \quad (\text{II.47})$$

Si on suppose une $f \ll 1$, alors :

$$g \ln(\beta) = \ln(1 - \alpha^f) \approx -\alpha^f. \quad (\text{II.48})$$

Par conséquent, les équations pour les deux paramètres f et g sont définies comme suit :

$$f = -\frac{1}{\ln(\beta)}. \quad (\text{II.49})$$

$$g = -\frac{\alpha^f}{\ln(\beta)}. \quad (\text{II.50})$$

II.5. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation des modèles mathématiques décrivant le comportement d'un dispositif photovoltaïque (cellule ou module). Nous avons divisé ces modèles en deux catégories : Modèles implicites et modèles explicite. Comme l'objet de ce mémoire de faire une étude comparative des modèles explicites les plus usuels, quatre modèles ont été présentés. Il s'agit plus précisément des modèles proposés par : Akbaba et Alattawi; El-Trayyan; Karmalkar & Haneefa et Das et al.

Chapitre III

Simulation et résultats

III.1. Introduction

L'objectif principal de ce troisième chapitre est de réaliser une étude comparative entre quatre modèles mathématiques explicites ou modèles de trois points les plus couramment utilisés dans la simulation du comportement d'un dispositif photovoltaïque. Pour ce faire, l'étude de simulation a été réalisée grâce au logiciel de simulation dynamique Matlab/Simulink.

En effet, dans ce chapitre nous présenterons l'implémentation de chaque modèle séparément et enfin, une étude comparative entre ces quatre techniques sera présentée.

III.1. Implémentation

Comme nous l'avons indiqué dans le chapitre précédent que les quatre modèles mathématiques explicites faisant l'objet de cette étude (modèle d'Akbaba et Alattawi; modèle d'El-Trayyan; modèle de Karmalkar & Haneefa et modèle de Das et al.) se basent uniquement les trois points significatifs d'une courbe expérimentale I-V d'un dispositif PV (cellule ou module PV) obtenue à certaines irradiance, $G(\text{W}/\text{m}^2)$ et température cellule, $T(^{\circ}\text{C})$, il s'agit bien sûr du point de court-circuit, du point de puissance maximale et du point de circuit-ouvert, qui sont définis respectivement par les quatre paramètres suivants : I_{sc} , V_m , I_m et V_{oc} .

Pour pouvoir établir cette étude comparative, nous avons implémenté ces quatre modèles et réalisé une étude de simulation à l'aide de logiciel Matlab/Simulink. En effet, les schémas bloc ou les diagrammes de ces modèles dans l'environnement Matlab/Simulink sont illustrés par les figures III.a, III.b, III.c et III.d. Il est à noter également comme il s'agit que, comme il s'agit bien évidemment d'équations explicites non modélisable en circuit électrique (i.e. elles n'ont pas de circuits électriques équivalent), donc leurs implémentation est uniquement basée sur les fonctions mathématiques intégrées (addition, soustraction, produit, fcn,...) dans la bibliothèque de Simulink.

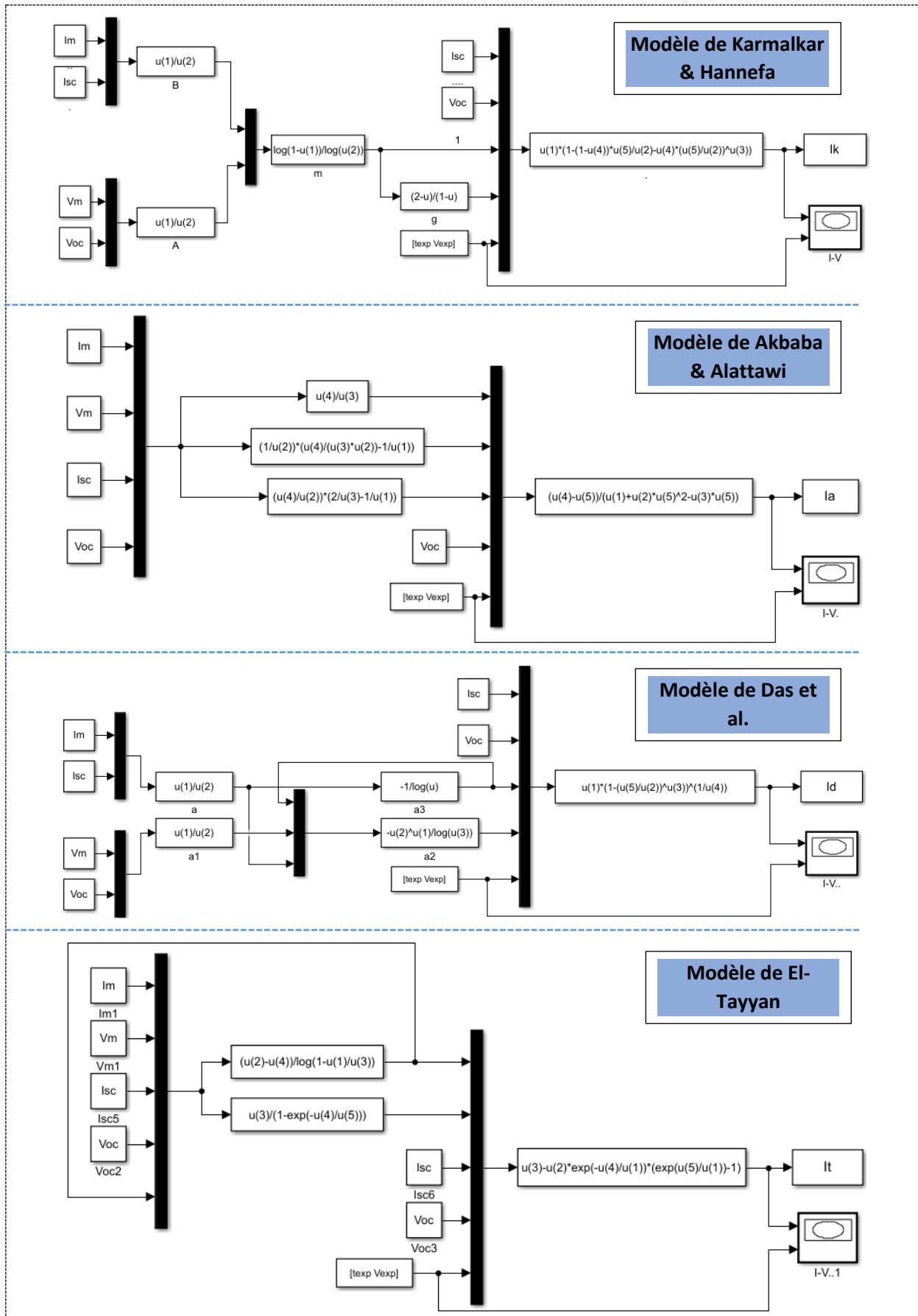


Figure : Diagrammes des quatre modèles dans l'environnement Matlab/Simulink

III.3. Simulation et résultats

Cette partie porte sur la validation des modèles étudiés. Afin de confirmer la précision de chaque modèle par rapport aux données expérimentales pour différents niveau d'éclairément et de température, une étude de simulation a été réalisée et appliquée à deux modules photovoltaïques de technologies de différentes (un module au Si-monocristallin, 160W/24V et un module au Si-polycristallin, 180W/24V). Par ailleurs, pour évaluer la précision et le modèle qui s'ajuste le mieux aux données aux données expérimentales, les critères de comparaison adoptés dans cette étude se réfèrent aux facteurs statistiques les plus connus, qui sont :

- **L'erreur** entre les valeurs simulées et les valeurs mesurées. Elle s'exprime par la relation suivante :

$$E = I_{i,s} - I_{i,m} \quad (\text{III.1})$$

- **L'erreur moyenne (ou MBE : Mean Bias Error)** entre les valeurs simulées et les valeurs mesurées, nous permet de voir si le modèle a tendance à surestimer ou sous-estimer les mesures. Elle s'exprime par la relation suivante :

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_{i,s} - I_{i,m}) \quad (\text{III.2})$$

- **La racine de l'erreur quadratique moyenne (ou RMSE : Root Mean Square Error)** nous permet de quantifier l'importance des erreurs (même unité que le paramètre sur lequel on évalue l'erreur). Elle s'exprime par la relation suivante :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_{i,sim} - I_{i,mes})^2} \quad (\text{III.3})$$

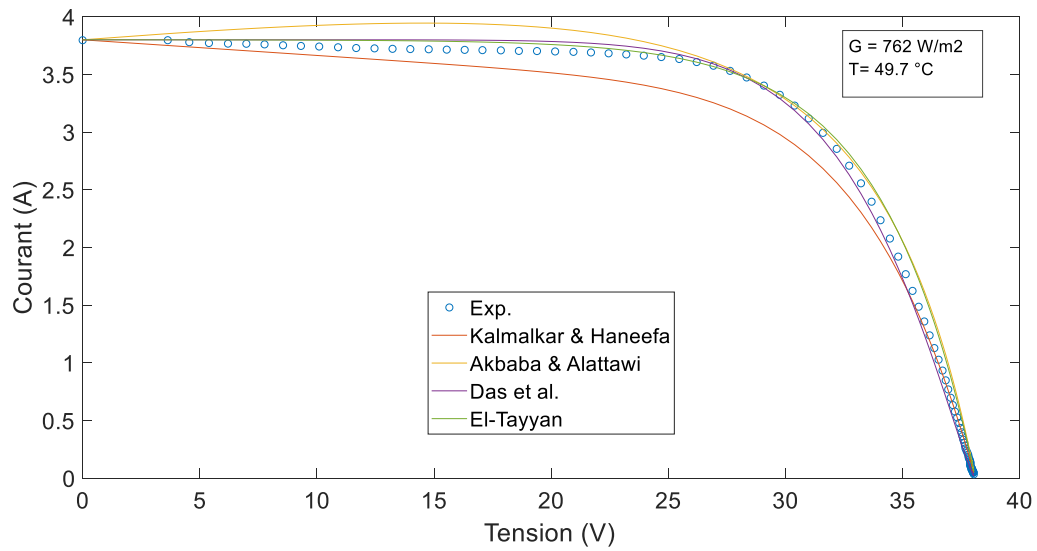
- **L'erreur relative au point de puissance maximale (ou ϵ_{Pm})**. Elle s'exprime par la relation suivante :

$$\epsilon_{Pm} = \frac{P_{m,sim} - P_{m,mes}}{P_{m,sim}} * 100 \quad (\text{III.4})$$

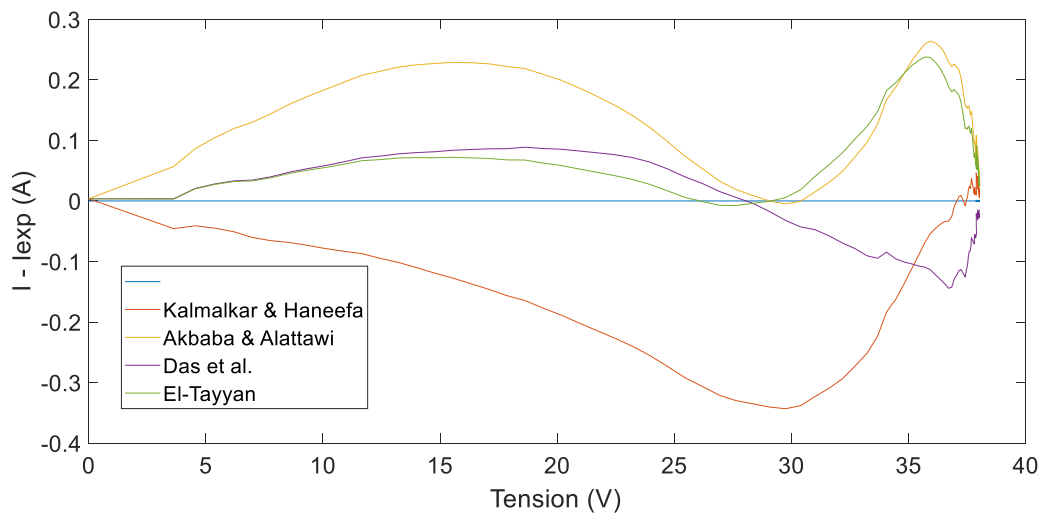
Où $I_{i,sim}$ et $I_{i,mes}$ sont les $i^{\text{èmes}}$ valeurs du courant simulé et mesuré respectivement et N est le nombre total de valeurs mesurées. $P_{m,sim}$ et $P_{m,mes}$ sont respectivement la puissance maximale simulée et mesurée.

Les résultats issus de cette étude de simulation et de comparaison entre ces quatre modèles explicites sont illustrés par les courbes I-V données aux figures III.1-III.6 et les tableaux comparatifs III.1 et III.2. Et au vu des résultats obtenus, nous avons pu déduire ce qui suit :

- Du point de vue puissance maximale, P_m , nous remarquons des écarts un peu élevés entre les valeurs simulées par le modèle Karmalkar & Haneefa et la valeurs mesurées, qui en terme d'erreurs relatives varient entre -12.27% - 5.81%. Tandis que les valeurs de P_m obtenues moyennant les modèles d'Akbaba et Alattawi; d'El-Trayyan; et de Das et al. sont en très bonnes concordance avec celles mesurées.
- Comme le montrent également clairement toutes les figures que les écarts, $I_{sim}-I_{mes}$, sont très importantes pour le modèle Karmalkar & Haneefa. En termes d'écart moyen, MBE, nous avons enregistré des valeurs très faibles pour le modèle de Karmalkar & Haneefa par rapport aux trois autres modèles. Nous pouvons conclure que le modèle de Karmalkar & Haneefa présente une sous-estimation de la caractéristique I-V pour les deux modules photovoltaïques étudiés.
- Le modèle explicite qui convient le mieux dans chaque cas est celui proposé par El-Trayyan.

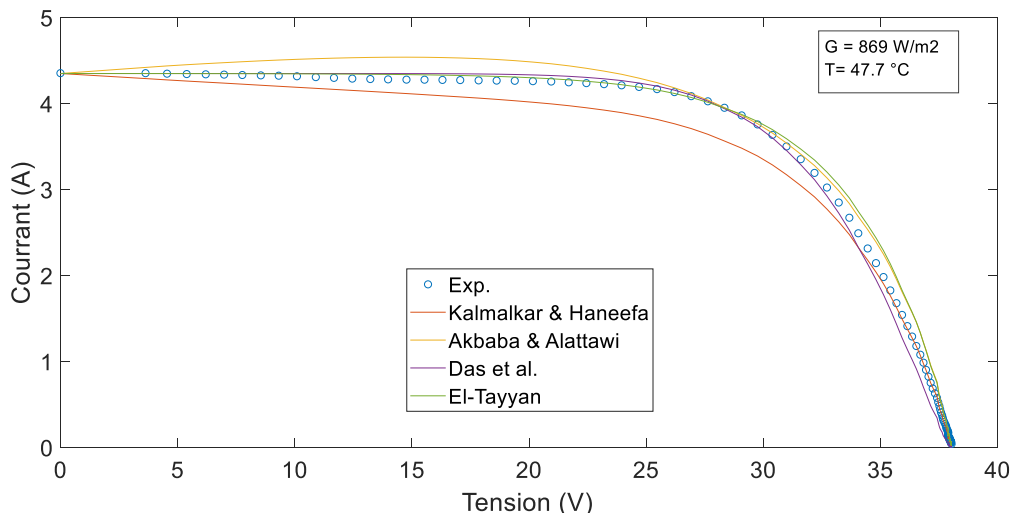


(a)

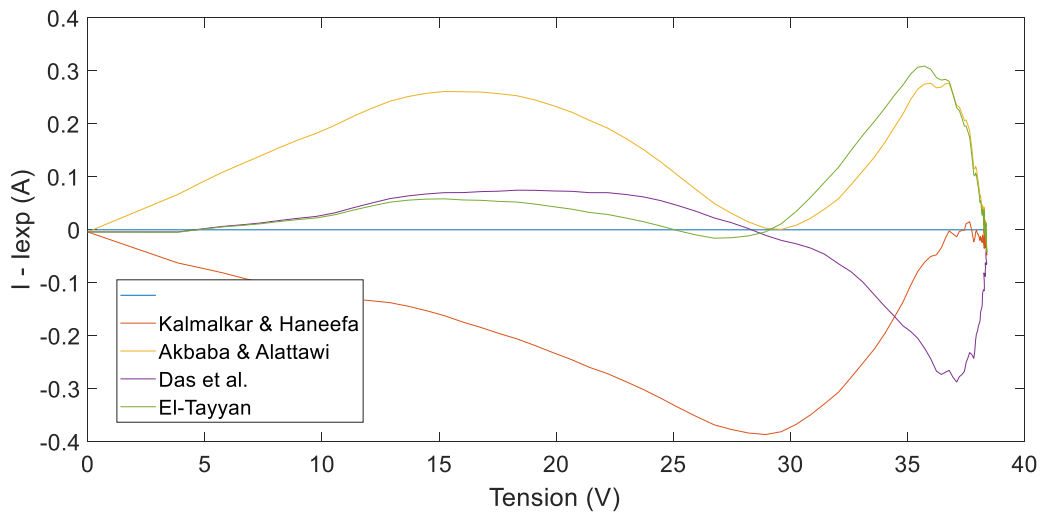


(b)

Figure III.1. Résultats de comparaison entre les données simulées et mesurées le module photovoltaïque (160W 24V, mono) à $G=762\text{W/m}^2$ et $T=49.7^\circ\text{C}$, a) Courbes I-V des quatre modèles, b) erreurs en le courant simulé et le courant mesuré relatifs aux quatre modèles.

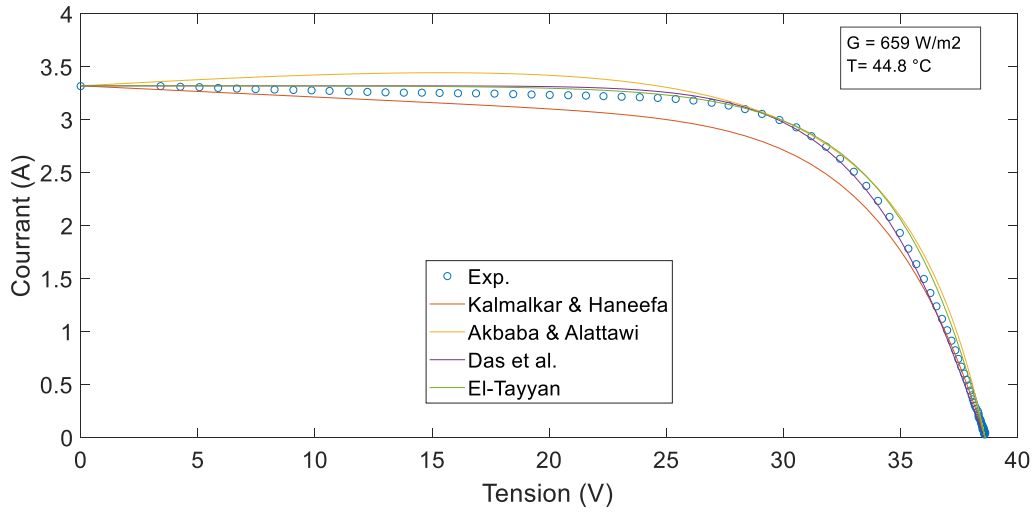


(a)

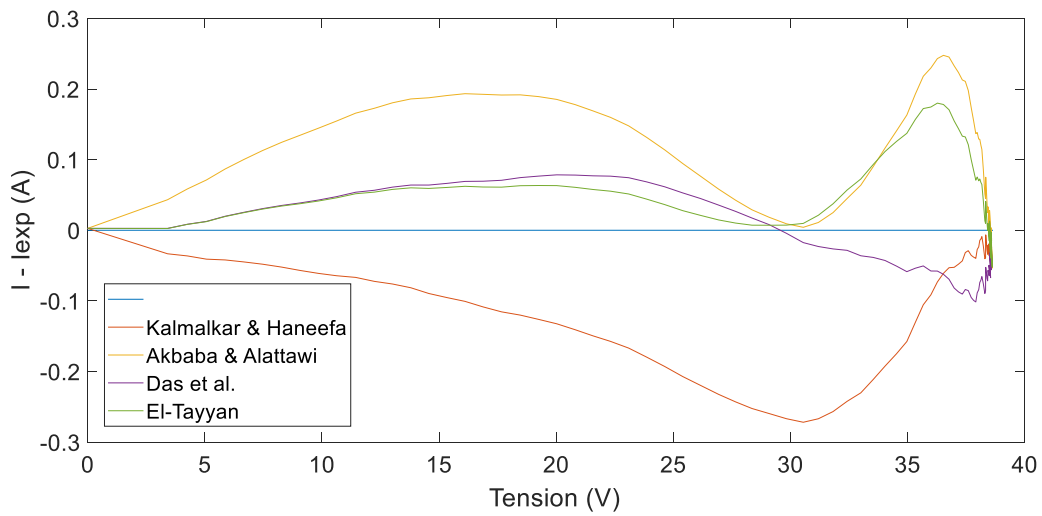


(b)

Figure III.2. Résultats de comparaison entre les données simulées et mesurées le module photovoltaïque (160W 24V, mono) à $G=869W/m^2$ et $T=47.7$, a) Courbes I-V des quatre modèles, b) erreurs en le courant simulé et le courant mesuré relatifs aux quatre modèles.



(a)



(b)

Figure III.3. Résultats de comparaison entre les données simulées et mesurées le module photovoltaïque (180W 24V, poly.) à $G=659\text{W/m}^2$ et $T=44.8$, a) Courbes I-V des quatre modèles, b) erreurs en le courant simulé et le courant mesuré relatifs aux quatre modèles.

Table III.1. Résultats de comparaison entre les données simulées et mesurées pour le module photovoltaïque (160W 24V, mono)

(a) Valeurs des trois points de départ :
(0, I_{sc})=(0, 3.8) ; (V_m, I_m)=(2.91, 3.40) ; (V_{oc},0)=(38.1, 0)

| Paramètres climatiques | Éclairement, G (W.m ⁻²) = 762 | | | | |
|--|---|--------------------------|--------|----------|-----------|
| | Température de la cellule, T(°C) = 49.7 | | | | |
| Puissance maximale, P _m (W) | Valeur mesurée | Valeur calculée (Modèle) | | | |
| | | Kalmalkar | Akbaba | Das | El-Tayyan |
| | 98.95 | 89.04 | 98.94 | 98.43 | 99.06 |
| Résultats de comparaison | <i>MBE</i> | -0.18071 | 0.1274 | -0.02454 | 0.08139 |
| | <i>RMSE</i> | 0.1437 | 0.1482 | 0.07241 | 0.103 |
| | $\varepsilon_{P_m}(\%)$ | -11.12 | 0 | -0.5252 | 0.1096 |

(b) Valeurs des trois points de départ :
(0, I_{sc})=(0, 3.8) ; (V_m, I_m)=(2.91, 3.40) ; (V_{oc},0)=(38.1, 0)

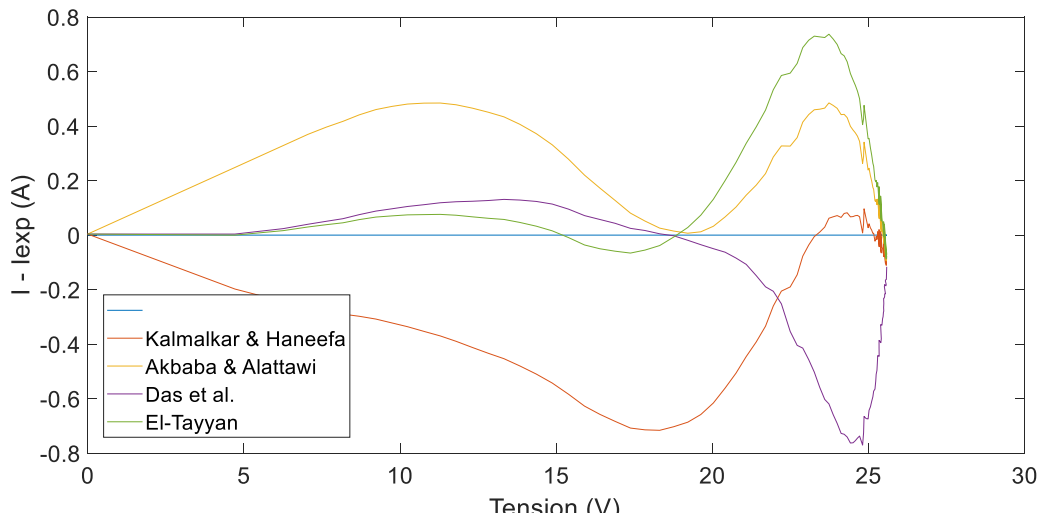
| Paramètres climatiques | Éclairement, G (W.m ⁻²) = 869 | | | | |
|--|---|-------------------------|--------|---------|-----------|
| | Température de la cellule, T(°C) = 47.7 | | | | |
| Puissance maximale, P _m (W) | Valeur mesurée (expérimentale) | Valeur simulée (Modèle) | | | |
| | | Kalmalkar | Akbaba | Das | El-Tayyan |
| | 114.4 | 103.2 | 114.4 | 114 | 114.7 |
| Résultats de comparaison | <i>MBE</i> | -0.1086 | 0.1189 | -0.0811 | 0.07593 |
| | <i>RMSE</i> | 0.1634 | 0.1545 | 0.1375 | 0.1226 |
| | $\varepsilon_{P_m}(\%)$ | -10.85 | 0 | -0.2736 | 0.294 |

(c) Valeurs des trois points de départ :
(0, I_{sc})=(0, 3.8) ; (V_m, I_m)=(2.91, 3.40) ; (V_{oc},0)=(38.1, 0)

| Paramètres climatiques | Éclairement, G (W.m ⁻²) = 659 | | | | |
|--|---|-------------------------|---------|----------|-----------|
| | Température de la cellule, T(°C) = 44.8 | | | | |
| Puissance maximale, P _m (W) | Valeur mesurée | Valeur simulée (Modèle) | | | |
| | | Kalmalkar | Akbaba | Das | El-Tayyan |
| | 89.45 | 81.46 | 89.69 | 89.29 | 89.74 |
| Résultats de comparaison | <i>MBE</i> | -0.18276 | 0.08854 | -0.01911 | 0.04016 |
| | <i>RMSE</i> | 0.1128 | 0.1229 | 0.05778 | 0.05778 |
| | $\varepsilon_{P_m}(\%)$ | -9.81 | 0.2691 | -0.1811 | 0.3313 |



(a)



(b)

Figure III.4. Résultats de comparaison entre les données simulées et mesurées le module photovoltaïque (180W 24V, poly.) à $G=993\text{W/m}^2$ et $T=53.9$, a) Courbes I-V des quatre modèles, b) erreurs en le courant simulé et le courant mesuré relatifs aux quatre modèles.

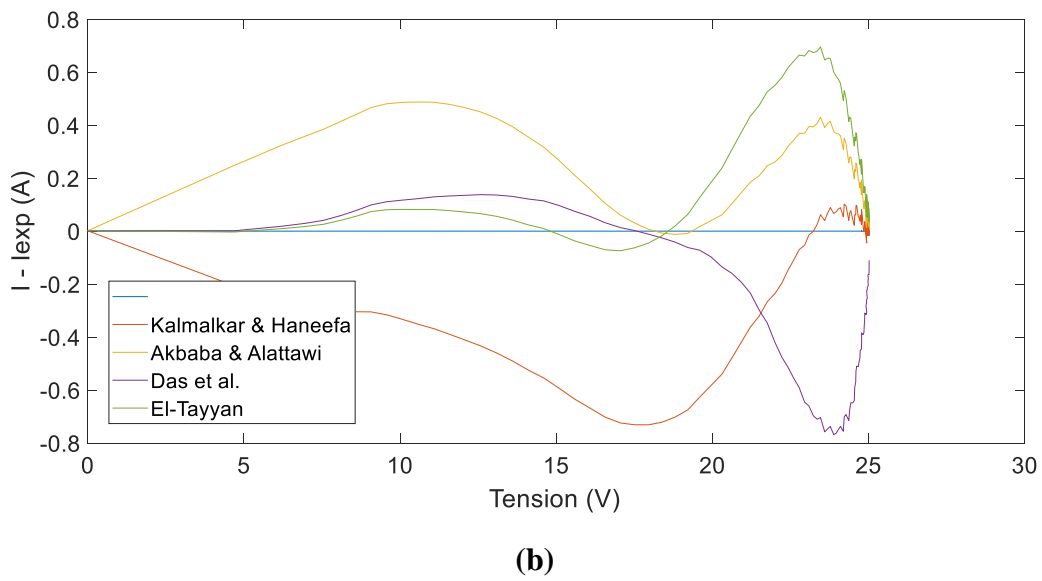
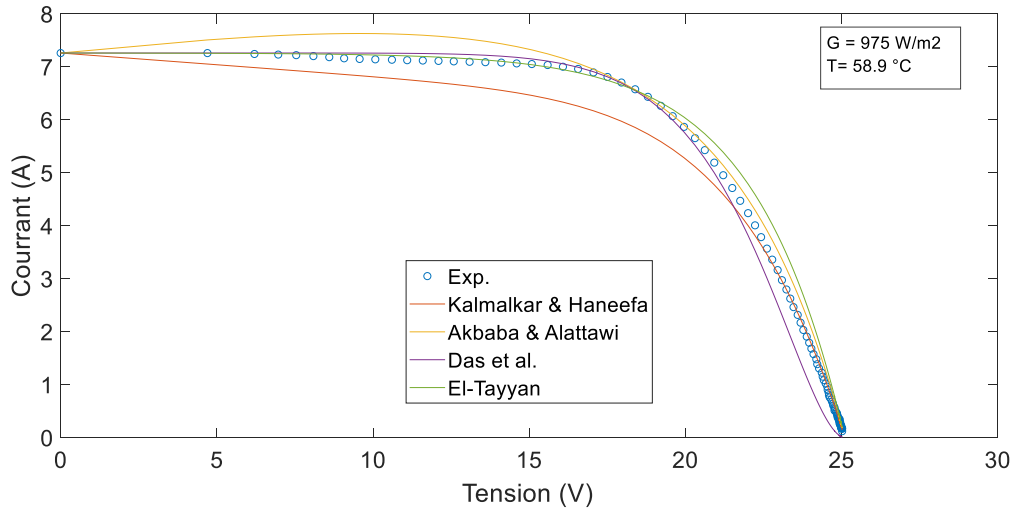
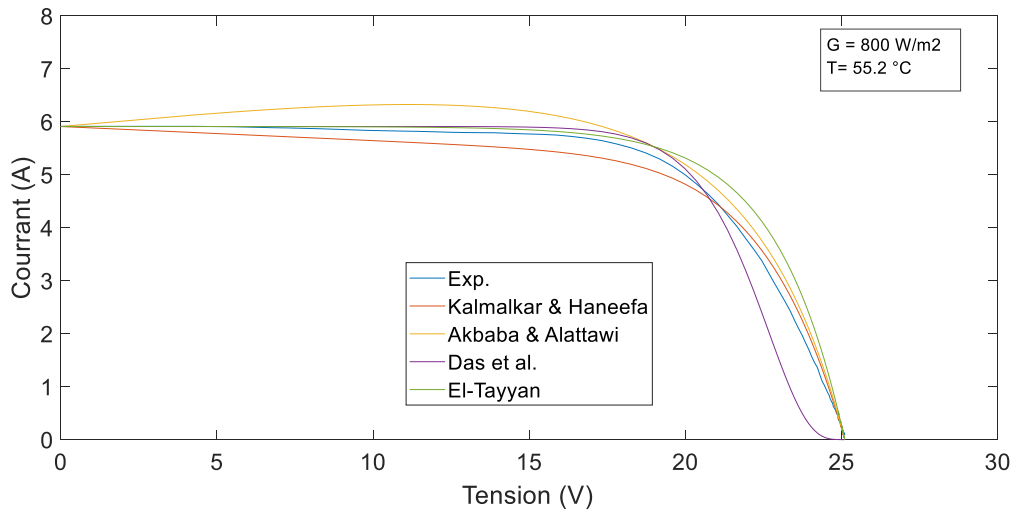
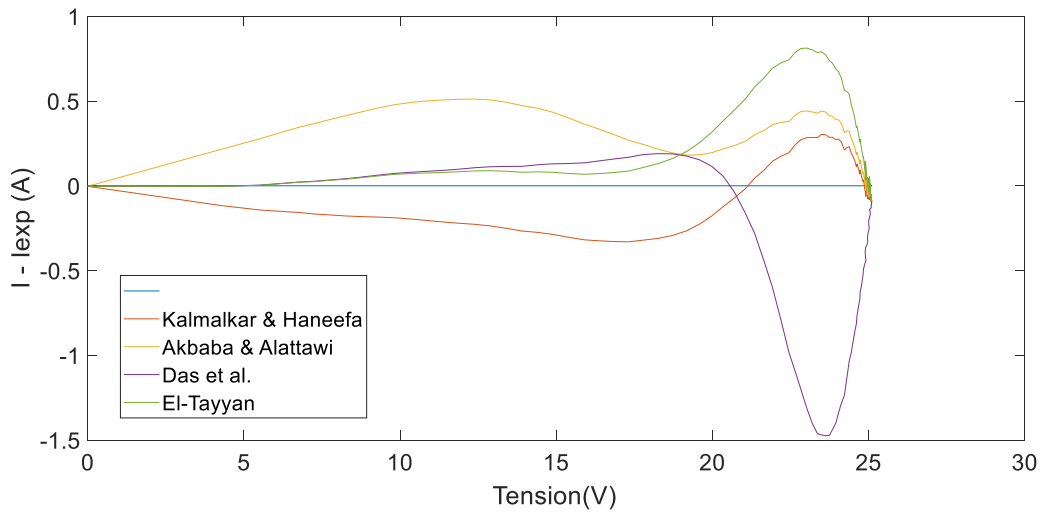


Figure III.5. Résultats de comparaison entre les données simulées et mesurées le module photovoltaïque (180W 24V, poly.) à $G=975\text{W/m}^2$ et $T=58.9$, a) Courbes I-V des quatre modèles, b) erreurs en le courant simulé et le courant mesuré relatifs aux quatre modèles.



(a)



(a)

Figure III.6. Résultats de comparaison entre les données simulées et mesurées le module photovoltaïque (180W 24V, poly.) à $G=800W/m^2$ et $T=55.2$, a) Courbes I-V des quatre modèles, b) erreurs en le courant simulé et le courant mesuré relatifs aux quatre modèles.

Table III.2. Résultats de comparaison entre les données simulées et mesurées pour le module photovoltaïque (180W 24V, poly.).

(a) Valeurs des trois points de départ :

$$(0, I_{sc})=(0, 3.8) ; (V_m, I_m)=(2.91, 3.40) ; (V_{oc}, 0)=(38.1, 0)$$

| Paramètres climatiques | Éclairement, $G (W.m^{-2}) = 993$ | | | | |
|------------------------------|--|-------------------------|--------|---------|-----------|
| | Température de la cellule, $T(^{\circ}C) = 53.9$ | | | | |
| Puissance maximale, $P_m(W)$ | Valeur mesurée | Valeur simulée (Modèle) | | | |
| | | Kalmalkar | Akbaba | Das | El-Tayyan |
| | 126.9 | 113.7 | 127.1 | 126.7 | 127.8 |
| Résultats de comparaison | <i>MBE</i> | -0.2745 | 0.2055 | -0.277 | 0.2066 |
| | <i>RMSE</i> | 0.297 | 0.2775 | 0.398 | 0.398 |
| | $\varepsilon_{P_m}(\%)$ | -11.59 | 0.1055 | -0.1595 | 0.6806 |

(b) Valeurs des trois points de départ :

$$(0, I_{sc})=(0, 3.8) ; (V_m, I_m)=(2.91, 3.40) ; (V_{oc}, 0)=(38.1, 0)$$

| Paramètres climatiques | Éclairement, $G (W.m^{-2}) = 975$ | | | | |
|------------------------------|--|-------------------------|--------|---------|-----------|
| | Température de la cellule, $T(^{\circ}C) = 58.9$ | | | | |
| Puissance maximale, $P_m(W)$ | Valeur mesurée (expérimentale) | Valeur simulée (Modèle) | | | |
| | | Kalmalkar | Akbaba | Das | El-Tayyan |
| | 120.9 | 107.7 | 120.8 | 120.5 | 121.5 |
| Résultats de comparaison | <i>MBE</i> | -0.259 | 0.2169 | -0.2836 | 0.2345 |
| | <i>RMSE</i> | 0.3054 | 0.2661 | -0.2836 | 0.3281 |
| | $\varepsilon_{P_m}(\%)$ | -12.27 | 0.4049 | -0.4049 | 0.496 |

(c) Valeurs des trois points de départ :

$$(0, I_{sc})=(0, 3.8) ; (V_m, I_m)=(2.91, 3.40) ; (V_{oc}, 0)=(38.1, 0)$$

| Paramètres climatiques | Éclairement, $G (W.m^{-2}) = 800$ | | | | |
|------------------------------|--|-------------------------|--------|---------|-----------|
| | Température de la cellule, $T(^{\circ}C) = 55.2$ | | | | |
| Puissance maximale, $P_m(W)$ | Valeur mesurée | Valeur simulée (Modèle) | | | |
| | | Kalmalkar | Akbaba | Das | El-Tayyan |
| | 101.6 | 96.65 | 105 | 104.9 | 106.3 |
| Résultats de comparaison | <i>MBE</i> | -0.3758 | 0.2129 | -0.3685 | 0.2242 |
| | <i>RMSE</i> | 0.1819 | 0.2895 | 0.6216 | 0.3558 |
| | $\varepsilon_{P_m}(\%)$ | -5.09 | 3.301 | 3.201 | 4.439 |

Conclusion générale

L'objectif principal du présent mémoire de Master était de réaliser une étude comparative entre certains modèles mathématiques explicites décrivant le comportement des dispositifs photovoltaïques (cellule, module ou générateur) sous conditions climatiques uniforme, i.e. en absence de tout phénomène de mismatch. L'intérêt de telle étude réside dans la recherche du modèle explicite qui présente la meilleure précision et qui s'ajuste le mieux aux données expérimentales (courbes I-V).

Dans une première partie, nous avons présenté les fondements de la conversion photovoltaïque à savoir : l'effet photovoltaïque, le principe de la conversion photovoltaïque, l'élément de base de la conversion photovoltaïque (cellule PV), les circuits électriques équivalent les plus usuels d'une cellule, les paramètres principaux caractérisant une cellule, puis nous avons présenté les différentes filières technologiques d'une cellule photovoltaïques. Enfin de cette partie, nous avons donné un descriptif du dispositif photovoltaïque commercialisé (module PV) permettant de former la source électrique d'un système PV.

Dans une seconde partie, nous avons les deux catégories de certains modèles mathématiques les utilisés décrivant le fonctionnement d'un dispositif photovoltaïque. Il s'agit des modèles implicites et modèles explicites.

Enfin, en une troisième partie, nous avons réalisé une étude comparative entre quatre modèles explicites qui ne nécessitent que quatre paramètres relatifs aux trois points caractérisant la courbe I-V (le courant de court-circuit, le courant et la tension correspondant à P_m et la tension de circuit-ouvert) comme données de base. En effet, en vue de valider de cette étude, nous avons réalisé une de simulation moyennant le logiciel Matlab/Simulink. Dans ce contexte, les données expérimentales de deux modules photovoltaïques de deux technologies différentes ont été exploitées. Au vu des résultats obtenus, nous avons pu remarquer que le modèle de s'ajuste le mieux aux données expérimentales comparativement aux autres modèle.

Comme perspective, nous préconisons d'étudier d'autres modèles explicites simplifiés, tels que : le modèle proposé par Shu-xian et al. (2013) qui se base sur le développement série de Taylor, le modèle utilisant la fonction de Lambert, etc.

Références bibliographiques

- [1] T. Markvart, L. Castaner, « photovoltaics fundamentals and applications », Preface Guide to usage of the handbooks by professional Groups, 2003.
- [2] Y. Pankow, « Étude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension », Thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'Arts et Métiers, Paris, décembre 2004.
- [3] A.Oi, « Design and simulation of photovoltaic water pumping system », Partial Fulfillment of the Requirements for the degree of master of science in Electrical Engineering, Faculty of California Polytechnic State University San Luis Obispo, september 2005.
- [4] I. Vechiu, « modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », Thèse de doctorat l'université du havre, Paris, décembre 2005.
- [5] A. Mabrouk, « Étude de conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique », mémoire de magister en électricité solaire de l'école nationale polytechnique El Harrach, Alger 2008.
- [6] S. Petibon, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, Janvier 2009.
- [7] R.P. Mukund, « Wind and solar Power Systems », CRC Press LLC, New York, 1999.
- [8] D. Turcotte, M.Ross and F. Sheriff, « Photovoltaic hybrid System Sizing and Simulation Tools », PV Horizon, Canada, 2001.
- [9] K. Helali, « Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative », Mémoire de Magister, UMMTO, 2012.
- [10] DAI. Concepts de base de la modélisation. évaluation par l'Agence des Etats-Unis pour le développement international (USAID), 2013.
- [11] Tossa, A.K.; Soro, Y.M.; Azoumah, Y.; Yamegueu, D. A new approach to estimate the performance and energy productivity of photovoltaic modules in real operating conditions. *Sol. Energy* 2014, 110, 543–560. [CrossRef]
- [12] Ortiz-Conde, A.; García-Sánchez, F.J.; Muci, J.; Sucre-González, A. A Review of Diode and Solar Cell Equivalent Circuit Model Lumped Parameter Extraction. *FACTA Univ. Ser. Electron. Energ.* 2014, 27, 57–102. [CrossRef]
- [13] Chin, V.J.; Salam, Z.; Ishaque, K. Cell modelling and model parameters estimation techniques for photovoltaic simulator application: A review. *Appl. Energy* 2015, 154, 500–519. [CrossRef]
- [14] Pindado, S.; Cubas, J. Simple mathematical approach to solar cell/panel behavior based on datasheet information. *Renew. Energy* 2017, 103, 729–738. [CrossRef]

- [15] Akbaba, M.; Alattawi, M.A.A. A new model for I-V characteristic of solar cell generators and its applications. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 1995, 37, 123–132. [CrossRef]
- [16] Karmalkar, S.; Haneefa, S. A Physically Based Explicit J–V Model of a Solar Cell for Simple Design Calculations. *IEEE Electron Device Lett.* 2008, 29, 449–451. [CrossRef]
- [17] Das, A.K. An explicit J–V model of a solar cell for simple fill factor calculation. *Sol. Energy* 2011, 85, 1906–1909. [CrossRef]
- [18] Saetre, T.O.; Midtgard, O.M.; Yordanov, G.H. A new analytical solar cell I-V curve model. *Renew. Energy* 2011, 36, 2171–2176. [CrossRef]
- [19] Das, A.K. An explicit J-V model of a solar cell using equivalent rational function form for simple estimation of maximum power point voltage. *Sol. Energy* 2013, 98, 400–403. [CrossRef]
- [20] El Tayyan, A.A. A simple method to extract the parameters of the single-diode model of a PV system. *Turk. J. Phys.* 2013, 37, 121–131.
- [21]]Massi Pavan, A.; Mellit, A.; Lughì, V. Explicit empirical model for general photovoltaic devices: Experimental validation at maximum power point. *Sol. Energy* 2014, 101, 105–116. [CrossRef]
- [22] Massi Pavan, A.; Mellit, A.; De Pieri, D.; Lughì, V. A study on the mismatch effect due to the use of different photovoltaic modules classes in large-scale solar parks. *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 2014, 22, 332–345. [CrossRef]
- [23] Rauschenbach, H. *Solar Cell Array Design Handbook*; Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology: Pasadena, CA, USA, 1976; Volume 1, p. 91103.
- [24]]Haneefa, S.; Karmalkar, S. An Analytical Method to Extract the Physical Parameters of a Solar Cell from Four Points on the Illuminated J–V Curve. *IEEE Electron Device Lett.* 2009, 30, 349–352.
- [25] Dash, D.P.; Roshan, R.; Mahata, S.; Mallik, S.; Mahato, S.S.; Sarkar, S.K. A compact J-V model for solar cell to simplify parameter calculation. *J. Renew. Sustain. Energy* 2015, 7, 013127. [CrossRef]
- [26] Miceli, R.; Orioli, A.; Di Gangi, A. A procedure to calculate the I-V characteristics of thin-film photovoltaic modules using an explicit rational form. *Appl. Energy* 2015, 155, 613–628.
- [27] T.F. El Shatter & M.T. El Hagry, "Sensitivity Analysis of the Photovoltaic Model Parameters", *IEEE, Cir. and Syst.*, Vol. 2, pp. 914 – 917, (1999).
- [28] T.Markvart and L. Castafier, "Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications. ELSEVIER, 2003

[29] J.A. Gow, C.D. Manning, « Development of a photovoltaic array model for use in power -electronics simulation studi