

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

*Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj*

*Faculté des Sciences et de la technologie*

*Département d'Electronique*

# *Mémoire*

*Présenté pour obtenir*

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : **Electronique**

**Spécialité : Electronique Des Systèmes Embarqués**

Par

- **Touahria Anis**
- **Djendel Youness**

*Intitulé*

***Modélisation VHDL-AMS d'une cellule photovoltaïque***

*Évalué le : 12/09/2021*

*Par la commission d'évaluation composée de\* :*

<i>Nom &amp; Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M<sup>lle</sup> HAMADACHE Fouzia</i>	<i>MAA</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. LATOUI Abdelhakim</i>	<i>MCA</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. DAACHI M. E. Hossine</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

*Année Universitaire 2020/2021*

## **Remerciements**

*Avant tout nous tenons nos remerciements à notre dieu de nos avoir  
donné la force et le Courage.*

*A la suite Nous tenons à remercier vivement **Dr. Abdelhakim  
Latoui** notre Encadreur qui a fourni des efforts énormes, par ses  
informations, ses conseils et ses encouragements.*

*Nous tenons également à remercier tous les professeurs de département  
d'électronique et a tous ce qui furent à un moment ou à toute instante partie  
prenante de ce travail.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à Mes très chers parents, pour leurs sacrifices,  
et qui n'ont jamais cessé de m'encourager que Dieu me les garde.*

*Mes très chères sœurs et mon frère*

*Ma grand-mère que dieu me le garde. Tous mes amis (es)*

## *Abstract*

In this Master Thesis, we present a method for modeling a photovoltaic cell using the VHDL-AMS language. Our objective is to study the climatic, temperature and irradiation effect on the photovoltaic cell, in order to get the best out of it.

The model presented in this work must be modeled separately, i.e., by modulating each component individually, whose objective is to obtain a more efficient I-V and P-V characteristic and thus improve the yield.

The study and simulation of the elements of this cell have shown that the main element, the photovoltaic generator, can deliver maximum power only for particular values of temperature and irradiation.

## *Résumé*

Dans cette mémoire, nous présentons une méthode de modélisation d'une cellule photovoltaïque en utilisant le langage VHDL-AMS. Notre objectif est d'étudier l'effet climatique, la température et d'irradiation sur la cellule photovoltaïque, pour en tirer le meilleur parti.

Le modèle présenté dans ce travail doit être modélisé de manière séparée, c'est-à-dire en modulant chaque composant individuellement, dont l'objectif est d'obtenir une caractéristique I-V et P-V plus efficace et ainsi améliorer le rendement.

L'étude et la simulation des éléments de cette cellule ont montré que l'élément principal, le générateur photovoltaïque, ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières de la température et d'irradiation.

## *ملخص*

في هذه الأطروحة، نقدم طريقة لنمذجة الخلية الكهروضوئية باستخدام لغة VHDL AMS. هدفنا هو دراسة تأثير المناخ ودرجة الحرارة والإشعاع على الخلية الكهروضوئية لتحقيق أقصى استفادة منها.

يجب أن يتم نمذجة النموذج المقدم في هذا العمل بشكل منفصل، أي عن طريق تعديل كل مكون على حدة، والهدف منه هو الحصول على خاصية I-V و P-V أكثر كفاءة وبالتالي تحسين الأداء.

أظهرت دراسة ومحاكاة عناصر هذه الخلية أن العنصر الرئيسي، المولد الكهروضوئي، يمكنه فقط توفير الطاقة القصوى لقيم معينة لدرجة الحرارة والإشعاع.

# Sommaire

Introduction générale .....	1
<b>Chapitre I Introduction à l'énergie photovoltaïque</b>	
I.1 Introduction .....	2
I.2 Historique .....	2
I.3 La cellule photovoltaïque .....	2
I.4 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque .....	3
I.5 Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque .....	3
I.6 Le principe de la conversion photovoltaïque .....	4
I.6.1 L'absorption de la lumière .....	4
I.6.2 Le transfert de l'énergie .....	5
I.6.3 La collecte des charges .....	5
I.7 Avantages et inconvénients du photovoltaïque .....	6
I.7.1 - Avantages .....	6
I.7.2 - Inconvénients .....	6
I.8 Conclusion .....	6
<b>Chapitre II Présentation du langage de modélisation comportementale VHDL-AMS</b>	
II.1 Introduction .....	8
II.2 La modélisation comportementale VHDL-AMS .....	8
II.3 Caractéristiques d'un modèle comportemental .....	9
II.4 Un modèle comportemental par la méthode ascendante .....	9
II.5 Un modèle comportemental par la méthode descendante .....	9
II.6 Un modèle comportemental par la méthode « meet in the middle » .....	10
II.7 Environnement de travail VHDL-AMS .....	10
II.8 Structure des modèles VHDL-AMS .....	11
II.8.1 Déclaration d'entité .....	11
II.8.2 Déclaration d'architecture .....	12
II.8.2.1 Déclaration d'architecture structurelle .....	12
II.8.2.2 Déclaration d'architecture comportementale .....	12
II.9 Exemples de modèles VHDL-AMS .....	12
II.9.1 Modèle physique .....	12
II.9.2 Modèle comportemental d'un circuit : comparateur de tension .....	13
II.10 Choix de simulateur VHDL-AMS .....	14

II.10.1 Simplorer .....	14
II.10.2 SystemVision .....	14
II.11 Les avantages du langage VHDL-AMS .....	15
II.12 Conclusion .....	15
<b>Chapitre III Modélisation et simulation d'une cellule PV par VHDL-AMS</b>	
III.1 Introduction .....	16
III.2 Modèle à cinq paramètres d'une cellule photovoltaïque .....	16
III.2.1 le photo-courant .....	16
III.2.2 Tension à circuit ouvert .....	16
III.2.3 Facteur de forme .....	16
III.2.4 La résistance série $R_s$ .....	16
III.2.5 La résistance Shunt .....	17
III.3 La modélisation avec ANSYS Simplorer .....	19
III.3.1 Code VHDL AMS .....	19
III.3.2 Le schéma électrique en Simplorer .....	23
III.3.3 Effets de variation de l'irradiation solaire .....	24
III.3.4 Effets de variation de la température .....	25
III.4 La modélisation avec SystemVision .....	26
III.4.1 Le schéma électrique en SystemVision .....	26
III.4.2 Code VHDL-AMS en SystemVision .....	27
III.4.3 Propriétés des quelques composants .....	28
III.4.4 Effets de variation de l'irradiation solaire .....	29
III.4.5 Effets de variation de la température .....	30
III.5 La modélisation avec Matlab / Simulink .....	32
III.5.1 Schéma de blocs .....	32
III.5.2 Code Matlab .....	33
III.5.3 Effets de variation de l'irradiation solaire .....	34
III.5.4 Effets de variation de la température .....	34
III.6 Conclusion .....	35
Conclusion générale .....	36
Références bibliographiques .....	37

## *Table des illustrations*

<b>Figure I.1</b>	Efficacité des cellules photovoltaïques
<b>Figure I.4</b>	Modèle d'une cellule photovoltaïque
<b>Figure I.5.1.1</b>	Un gap direct
<b>Figure I.5.1.2</b>	Un gap indirect
<b>Figure II.7</b>	Environnement de travail VHDL-AMS
<b>Figure II.8</b>	Structure d'un modèle VHDL-AMS
<b>Figure II.8.1</b>	Code pour la déclaration d'entités
<b>Figure II.9.1</b>	Modèle VHDL-AMS d'une capacité
<b>Figure II.9.2.1</b>	le symbole du l'équation comparateur
<b>Figure II.9.2.2</b>	Code VHDL-AMS pour le modèle comportemental du comparateur
<b>Figure II.10.1</b>	Interface utilisateur ANSYS Simplorer
<b>Figure II.10.2</b>	Interface utilisateur SystemVision
<b>Figure III.2</b>	Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque
<b>Figure III.3.1.a</b>	Modèle VHDL-AMS d'une résistance
<b>Figure III.3.1.b</b>	Modèle VHDL-AMS d'une résistance Shunt
<b>Figure III.3.1.c</b>	Modèle VHDL-AMS d'une diode
<b>Figure III.3.1.d</b>	Modèle VHDL-AMS d'une source de tension
<b>Figure III.3.1.e</b>	Modèle VHDL-AMS d'un générateur PV
<b>Figure III.3.1.f</b>	Modèle VHDL-AMS d'une cellule photovoltaïque
<b>Figure III.3.2.1</b>	Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque
<b>Figure III.3.2.2</b>	Caractéristiques d'un générateur photovoltaïque
<b>Figure III.3.3</b>	Caractéristique I-V pour différentes valeurs d'irradiation
<b>Figure III.3.4</b>	Caractéristique I-V pour différentes valeurs de température
<b>Figure III.4</b>	Système liée à la charge
<b>Figure III.4.1.1</b>	Schéma électrique d'une cellule PV dans SystemVision
<b>Figure III.4.1.2</b>	Quatre schémas de cellule PV dans SystemVision
<b>Figure III.4.2.a</b>	Modèle VHDL-AMS d'une résistance variable
<b>Figure III.4.2.b</b>	Modèle VHDL-AMS d'une Source de quantité-constante
<b>Figure III.4.3.1</b>	La diode
<b>Figure III.4.3.2</b>	Le générateur de fonction de tension
<b>Figure III.4.3.1</b>	Caractéristique I-V pour différentes valeurs d'irradiation
<b>Figure III.4.3.2</b>	Caractéristique P-V pour différentes valeurs d'irradiation
<b>Figure III.4.4.1</b>	Caractéristique I-V pour différentes valeurs de température
<b>Figure III.4.4.2</b>	Caractéristique P-V pour différentes valeurs de température
<b>Figure III.5.1</b>	Le schéma bloc d'une cellule photovoltaïque
<b>Figure III.5.2</b>	Code Matlab pour la modélisation d'une cellule photovoltaïque
<b>Figure III.5.3</b>	Caractéristiques I-V et P-V pour différentes valeurs d'irradiation
<b>Figure III.5.3</b>	Caractéristiques I-V et P-V pour différentes valeurs de température

# *Introduction générale*

Selon un rapport de l'agence Internationale de l'Énergie (International Energy Agency IEA, 2012), 80% de l'énergie consommée dans le monde provient de gisements de combustibles fossiles (pétrole, gaz...). La demande énergétique mondiale ne cesse d'accroître et devrait augmenter de plus d'un tiers sur la période s'étendant jusqu'à 2035 a-t-elle ajouté. Or, ces ressources d'énergies posent de sérieux problèmes : outre que leurs stocks sont en quantité limitée (elles sont épuisables), elles y sont premières sources d'émission des gaz à effet de serre ce qui contribue massivement au réchauffement climatique. C'est pourquoi que, ces dernières années, les énergies renouvelables et particulièrement l'énergie photovoltaïque, s'est imposée comme solution qui contribue sans nul doute à la réduction des gaz à effet de serre d'une part, et à la production de l'électricité. Selon toujours l'IEA, la première source mondiale de production d'électricité sera, en 2035, en effet l'énergie photovoltaïque. Par ailleurs, l'élément clé dans ces systèmes reste en effet la cellule solaire. C'est pourquoi, depuis un certain nombre d'années, les ingénieurs se sont penchés sur le développement de plusieurs modèles de cellules photovoltaïques afin d'étudier les différents paramètres qui influent sur leur caractéristique I-V.

Notre travail rentre dans ce cadre et nous nous proposons de développer un modèle VHDL-AMS d'une cellule photovoltaïque. Pour ce faire, nous nous proposons de développer un modèle d'une cellule à une simple diode. Ensuite, il faudra tracer sa caractéristique I-V et de la comparer avec celle d'une cellule réelle. Enfin, il faudra étudier l'effet des différents paramètres (température, irradiation, résistance série, ...) sur la caractéristique I-V du modèle développé et de tracer les différents graphes qui y correspondent.

Outre cette introduction, le présent manuscrit est organisé en trois chapitres. Le premier chapitre introduit les notions de base de l'énergie solaire photovoltaïque.

Le deuxième chapitre, quant à lui, est consacré à une présentation succincte du langage de modélisation comportemental VHDL-AMS. Cependant, le troisième chapitre propose le développement d'un modèle VHDL-AMS d'une cellule photovoltaïque par les outils Simplorer de ANSOFT et SystemVision de SIEMENS. Les résultats de simulation obtenus sont également présentés et interprétés dans ce même chapitre. À l'issue de ce troisième chapitre, nous présentons une conclusion générale sur nos travaux réalisés dans le cadre de notre projet de Master.



# **Chapitre I**

## **Introduction à l'énergie photovoltaïque**

# Chapitre I Introduction à l'énergie photovoltaïque

## I-1 Introduction :

Le terme photovoltaïque est une combinaison du mot grec phós, photós (lumière, de la lumière) et du nom du physicien italien Alessandro Volta (1745-1825). Il a découvert la première batterie électrochimique fonctionnelle et l'unité d'électricité, le volt, porte son nom [1].

La conversion directe du rayonnement solaire en électricité est souvent décrite comme une conversion d'énergie photovoltaïque (PV) car elle est basée sur l'effet photovoltaïque. En général, l'effet photovoltaïque signifie la génération d'une différence de potentiel à la jonction de deux matériaux différents en réponse à un rayonnement visible ou autre [2].

## I-2 Historique :

En 1839, les français Antoine Becquerel découvre l'effet photovoltaïque. C'est en 1883, que la découverte de Becquerel a été utilisée par l'Américain Charles Fritts pour produire la première cellule photovoltaïque [3].

D'après EDF, en 2014, 6% de la production d'électricité en France était produite grâce à l'énergie solaire ; ce qui correspond à une croissance de +27,5% par rapport à 2013. En 2016, l'énergie solaire photovoltaïque représentait 1,6% de la production mondiale et produisait 375 TWh contre 246 TWh en 2015. L'énergie solaire photovoltaïque se développe davantage chaque année. En 2017, la production atteignait 500 TWh. Son aspect renouvelable est un attrait conséquent. L'Agence internationale de l'énergie prévoit que l'énergie solaire photovoltaïque produite atteigne 16% de la production mondiale d'électricité en 2050 [3].

## I-3 La cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est composée de plusieurs couches de matériaux, chacune ayant un but spécifique. La couche la plus importante est la couche semi-conductrice spécialement traitée. Elle est constituée de deux couches distinctes (de type p et de type n) et c'est elle qui convertit l'énergie du soleil en électricité utile par un processus appelé effet photovoltaïque. De chaque côté du semi-conducteur se trouve une couche de matériau conducteur qui recueille l'électricité produite. La face arrière peut se permettre d'être entièrement recouverte de conducteur, alors que la face avant doit

utiliser les conducteurs avec parcimonie pour ne pas empêcher une grande partie du rayonnement solaire d'atteindre le semi-conducteur. La dernière couche, est la couche anti-reflet [4].

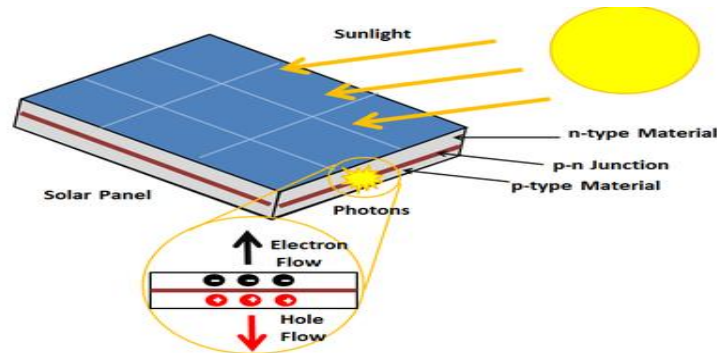


Figure I.3 : efficacité des cellules photovoltaïques

#### I-4 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

En traversant la cellule photovoltaïque, les photons arrachent des électrons aux atomes de silicium des deux couches n et p. Les électrons libérés se déplacent alors dans toutes les directions. Après avoir quitté la couche p, les électrons empruntent ensuite un circuit pour retourner à la couche n. Ce déplacement d'électrons n'est autre que de l'électricité. Le produit des deux correspond à la puissance électrique délivrée par la cellule qui convertie directement une partie de l'énergie lumineuse en énergie électrique. On a trois mécanismes [5]:

- Absorption des photons par le matériau constituant le dispositif.
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur.
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

#### I-5 Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque :

La puissance électrique délivrée par une cellule photovoltaïque est le produit de la tension par le courant qu'elle génère. Ces deux grandeurs, courant et tension, dépendent à la fois des propriétés électriques de la cellule mais aussi de la charge électrique à ses bornes. Ces propriétés électriques de la cellule sont synthétisées dans un graphe qu'on appelle caractéristique courant-tension [8].

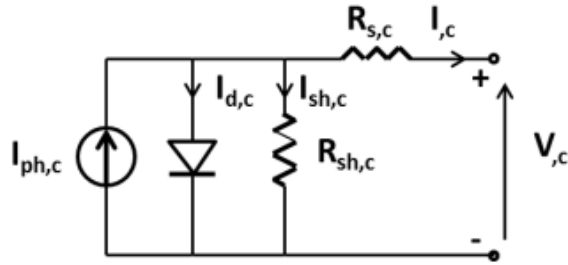


Figure I.5 Modèle d'une cellule photovoltaïque

En ce qui concerne l'équation de courant généré par la cellule, il pourra être présenté par l'équation suivante :

$$I_c = I_{ph,c} - I_{0,c} \left( \exp \frac{q(V_c + R_{s,c} I_c)}{aKT} - 1 \right) - \frac{(V_c + R_{s,c} I_c)}{R_{sh,c}}$$

Avec :

$I_{ph,c}$  Le photo-courant d'une cellule

$I_{0,c}$  Le courant de saturation inverse de la diode

$q$   $a$   $K$   $T$  Désignent respectivement la charge de l'électron, facteur d'idéalité de la diode, Constante de Boltzmann et la température de la cellule.

$V_c$  La tension aux bornes de la cellule

$I_c$  Le courant de la cellule

$R_{s,c}$   $R_{sh,c}$  Les résistances série et shunt

## I-6 Le principe de la conversion photovoltaïque :

### I-6.1 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 présumée être entièrement occupée par des électrons et la bande de conduction entièrement vide [9].

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 [9].

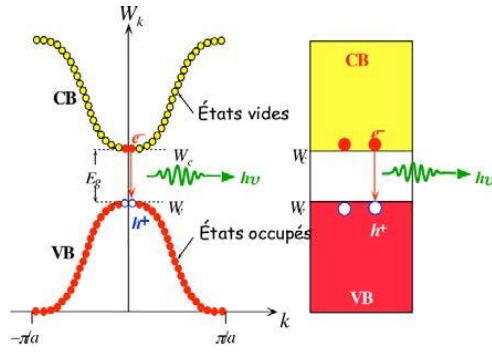


Figure 1.7.1.1 : Un gap direct

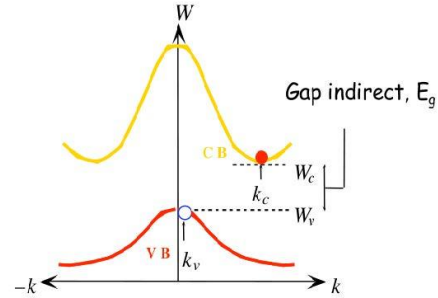


Figure 1.7.1.2 : Un gap indirect

### I-6.2 Le transfert de l'énergie

Les photons absorbés vont transférer leur énergie aux électrons périphériques des atomes. Ces électrons seront alors, si l'énergie apportée par le photon le permet, autrement dit si l'énergie apportée par le photon est supérieure à celle du gap. Un trou est créé correspond au comportement d'une bande entièrement pleine privée d'un électron. La circulation des électrons dans un sens et des trous dans l'autre formeront un courant électrique, lorsqu'une charge sera branchée [9].

### I-6.3 La collecte des charges

Le fait de créer des paires électron-trou ne suffit pas car celles-ci peuvent se recombiner naturellement provoquant uniquement de l'énergie thermique. Il faut séparer les charges pour qu'elles puissent circuler sans se recombiner. Une solution est de créer un champ électrique dans le matériau. Pour cela, on dope une partie d'un semi-conducteur en atomes ayant un électron de valence supplémentaire par rapport à l'atome du semi-conducteur. Il y aura un excédent de charges négatives. Cette partie sera par conséquent donneuse d'électrons. On dit qu'elle est dopée de type n. Une autre partie de semi-conducteur sera dopée en atomes ayant un électron de valence de moins que l'atome du matériau semi-conducteur. Il y aura cette fois un excédent de charges positives. Le matériau deviendra alors accepteur d'électrons [9].

La mise en contact de ces deux zones provoquera un champ électrique. En effet, les charges négatives excédentaires du matériau dopé n chercheront à rejoindre les charges positives du matériau dopé p. Et inversement pour les charges positives excédentaires du matériau p [9].

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. Ces deux contributions s'ajoutent pour former un photo-courant résultant  $I_{ph}$  [9].

## **I-7 Avantages et inconvénients du photovoltaïque :**

### ***I-7.1 - Avantages :***

- Inépuisable et non polluante
- Propre et ne dégage pas de gaz à effet de serre
- Les frais de maintenance et de fonctionnement d'une installation thermique sont relativement faibles
- Le rendement énergétique est positif : il faut en moyenne entre 3 et 4 ans pour que le panneau produise l'énergie nécessaire à sa fabrication et un panneau solaire produit en moyenne entre 9 à 14 fois l'énergie qu'il a consommé pour sa fabrication [10].

### ***I-7.2 - Inconvénients :***

- Le coût d'investissement d'une installation solaire thermique est relativement élevé.
- La production d'énergie solaire n'est possible que lorsqu'il y a du soleil.
- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles et de l'ordre de 20 % (pour les meilleurs). L'énergie photovoltaïque convient donc mieux pour des projets à faible besoins, comme une maison unifamiliale, par exemple [10].

## **I-8 Conclusion**

L'énergie photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par la cellule photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque.

Nous avons rappelé dans ce chapitre le principe de la conversion photovoltaïque et les caractéristiques électriques fondamentales. Nous exposons ensuite un schéma électrique qui permet de modéliser une cellule photovoltaïque que nous comparons aux mesures I-V et P-V. Enfin nous discutons les principes de la conversion photovoltaïque et les avantages et les inconvénients du photovoltaïque.

## **Chapitre II**

# **Présentation du langage de modélisation comportementale VHDL-AMS**

# Chapitre II Présentation du langage de modélisation comportementale VHDL-AMS

## II-1 Introduction

Le langage VHDL-AMS, dont la dénomination officielle est VHDL 1076.1-1999, est une extension du langage VHDL "classique" 1076-1993 avec lequel il offre une compatibilité ascendante totale. Il constitue la synthèse entre plusieurs extensions analogiques de VHDL.

Ce langage permet de modéliser tout système dont le comportement peut être décrit par des équations différentielles algébriques (Differential Algebraic Equations) en fonction du temps. Il peut prendre en compte des systèmes conservatifs ou non, multi-technologiques [11].

Le langage VHDL-AMS permet de supporter la conception à plusieurs niveaux :

- Niveau circuit : modélisation de circuits numériques et analogiques, abstraction possible grâce à des modèles comportementaux de complexités variables.
- Niveau système : modélisation de systèmes complets comme une chaîne d'acquisition de données d'un capteur avec traitement numérique [12].

## II-2 La modélisation comportementale VHDL-AMS

Le niveau de modélisation comportementale représente la première description différenciée du système global. Il a une position centrale dans le flot de conception des systèmes mixtes, indispensable à la phase de conception descendante comme à la phase ascendante [13].

Un modèle comportemental peut être défini comme étant une représentation abstraite ou une description d'un système physique dont on ne conserve que les aspects essentiels à une certaine utilisation. Ces aspects ou comportements expriment des relations de cause à effet, des algorithmes, des processus ou des équations définissant des relations entre variables qui représentent des grandeurs physiques d'entrées/sorties [14].

Ainsi, un modèle comportemental doit répondre aux exigences suivantes : [15] [16]

- Une description fidèle des comportements choisis pour la représentation du système lorsque celui-ci est soumis aux stimuli relatifs à son utilisation.
- Une simulation rapide et fiable pour les différentes conditions d'utilisation et les différents modes de simulation.



- Une compatibilité des nœuds d'entrées/sorties avec les autres composantes du système global.
- Une transportabilité du modèle pour permettre sa réutilisation en tant qu'IP.
- Une approche ascendante où les modèles sont extraits à partir d'une description hiérarchiquement inférieure.
- Une approche descendante où les modèles sont génériques et principalement destinés aux premières phases du flot de conception [15] [16].

### **II-3 Caractéristiques d'un modèle comportemental**

On y définit des entrées/sorties qui sont généralement ceux du circuit modélisé et des paramètres qui permettent de modifier et d'ajuster les caractéristiques de transfert. Un modèle comportemental doit être fiable. Les critères de fiabilité sont [12] :

- Des paramètres génériques permettant d'adapter le modèle pour toute une classe de circuits similaires.
- Une bonne précision par rapport au circuit réel.
- Un gain de temps en simulation comportementale (suffisamment important).
- Une convergence sûre des équations dans la modélisation pour les conditions d'opérations et les modes de simulations.
- Une description complète des caractéristiques de transfert du circuit.

### **II-4 Un modèle comportemental par la méthode ascendante**

La méthode ascendante « bottom-up » consiste en l'élaboration d'un modèle comportemental en partant d'un système existant ou d'une modélisation de niveau inférieur.

Les modèles obtenus doivent permettre une simulation bien plus rapide qu'une description niveau transistor par exemple, tout en gardant les caractéristiques essentielles du circuit modélisé [17].

### **II-5 Un modèle comportemental par la méthode descendante**

Cette famille des modèles comportementaux « top-down » est composée de modèles génériques, car généralement décrits indépendamment d'un composant ou circuit de référence. L'approche qui conduit à l'obtention de ce type de modèle a pour base la fonction première de l'objet à modéliser. L'approche qui conduit à l'obtention de ce type de modèle a pour base la fonction première de l'objet à modéliser [12].

Cette Méthode présente l'avantage de produire des modèles plus rapides à simuler, plus paramétrables et plus transportables que ceux obtenus par la méthode ascendante [18].

## II-6 Un modèle comportemental par la méthode « meet in the middle »

Cette méthode permet de réaliser un compromis entre les deux approches précédentes. Il se peut que le plan de modélisation impose au concepteur l'observation de plusieurs comportements d'un même composant ou sous-système à des niveaux de précisions différents. Le choix du niveau de précision requis pour ces comportements représente d'ailleurs la problématique principale du plan de modélisation [19].

## II-7 Environnement de travail VHDL-AMS

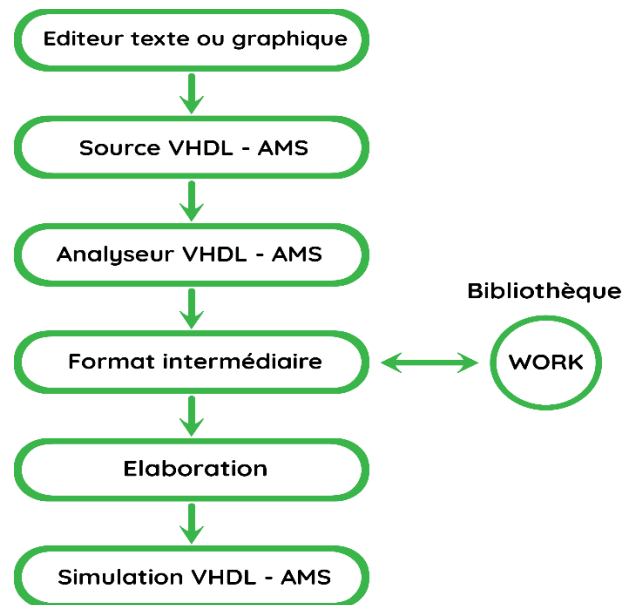


Figure II.7 : Environnement de travail VHDL-AMS

L'interface graphique peut se réduire à un simple éditeur de texte. La plupart des outils utilise en plus leur éditeur de schémas pour générer automatiquement le squelette d'un modèle VHDL-AMS [12].

L'analyseur (ou compilateur) vérifie la syntaxe d'une description VHDL-AMS. Il permet la détection d'erreurs locales, qui ne concernent que l'unité compilée.

Tous les modèles compilés sont placés dans une bibliothèque de travail (working library) de nom logique work qui est propre à chaque concepteur [12].

La phase d'élaboration consiste en une construction de structures de données et permet la détection d'erreurs globales, qui concernent l'ensemble des unités de la description.

Le simulateur calcul comment le système modélisé se comporte lorsqu'on lui applique un ensemble de stimuli [12].

## II-8 Structure des modèles VHDL-AMS

```
-- bibliothèques utilisées--
LIBRARY <nom_bibliothèque> ;
USE <bibliothèque.paquetage1> ;
USE <bibliothèque.paquetage2>;

--specification de l'entité--
ENTITY <nom_entité> IS
    GENERIC( <declaration_generic_1>;
    <declaration_generic_2>;...;<declaration_generic_N>
    );
    PORT( <declaration_port_1>; <declaration_port_2>;...;<declaration_port_N>
    );
    [<declarations_variables_globales> ;]
[BEGIN
    <controle_parametres_entree>
]
END ENTITY <nom_entité>;

--specification de l'architecture--
ARCHITECTURE <nom_arch_1> OF <nom_entité> IS
    <declaration_fonction_procedure>;
    <declaration_constantes>;
    <declaration_terminaux>;
    <declaration_types>;
    <declaration_variables>;

BEGIN
    <type_modele>;
END ARCHITECTURE <nom_archi_1>;

ARCHITECTURE <nom_arch_2> OF <nom_entité> IS .....
ARCHITECTURE <nom_arch_3> OF <nom_entité> IS ....
```

Figure II.8 Structure d'un modèle VHDL-AMS

### II-8.1 Déclaration d'entité :

On peut définir l'interface d'un modèle avec le monde extérieur au moyen de ports. Il existe trois types de ports [20] :

- Les ports « signal » : qui définissent des canaux de communication directionnels : entrées (in), sorties (out) ou bidirectionnels (inout) modélisant des signaux logiques.
- Les ports « terminal » : qui définissent des points de connexions analogiques directionnels pour les informations analogiques orientées.
- Les ports « quantity » : qui définissent des points de connexion analogiques directionnels : entrée (in), sorties (out) pour lesquels les lois de Kirchhoff ne doivent pas être satisfaits [20].

```

--modèle analogique: capacité--
entity capacity is
  generic(cap:real);
  port(terminal n1,n2: electrical);
end entity capacity;

--modèle analogique: multiplieur (sans conservation de
l'énergie)--
entity mult is
  port(
    quantity in1,in2: in real; --opérandes
    quantity resit: out real; --résultat
  );
end entity mult;

--modèle numérique: additionneur 1 bit complet--
entity additionneur is
  generic(tprop:time:=0ns); --temps de propagation
  port (
    signal a,b,cin:in bit ; --entrées :opérandes a et b,
    retenue
    signal s,cout:out bit ; --sorties: somme,retenue de
    sortie
  );
end entity additionneur ;

```

Figure II.8.1 : : Code pour la déclaration d'entités

## II-8.2 Déclaration d'architecture :

### II-8.2.1 Déclaration d'architecture structurelle :

Elle peut être décrite de deux manières : par des déclarations de composants pour définir les besoins de l'architecture. Ces déclarations sont purement locales et ne sont pas nécessairement reliées à des entités de conception particulières, et ensuite par la déclaration de configuration qui est nécessaire pour établir les liens [12].

### II-8.2.2 Déclaration d'architecture comportementale :

Le comportement d'un circuit est exprimé dans l'architecture grâce à des types, des objets, des instructions simultanées, concurrentes, et séquentielles [12].

## II-9 Exemples de modèles VHDL-AMS

En peut dire que les instructions du langage VHDL-AMS permettent de présenter le modèle du circuit à plusieurs niveaux d'abstraction.

### II-9.1 Modèle physique :

Voilà donc la relation entre la tension et le courant d'une capacité

$$i(t) = C \frac{dV(t)}{dt}$$

```

LIBRARY IEEE;
USE IEEE.ELECTRICAL_SYSTEMS.ALL;

ENTITY C IS
  GENERIC (V0: VOLTAGE := 0.0;
           C : CAPACITANCE := 1.0e-6);
  PORT (TERMINAL p,m : ELECTRICAL);
END ENTITY C;

ARCHITECTURE behav OF C IS
  QUANTITY v ACROSS i THROUGH p TO m;
  QUANTITY temp_charge : CHARGE := C*v0;
BEGIN
  IF (domain = quiescent domain) USE
    temp_charge == C*v0;
    v == V0;
  ELSE
    temp_charge == C * v ;
    I == temp_charge'dot;
  END USE;
END ARCHITECTURE behav;

```

Figure II.9.1 : Modèle VHDL-AMS d'une capacité

### II-9.2 Modèle comportemental d'un circuit : comparateur de tension

Le comparateur définit ici fournira en sortie un signal numérique de niveau '1' ou '0' selon la comparaison effectuée sur des signaux analogiques en entrée.



Figure II.9.2.1 : le symbole du l'équation comparateur

```

library IEEE;
use ieee.std_logic_1164.all;
use IEEE.electrical_systems.all;

entity compareur is
  port (
    terminal in_p, in_n : electrical; -- entrées analogiques
    signal output : out std_logic := '1' ); -- sorties logiques
end entity compareur;

architecture comportementale of compareur is
  quantity Vin across in_p;
  quantity Vref across in_n;

begin
  process (Vin'above(Vref)) is
    begin
      if Vin'above(Vref) --
      then
        output <= '1' after 1us;
      else
        output <= '0' after 1us;
      end if;
    end process;
end architecture comportementale;

```

Figure II.9.2.2 : Code VHDL-AMS pour le modèle comportemental du comparateur

## II-10 Choix de simulateur VHDL-AMS :

L'offre logicielle dans ce domaine est très importante, mais également très variée. Outre la concurrence qui fait naître des outils similaires, l'évolution dans l'utilisation du langage VHDL-AMS lui-même a fait émerger plusieurs philosophies de conception [21].

Nous avons donc dû choisir parmi tout cela le simulateur le plus adapté à nos besoins, ANSYS Simplorer et SystemVision.

### II-10.1 Simplorer :

Simplorer est un logiciel de simulation qui fournit une approche pour le prototypage virtuel de systèmes à grande échelle en vous permettant de développer une conception qui combine des composants de base prédéfinis et spécifiques à l'industrie avec des modèles définis par l'utilisateur. Vous pouvez créer des modèles dans des langages de programmation courants ou des langages de modélisation standard tels que VHDL-AMS. Les bibliothèques de modèles de base et spécifiques à l'industrie disponibles pour Simplorer fournissent des composants paramétrés prêts à l'emploi, rendant Simplorer précis et flexible.[22].

Simplorer intègre de manière transparente plusieurs techniques de modélisation basées sur des systèmes (circuits, diagrammes de blocs, machines d'état, niveau d'équation) et des langages de modélisation (VHDL-AMS, Simplorer Modeling Language, C/C) qui peuvent être utilisés simultanément dans le même schéma.

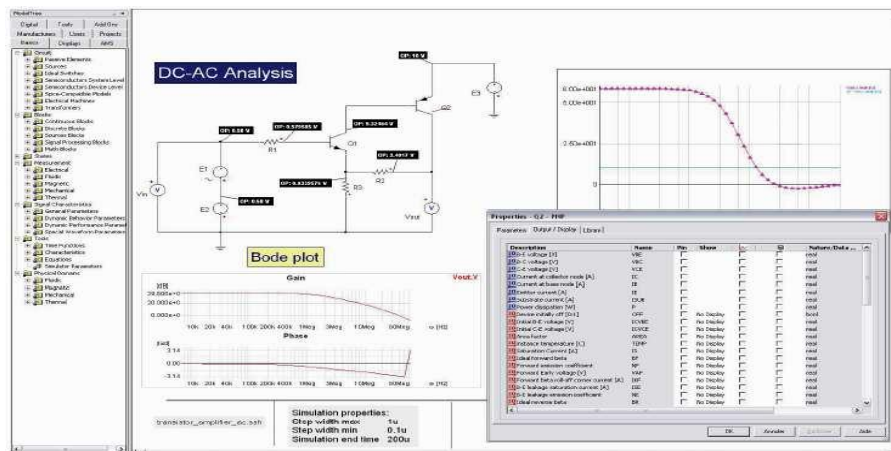
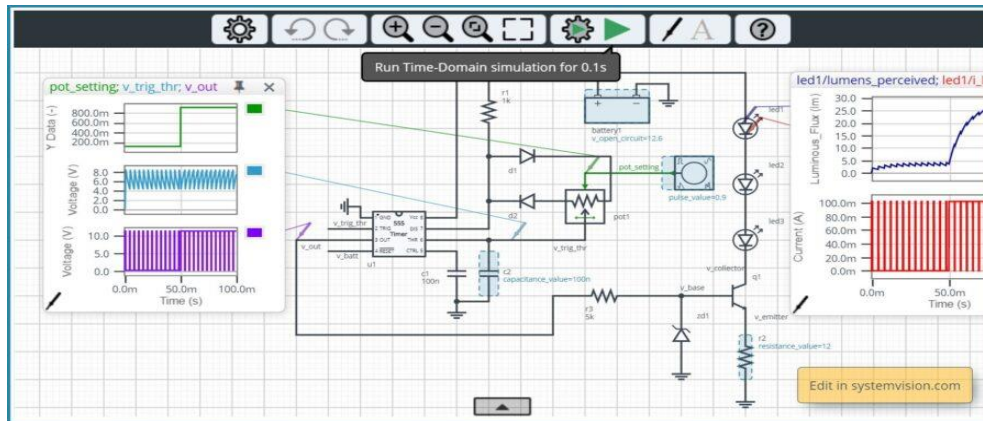


Figure II.10.1 : Interface utilisateur ANSYS Simplorer

### II-10.2 SystemVision :

De l'exploration de la conception à l'implémentation détaillée, SystemVision est un environnement unique d'exploration et d'optimisation de la conception qui offre de puissantes capacités de

vérification et d'analyse pour les conceptions multidisciplinaires difficiles. En utilisant la puissance du langage de modélisation VHDL-AMS standard de l'IEEE, SystemVision permet de réduire le temps de développement, de simplifier l'intégration HW/SW et de réduire le risque de bogues de dernière minute qui compromettent souvent le succès du programme [23].



*Figure II.10.2 : Interface utilisateur SystemVision*

## II-11 Les avantages du langage VHDL-AMS

La grande force de ce langage est de permettre la simulation mixte en autorisant aussi bien les modélisations à temps continu qu'à évènements discrets ou mélangeant les deux.

Le VHDL-AMS propose des mécanismes permettant de gérer aussi bien les abstractions comportementales, que les abstractions structurales de type work-flow [24].

L'utilisation généralisée du VHDL-AMS facilite la communication entre les différents domaines scientifiques grâce à son approche multi-domaines native qui permet aussi bien à un électronicien qu'à un mécanicien de modéliser la partie d'un dispositif qui le concerne directement sans problèmes de dialogue avec les autres parties [21].

## II-12 Conclusion.

Chaque langage permet de modéliser le comportement d'un composant avant que celui-ci ne soit construit réellement. Notre choix s'est porté sur VHDL-AMS en raison de la diversité des simulateurs disponibles pour ce langage. Dans ce chapitre, nous avons reporté en détail recherches sur VHDL-AMS pour connaître comment utiliser ses constructions et ses instructions fondamentales. Le langage de description du matériel normalisé VHDL-AMS, nous a permis de modéliser une cellule photovoltaïque en utilisant les simulateur SystemVision, Matlab / Simulink et Simplorer.

**Chapitre III**  
**Modélisation et simulation d'une cellule**  
**photovoltaïque par VHDL-AMS**



# Chapitre III Modélisation et simulation d'une cellule photovoltaïque par VHDL-AMS

## III-1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons faire une modélisation comportementale de la cellule photovoltaïque pour étudier l'influence des paramètres climatiques sur le rendement de la cellule.

La caractéristique d'une cellule photovoltaïque ou bien d'un générateur photovoltaïque est directement dépendante de l'irradiation et de la température. Pour extraire cette caractéristique, nous devons faire varier des différents niveaux d'irradiation et des différents degrés de température.

Avant de s'engager dans le processus de matérialisation et de réalisation technologique, la modélisation et la simulation permettent de corriger plus facilement les erreurs éventuelles et d'optimiser les coûts de développement et d'industrialisation. De plus, elle permet également d'éviter d'endommager les composants réels sans les détruire [13].

## III-2 Modèle à cinq paramètres d'une cellule photovoltaïque

### III-2.1 le photo-courant

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule et croît linéairement 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 [06].

### III-2.2 Tension à circuit ouvert

Est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse [06].

### III-2.3 Facteur de forme

Représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée  $P_{max}$  et la puissance formée par le rectangle  $I_{cc} * V_{oc}$ . Plus la valeur de ce facteur ne sera grande, plus la puissance exploitable le sera également [09].

### III-2.4 La résistance série $R_s$

Est liée à la résistivité volumique et à l'impédance des électrodes et des matériaux [07].

### III-2.5 La résistance Shunt

En général, la valeur de  $R_{sh}$  est plus grande que  $R_s$  d'au moins un ordre de grandeur. Pour minimiser les pertes, il faut diminuer  $R_s$  et augmenter  $R_{sh}$  [25].

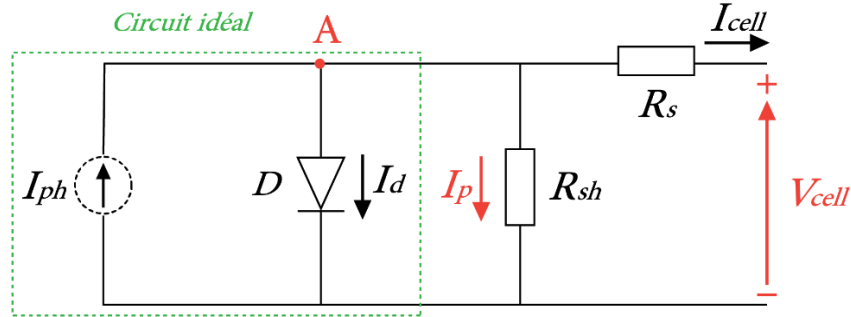


Figure III.2 : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque

Ce modèle fait intervenir un générateur de courant pour modéliser le flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule et deux résistances (série et shunt) pour les pertes. La résistance série représente la résistance interne de la cellule et la résistance Shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction. Le modèle présenté est dit à cinq paramètres, et si on néglige l'effet de la résistance shunt  $R_{sh}$ , on retrouve le modèle à 4 paramètres. Et si en plus, on néglige la résistance série, on retrouvera alors le modèle à 3 paramètres. Le choix du modèle se fait en fonction des besoins de l'étude [25].

Les équations suivantes permettent de décrire la caractéristique I-V de la cellule et du module en donnant les expressions des différents courants.

On a déjà l'équation de courant de la charge :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_d - IR_{sh} \dots\dots\dots (III.1)$$

Avec:

$I_{cell}$  Courant délivré par la photopile

$I_{ph}$  Photo courant

$I_d$  Courant de la diode

$IR_{sh}$  Courant shunt

Si on néglige l'effet de la résistance shunt  $R_{sh}$ , l'équation s'écrit :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_d \dots\dots\dots (III.2)$$

**a. le photo-courant**

Généré par une cellule, il est proportionnel à l'irradiation solaire et est légèrement influencé par la température selon l'équation suivante :

$$I_{ph} = [I_{cc} + K_i(T_{ambient} - T_n)] * \frac{G}{G_n} \dots\dots\dots (III.3)$$

Avec:

- I<sub>cc</sub>* Courant de court-circuit du panneau
- K<sub>i</sub>* Courant de court-circuit divisé par le coefficient de température du panneau.
- T<sub>ambient</sub>* La Température ambiante
- T<sub>n</sub>* La Température de référence (25°C)
- G* L'irradiation sur la surface de la cellule
- G<sub>n</sub>* L'irradiation de référence (1000 W/m<sup>2</sup>)

**b. le courant de saturation I<sub>0</sub>**

C'est le courant varie avec la température et donné par l'équation :

$$I_0 = I_{RS} * \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^3 \exp\left(\left(\frac{q.Eg}{A.k}\right) \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}}\right) - \left(\frac{1}{T}\right)\right) \dots\dots\dots (III.4)$$

Avec :

- E<sub>g</sub>* L'énergie de gap du semi-conducteur

**c. Le courant de saturation inverse de la diode (courant de fuite)**

Est donnée par l'équation :

$$I_{RS} = \frac{I_{cc}}{\exp\left(\frac{q.V_{oc}}{KAT}\right) - 1} \dots\dots\dots (III.5)$$

Avec :

- V<sub>oc</sub>* Tension de circuit ouvert du module (donnée par le constructeur)
- q* Charge de l'électron (1.602. 10<sup>-19</sup> °c)
- A* Constante d'idéalité de la jonction (1<A)
- K* Constante de Boltzmann (1.3805 .10<sup>-23</sup> J/K)

À partir de ces expressions, on peut déduire le courant délivré par une cellule :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_0 \left( \exp \frac{(V_{cell} + R_s I_{cell})}{aKT} - 1 \right) - \frac{(V_{cell} + R_s I_{cell})}{R_{sh}} \dots\dots\dots (III.6)$$

### III-3 La modélisation avec ANSYS Simplorer

#### III-3.1 Code VHDL AMS :

##### a. La résistance $R_s$

La résistance série dans une cellule solaire est due aux contacts entre les semi-conducteurs et les parties métalliques permettant d'utiliser la cellule.

Le code VHDL-AMS d'une résistance est très simple :

```
----- VHDLAMS MODEL Myresitor -----  
LIBRARY ieee;  
LIBRARY std;  
USE    std.ALL;  
USE    ieee.ALL;  
  
----- ENTITY DECLARATION Myresitor -----  
ENTITY Myresitor IS  
  GENERIC (  
    R : real := 1000.0  
  );  
  PORT (  
    TERMINAL p : electrical;  
    TERMINAL m : electrical  
  );  
END ENTITY Myresitor;  
  
----- ARCHITECTURE DECLARATION arch_Myresitor -----  
ARCHITECTURE arch_Myresitor OF Myresitor IS  
  QUANTITY V_R ACROSS I_R THROUGH p to m;  
  
  BEGIN  
    V_R == R * I_R;  
  END ARCHITECTURE arch_Myresitor;  
  
----- END VHDLAMS MODEL Myresitor -----
```

Figure III.3.1.a : Modèle VHDL-AMS d'une résistance

La valeur standard de la résistance série est donnée à  $R_s = 1k\Omega$  avec la possibilité de la varier selon les résultats que l'on veut simuler.

##### b. La résistance $R_{shunt}$

C'est le même principe de la résistance série. Le Shunt est dû à un courant de fuite au niveau de la jonction.

Le modèle VHDL-AMS est présenté dans la figure III.3.1.b

```

----- VHDLAMS MODEL Myresistor -----
LIBRARY ieee;
LIBRARY std;
USE std.ALL;
USE ieee.ALL;

----- ENTITY DECLARATION Myresistor -----
ENTITY Myresistor IS
  GENERIC (
    R : real := 1335.0
  );
  PORT (
    TERMINAL p : electrical;
    TERMINAL m : electrical
  );
END ENTITY Myresistor;

----- ARCHITECTURE DECLARATION arch_Myresistor -----
ARCHITECTURE arch_Myresistor OF Myresistor IS
  QUANTITY V_R ACROSS I_R THROUGH p to m;

  BEGIN
  V_R == R * I_R;
  END ARCHITECTURE arch_Myresistor;

----- END VHDLAMS MODEL Myresistor -----

```

*Figure III.3.1.b : Modèle VHDL-AMS d'une résistance Shunt*

### c. La diode

La diode est caractérisée par son courant de saturation et son facteur d'idéalité.

```

----- VHDLAMS MODEL Diode -----
library IEEE;
use IEEE.math_real.all;
use IEEE.electrical_systems.all;

----- ENTITY DECLARATION Diode -----
entity DIODE is
  generic (iss : current := 1.0e-14;
    af : real := 1.0;
    kf : real := 0.0);
  port (terminal anode, cathode : electrical);
end entity DIODE;

----- ARCHITECTURE DECLARATION arch_Diode -----
architecture IDEAL of DIODE is
  quantity v across i through anode to cathode;
  constant vt : voltage := 0.0258;
begin

  i == iss * (exp(v/vt) - 1.0);

end architecture IDEAL;

----- END VHDLAMS MODEL Diode -----

```

*Figure III.3.1.c : Modèle VHDL-AMS d'une diode*

#### d. Source de tension

Pour notre étude, on a utilisé un modèle intégré dans l'outil Simplorer pour une source de tension on charge, mais pour la modélisation VHDL-AMS, le code modèle est très simple.

```
----- VHDLAMS MODEL Source de tension -----  
LIBRARY discipline;  
USE disciplines.electromagnetic_system.all;  
  
----- ENTITY DECLARATION v_source -----  
ENTITY v_source IS  
    generic (dc_value : real :=-2.50);  
    port (terminal p,m: electrical);  
  
END ENTITY v_source;  
  
----- ARCHITECTURE DECLARATION behav of v source -----  
architecture behav of v source is  
  
    quantity v_in across i_out through p to m;  
  
BEGIN  
    v_in==dc_value*now;  
  
END behav;  
  
----- END VHDLAMS MODEL Source de tension -----
```

Figure III.3.1.d : Modèle VHDL-AMS d'une source de tension

#### e. Le générateur photovoltaïque

Pour un générateur photovoltaïque, la production de puissance varie fortement en fonction de l'éclairement, de la température, mais aussi du vieillissement global du système.

Pour le générateur PV, on a six paramètres sont :

- I<sub>cc</sub>** Courant de court-circuit du panneau
- K<sub>i</sub>** Courant de court-circuit divisé par le coefficient de température du panneau.
- T<sub>ambient</sub>** La Température ambiante
- T<sub>n</sub>** La Température de référence (25°C)
- G** L'irradiation sur la surface de la cellule
- G<sub>n</sub>** L'irradiation de référence (1000 W/m<sup>2</sup>)

La figure III.3.1.e représente le code VHDM-AMS qu'on a utilisé dans notre projet.

```

----- VHDLAMS MODEL Generateur -----
LIBRARY ieee;
LIBRARY std;
USE std.ALL;
USE ieee.ALL;

----- ENTITY DECLARATION I_pv -----
entity I_pv is
generic (
  Ipv_n : current := 5.0; -- Isc nominal @ Tn
  Tn : real := 25.0; -- T° nominale des tests datasheet panneau
  kI : real := 0.00065; -- Coeff datasheet panneau
  Gn : real := 1000.0 -- Ensoleillement des tests datasheet panneau
);
port (
  terminal pos, neg : electrical;
  quantity G, temp_ambient : in real);
end entity I_pv;

----- ARCHITECTURE DECLARATION default -----
architecture default of I_pv is
-- Declare internal quantities
  quantity v across i through pos to neg;
begin
  i == (Ipv_n + kI*(temp_ambient - Tn))*(G/Gn);
end architecture default;

----- END VHDLAMS MODEL Generateur -----

```

Figure III.3.1.e : Modèle VHDL-AMS d'un générateur PV

#### f. La cellule photovoltaïque

```

library ieee;
use ieee.math_real.all;
use ieee.electrical_systems.all;
entity pv_cell is
  generic(
    Rs : real := 1.0e-5;
    Rp : real := 1.0e+5;
    Isc : real := 4.5;
    Is : real := 1.0e-15;
    Vt : real := 25.0e-3;
  );
  port(
    terminal p,m : electrical;
    quantity pw_inst : out real;
  );
end entity pv_cell;
architecture arch_pv_module of pv_module is
  quantity Vcell across Icell through m to p;
begin
  Icell == Iph - Is * (exp((Vcell+Icell*Rs)/vt) - 1.0)
    -((Vcell+Icell*Rs)/Rp);
  pw_inst == -Icell*Vcell;
end architecture arch_pv_cell;

```

Figure III.3.1.f : Modèle VHDL-AMS d'une cellule photovoltaïque

### III-3.2 Le schéma électrique en Simplorer :

Pour étudier l'effet de la température et l'influence de l'ensoleillement, on a fait quatre circuits pour visualiser les différentes caractéristiques I-V et P-V pour différentes valeurs de température et d'ensoleillement.

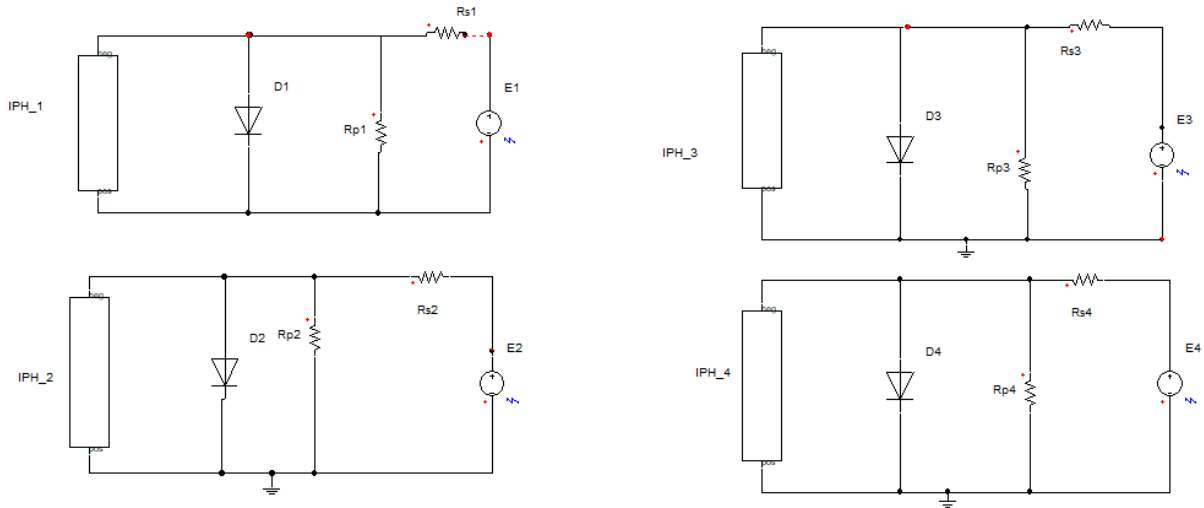


Figure III.3.2.1 : Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque

Avec :

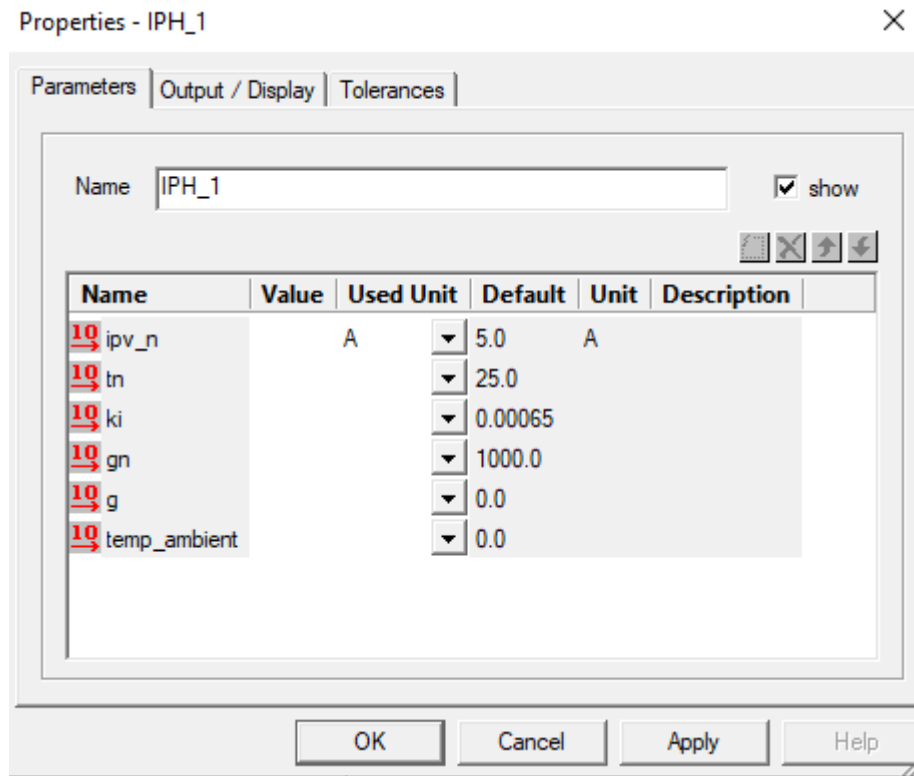


Figure III.3.2.2 : Caractéristiques d'un générateur photovoltaïque



$I_{pv\_n}$  5 A  
 $K_i$  0.000065  
 $T_{ambiant}$  20° C, 30° C, 40° C, 60° C  
 $T_n$  25° C  
 $G$  1000 W /m<sup>2</sup>, 800 W /m<sup>2</sup>, 600 W /m<sup>2</sup> et 400 W /m<sup>2</sup>  
 $G_n$  1000 W/m<sup>2</sup>

Et pour les différents composants :

$R_s$  0.12 Ω  
 $R_p$  1335 Ω  
 $E$  5 V

### III-3.3 Effets de variation de l'irradiation solaire :

Comme nous pouvons le constater à partir de la figure **III.3.3**, le courant de PV dépend fortement de l'irradiation solaire. Cependant, la tension augmente de 1V quand l'irradiation solaire est passée de 400 W/m<sup>2</sup> à 1000 W /m<sup>2</sup>.

- La courbe *Rs1.I* est le résultat de modélisation avec irradiation  $G = 1000 \text{ W /m}^2$
- La courbe *Rs2.I* est le résultat de modélisation avec irradiation  $G = 800 \text{ W /m}^2$
- La courbe *Rs3.I* est le résultat de modélisation avec irradiation  $G = 600 \text{ W /m}^2$
- La courbe *Rs4.I* est le résultat de modélisation avec irradiation  $G = 400 \text{ W /m}^2$

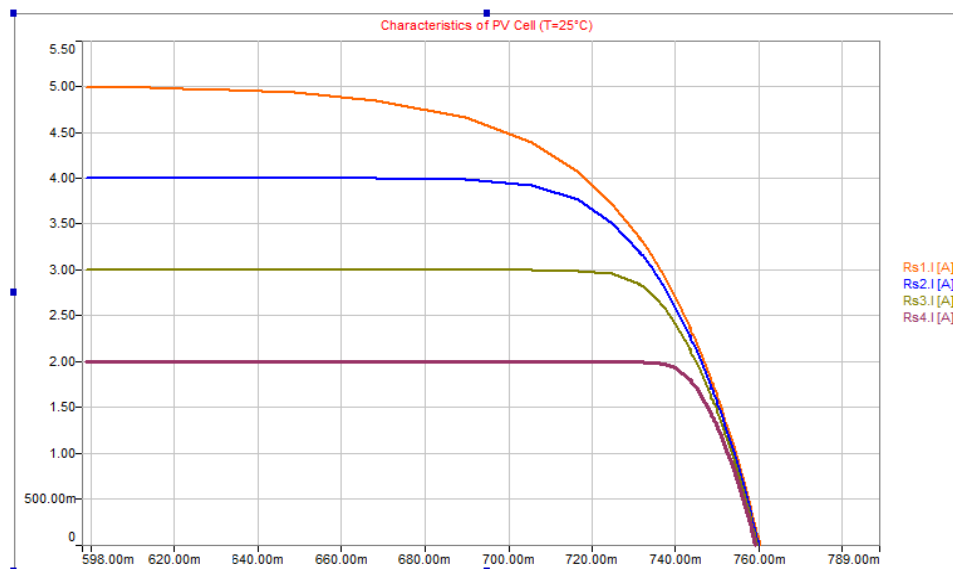


Figure III.3.3 : Caractéristique I-V pour différentes valeurs d'irradiation

A partir des variations du courant en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairiments à température maintenue constante 25°C, Lorsque l'irradiation varie pour une température donnée, le courant de court-circuit  $I_{cc}$  varie proportionnellement à l'irradiation. Dans un même temps, la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  (à vide) varie très peu.

### III-3.4 Effets de variation de la température :

La Figure III.3.4 représente la caractéristique courant – tension  $I(V)$  dans la même condition de l'éclairément ( $E=1000 \text{ W/m}^2$ ) et pour différents température ( $T=25, 30, 40, 60$ ) :

- La courbe  $Rs1.I$  est le résultat de modélisation avec un température de  $T= 25^\circ$
- La courbe  $Rs2.I$  est le résultat de modélisation avec un température de  $T= 30^\circ$
- La courbe  $Rs3.I$  est le résultat de modélisation avec un température de  $T= 40^\circ$
- La courbe  $Rs4.I$  est le résultat de modélisation avec un température de  $T= 60^\circ$

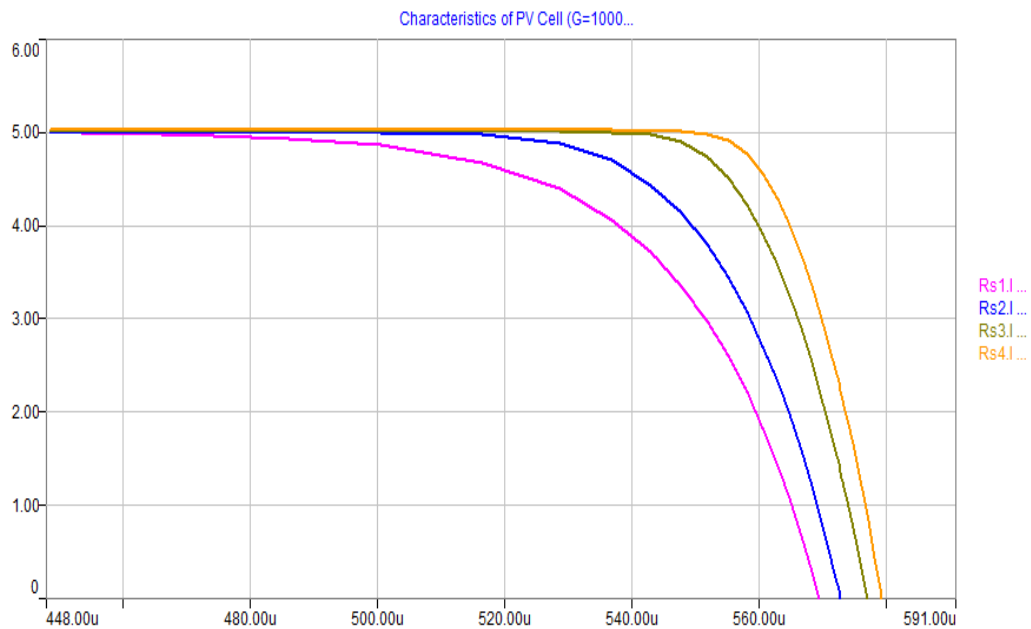


Figure III.3.4 : Caractéristique I-V pour différentes valeurs de température

La tension de circuit ouvert est diminuée avec l'augmentation de la température, par contre le courant de court-circuit augmente légèrement avec l'augmentation de la température et la puissance maximale diminue. On constate que la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert.

### III-4 La modélisation avec SystemVision

Dans ce modèle, on a remplacé la source de tension a la charge avec un système extérieur composé d'une résistance variable, tension à quantité continue et un générateur de fonction de tension avec des propriétés donnés comme ci-dessous

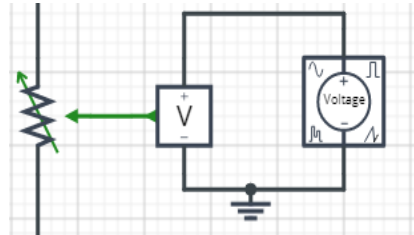


Figure III.4 Système liée à la charge

#### III-4.1 Le schéma électrique en SystemVision :

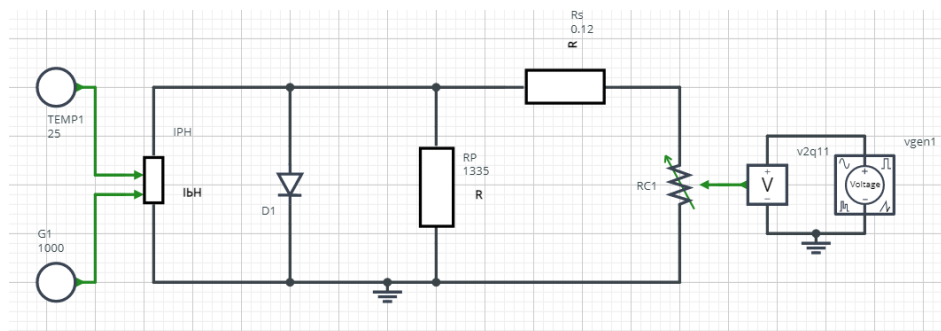


Figure III.4.1.1 Schéma électrique d'une cellule PV dans SystemVision

Dans ce modèle-là, on a utilisé :

- Un générateur photovoltaïque IPH
- Une diode D
- Deux résistances Rp et Rs
- Une résistance variable RC
- Une tension à quantité continue v2q
- Un générateur de fonction de tension vgen
- Source de quantité – Constante T et G (Pour la température et l'irradiation)

Pour la comparaison des courbes des caractéristiques courant-tension et puissance tension avec les variations de la température et l'irradiation, nous avons fait le schéma électrique (Figure III.4.1) quatre fois avec différentes valeurs de T (°C) et G (W/m<sup>2</sup>).

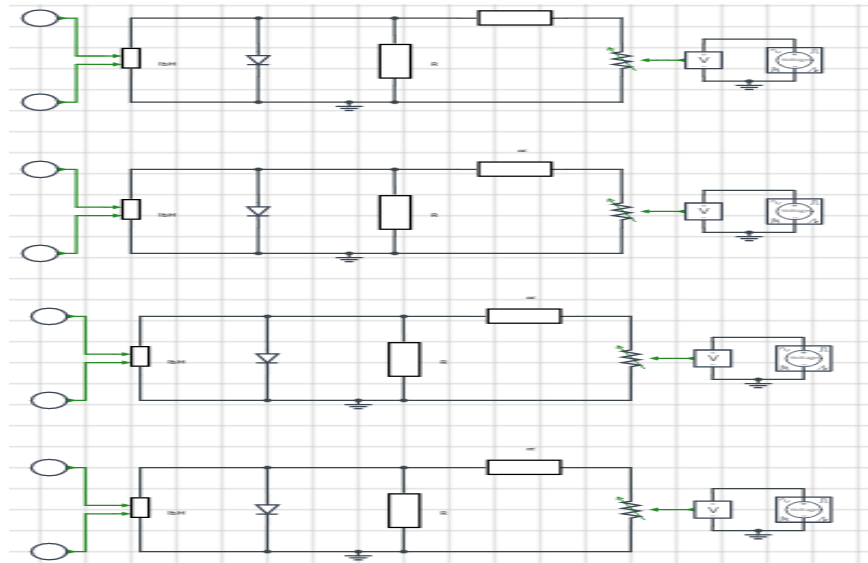


Figure III.4.1.2 Quatre schémas de cellule PV dans SystemVision

### III-4.2 Code VHDL-AMS en SystemVision :

#### a. La resistance variable RC

```

----- VHDLAMS MODEL resistance variable -----
library IEEE;
use IEEE.electrical_systems.all;
use IEEE.energy_systems.all;

----- ENTITY DECLARATION resistance_variable -----
entity resistance_variable is

    generic (minimum_resistance : resistance := 1.0e-3);

    port (quantity resistance_input : in resistance;
          terminal p1, p2 : electrical);

end entity resistance_variable;

----- ARCHITECTURE DECLARATION default -----
architecture default of resistance_variable is

    quantity v across i through p1 to p2;
    quantity resistance_limited : resistance := minimum_resistance;
    quantity power_dissipated : power;

begin

    procedural is
    begin
        if resistance_input < minimum_resistance then
            resistance_limited := minimum_resistance;
        else
            resistance_limited := resistance_input;
        end if;

    end procedural;

    v == i*resistance_limited;

----- END VHDLAMS MODEL resistance variable -----

```

Figure III.4.2.a Modèle VHDL-AMS d'une résistance variable

### b. Source de quantité-constante

Cette source constante conduit sa quantité de sortie à la valeur spécifiée par le paramètre générique "output\_level". Lorsqu'il est utilisé dans une simulation "AC" ou dans le domaine fréquentiel, ce modèle fournit un stimulus AC avec une magnitude "ac\_magnitude" et un angle de phase "ac\_phase" spécifié en degrés et avec un angle de phase "ac\_phase" spécifié en degrés.

```
----- VHDLAMS MODEL qsrc_constant -----  
library IEEE;  
use IEEE.MATH_REAL.all;  
  
----- ENTITY DECLARATION qsrc_constant -----  
entity qsrc_constant is  
  
    generic (output_level : real;  
            ac_magnitude : real := 0.0;  
            ac_phase     : real := 0.0);  
  
    port (quantity output : out real);  
  
end entity qsrc_constant;  
  
----- ARCHITECTURE DECLARATION default -----  
architecture default of qsrc_constant is  
  
    quantity ac_spec : real spectrum ac_magnitude, math_2_pi*ac_phase/360.0;  
  
begin  
  
    if domain = quiescent_domain or domain = time_domain use  
        output == output_level;  
    else  
        output == ac_spec;  
    end use;  
end architecture default;  
  
----- END VHDLAMS MODEL qsrc_constant -----
```

Figure III.4.2.b Modèle VHDL-AMS d'une Source de quantité-constante

### III-4.3 Propriétés des quelques composants :

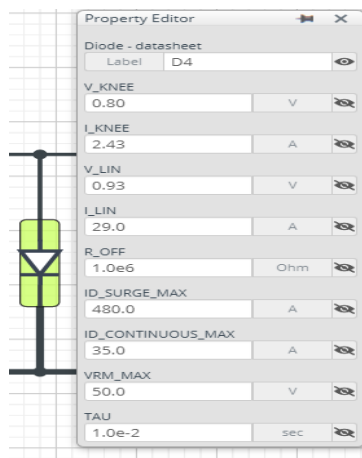


Figure III.4.3.1 La diode

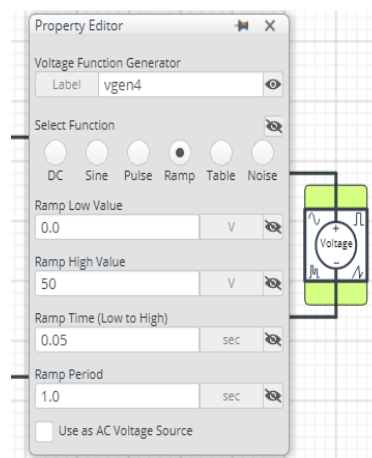
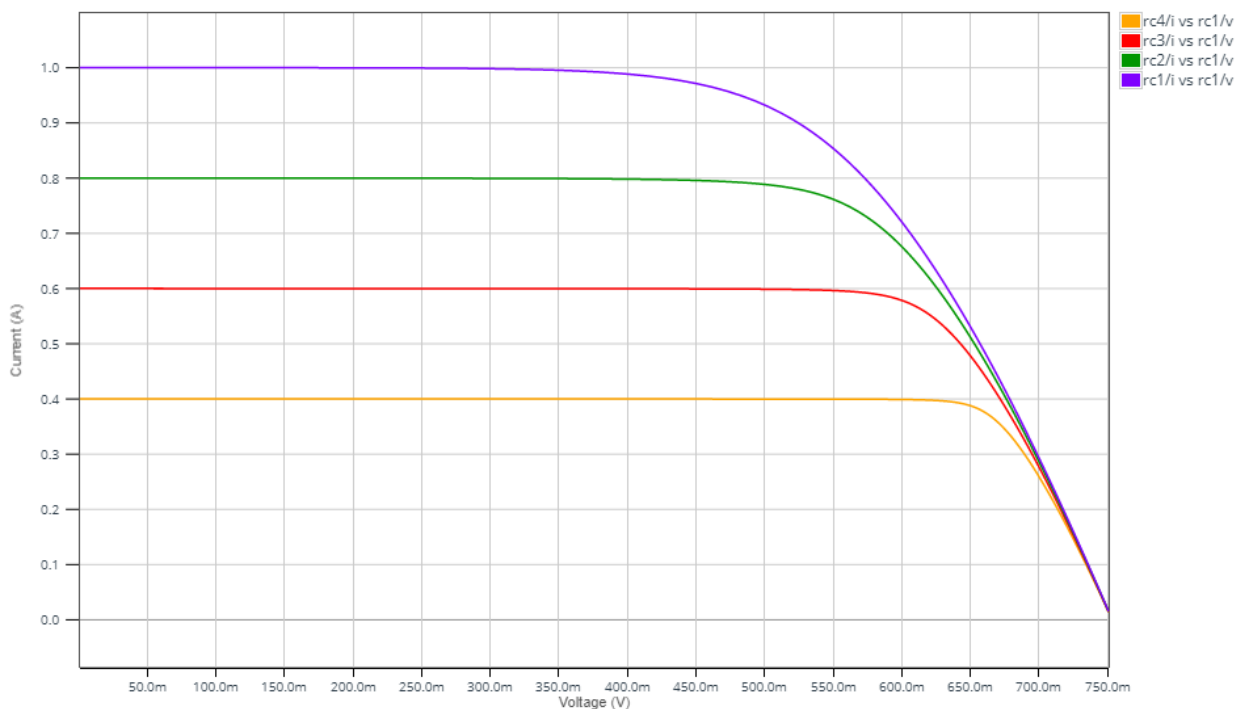


Figure III.4.3.2 Le générateur de fonction de tension

### III-4.4 Effets de variation de l'irradiation solaire :

Les figures (III.4.3.1) et (III.4.3.1) représentent la caractéristique (I-V) et (P-V) d'une cellule en fonction de la variation de l'éclairement ( $G=400.600.800.1000 \text{ W/m}^2$ ) à température constants ( $T=25^\circ\text{C}$ )

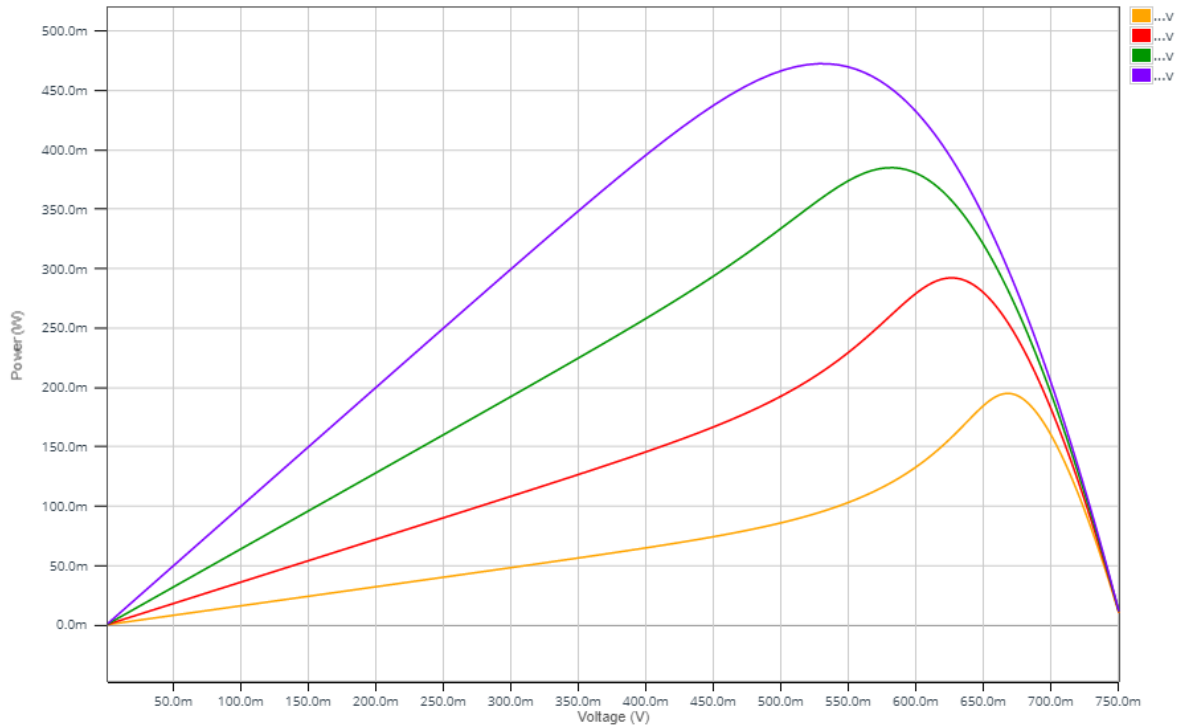
- La courbe *Rc1 I / Rc1V* est le résultat de modélisation avec irradiation  $G=1000 \text{ W /m}^2$
- La courbe *Rc2 I / Rc1V* est le résultat de modélisation avec irradiation  $G = 800 \text{ W /m}^2$
- La courbe *Rc3 I / Rc1V* est le résultat de modélisation avec irradiation  $G = 600 \text{ W /m}^2$
- La courbe *Rc4 I / Rc1V* est le résultat de modélisation avec irradiation  $G = 400 \text{ W /m}^2$



*Figure III.4.3.1 Caractéristique I-V pour différentes valeurs d'irradiation*

Le courant de court-circuit est directement proportionnel au rayonnement incident. Par contre, la tension de circuit ouvert augmente rapidement pour de faibles niveaux d'éclairement, puis lentement pour des niveaux plus élevés.

- La courbe *Rc1 P / Rc1 V* est la courbe P-V avec une irradiation  $G = 1000 \text{ W /m}^2$
- La courbe *Rc2 P / Rc1 V* est la courbe P-V avec une irradiation  $G = 800 \text{ W /m}^2$
- La courbe *Rc3 P / Rc1 V* est la courbe P-V avec une irradiation  $G = 600 \text{ W /m}^2$
- La courbe *Rc4 P / Rc1 V* est la courbe P-V avec une irradiation  $G = 400 \text{ W /m}^2$



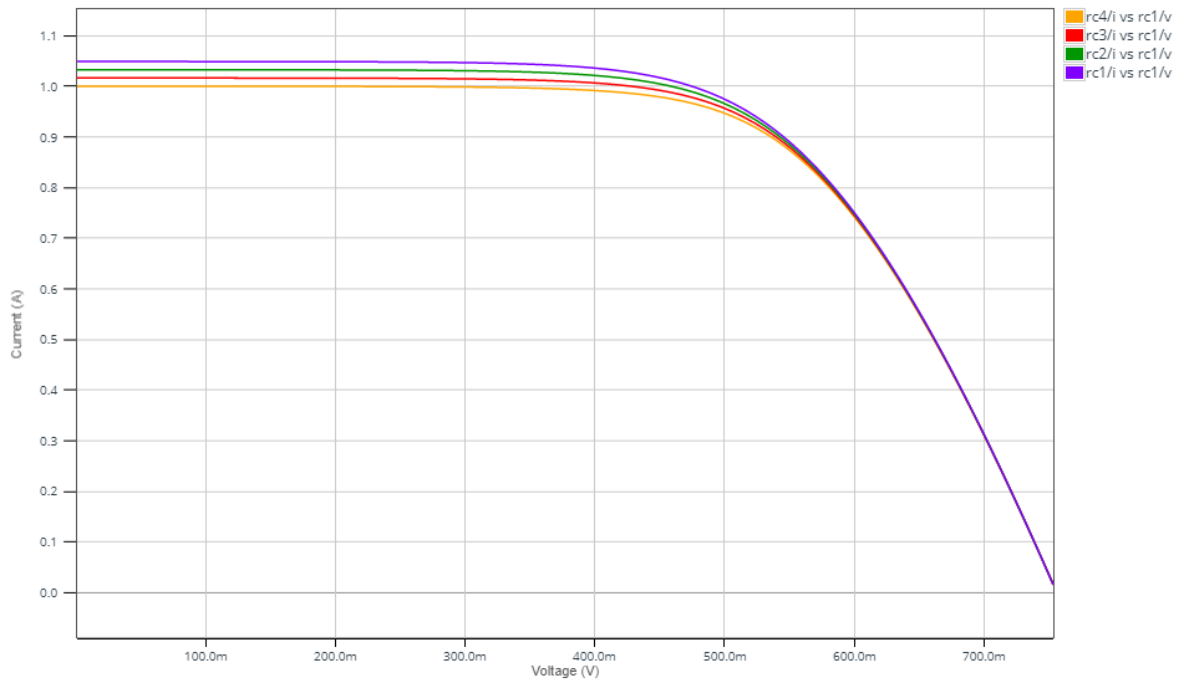
**Figure III.4.3.2** Caractéristique P-V pour différentes valeurs d'irradiation

Un bref rappel nous indique que lorsque tous les paramètres sont constants, plus l'irradiation est élevée, plus le courant de sortie est important et, par conséquent, plus la puissance générée est élevée. La figure **III.4.3.2** montre la relation entre la puissance et la tension du module PV à différents niveaux d'irradiation solaire. L'image montre que lorsque l'irradiation augmente, le module génère une puissance plus élevée sur l'axe vertical. Nous pouvons voir aussi que lorsque l'irradiation augmente, le module est capable de générer plus de puissance, représentée par des pics plus élevés sur les courbes.

### III-4.5 Effets de variation de la température :

En ce qui concerne la température, lorsque tous les paramètres sont constants, plus la température est élevée, plus la tension est faible. Ceci est considéré comme une perte de puissance. D'autre part, si la température diminue par rapport aux conditions initiales, la sortie PV présente une augmentation de la tension et de la puissance. La figure 2.9 est un graphique montrant la relation entre la tension et le courant du module PV pour différentes valeurs de température solaire. La figure montre qu'à mesure que la température augmente, la tension, sur l'axe horizontal, diminue.

- La courbe  $Rc1 I/Rc1 V$  est la courbe I-V avec une température  $T = 25^{\circ} C$
- La courbe  $Rc2 I/Rc1 V$  est la courbe I-V avec une température  $T = 50^{\circ} C$
- La courbe  $Rc3 I/Rc1 V$  est la courbe I-V avec une température  $T = 75^{\circ} C$
- La courbe  $Rc4 I/Rc1 V$  est la courbe I-V avec une température  $T = 100^{\circ} C$

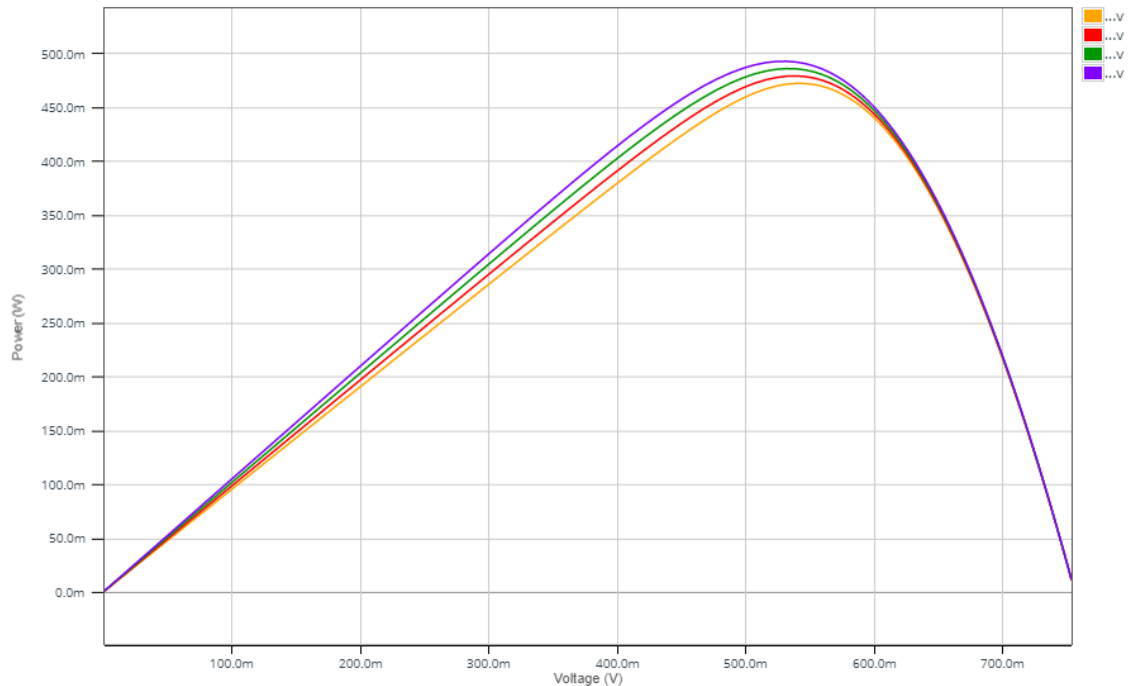


**Figure III.4.4.1** Caractéristique I-V pour différentes valeurs de température

Nous constatons que l'augmentation de la température avec une d'illumination fixe entraîne une diminution de la tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) et une augmentation du courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ).

De même, la figure **III.4.4.1** montre la relation entre la tension et la puissance du module PV à différents niveaux d'irradiation solaire. Nous pouvons constater que la puissance diminue lorsque la température augmente, comme l'illustrent les pics de puissance plus faibles sur les courbes de la figure **III.4.4.2**.





**Figure III.4.4.2** Caractéristique P-V pour différentes valeurs de température

- La courbe *Rc1 I / Rc1 V* est la courbe P-V avec une température  $T = 25^{\circ} \text{C}$
- La courbe *Rc2 I / Rc1 V* est la courbe P-V avec une température  $T = 50^{\circ} \text{C}$
- La courbe *Rc3 I / Rc1 V* est la courbe P-V avec une température  $T = 75^{\circ} \text{C}$
- La courbe *Rc4 I / Rc1 V* est la courbe P-V avec une température  $T = 100^{\circ} \text{C}$

### III-5 La modélisation avec Matlab / Simulink

#### III-5.1 Schéma de blocs :

*SIMULINK* est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques. Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la Simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal. La figure *III.5.1* représente le schéma bloc d'une cellule photovoltaïque que nous avons utilisé

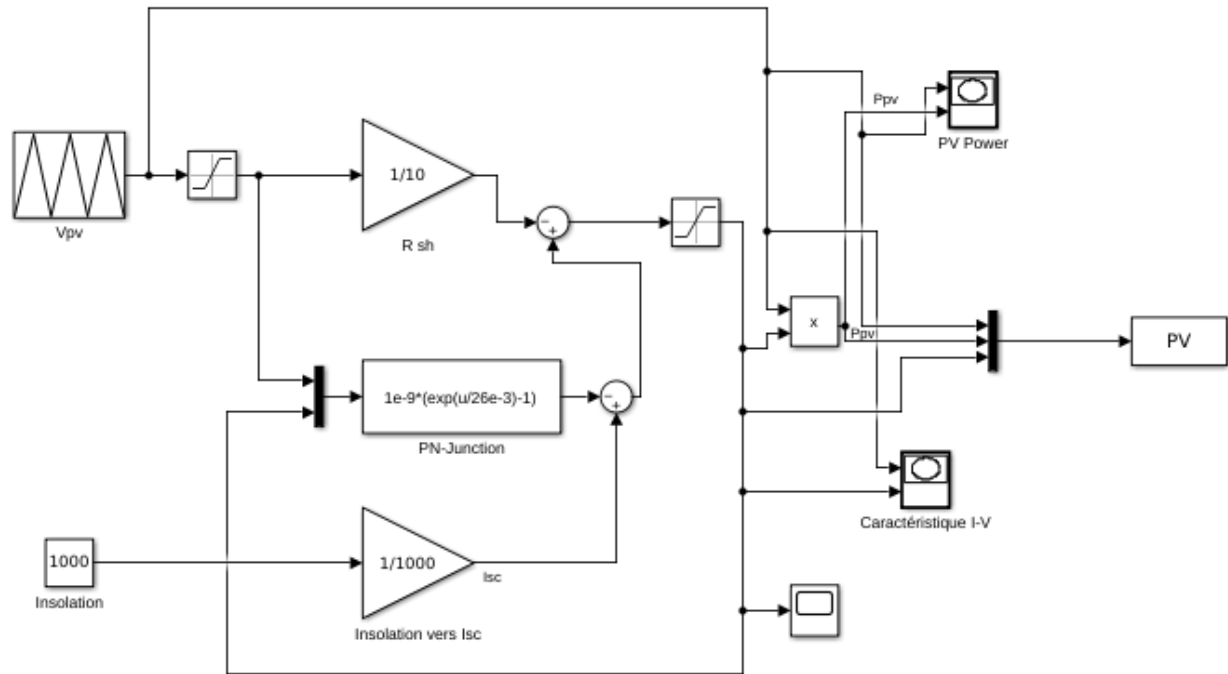


Figure III.5.1 le schéma bloc d'une cellule photovoltaïque

### III-5.2 Code Matlab :

```

1 - c1c ;
2 - x1=PV(:,1);
3 - y1=PV(:,2);
4 - z1=PV(:,3);
5
6 - x2=PV(:,1);
7 - y2=PV(:,2);
8 - z2=PV(:,3);
9
10 - x3=PV(:,1);
11 - y3=PV(:,2);
12 - z3=PV(:,3);
13
14 - x4=PV(:,1);
15 - y4=PV(:,2);
16 - z4=PV(:,3);
17
18 - yyaxis left
19 - plot(x1,y1,x2,y2,x3,y3,x4,y4,'LineWidth',2);
20
21 - xlabel('Cell Voltage in V');
22 - ylabel('Cell Current in A');
23
24 - yyaxis right
25 - plot(x1,z1,x2,z2,x3,z3,x4,z4,'LineWidth',2);
26 - legend('G=1000W/m²','G=800W/m²','G=600W/m²','G=400W/m²','G=1000W/m²','G=800W/m²','G=600W/m²','G=400W/m²');
27 - %legend('T=10°C','T=25°C','T=40°C','T=70°C','T=10°C','T=25°C','T=40°C','T=70°C');
28

```

Figure III.5.2 Code Matlab pour la modélisation d'une cellule photovoltaïque

### III-5.3 Effets de variation de l'irradiation solaire :

Quand l'ensoleillement augmente, l'intensité du courant croît, les courbes permettant à la cellule de produire une puissance électrique plus importante.

Lorsque l'ensoleillement augmente, l'intensité du court-circuit augmente, les courbes caractéristiques sont déplacées vers des valeurs croissantes, ce qui permet à la cellule de produire une plus grande puissance électrique comme indiqué dans la figure III.5.3

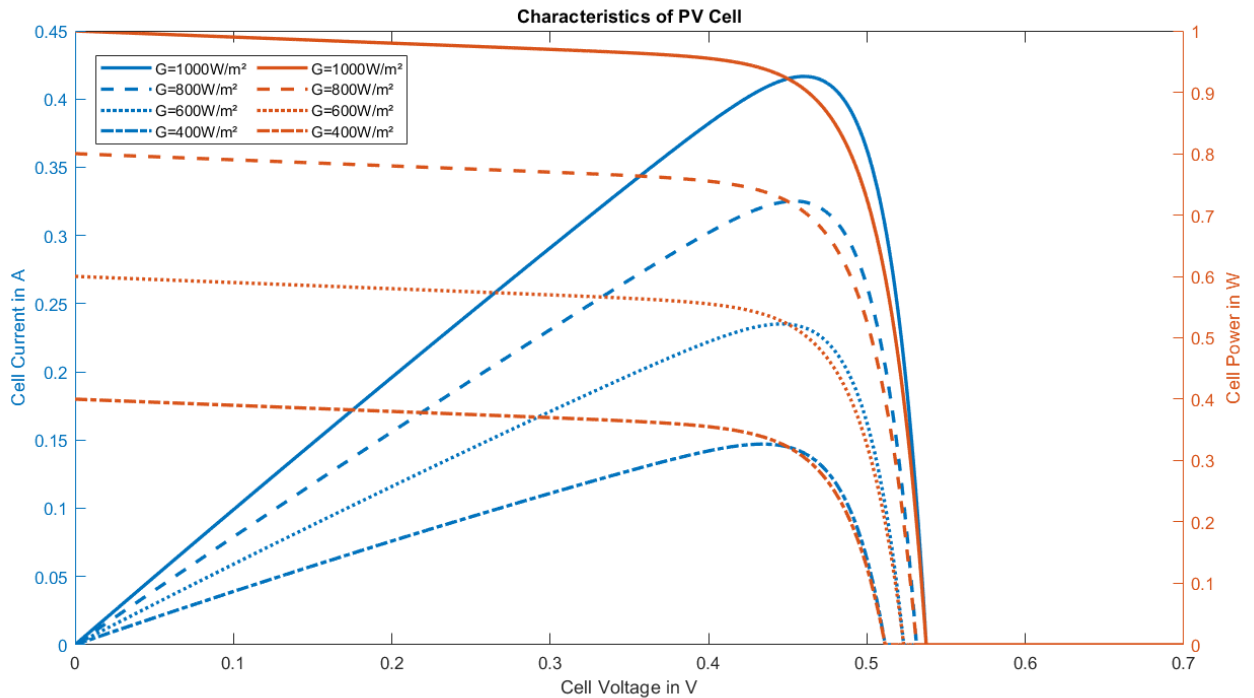
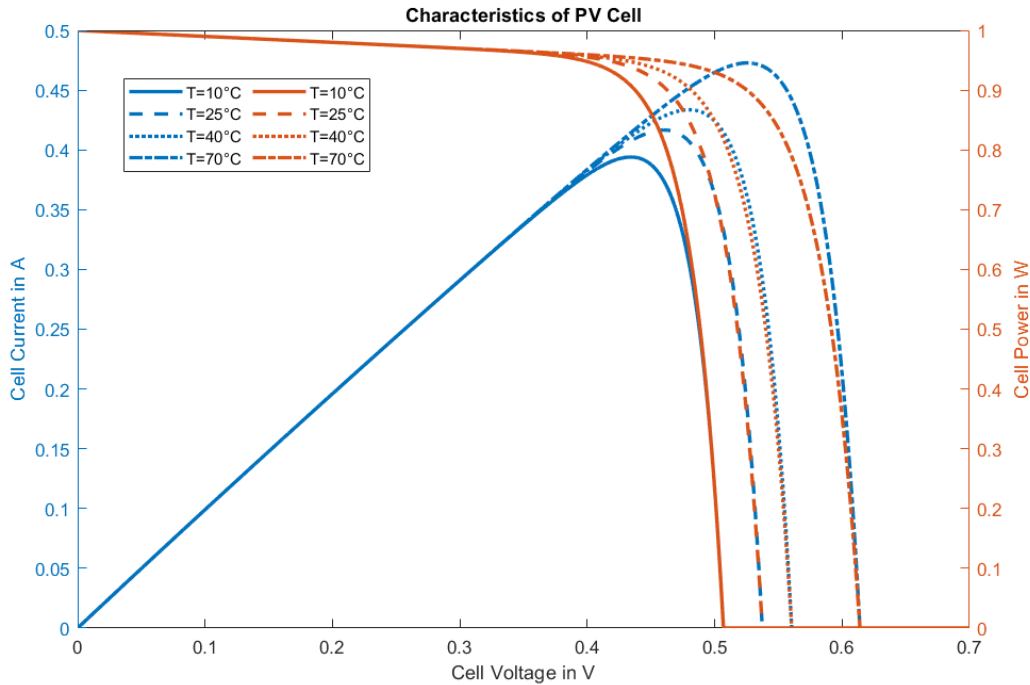


Figure III.5.3 Caractéristiques I-V et P-V pour différentes valeurs d'irradiation

### III-5.4 Effets de variation de la température :

Nous remarquons que la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert (Plus la température est élevée plus  $V_{co}$  est faible et le courant de court-circuit  $I_{cc}$  augmente avec la température). Et par contre la puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente.

La figure III.5.4 présente la variation des caractéristiques d'une cellule PV en fonction de la température à un éclairement donné. L'éclairement est ici fixé à  $1000\text{W} / \text{m}^2$ .



*Figure III.5.3 Caractéristiques I-V et P-V pour différentes valeurs de température*

### **III-6 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les caractéristiques électriques fondamentales d'une cellule photovoltaïque et l'influence des paramètres climatique sur le rendement de la cellule.

Nous avons utilisé les logiciel Matlab / Simulink, SystemVision et ANSYS Simplorer pour étudier le comportement d'une cellule photovoltaïque dans les conditions standard ( $G=1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T=25^\circ\text{C}$ ).

Les performances d'une cellule photovoltaïque sont fortement influencées par les conditions climatiques, particulièrement l'éclairement solaire et la température.

D'après les résultats que nous avons obtenus en variant les valeurs de la température et l'irradiation, on a conclu que le courant de court-circuit évolue principalement avec l'éclairement et la tension à vide avec la température. C'est-à-dire, si l'irradiation diminue, le courant généré diminue proportionnellement, et la variation de la tension à vide (en circuit ouvert) est très faible. Si la température augmente, la tension diminue, le courant produit reste pratiquement constant, et la puissance électrique produite par la cellule photovoltaïque est réduite.

## *Conclusion générale*

Les travaux présentés dans notre mémoire concernent la modélisation comportementale d'une cellule photovoltaïque en utilisant le langage VHDL-AM. L'étude est basée sur l'influence des conditions climatiques sur la cellule photovoltaïque pour la détermination des caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  aux différents paramètres de température et d'irradiation.

Habituellement, les cellules photovoltaïques sont modélisées à l'aide d'un type spécifique de circuit équivalent pour déployer l'équation du modèle mathématique. Tout modèle photovoltaïque est basé sur le comportement de la diode, qui donne à la cellule photovoltaïque sa caractéristique exponentielle. Dans la littérature scientifique, il existe plusieurs modèles qui décrivent le fonctionnement et le comportement du générateur photovoltaïque. Ces modèles diffèrent par la procédure de calcul, la précision et le nombre de paramètres impliqués dans le calcul des caractéristiques courant-tension ( $I-V$ ) et puissance-tension ( $P-V$ ).

La cellule photovoltaïque se comporte comme un générateur dont la tension à ses bornes et le courant qu'il débite représentent la caractéristique  $I(V)$ . Cette caractéristique est influencée la température. On a constaté d'après les résultats obtenus dans le troisième chapitre que la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert et par contre, la puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente.

La production d'énergie électrique à l'aide de cellule photovoltaïque présente un point optimum de fonctionnement, c'est-à-dire, qu'il existe une tension aux bornes du générateur pour laquelle la puissance récoltée est maximale.

Selon les résultats de comparaison et les remarques citées, on peut dire que l'augmentation de l'irradiation provoque une augmentation ou le générateur fonctionne comme un générateur de courants, mais il'ya une légèrement d'augmentation pour la tension en circuit ouvert. Et l'augmentation de la température entraîne une diminution nette de la tension de circuit ouvert et une augmentation du courant de court-circuit.

Espérant que l'approche proposée peut fournir une base théorique et des connaissances pour la conception des cellules photovoltaïques futures.

Références

Bibliographiques

## Références bibliographiques

- [1] « Énergie photovoltaïque et L'électricité du Soleil » ; european photovoltaic industry association
- [2] « Introduction to Photovoltaic Solar Energy »; Miro Zeman Delft University of Technology
- [3] « Énergie solaire photovoltaïque Projet de Physique P6 STPI/P6/2018 – #35 »
- [4] C. Julian Chen. « Physics of Solar Energy »; 1st ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons Inc., 2011
- [5] « Énergie solaire photovoltaïque : fonctionnement, enjeux et chiffres clés » ; [www.connaissancedesenergies.org](http://www.connaissancedesenergies.org)
- [6] « Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques organiques » Zouhair El Jouad. Physique [physics]. Université d'Angers, 2016. Français. ffNNT : 2016ANGE0022ff. fftel-01443621f
- [7] « Extraction des paramètres électriques d'une cellule solaire organique à base de (P3HT : PCBM) » ; Volume II N° 6 Equipe de Recherche en Electronique, Instrumentation et Mesures (E.R.E.I.M) & Faculté Polydisciplinaire, Université Sultan Moulay Slimane, Beni Mellal, Maroc.
- [8] « Aspects Techniques Des Projets Solaires PV Raccordés Au Réseau » ; Abdelkarim GHEZAL
- [9] « Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies » ; Thèse Thomas Mambrini
- [10] « Environnement sur la terre avantages et inconvenients-energie solaire-011 » [www.unblogsurlaterre.com](http://www.unblogsurlaterre.com) ;
- [11] « Méthodologie de prédiction des niveaux d'émission conduite dans les circuits intégrés, à l'aide de VHDL-AMS / A VHDL-AMS » ; Perdriau, Richard
- [12] « Modélisation Comportementale Par VHDL-AMS D'un Synthétiseur De Fréquence » ; Amanantsihoarana Harisoa Nathalie.

- [13] « Modélisation comportementale des systèmes multidisciplinaires en VHDL-AMS », BAOUCHE Fatima Zohra
- [14] A. VACHOUX, « Modélisation de Systèmes Analogiques et Mixtes -Introduction à VHDL-AMS », notes de cours 2003 EPFL.
- [15] Y. HERVE, « VHDL-AMS, Applications et enjeux industriels », Dunod, Paris, 2002.
- [16] R. Frevert, J. Haase, R. Jancke, U. Knöchel, P. Schwarz, R. Kakerow and M. Darianian, « Modeling and Simulation for RF System Design », Springer, First edition, 2005.
- [17] J.R. Phillips, « Projection-based approaches for model reduction of weakly nonlinear time-varying systems », IEEE Transactions on Computer Aided Design of Integrated Circuits and Systems, Vol. 22, No. 2, Février 2003.
- [18] G.R. Boyle, B.M. Cohn, D.O. Pederson, J.E. Solomon, « Macromodeling of integrated circuit operational amplifiers », IEEE Journal of Solid-State Circuits, SC 9, 1974.
- [19] « Modélisation comportementale en VHDL-AMS du lien RF pour la simulation et l'optimisation des systèmes RFID UHF et micro-ondes » Rami Khouri
- [20] « Contribution au développement de modèles pour l'électronique de puissance en VHDL-AMS », THESE – Their Ibrahim.
- [21] « Modélisation multidisciplinaire VHDL-AMS de systèmes complexes : vers le Prototypage Virtuel », Sébsatien Snaidero
- [22] « Simplorer Getting Started Guide » ANSYS, Inc. Release 18.2 July 2017
- [23] « SystemVision - Virtual Lab for Mechatronic System Design and Analysis »; Datasheet by Mentor Graphics
- [24] « Modélisation Comportementale De Spice A VHDL-AMS » ; THESE Benacer Imad
- [25] « Etude simulation d'un générateur de panneau photovoltaïque » ; Thèse Master HARAUBIA Mohamed