

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master 2

Filière Electronique
Spécialité Instrumentation

Présenté par

OUKACI Manel Dalila

&

ZAMIME Amina

Modélisation sur NI-MULTISIM et Co-simulation par LABVIEW des générateurs photovoltaïques

Proposé par : **Dr NADJEMI Omar (UB1)** & **Dr NACER Tarek (ENSHB)**

Année Universitaire 2019-2020

Remerciements

Nous remercions tout d'abord Allah le miséricordieux & le très miséricordieux pour nous avoir donné le courage et la force de mener à bien ce travail.

*Nous remercions particulièrement nos promoteurs Messieurs **NADJEMI Omar et NACER Tarek** pour leur encadrement et soutien concrétisés par leurs remarques, conseils, disponibilité et bienveillance au cours du développement de notre projet de fin d'étude.*

Qu'ils trouvent ici le témoignage de notre profonde gratitude.

Nous tenons aussi à remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail, pour toutes remarques et critiques constructives.

Enfin, merci à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

*A mes très chers **parents** que Dieu les protège pour leurs soutiens durant toute ma carrière d'étude, pour leurs bienveillances, leurs efforts constants et pour leurs encouragements.*

*A ma sœur **Fella***

*A mon mari **Smaïl***

A tous mes ami(e)s dont la sympathie et le soutien moral m'ont été précieux.

Enfin, je rends une ardente vénération à tous mes professeurs, enseignants, et tous ceux qui de près ou de loin m'ont aidé à réaliser et finaliser ce travail.

MANEL Dalila

Je dédie ce modeste travail à :

*A mes très chers **parents** que Dieu les protège pour leurs soutiens durant toute ma carrière d'étude, pour leurs bienveillances, leurs efforts constants et pour leurs encouragements.*

*A mes sœurs **Dalíla, Faíza, Nassíma, Sara***

*A mes amies **Hanane, Safía, Imène***

*Ainsi A mon mari **Híchem***

A tous mes ami(e)s dont la sympathie et le soutien moral m'ont été précieux.

Enfin, je rends une ardente vénération à tous mes professeurs, enseignants, et tous ceux qui de près ou de loin m'ont aidé à réaliser et finaliser ce travail.

Amína

Abstract

In recent years, the use of renewable energies (*e.g.*, biofuel, geothermal, hydroelectricity, solar, tidal wave and wind) as a source of electrical energy has become a promising solution throughout the world. In Algeria, the first attempts to adopt solar photovoltaic (PV) energy have just appeared. The first use of PV is recorded in the field of rural electrification where a few tens of Saharan villages in the Tamanrasset region of Illizi and Adrar have benefited from these installations.

Experimental testing is a good tool to be employed to understand the behaviour (performance) of PV panels under different conditions (*i.e.*, temperatures), however, it is very tedious and costly. Therefore, the development of appropriate numerical methods is of a primary importance in order to be able to study the different parameters that could influence the performance of PV panels and possibly provide a better understanding of the complexity of the PV system.

In this thesis, a numerical co-simulation, using Multisim and LabVIEW software, capable of reproducing as accurately as possible the I (V) characteristics of a PV generator as a function of temperature as well as solar irradiations, was developed. The above-mentioned co-simulation was validated using experimental data available in the literature.

This thesis starts with a literature review on several studies that were carried out on the basics of PV energy, structure and components of a PV panel as well as its electrical characteristics in addition to the factors that affect its performance.

The steps to follow in order to model the MSX 60 PV generator using Multisim software are presented in Chapter 2. The curves that depict the variation of the current as a function of the voltage for temperature values equal to 0, 25, 50 and 75 °C and under standard incident irradiation of 1 kWp/m², are adopted as a tool to assess the performance of the simulated model.

The various simulations carried out in Chapter 2 enabled the extraction of the electrical parameters related to each level of characterization and the achievement of a good agreement between the analytical and experimental results.

In Chapter 3, an analysis, which consists in simulating the I (V) characteristics of the Solarex MSX-60 panel from the first level results, obtained in Chapter 2, and their comparison with the second level characteristics, was carried out using LabVIEW with the purpose of introducing the sought co-simulation.

The co-simulation showed that the I (V) characteristics generated by Multisim and presented as an input to LabVIEW made it possible to extract the parameters of the MSX 60 generator with a good approximation except the value of the series resistance « R_s » which is due to its extract method.

The last part of the thesis concludes the research findings and explores areas of future research in terms of the following:

- SPICE programming of PV generators
- Implementation of an automatic co-simulation
- Application to the practical characterization of PV panels

ملخص:

يهدف العمل المقدم في هذه المذكرة إلى دراسة وتحليل لوحة كهروضوئية من خلال ربط عدة خلايا في سلسلة على التسلسل و على التفرع تحت ظروف مختلفة لدرجة حرارة وإشعاع شمسي باستخدام برنامج محاكاة يدعى مولتيسيم لاتقان و تصور التغييرات التي يجب إجراؤها على الأخيرة ول أن تكون قادرًا على تحقيق النتائج المرجوة ، أيضًا بهدف محاكاة لوحة كهروضوئية لاحقًا باستخدام معلومات من الورقة الفنية للشركة المصنعة لإنهاء هذا العمل مع محاكاة مشتركة على برنامج يدعى لافييو

Résumé :

Le travail présenté dans ce mémoire a pour objectif d'étudier et d'analyser un panneau photovoltaïque à travers l'association de plusieurs cellules en série et en parallèle sous des conditions différentes, de la température et de l'irradiation solaire utilisant le logiciel de simulation MULTSIM pour bien maîtriser et visualiser les changements effectués sur ce dernier et pour pouvoir atteindre les résultats voulu, aussi pour but de simuler par la suite un panneau photovoltaïque utilisant les informations de la fiche technique du fabricant pour finir ce travail avec une co-simulation sur le logiciel LABVIEW.

Abstract:

The work presented in this thesis aims to study and analyze a photovoltaic panel through the association of several cells in series and parallel under different conditions, temperature and solar irradiation using the MULTSIM simulation software for properly master and visualize the changes to be made on the latter and to be able to achieve the desired results, also with the aim of subsequently simulating a photovoltaic panel using information from the manufacturer's technical sheet to finish this work with co-simulation on the software LABVIEW

Listes des acronymes et abréviations

A	Aire de la cellule
E	Eclairement
FF	Facteur de forme
GPV	Générateur photovoltaïque
I_{cc} (I_{sc})	Courant de court-circuit
I_{ph}	Photo –courant
I_s (I₀)	Courant de saturation
I_{m_cel}	Courant maximale de la cellule idéale
I_{m_Cel2R}	Courant maximale de la cellule à 2 résistances
I_{mp}	Courant @ P _{max}
K_i	Coefficient de T° de la tension à circuit ouvert
K_v	Coefficient de T° du courant en court-circuit
MSX 60_ Rsh à 0°C	Panneau MSX 60 à une résistance Rsh à 0°C
MSX 60 à 0°C	Panneau MSX 60 à 0°C
MSX 60_ Rsh	Panneau MSX 60 à une résistance Rsh
MSX 60	Panneau solaire MSX 60
n	Facteur d'idéalité de la jonction
N_s	Groupement en série
N_p	Groupement en parallèle
PV	Photovoltaïque
P (bias)	Puissance de la charge
P_m	Puissance optimum

Pm_cel	Puissance maximale de la cellule idéale
Pm_2R	Puissance maximale de la cellule à 2 résistances
Pm_cel,Rsh	Puissance maximale de la cellule à une résistance Rsh
Rsh	Résistance shunt
Rs	Résistance série
Rsh@I_{sc_cel}	Valeur inverse de la pente de I(V) _{cel} , idéale au point V = 0
Rsh@I_{sc-2R}	Valeur inverse de la pente de I(V) _{cel,2R} au point V = 0
Rsh@I_{sc_gpv}	Valeur inverse de la pente de I(V) _{gpv} au point V = 0
Rsh@I_{sc-Rsh}	Valeur inverse de la pente de I(V) _{gpv} à Rsh au point V = 0
T	Température
Voc	Tension à circuit ouvert
V (bias)	Tension de la charge
Vm_cel	Tension maximale de la cellule idéale
Voc_cel	Tension de circuit ouvert de la cellule idéale
Vm_2R	Tension maximale de la cellule à 2 résistances
Voc_2R	Tension de circuit ouvert de la cellule à 2 résistances
Voc_Rsh	Tension de circuit ouvert de la cellule à une Résistance Rsh
Vm_Rsh	Tension maximale de la cellule à une résistance Rsh
Vmp	Tension @ Pmax
WC	Watt crête

Table des matières

Introduction générale	1
<u>Chapitre 01 : Généralités sur l'énergie solaire et photovoltaïque</u>	
1. Introduction	3
2. Energie solaire	
2.1 Introduction	3
2.2 Le soleil	5
2-2-1- présentation du soleil	5
2-2-2- Mouvement de la terre autour du soleil	6
2-2-3- Trajectoire du soleil	7
2-2-4- Coordonnées du soleil	7
2.3 Cordonnée terrestre	7
1-3-1- longitude	8
1-3-2- altitude	8
1-3-3- latitude	8
2.4 Le rayonnement solaire	9
2-4-1- composition	10
2-4-2- différents types de rayonnement solaire	10
3. <u>L'énergie photovoltaïque</u>	
3.1 Historique	12
3.2 Définition du mot photovoltaïque	13

3.3 Présentation de la cellule PV ou Photopile	13
3-3-1- matériau semi-conducteurs	14
3-3-2- les types de dopage semi-conducteurs	15
3-3-3- Principe du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	16
3.4 Technologies de cellule solaire	18
3.5 Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque	19
3-5-1- schéma électrique équivalent	19
3-5-2- paramètres d'une cellule photovoltaïque	20
3.6 Le panneau solaire	23
3-6-1- groupement de cellule	23
3-6-2- la puissance électrique d'un panneau solaire	25
3-6-3- le rendement d'un panneau solaire photovoltaïque	26
3.7 Principe d'un générateur PV	27
3-7-1- exemples d'installation PV	27
2-7-2- avantages et inconvénients de l'énergie solaire Photovoltaïque	29
4. Conclusion	31
Chapitre 02 : Simulation schématique d'un système PV	
2-1- Introduction	32
2-2- Présentation des moyens et ressources mis en œuvre	33
2-2-1- NI MultiSim	33

2-2-2-	Le panneau solaire MSX 60	34
2-2-3-	La cellule idéale	35
2-2-4-	La cellule à deux résistances	37
2-2-5-	Le panneau photovoltaïque	38
2-2-6-	Création et enregistrement du Subcircuit dans la base de multisim	40
2-3-	caractérisation de la cellule MSX 60	41
2-3-1-	la cellule MSX 60	41
2-3-2-	La cellule MSX60 à deux résistances	45
2-3-3-	La cellule MSX 60 à une résistance Rsh	46
2-3-4-	Extraction de la valeur de Rs	48
2-4-	caractérisation du panneau MSX 60 aux conditions standards	49
2-5-	caractérisation du panneau MSX 60 aux températures 0, 25, 50, 75 °C	52
2-5-1-	Courbe I (V, T) du panneau MSX 60 aux températures 0, 25, 50, 75 °C	52
2-5-2-	Extraction des paramètres du panneau MSX 60 aux Températures 0, 25, 50, 75 °C	54
2-6-	Groupement de panneaux MSX 60 en série et parallèle	56
2-6-1-	caractérisation du groupement de deux panneaux MSX 60 en série	57
2-6-2-	caractérisation du groupement de deux panneaux MSX 60 En parallèle	58
2-7-	Conclusion	59
 <u>Chapitre 03 : CO-SIMULATION DES CARACTERISTIQUES PAR SOLARIVTOOLKIT</u>		
3-1-	Introduction	60
3-2-	Présentation des moyens et ressources mis en œuvre	61

3-2-1-	Caractéristiques MSX 60	61
3-2-2-	LabVIEW	61
3-2-3-	SolarIVtoolkit	65
3-3-	Co-simulation MultiSim LabVIEW	70
3-3-1-	Tableau des résultats de la co-simulation	70
3-3-2-	Analyse de la co-simulation	72
3-4-	Conclusion	74

Liste des figures

Figure 1.1 :	le mouvement de la terre autour du soleil	5
Figure 1.2 :	trajectoire du soleil	6
Figure 1.3 :	coordonnées terrestres du soleil	7
Figure 1.4 :	analyse spectrale du rayonnement solaire	8
Figure 1.5 :	composants du rayonnement solaire	9
Figure 1.6 :	les trois composantes du rayonnement solaire sur un plan Incliné	10
Figure 1.7 :	conversion de l'énergie solaire en électricité	12
Figure 1.8 :	procédé de dopage d'un S.C pur	13
Figure 1.9 :	dopage de type N	14
Figure 1.10 :	dopage de type P	15
Figure 1.11 :	jonction PN à l'équilibre	16
Figure 1.12 :	schéma d'une cellule photovoltaïque	16
Figure 1.13 :	principe de fonctionnement d'une cellule PV	18

Figure 1.14 : schéma équivalent électrique d'une cellule PV	19
Figure 1.15 : caractéristique et schéma équivalent d'une cellule Photovoltaïque réelle	20
Figure 1.16 : association de n_s cellules PV en série	22
Figure 1.17 : association de n_p cellules PV en parallèle	23
Figure 1.18 : association mixte des modules solaires N_s/N_p	23
Figure 1.19 : une installation photovoltaïque en site isolé	27
Figure 1.20 : une installation photovoltaïque accordée au réseau	28
Figure 2.1 : NIMULTISIM 14.1	33
a. Modèle compact idéal	35
b. Circuit équivalent idéal	35
Figure 2.3 : cellule photovoltaïque à deux résistances (série et shunt)	37
a. Modèle compact à deux résistances	37
b. Circuit équivalent à deux résistances	37
Figure 2.4 : le modèle compact d'un panneau	39
Figure 2.5 : sauvegarde dans DB	40
Figure 2.6 : enregistrement dans DB	40
Figure 2.7 : sélection du modèle	40
Figure 2.8 : sélection d'outil du Subcircuit	41
Figure 2.9 : nom du nouveau modèle compact	41
Figure 2.10 : le modèle compact	41
Figure 2.11 : retour au modèle principal	41

Figure 2.12 : consulter configuration	41
Figure 2.13 : fenêtre de configuration des paramètres de la simulation	43
Figure 2.14 : caractéristique I(V) et P(V) de la cellule MSX 60 idéale	43
a. Modèle idéal compact	43
b. Circuit idéal équivalent	43
Figure 2.15 : caractéristique I(V) et P(V) de la cellule MSX 60 à résistances série et shunt	46
a. Modèle à deux résistances compact	46
b. Circuit à deux résistances équivalent	46
Figure 2.16: caractéristique I(V) et P(V) de la cellule MSX 60_Rsh	47
Figure 2.17 : fenêtres en cascade de configuration de la simulation du MSX 60	49
a. Fenêtre " Temperature Sweep "	49
b. Fenêtre " Nested Parameter Sweep "	49
Figure 2.18 : I(V) & P(V) du MSX 60	50
Figure 2.19 : I(V) & P(V) du MSX 60_Rsh	50
Figure 2.20 : caractéristique I (V, T) du panneau MSX 60 pour différentes températures	52
Figure 2.21 : I(V) & P(V) du MSX 60	53
Figure 2.22 : I(V) & P(V) du MSX 60_Rsh	53
Figure 2.23 : I(V) & P(V) du MSX 60 à 50°C	54
Figure 2.24 : I(V) & P(V) du MSX 60_Rsh à 50°C	54
Figure 2.25 : I(V) & P(V) du MSX 60 à 75°C	55

Figure 2.26 : I(V) & P(V) du MSX 60_Rsh à 75 °C	55
Figure 2.27 : groupements de panneaux en série	56
Figure 2.28 : groupements de panneaux en parallèle	56
Figure 2.29 : I(V) & P(V) de deux MSX 60 en série	56
Figure 2.30 : I(V) & P(V) de deux MSX 60_Rshs en série	56
Figure 2.31 : I(V) & P(V) de deux MSX 60 en parallèle	57
Figure 2.32 : I(V) & P(V) de deux MSX 60_Rshs en parallèle	57
Figure 3.1 : logo du logiciel LabVIEW	61
Figure 3.2 : Présentation des composantes d'un Instrument Virtuel	62
Figure 3.3 : Présentation du diagramme fonctionnel d'un VI	63
Figure 3.4 : Présentation de la face avant ou interface graphique d'un VI	63
Figure 3.5 : Icône ou connecteur d'un VI	64
Figure 3.6 : PXI-4130 Power SMU	65
Figure 3.7 : Explorateur du projet SolarIVToolkit avec et sans Matériel	66
Figure 3.8 : LabVIEW VI pour la caractérisation des cellules solaires Photovoltaïques	66
Figure 3.9 : Explorateur du projet SolarIVToolkit indépendant du Matériel.	67
Figure 3.10: Diagramme fonctionnel de la VI caractérisation IV à partir de fichiers LVM	67
Figure 3.11: Répertoire Data_lvm d'enregistrement des fichiers LVM	69
Figure 3.11_a : Paramètres MSX 60_Cel sous LabVIEW	69
Figure 3.11_b : Paramètres MSX 60_Cel_2R sous LabVIEW	69
Figure 3.11_c : Paramètres MSX 60_Cel_Rsh sous LabVIEW	70

Figure 3.11_d : Paramètres MSX 60_25°C sous LabVIEW	70
Figure 3.11_e : Paramètres MSX 60_Rsh sous LabVIEW	70
Figure 3.11_f : Paramètres MSX 60_0°C sous LabVIEW	70
Figure 3.11_g : Paramètres MSX 60_50 °C sous LabVIEW	70
Figure 3.11_h: Paramètres MSX 60_75°C sous LabVIEW	70
Figure 3.12 Extraction de la valeur de Rs par LabVIEW	72

Liste des tableaux

Tableau (2.1) : caractéristiques typiques électriques du panneau MSX 60	34
Tableau (2.2) : caractéristiques électriques sous les conditions standards de La cellule idéale	42
Tableau (2.3) : caractéristiques électriques sous les conditions standards de la cellule à 2R	44
Tableau (2.4) : caractéristiques électriques sous les conditions standards de la cellule à Rsh	46
Tableau (2.5) : caractéristiques électriques sous les conditions standards du panneau MSX 60	48
Tableau (3.1) : toutes les valeurs des caractéristiques du panneau MSX 60 obtenues à l'issue des simulations effectuées aux différents niveaux de modélisation dans le chapitre 2	60
Tableau (3.2) : toutes les valeurs des caractéristiques du panneau MSX 60 obtenues par co_simulation	71

Introduction générale

Ces dernières années, l'utilisation des énergies renouvelables (énergie solaire, géothermique, biomasse, éolienne et hydraulique) comme source d'énergie électrique est devenue parmi les meilleures solutions à travers le monde. En Algérie, les premières tentatives d'exploitation de l'énergie solaire photovoltaïque (PV) viennent d'apparaître. La première utilisation du PV est enregistrée dans le domaine de l'électrification rurale où quelques dizaines de villages sahariens de la région de Tamanrasset d'Illizi et d'Adrar ont bénéficié de ces installations [1].

Les connaissances actuelles sur le comportement (rendement) des panneaux PV viennent des essais à l'échelle expérimentale en accord avec les considérations théoriques. Ces essais sont généralement très onéreux et laborieux. Par conséquent, le développement des méthodes numériques appropriées est important, afin d'être en mesure d'étudier les différents paramètres qui pourraient influencer sur le rendement des panneaux PVs et éventuellement fournir une meilleure compréhension de la complexité du système PV.

Le mémoire prend en charge l'étude d'un projet de fin d'études qui consiste à établir une Co-simulation numérique, en utilisant les logiciels Multisim et LabVIEW, capable de reproduire aussi fidèlement que possible les caractéristiques $I(V)$ d'un générateur PV en fonction de la température et des irradiances solaires. Cette co-simulation est basée sur un modèle du panneau PV de la littérature, ayant été mis en œuvre numériquement et validé par des données expérimentales.

Afin d'atteindre les objectifs cités ci-dessus, le mémoire est structuré en trois chapitres, et une conclusion, dont les contenus sont comme suit :

- Dans le premier chapitre, une revue bibliographique a été menée sur plusieurs études consacrées à la présentation de quelques notions de base sur l'énergie PV, la

structure d'un panneau PV, son principe de fonctionnement, ses composantes, ses caractéristiques électriques ainsi que les facteurs qui limitent son rendement.

- Le deuxième chapitre présente en détails les étapes à suivre afin de modéliser le générateur PV MSX 60 moyennant le logiciel Multisim. Des traitements de courbes représentant la variation du courant en fonction de la tension pour des valeurs de température égale à 0, 25, 50 et 75 °C, sous irradiation incidente standard de 1 kWc/m², sont utilisés pour tester les performances du modèle simulé.
- Une analyse consistant à simuler les caractéristiques I(V) du panneau MSX-60 de Solarex à partir des résultats de premier niveau, obtenus au chapitre 2 et de leur comparaison avec les caractéristiques de deuxième niveau, effectuée par Labview ont fait l'objet du troisième chapitre pour aboutir à introduire la co-simulation cherchée.

Enfin, le présent travail s'achève par une conclusion générale comportant un résumé de l'ensemble de ce mémoire, ainsi que des recommandations qui peuvent constituer une suite à ce travail, ou des perspectives à des futurs travaux de recherche.

Chapitre 1 Généralités sur l'énergie solaire

photovoltaïque

1. Introduction

Le progrès le plus important dans le développement de la technologie solaire a été le photovoltaïque, un système d'énergie solaire qui utilise des semi-conducteurs pour convertir directement le rayonnement solaire en électricité. L'« effet photovoltaïque» - la capacité de créer un courant électrique à l'aide des rayons solaires - a été initialement découvert en 1839 par Alexandre Becquerel [2].

Depuis lors, la technologie s'est considérablement développée, les modules devenant de plus en plus efficaces et rentables. Une grande partie de cette recherche a été effectuée avant les années 1970 et a été commémorée par Jimmy Carter mettant des panneaux solaires sur la Maison Blanche. Ils ont été démolis par Richard Nixon peu de temps après, mais l'esprit solaire pionnier perdure alors que les gens du monde entier continuent d'adopter des systèmes de panneaux solaires [3].

En raison de l'adoption continue, les entreprises ont continué d'investir dans la technologie, ce qui a fait augmenter l'efficacité de la plupart des panneaux solaires entre 15 et 20% - le reste est perdu sous forme de chaleur (en comparaison, la production d'électricité à partir de combustibles fossiles a une efficacité ~ 40%). Cela a également entraîné une baisse significative du prix des panneaux solaires.

Au cours de la seule dernière décennie, les prix ont diminué de plus de 80% [4]. Le mot photovoltaïque vient de la « photo » ce qui signifie la lumière, et "voltaïque", qui fait référence à la production d'électricité. Par conséquent, le processus photovoltaïque « Produit directement de l'électricité de la lumière du soleil. " Le mot

photovoltaïque est souvent appelé PV. Il offre aux consommateurs la capacité à produire de l'électricité dans une manière propre, calme et fiable.

2. L'énergie solaire

2.1 Introduction

Le soleil est à l'origine de toute forme d'énergie sur terre, que ce soit pour les énergies conventionnelles d'origine fossile comme les hydrocarbures ou pour les énergies renouvelables dont les plus importantes sont le solaire, l'éolien et la biomasse. L'énergie solaire directe est la plus dominante de toutes les formes d'énergies renouvelables, elle est l'une des plus facilement exploitables comme la plupart des énergies douces, elle donne à l'utilisateur la possibilité de subvenir sans intermédiaire à une partie de ses besoins.

Dans cette partie nous allons définir quelques notions préliminaires sur le rayonnement solaire nécessaires à la compréhension du principe de la photovoltaïque.

2.2 Le soleil

2.2.1 Présentation du soleil :

Le soleil est une sphère chaude de gaz dont les températures internes atteignent plus de 20 millions de degrés kelvin en raison des réactions de fusion nucléaire au cœur du soleil qui convertissent l'hydrogène en hélium. Le rayonnement du noyau interne n'est pas visible car il est fortement absorbé par une couche d'atomes d'hydrogène plus proche de la surface du soleil. La chaleur est transférée à travers cette couche par convection.

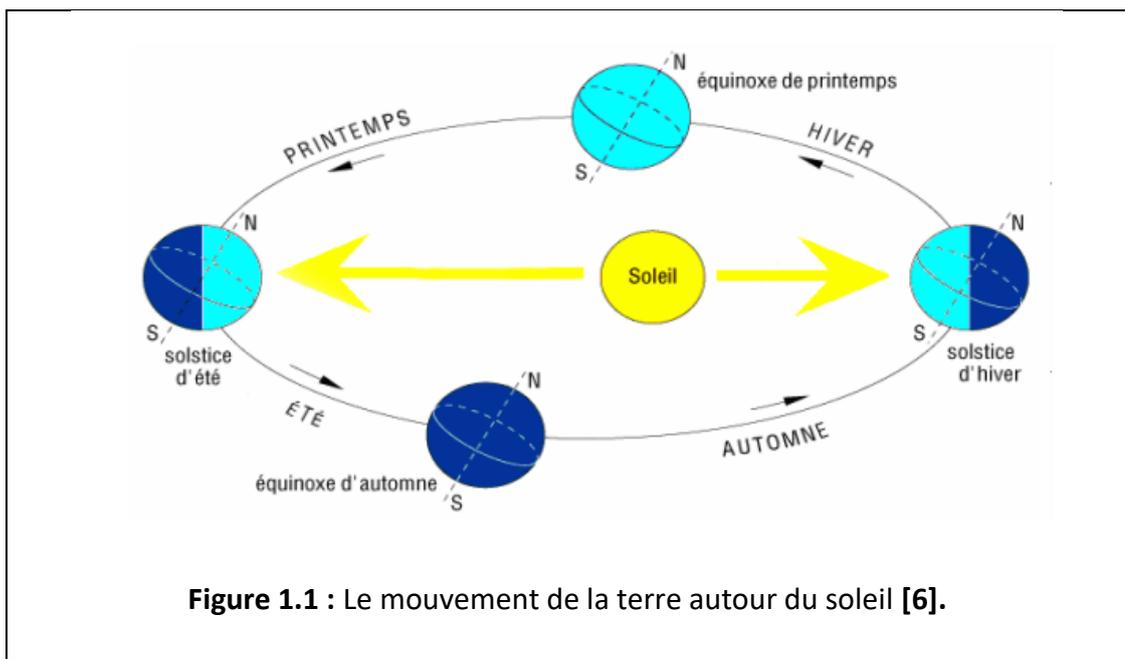
Aussi c'est l'étoile du Système solaire. Dans la classification astronomique, c'est une étoile de type naine jaune d'une masse d'environ $1,9891 \times 10^{30}$ kg, composée d'hydrogène (75 % de la masse ou 92 % du volume) et d'hélium (25 % de la masse ou 8 % du volume)⁹. Le Soleil fait partie de la galaxie appelée la Voie lactée et se situe à environ 8 kpc (~26 100 a.l.) du centre galactique, dans le bras d'Orion. Le Soleil orbite autour du centre galactique en 225 à 250 millions d'années (année galactique). Autour de lui gravitent la Terre (à la vitesse de 30 km/s), sept autres planètes, au moins

cinq planètes naines, de très nombreux astéroïdes et comètes et une bande de poussière [5] [6].

Le Soleil représente à lui seul environ 99,854 % de la masse du Système solaire ainsi constitué.

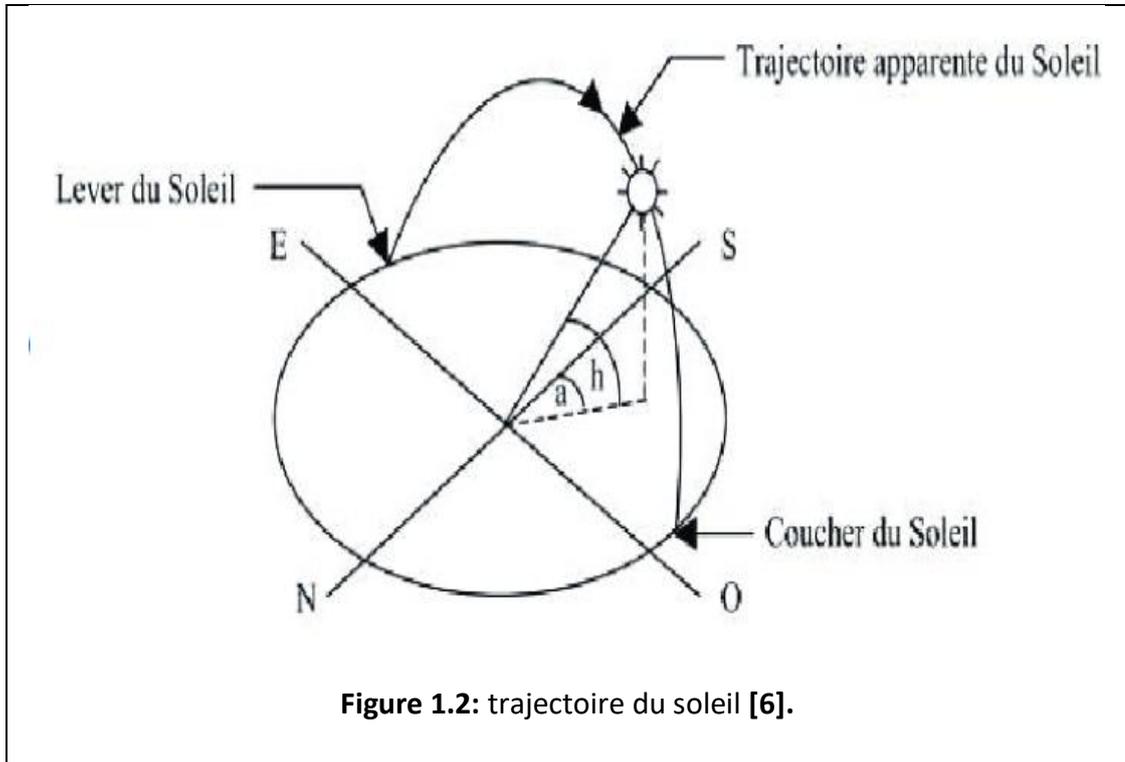
2.2.2 Mouvement de la terre autour du soleil :

Le mouvement de la terre autour du soleil s'effectue dans un plan nommé le plan de l'écliptique. L'axe des pôles, autour duquel s'effectue le mouvement de rotation de la terre, n'est pas perpendiculaire au plan de l'écliptique. Le centre de gravité de la terre décrit une ellipse dont le soleil occupe l'un des foyers Figure 1.1. La terre tourne sur elle-même autour de l'axe des pôles et le plan équatorial, perpendiculaire à cet axe. Ainsi, la rotation et l'inclinaison de la terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison. La terre tourne autour du soleil en 365 jours 5h 48 mn 40s $\approx 365,25$ jours, avec une vitesse moyenne 29,77 Km/s (vitesse maximale en hiver 30,27 Km/s et minimale en été 29,77 Km/s). Ce mouvement s'effectue dans le sens trigonométrique et provoque le cycle des saisons [5].



2.2.3 Trajectoire du soleil :

Pour un observateur situé sur la surface de la terre, le soleil décrit une trajectoire apparente qui dépend de la latitude et la longitude du lieu où il se trouve



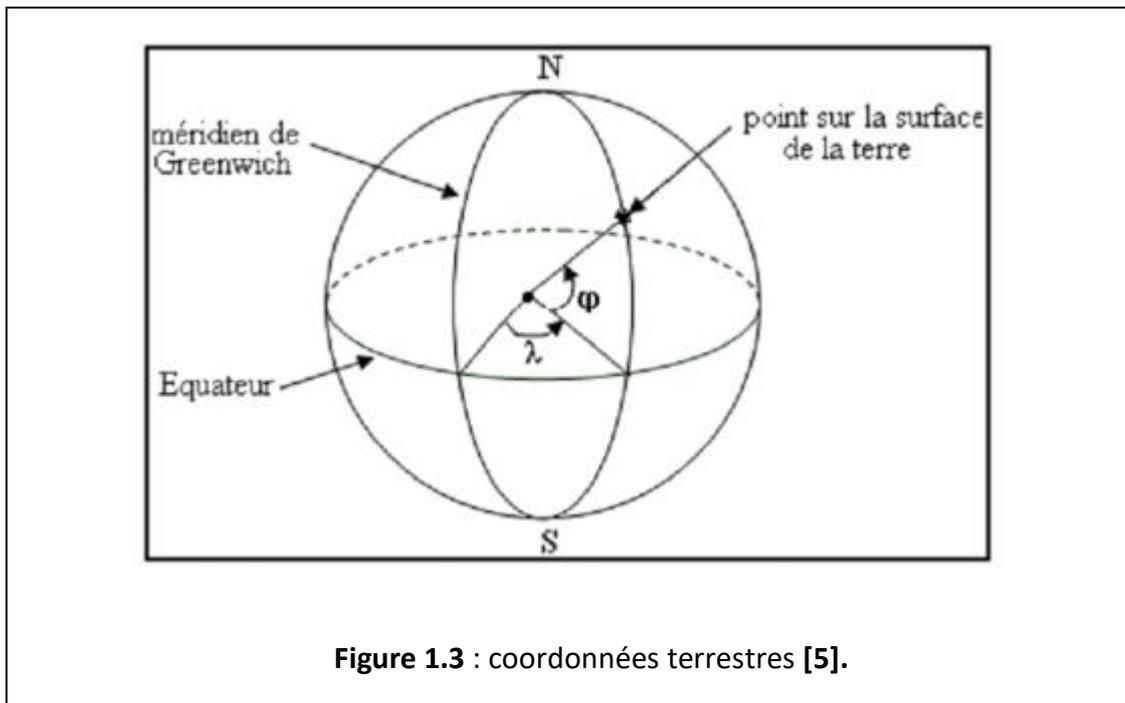
2.2.4 Coordonnées du soleil :

Pour un lieu donné, la position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par deux systèmes de coordonnées différents :

- Par rapport au plan équatorial de la terre (repère équatorial).
- Par rapport au plan horizontal du lieu (repère horizontal)

2.3 Coordonnées terrestre

Tout point sur la surface terrestre peut être repéré par ses coordonnées géographiques qui sont : la longitude, la latitude, ainsi que par son altitude, voir figure dans la page suivante .



2.3.1 Longitude :

La longitude (λ) d'un lieu correspond à l'angle formé par deux plans méridiens (passant par l'axe des pôles), l'un étant pris comme origine (méridien de Greenwich 0°) et l'autre déterminé par le lieu envisagé. La longitude d'un lieu peut être comprise entre -180 et 180° . A tout écart de 1° de longitude correspond à un écart de 4 minutes de temps. On affecte du signe (+) les méridiens situés à l'Est de ce méridien, et du signe (-) les méridiens situés à l'Ouest.

2.3.2 Altitude :

L'altitude d'un point correspond à la distance verticale en mètre entre ce point et une surface de référence théorique (niveau moyen de la mer).

2.3.3 Latitude :

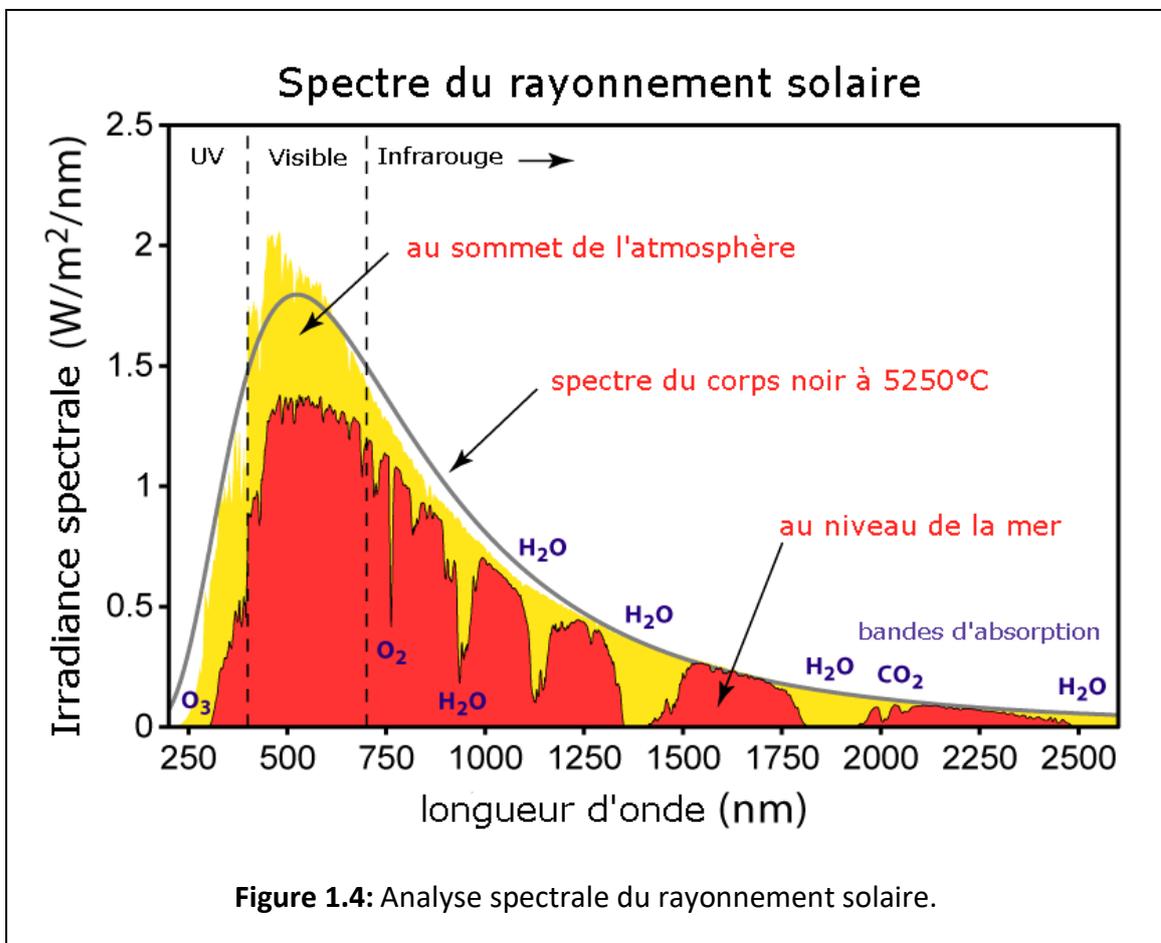
L'angle (ϕ) de latitude est l'angle entre une ligne tracée d'un point sur la surface de la terre avec le centre de cette dernière, et le cercle équatorial de la terre. L'intersection du cercle équatorial avec la surface de la terre forme l'équateur et est indiquée en tant que latitude de 0° , le pôle nord par la latitude $+90^\circ$ et le pôle sud par la latitude -90° . Par convention, le signe (+) est affecté à tous les lieux de l'hémisphère nord et le signe

(-) à tous les lieux de l'hémisphère sud. La latitude d'un lieu peut être comprise entre -90° et +90°.

2.4 Le rayonnement solaire

Le **rayonnement solaire** est l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le Soleil.

Il est composé de toute la gamme des rayonnements, de l'ultraviolet lointain comme les rayons gamma aux ondes radio en passant par la lumière visible. Le rayonnement solaire contient aussi des rayons cosmiques de particules animées d'une vitesse et d'une énergie extrêmement élevées. Une partie de ce rayonnement est filtrée par la couche d'ozone avant d'atteindre la troposphère. Via la photosynthèse il est nécessaire à la plupart des espèces qui vivent sur la terre.



2.4.1 Composition :

L'émission d'ondes électromagnétiques par le Soleil est convenablement modélisée par un corps noir à 5 800 kelvins, et peut donc être décrit par la loi de Planck. Le maximum d'émission est dans le vert ($\lambda=504$ nm), et la répartition du rayonnement est à peu près pour moitié dans la lumière visible, pour moitié dans l'infrarouge, avec 1 % d'ultraviolets.

Arrivé au niveau de la mer, c'est-à-dire ayant traversé toute l'atmosphère terrestre, une partie du rayonnement solaire a été absorbée. On peut repérer notamment sur le spectre ci-dessus les bandes d'absorption de l'ozone (qui absorbe une partie importante des ultraviolets), du dioxygène, du dioxyde de carbone et de l'eau.

2.4.2 Différents types de rayonnement solaire :

En réalité, le rayonnement total reçu sur une surface, appelé irradiation solaire incidente (ou encore éclairement énergétique global), est défini par la somme de trois composantes [7]:

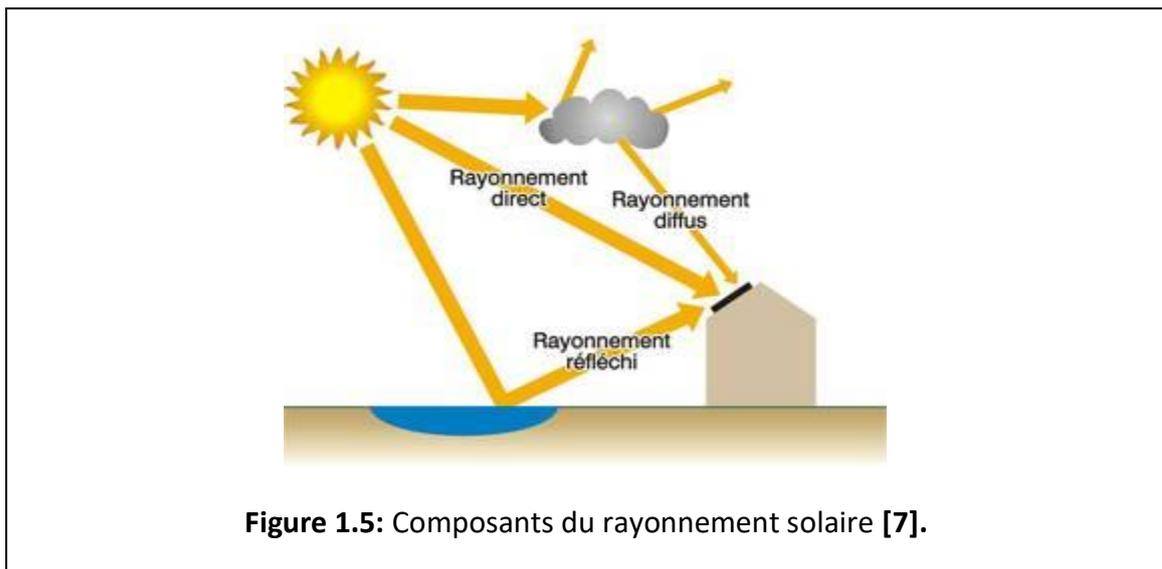


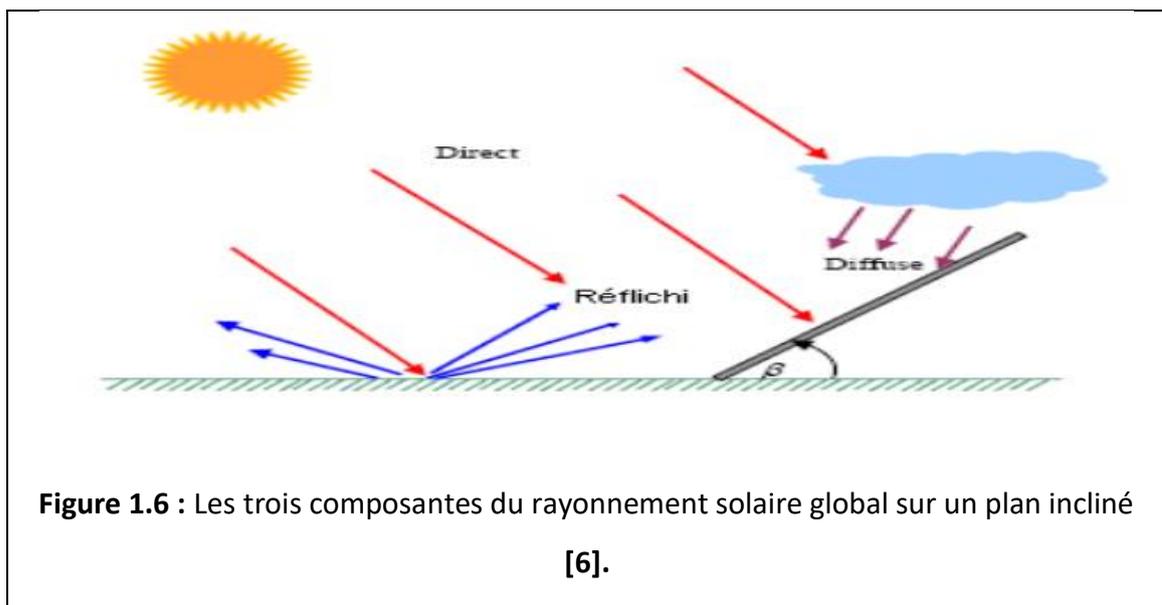
Figure 1.5: Composants du rayonnement solaire [7].

- **L'irradiation directe (rayonnement directe) :** provenant directement du Soleil. Cette composante s'annule si le Soleil est caché par des nuages ou par un obstacle.

- **L'irradiation diffusée (rayonnement diffusé)** : correspondant au rayonnement reçu de la voûte céleste, hors rayonnement direct. Cette énergie diffusée par l'atmosphère et dirigée vers la surface de la terre, peut atteindre 50 % du rayonnement global reçu, lorsque le soleil est bas sur l'horizon, et 100 % pour un ciel entièrement couvert.
- **L'irradiation réfléchie (rayonnement réfléchi)** : correspondant au rayonnement réfléchi par l'environnement extérieur, en particulier le sol, dont le coefficient de réflexion est appelé « albedo ».
- **L'irradiation Global (rayonnement global)** :

➤ **Sur Une surface horizontale :**

C'est l'ensemble du rayonnement d'origine solaire qui parvient sur une surface horizontale sur le globe terrestre. Il comprend donc la composante verticale du rayonnement solaire direct et rayonnement solaire diffus.



➤ **Sur Une surface inclinée :**

Rayonnement global sur une surface inclinée est la somme des rayonnements : Direct, Diffus et Réfléchi.

3. L'énergie photovoltaïque

3.1 Historique :

Découvert en 1839 par Antoine Becquerel [8], l'effet photovoltaïque permet la transformation de l'énergie lumineuse en électricité. Ce principe repose sur la technologie des semi-conducteurs. Il consiste à utiliser les photons pour libérer les électrons et créer une différence de potentiel entre les bornes de la cellule qui génère un courant électrique continu. A la différence des autres énergies renouvelables, l'énergie solaire est disponible partout sur la terre. L'Algérie reçoit en moyenne chaque jour 3kWh par mètre carré même si les déserts les plus ensoleillés recueillent 7kWh. Il n'y a donc pas de problème de gisement pour cette source. Les premières applications ont lieu dès les années 60 avec l'équipement de satellites spatiaux. Puis à partir de 1970, les premières utilisations terrestres ont concerné l'électrification des sites isolés. La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire est apte à répondre à une demande croissante d'énergie renouvelable. Elle est considérée comme devant prendre une part significative dans l'approvisionnement énergétique mondial. Celle-ci sera d'autant plus grande et d'autant plus rapide que des méthodes permettant de produire de l'électricité solaire à moindre coût seront utilisées.

- La puissance des installations est exprimée en Watt crête (Wc). Le Wc est la puissance fournie par un module photovoltaïque pour un ensoleillement normalisé de 1000W par m², à une température de 25°C. Le rendement électrique est le rapport puissance lumineuse incidente sur puissance électrique fournie. Les modules existants permettent des rendements électriques jusqu'à 20% [8].
- Actuellement le matériau semi-conducteur le plus utilisé est le silicium, sous forme de plaquettes, offrant le meilleur rendement de conversion de l'énergie solaire en électricité. Cependant, sa purification et son traitement conduisent à des coûts très élevés qui constituent un frein important au développement du photovoltaïque [8].

3.2 Définition du mot photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque » souvent abrégé par le sigle « PV », a été formé à partir des mots « photo » un mot grec signifiant lumière et « Volta » le nom du physicien italien Alessandro Volta qui a inventé la pile électrochimique en 1800 [9]. L'effet photovoltaïque est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité.

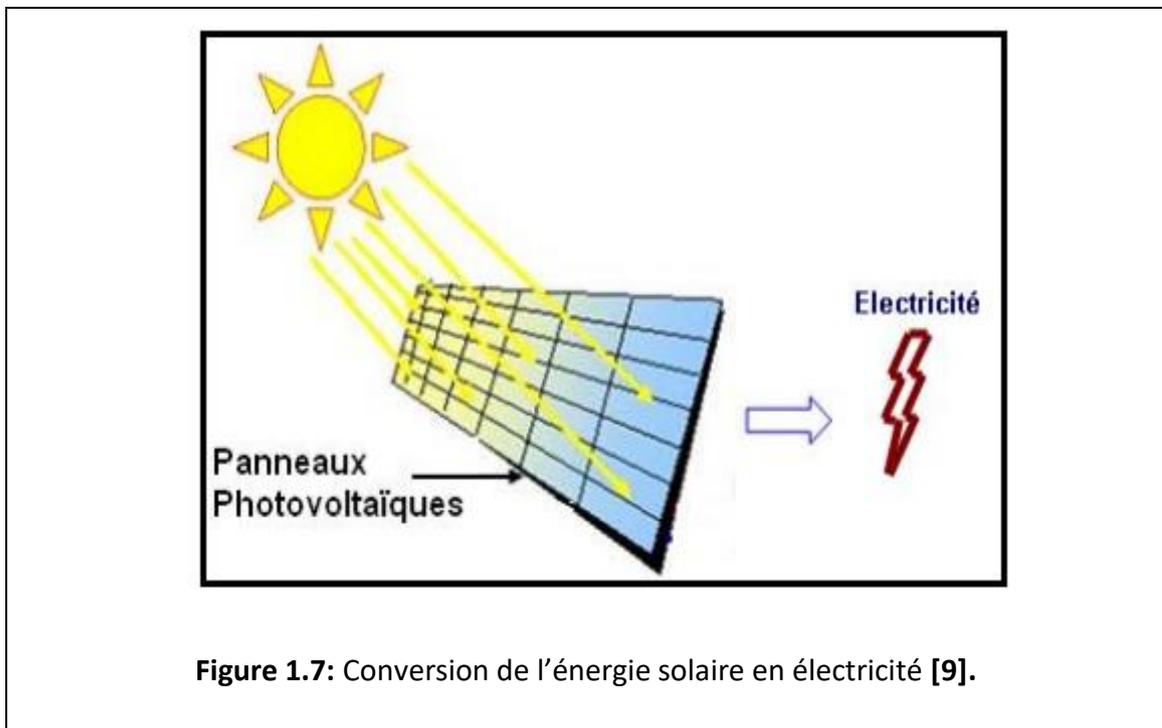


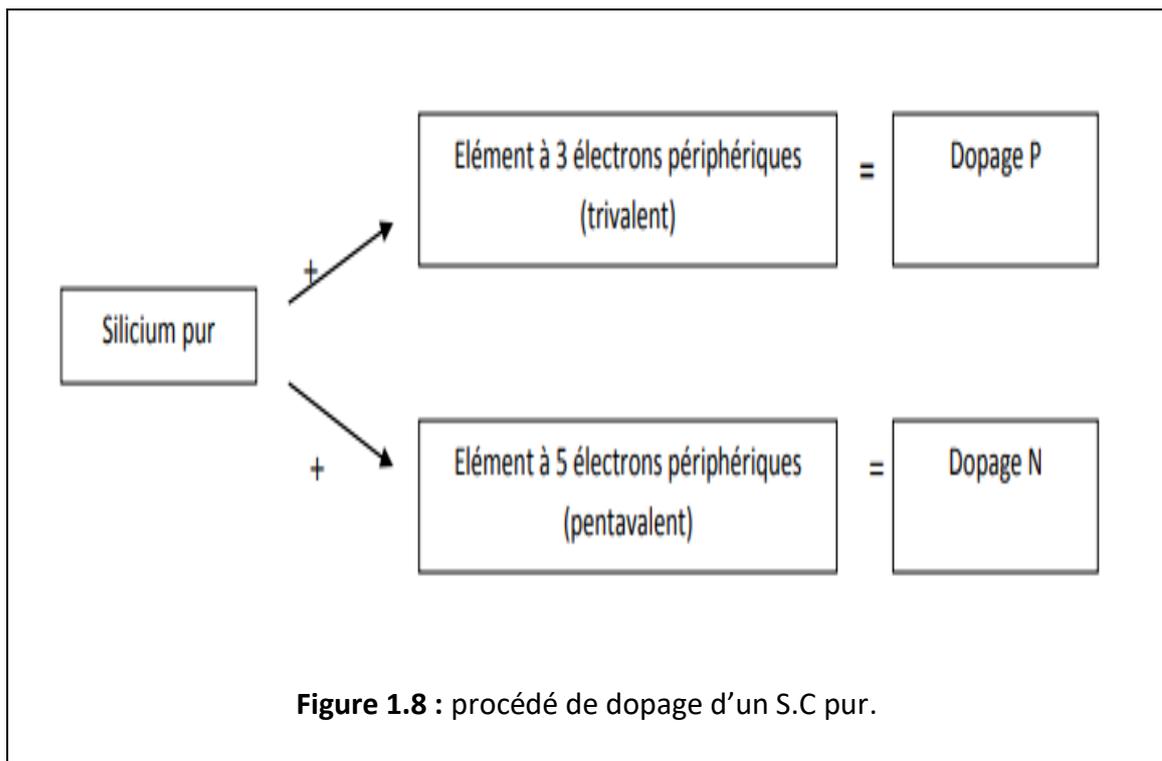
Figure 1.7: Conversion de l'énergie solaire en électricité [9].

3.3 Présentation de la cellule PV ou photopile

C'est l'élément de base qui grâce à lui la conservation est produite, les photopiles ou cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité. Elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi-conducteurs ayant des propriétés intermédiaires entre conducteurs et isolants. Le matériau de base est dans la plupart des cas le silicium. Selon le procédé de fabrication, on obtiendra des photopiles plus ou moins performantes, sous forme amorphe, poly-cristalline ou monocristalline. D'autres matériaux sont utilisables : Arséniure de gallium (GaAs), Tellure de cadmium (CdTe) et autres.

3.3.1 Matériau semi-conducteurs :

Un matériau semi-conducteur est un matériau dont la conductibilité électrique peut varier en fonction des conditions dans lesquelles il se trouve. Afin d'améliorer la conduction de ce dernier, les fabricants injectent dans une plaquette semi-conductrice des matériaux dopeurs (impuretés), qui possèdent un nombre d'électrons périphériques juste inférieur ou juste supérieur aux 4 électrons du semi-conducteur (silicium).

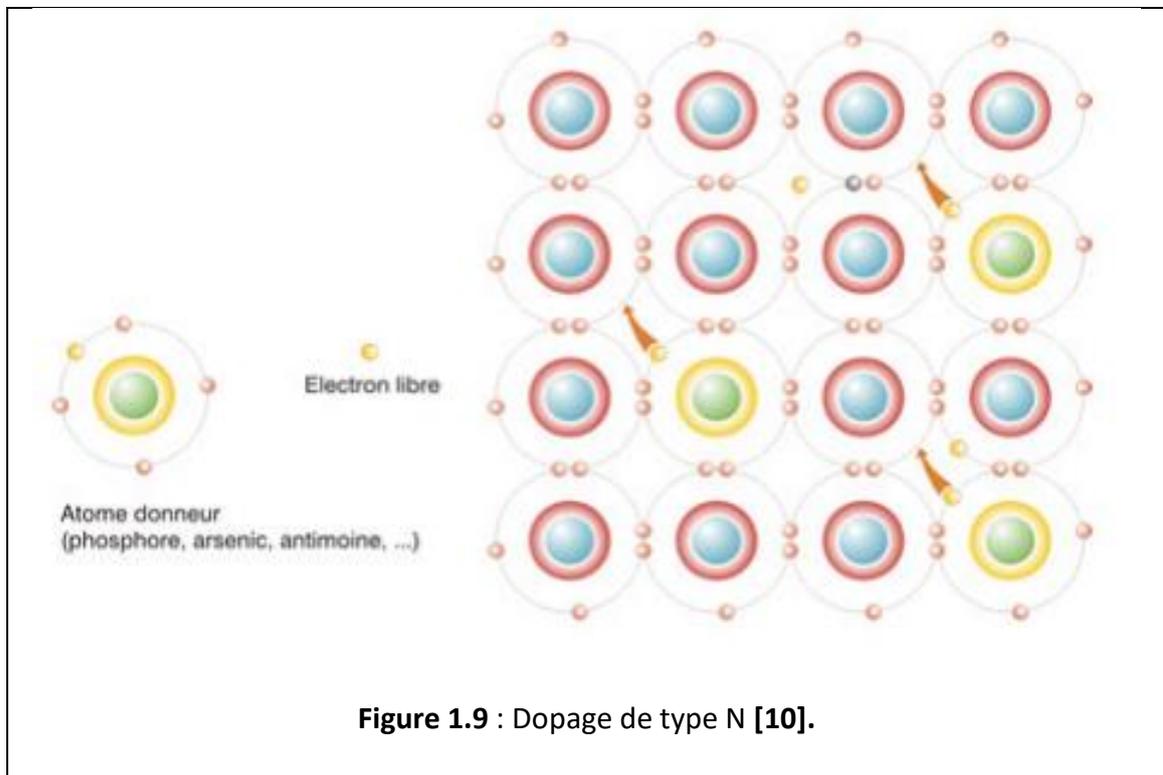


Il est ainsi possible d'augmenter la conductibilité d'un semi-conducteur par un procédé chimique, appelé dopage, qui consiste à insérer des impuretés dans le semi-conducteur pur pour réaliser ainsi des semi-conducteurs de "type n" et des semi-conducteurs de "type p"

3.3.2 Les types de dopage des semi-conducteurs :

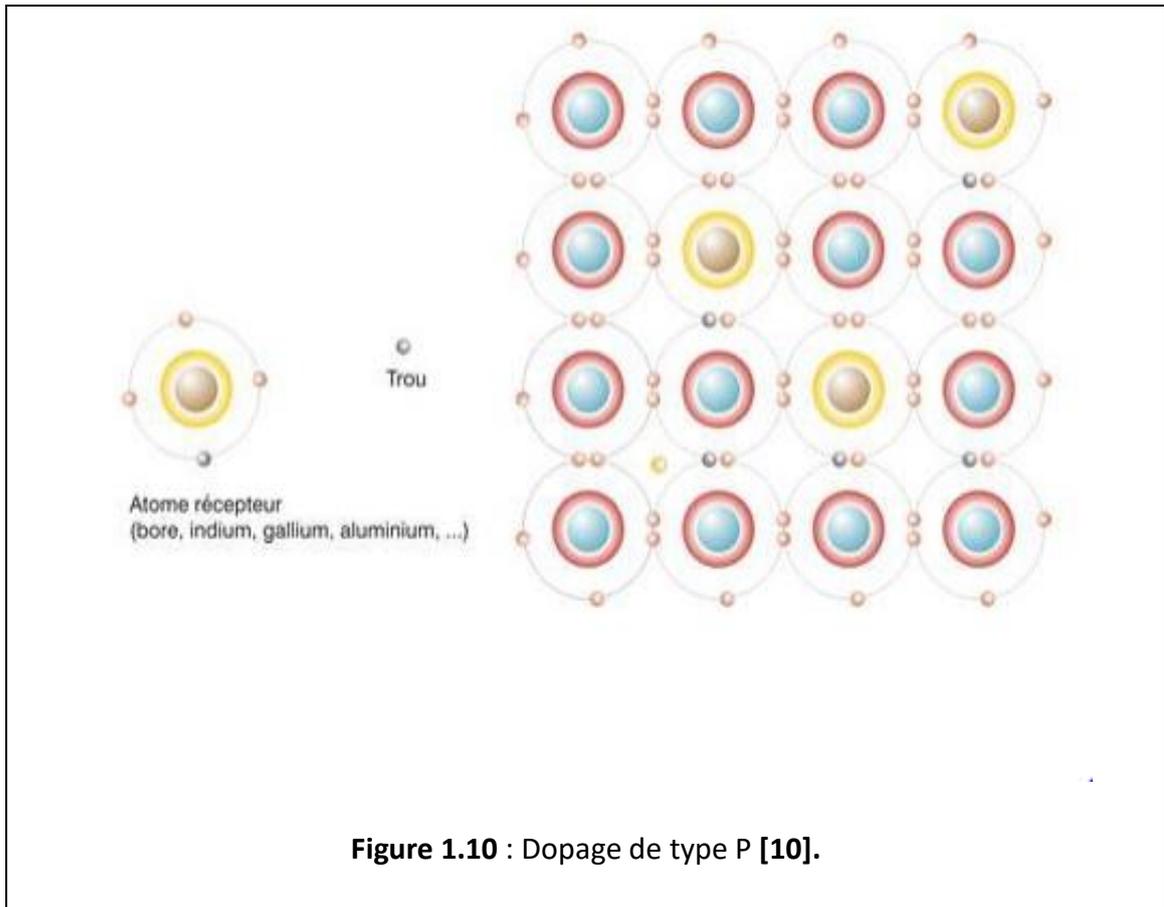
a) Le dopage N :

Le dopage de type N consiste à ajouter atome donneur tel que le phosphore au sein de la structure cristalline du silicium. Le phosphore disposant de 5 électrons sur sa couche électronique externe va s'associer avec 4 atomes de silicium, laissant ainsi libre un électron : Cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale négative.



b) Le dopage P :

Le dopage de type P consiste à ajouter un atome accepteur comme le bore au sein de la structure cristalline du silicium. Le bore disposant de 3 électrons sur sa couche électronique externe va s'associer avec 4 atomes de silicium, laissant ainsi libre un trou ; Cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale positive.



c) La jonction P-N :

Lorsque les deux zones sont mises en contact, certains électrons de semi-conducteur de type N passent vers le matériau de type P tandis que les trous du semi-conducteur de type P se déplacent au même moment dans la direction opposée. Le mouvement de ces charges majoritaires forme des paires électron-trou neutre, nous obtenons alors une région appelée jonction PN dans laquelle la conductibilité passe progressivement du type P au type N.

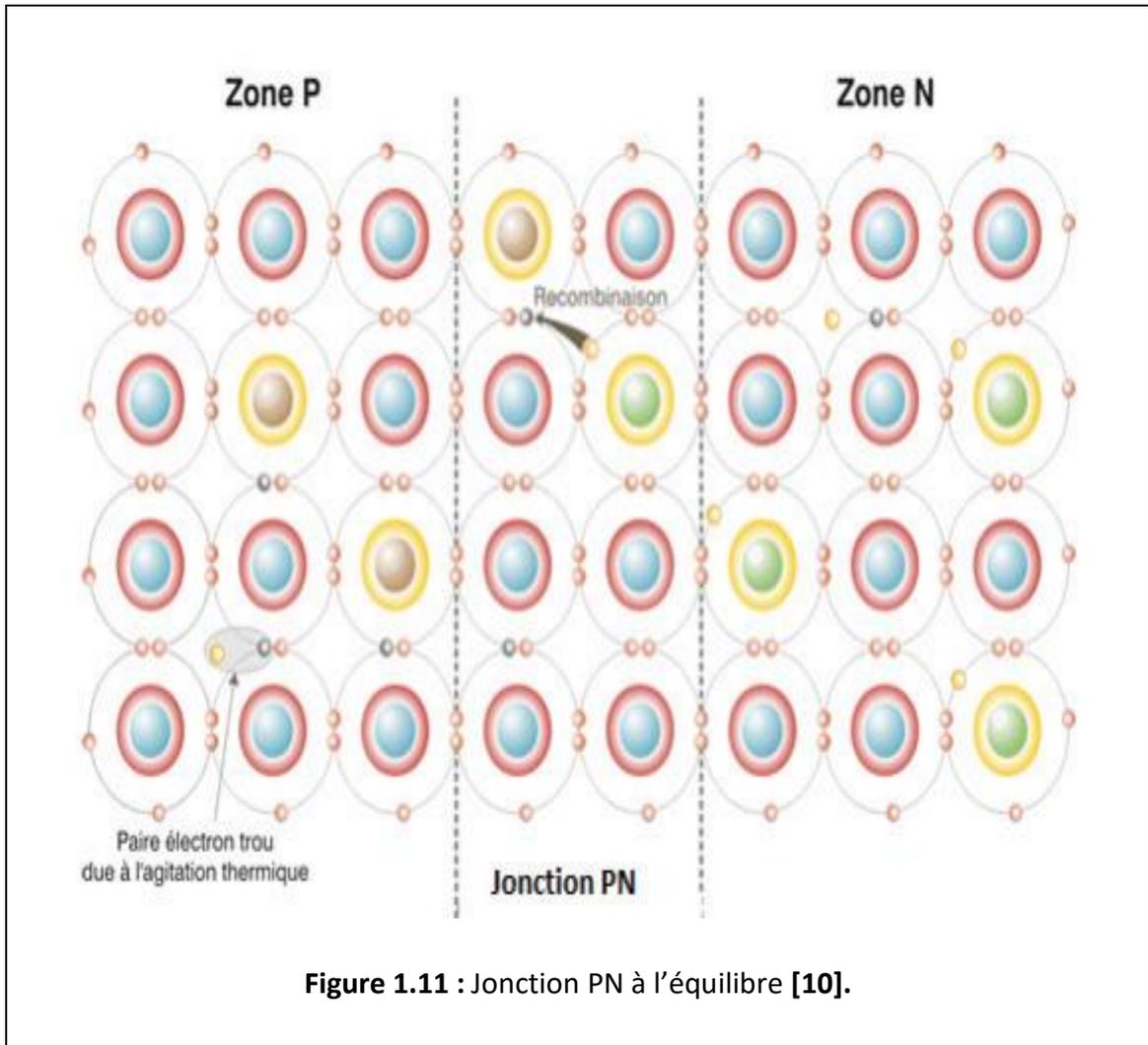


Figure 1.11 : Jonction PN à l'équilibre [10].

3.3.3 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

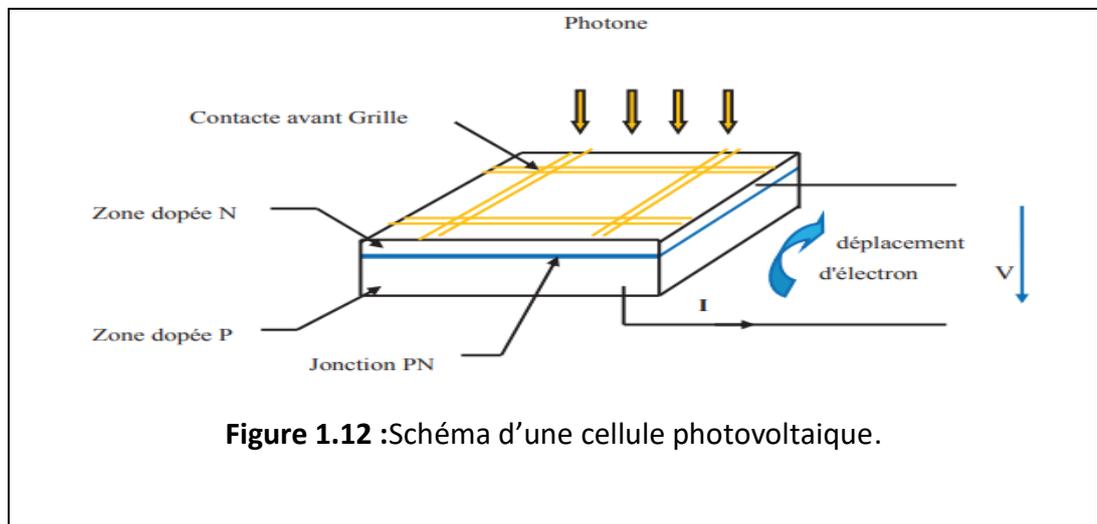


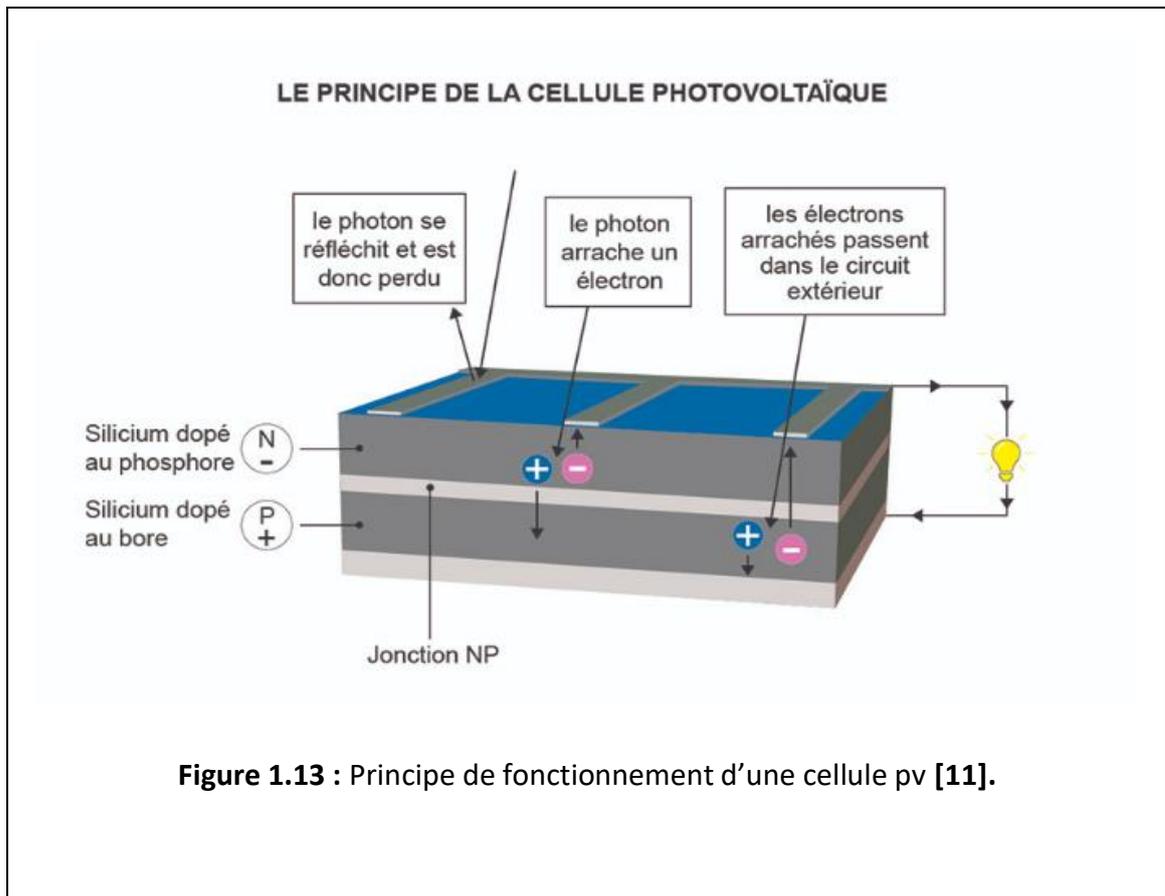
Figure 1.12 : Schéma d'une cellule photovoltaïque.

La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique repose sur l'effet photoélectrique, c'est-à-dire sur la capacité des photons à créer des porteurs de charge (électrons et trous) dans un matériau.

Elle est aussi fondée sur les propriétés de semi-conducteurs qui, percutés par les photons, mettent en mouvement un flux d'électrons. Les photons sont des particules élémentaires qui transportent l'énergie solaire à 300 000 km/s et qu'Albert Einstein appelait dans les années 1920 les « grains de lumière ». Lorsqu'ils frappent un élément semi-conducteur comme le silicium, ils arrachent des électrons à ses atomes. Ces électrons se mettent en mouvement, de façon désordonnée, à la recherche d'autres « trous » où se repositionner.

Mais pour qu'il y ait un courant électrique, il faut que ces mouvements d'électrons aillent tous dans le même sens. Pour les y aider, on va associer deux types de silicium. La face exposée au soleil est « dopée » avec des atomes de phosphore qui comportent plus d'électrons que le silicium, l'autre face est dopée avec des atomes de bore qui comportent moins d'électrons. Cette double face devient une sorte de pile : le côté très chargé en électrons devient la borne négative (N), le côté avec moins d'électrons devient la borne positive (P). Entre les deux il se crée un champ électrique.

Quand les photons viennent exciter les électrons, ceux-ci vont migrer vers la zone N grâce au champ électrique, tandis que les « trous » vont vers la zone P. Ils sont récupérés par des contacts électriques déposés à la surface des deux zones avant d'aller dans le circuit extérieur sous forme d'énergie électrique. Un courant continu se crée. Une couche antireflet permet d'éviter que trop de photons se perdent en étant réfléchis par la surface, comme illustré par la figure 1.13.



L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Les modules photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. La conversion photovoltaïque se produit dans des matériaux semi-conducteurs.

3.4 Technologies de cellule solaire :

Les cellules solaires peuvent être réparties en trois groupes, selon le matériau de base utilisé :

- Cellules monocristallines
- Cellules poly cristallines
- Cellules à couche minces

Le groupe des cellules à couche mince compte les amorphes au silicium et les cellules formées à partir d'autres matériaux, comme le tellure de cadmium (CdTe), le di séléniure de cuivre et d'indium (CIS) ou l'arséniure de gallium (GaAs). Dans la pratique, les cellules en silicium ont fini par s'imposer.

Cellules solaires monocristallines

Des blocs de silicium sont formés à partir de fonte de silicium ultrapure. Dans un **monocristal**, le réseau cristallin complet est agencé de manière uniforme. Le bloc de silicium est découpé en rondelles de 200 à 300 μm d'épaisseur, appelées galettes. Pour permettre un usage optimal de la surface du module solaire, les cellules rondes sont découpées en éléments carrés. D'habitude, les cellules présentent une longueur d'arête de 152 mm. La fabrication est conclue par le dopage, l'application des surfaces de contact et de la couche anti réflexion. Possédant un rendement variant entre 15 et 18 %, les cellules monocristallines fabriquées industriellement sont les cellules ayant actuellement le rendement le plus élevé. Cependant, leur fabrication requiert plus d'énergie et de temps que celle des cellules poly cristallines.

Cellules solaires poly cristallines

Le matériau de base est du silicium ultrapure qui est porté à fusion. Mais pour la fabrication de cellules solaires poly cristallines, on ne cultive pas de monocristaux, mais la fonte de silicium est refroidie de façon contrôlée dans un moule carré. Pendant le refroidissement, les cristaux s'orientent de manière irrégulière et forment la surface miroitante typique pour les cellules solaires poly cristallines. Les blocs de silicium carrés sont découpés en galettes de 200 à 300 μm d'épaisseur.

La fabrication est conclue par le dopage, l'application des surfaces de contact et de la couche anti réflexion. La couche anti réflexion offre à la cellule solaire sa surface bleue typique, car le bleu réfléchit le moins de lumière et en absorbe la plus grosse quantité. Les cellules solaires poly cristallines présentent un rendement entre 13 et 16 %.

Cellules solaires amorphes

Le terme amorphe vient du grec (a : sans, morphe : forme) et signifie qui n'a pas de forme. En physique, on appelle amorphes les éléments dont les atomes

présentent des formes irrégulières. Si les atomes ont une structure ordonnée, on les appelle des cristaux.

Pour la fabrication de cellules solaires amorphes, on applique le silicium sur un matériau support, comme par ex. le verre. L'épaisseur du silicium s'élève alors à env. 0,5 à 2 μm . Ainsi, non seulement la quantité de silicium requise est-elle assez faible, mais le découpage fastidieux des blocs de silicium n'est-il pas nécessaire. Le degré de rendement des cellules solaires amorphes se situe seulement à 6-8 %.

3.5 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

3.5.1 Schéma électrique équivalent :

La figure 1.14 présente le schéma équivalent dit **model à une diode** le plus cité dans la littérature, d'une cellule photovoltaïque sous éclairement. Il se compose :

- D'une source de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique
- Une résistance shunt (court-circuit) **Rsh** qui représente le comportement de la périphérie de la surface de la cellule
- Une résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexion
- Une diode en parallèle qui modélise la jonction PN.

Ce comportement en statique peut être décrit par l'équation électrique suivante :

$$I = I_{ph} - I_s \left\{ \exp \left[\frac{q(V + R_s I)}{A K T_j} - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right\} \quad (1)$$

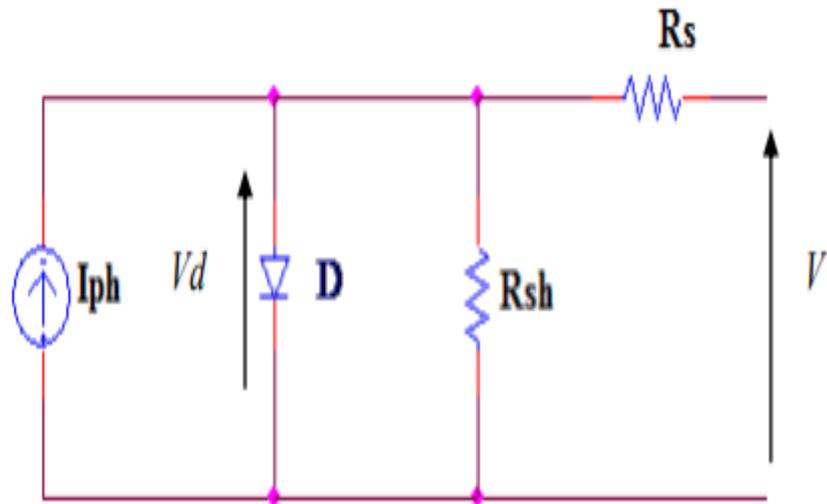
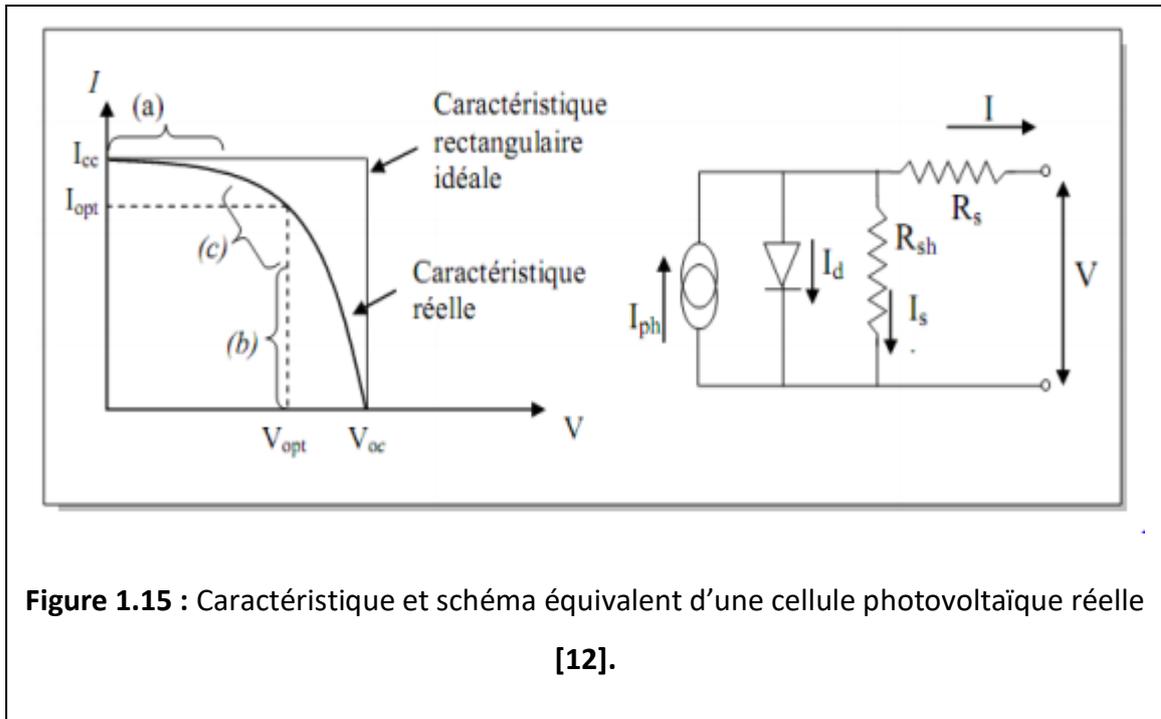


Figure 1.14 : Schéma équivalent électrique de la cellule PV.

3.5.2 Paramètres d'une cellule photovoltaïque :

Les principaux paramètres des cellules photovoltaïques sont :

a) La caractéristique I-V :



La caractéristique se divise en trois parties

- » **La zone (a)** où la cellule se comporte comme un générateur de courant I_{cc} proportionnel à l'éclairement,
- » **La zone (b)** où la cellule se comporte comme un générateur de tension V_{oc} ,
- » **La zone (c)** où l'impédance interne du générateur varie rapidement.

b) Tension à circuit ouvert, V_{oc} :

La 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.

$$V_{oc} = \frac{kt}{e} \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_s} + 1 \right) \quad (2)$$

c) Courant de court-circuit, I_{cc} :

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant V=0 dans le schéma équivalent). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la cellule éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

d) Point de fonctionnement optimum, (V_m, I_m) :

P_m c'est la puissance générée par le module PV :

$$P_m = V_m \times I_m \quad (3)$$

e) Facteur de forme, FF :

Le facteur de forme est le rapport entre la puissance optimale P_m et puissance maximale que peut avoir la cellule ; il est défini par la relation suivante :

$$ff = \frac{P_m}{V_{oc} \cdot I_{cc}} = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{oc} \cdot I_{cc}} \quad (4)$$

f) Rendement de conversion :

Le rendement η , des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente dans les conditions de mesures standards STC.

$$\eta = \frac{p_m}{p_{in}} = \frac{ff \cdot V_{OC} \cdot I_{cc}}{p_{in}} \quad (5)$$

P_{in} : Puissance incidente = P solaire = 1000 W/m²

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant-circuit et la tension à circuit ouvert

3.6 Le panneau solaire

Les **panneaux solaires** sont des groupements de cellules disposées en série, en parallèle ou en série parallèle. Leur taille peut atteindre en moyenne **1m70 de hauteur** sur **1m de largeur**.

3.6.1 Groupement de cellule

La puissance fournie par une seule cellule solaire étant très faible, plusieurs cellules dont les caractéristiques sont semblables doivent être électriquement associées et encapsulées dans un plastique pour former un GPV pratique. Dans ce qui suit, différents groupements possibles des cellules solaires sont présentés, ainsi que les précautions à prendre pour contourner quelques aléas.

- ✚ **Groupement en série** : Dans un groupement en série "Ns", les cellules sont traversées par le même courant et la tension générale de panneaux solaires est égale à la somme des tensions de chaque cellule.

Ce dernier Permet d'augmenter la tension de sortie. Pour un groupement de Ns cellules montées en série la tension de sortie U_s a pour expression générale :

$$U_s = N_s \cdot U_c$$

Avec U_c : tension fournie par une cellule

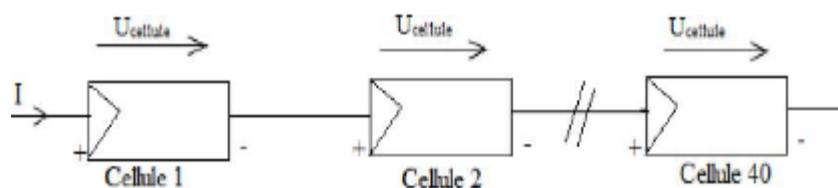


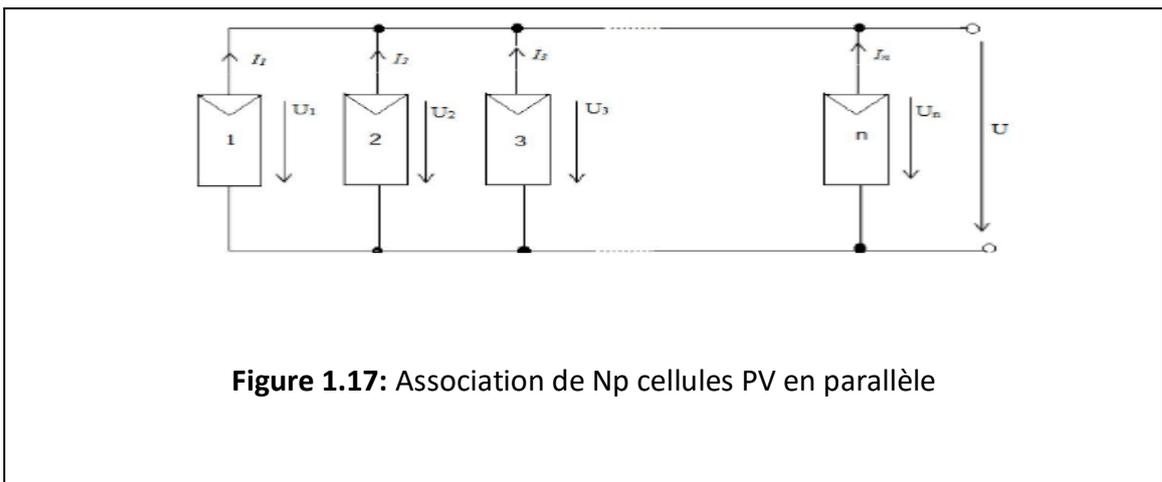
Figure 1.16: Association de N_s cellules PV en série [13].

- ✚ **Groupement en parallèle** : Dans ce groupement on associe plusieurs cellules en parallèle " N_p " le courant générale de panneaux solaires est égal à la somme des courants de chaque branche [6].

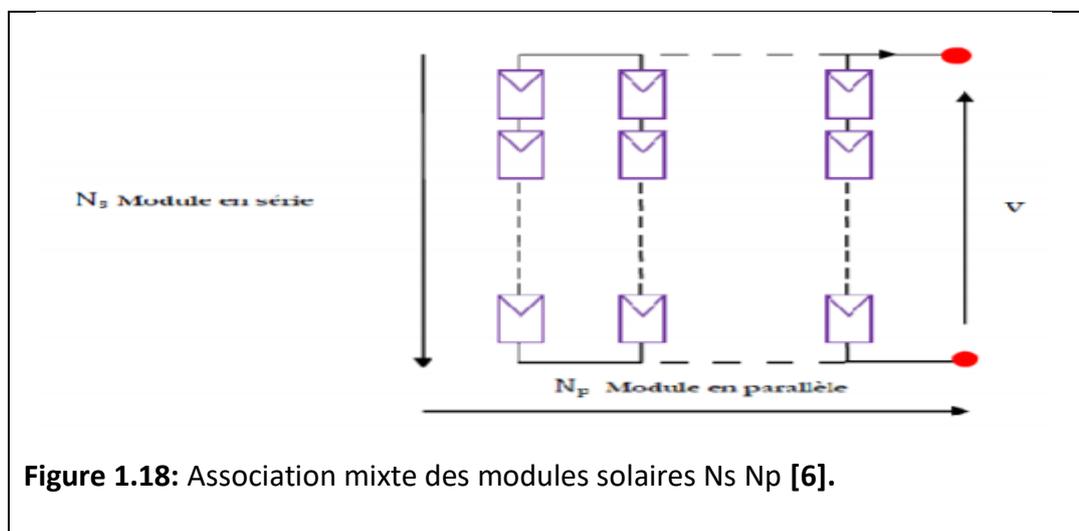
Ce dernier Permet d'augmenter le courant de sortie. Pour un groupement de n cellules montées en parallèle, le courant de sortie I_s a pour expression générale :

$$I_s = N_p \cdot I$$

Avec I : courant fourni par une cellule.



- ✚ **Groupement série-parallèle** : Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est à dire Série-Parallèle [13].



3.6.2 La puissance électrique d'un panneau solaire photovoltaïque :

Il faut savoir que l'on définit bien souvent un panneau solaire photovoltaïque par sa **puissance crête** (en watt-crête ou Wc). Cette donnée correspond à la puissance maximale que peut délivrer le panneau dans des conditions optimales d'ensoleillement.

La puissance des panneaux solaires photovoltaïques s'exprime en **Watt crête**, abrégée en Wc. Le nombre de cellules du panneau et leur qualité définit la puissance d'un panneau donné [13].

Il faut prendre en compte que la puissance crête annoncée correspond aux conditions standards de mesure STC :

- Une température ni trop froide, ni trop chaude de 25°.
- Un ensoleillement de 1000 watts par m².
- Une masse d'air AM 1.5.

Le **kWc** vous assure donc de connaître la **capacité maximale théorique d'un panneau solaire** et vous donne une idée de son rendement. Néanmoins, avec tous les éléments à prendre en compte dans une installation solaire, gardez bien à l'esprit que le kWc est une information approximative.

Plus les technologies s'améliorent, plus les panneaux deviennent puissants et efficaces.

3.6.3 Le rendement d'un panneau solaire photovoltaïque :

Le rendement d'un panneau solaire est le **rapport qui existe entre l'énergie qui arrive sur le panneau** et celle qui en ressort sous forme d'électricité. On parlera du rendement de l'installation pour le rapport entre l'énergie solaire arrivant sur les panneaux et la production d'électricité en courant alternatif en sortie de l'onduleur.

Avec un même panneau photovoltaïque, il est possible d'obtenir **des résultats de production électrique très différents**. En effet, il peut y avoir différentes pertes lors de la transformation de l'énergie solaire en électricité. Ainsi, le rendement d'une installation de panneaux solaires photovoltaïques prend en compte de nombreux éléments pour calculer la quantité d'énergie solaire qui sera bel et bien convertie en énergie électrique [14].

Ces paramètres sont notamment :

- **La technologie utilisée** pour la fabrication du panneau solaire : certaines technologies ont des rendements inférieurs à d'autres
- **La puissance du panneau** : c'est la puissance en watts-crête que nous avons évoquée plus haut
- **Les autres équipements de votre installation** : les onduleurs ou bien les câbles peuvent aussi induire certaines pertes énergétiques
- **La zone où est implanté le panneau photovoltaïque** : bien évidemment, la qualité et la quantité du rayonnement solaire vont conditionner la production d'électricité
- **L'inclinaison et l'orientation du panneau** : une orientation Sud avec une inclinaison à 30° est par exemple la meilleure installation possible. Les autres positions induisent des pertes plus ou moins importantes
- **Les potentielles ombres** : une ombre qui se porterait sur votre installation viendrait diminuer sa performance

Ainsi, il est nécessaire de prendre en compte **un grand nombre de données** afin de réaliser une bonne installation solaire photovoltaïque.

De mauvais choix peuvent vous amener à un projet très cher et peu rentable. Le concept de rendement est donc primordial si vous voulez **faire des économies d'énergie**.

3.7 Principe d'un générateur PV

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un GPV. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera [15].

3.7.1 Les différents montages du générateur PV :

Une installation photovoltaïque en site isolé :

Une installation photovoltaïque (PV) en site isolé est composée de quatre éléments principaux :

- le panneau solaire, dont le rôle est de délivrer l'énergie à la charge, ainsi qu'à la batterie ;
- la batterie, dont le rôle est de stocker l'énergie et de la restituer lorsque l'ensoleillement est insuffisant ;
- le régulateur, dont le rôle est de réguler la charge et la décharge de la batterie ;
- l'onduleur, dont le rôle est d'assurer la conversion continu-alternatif. Il permet d'alimenter les récepteurs en courant alternatif à partir du courant continu.

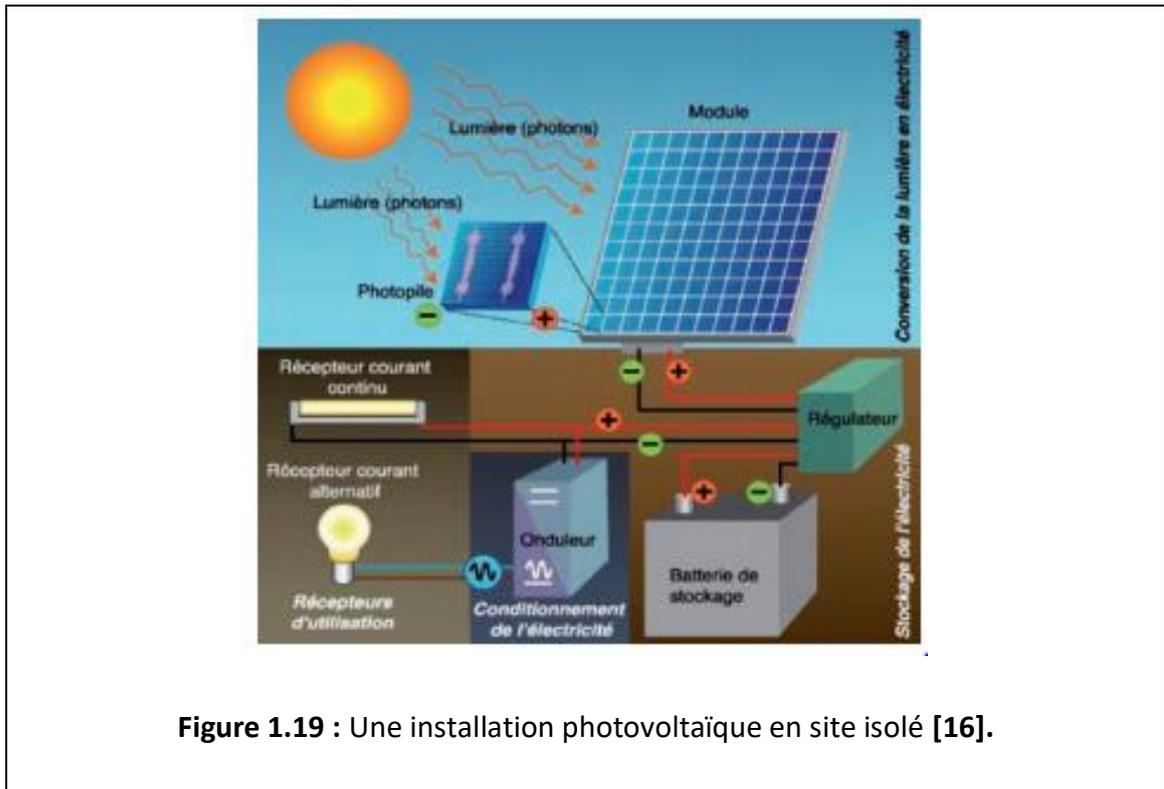


Figure 1.19 : Une installation photovoltaïque en site isolé [16].

Une installation photovoltaïque raccordée au réseau :

Une installation photovoltaïque raccordée au réseau est généralement composée d'un générateur photovoltaïque, d'un système de pose au sol ou sur toiture, d'un ou plusieurs onduleurs, d'un système de protection électrique, de câbles électriques et d'un compteur réseau. Parfois, l'installation est dotée d'un système de supervision local ou à distance. Dans le cas de l'autoconsommation, des batteries peuvent être ajoutées pour permettre le stockage de l'électricité. Ce type d'installation permet de produire de l'électricité qui sera envoyée directement sur le réseau électrique national avec les caractéristiques adéquates (fréquences, voltage, ...).

DD : Direction de distribution.

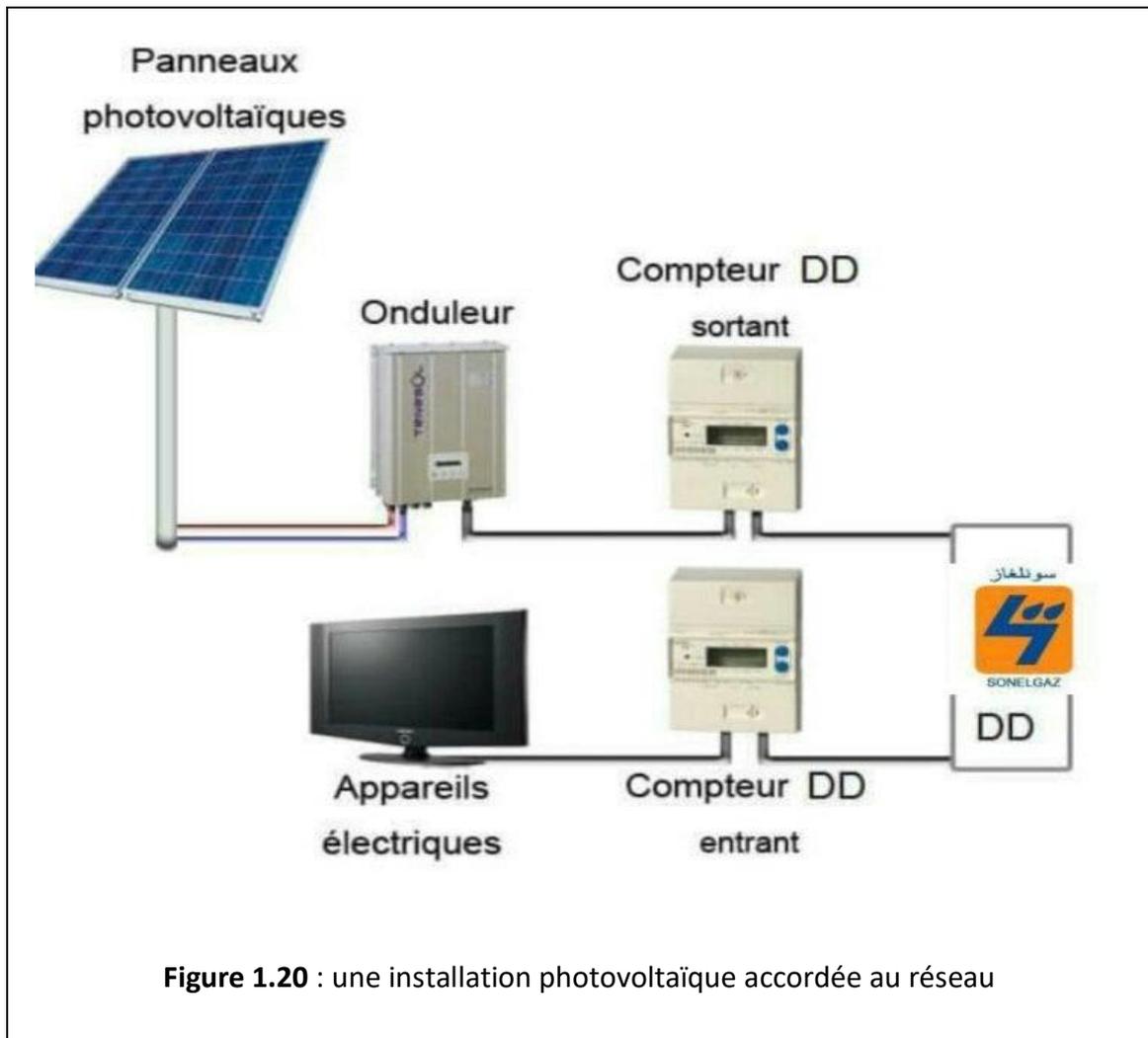


Figure 1.20 : une installation photovoltaïque accordée au réseau

3.7.2 Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque :

Les Avantages :

L'un des principaux **avantages de l'énergie solaire** reste qu'il s'agit là d'une énergie renouvelable et donc inépuisable. Le soleil ne risquant pas de s'éteindre avant cinq milliards d'années, vous avez largement le temps de profiter de ses rayons pour produire de l'électricité et de la chaleur pour votre habitation.

D'autant plus intéressant que, contrairement aux énergies fossiles, le solaire ne rejette pas de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère, n'émet pas de gaz à effet serre et ne contribue pas au réchauffement climatique. Une énergie propre, à l'impact

environnemental minime. De plus, les panneaux photovoltaïques sont majoritairement composés de matériaux recyclables.

- Des couts d'installation de moins au moins chère.
- Une énergie source d'économique.
- Impact environnemental minime.
- Autonomie énergétique.
- ils sont non polluants sans émissions ou odeurs discernables.
- ils peuvent être des systèmes autonomes qui fonctionnent sûrement, sans surveillance pendant de longues périodes.
- ils n'ont besoin d'aucun raccordement à une autre source d'énergie où à un approvisionnement en carburant.
- ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système.
- ils peuvent résister à des conditions atmosphériques pénibles comme la neige et la glace.
- ils ne consomment aucun combustible fossile et leur carburant est abondant et libre.
- une haute fiabilité car l'installation ne comporte pas de pièces mobiles, ce qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées, d'où son utilisation sur les engins spatiaux.
- le système modulaire de panneaux photovoltaïques permet un montage adaptable à des besoins énergétiques variés ; les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications allant du milliwatt au mégawatt.
- la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit est non polluant, silencieux, et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- les frais et les risques de transport des énergies fossiles sont éliminés.

Les Inconvénients :

- la fabrication des modules photovoltaïques relève de la haute technologie, ce qui rend le coût très élevé.
- le rendement réel d'un module photovoltaïque est de l'ordre de 10 à 15 %, - ils sont tributaires des conditions météorologiques.
- l'énergie issue du générateur photovoltaïque est continue et de faible voltage (< à 30 V) donc il doit être transformé par l'intermédiaire d'un onduleur.
- beaucoup d'appareils vendus sur le marché fonctionnent avec du 230 V alternatif.

4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des notions importantes sur l'énergie solaire ce qui concerne la trajectoire du soleil ainsi ces coordonnées, les matériaux semi-conducteurs et les différents groupements possibles des cellules. Ensuite nous avons abordé le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque au silicium ainsi que le générateur (GPV) et ses différents montages.

Le travail que nous avons présenté nous a beaucoup permis d'enrichir nos connaissances, et puis dans ce contexte nous allons présenter dans le chapitre qui suit la modélisation schématique d'un générateur PV ainsi d'une cellule à l'aide du logiciel de simulation MULTISIM en étudiant les Caractéristiques de la cellule MSX60 aussi l'influence de la température, éclairement, l'association des cellules sur les valeurs du R_s et R_{sh} résultantes.

Chapitre 2 MODELISATION SCHEMATIQUE D'UN GENERATEUR PV

2.1 Introduction

L'association de plusieurs cellules en série et/ou parallèle donnent lieu à un module photovoltaïque qui a une caractéristique courant-tension non linéaire présentant un point de puissance maximale. Les performances d'un module photovoltaïque sont fortement influencées par les conditions climatiques, particulièrement l'irradiation solaire et la température du module.

Pour développer un circuit équivalent précis de la cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique et électrique de ces éléments. Selon cette philosophie plusieurs modèles électriques dans la littérature ont été développés, dont le but est l'obtention d'une caractéristique $I(V)$ plus exacte et pratique. Ces modèles sont différents entre eux par la procédure et le nombre de paramètres pris en compte.

Nous avons opté pour le modèle à une diode pour simuler le fonctionnement du module photovoltaïque pour différentes conditions d'irradiation et de température. Le principal intérêt de ce modèle réside dans sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre à partir des caractéristiques techniques données par le constructeur.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats de simulation des caractéristiques $I(V)$, basée sur le modèle de la cellule à une diode décrit dans le chapitre précédent, du panneau photovoltaïque MSX 60 (Module silicium polycristallin) de SOLAREX. On utilise le logiciel MultiSim de National Instrument pour réaliser la simulation des caractéristiques dans les conditions standards (niveau d'éclairement $E=1000 \text{ W/m}^2$ et température ambiante $T=25^\circ\text{C}$) dans le cas de la cellule.

Par contre la simulation du panneau est étendue en plus aux températures 0 °C, 50 °C et 70 °C.

Les circuits utilisés pour effectuer la simulation des caractéristiques I(V) reposent sur 3 designs compacts tirés de la littérature de NI et d'un circuit similaire à la cellule idéale et avec perte développé localement sur MultiSim.

2.2 Présentation des moyens et ressources mis en œuvre

2.2.1 NI Multisim :

Le logiciel NI Multisim, est un outil puissant utilisé pour simuler et prototyper les conceptions de circuits électroniques d'un large éventail d'applications didactiques et professionnelles.

Le logiciel Multisim intègre la simulation SPICE aux normes de l'industrie avec un environnement schématiques interactif pour visualiser et analyser instantanément le comportement des circuits électroniques. Son interface intuitive aide les enseignants à renforcer la théorie des circuits et à améliorer la rétention de la théorie tout au long du programme d'ingénierie. En ajoutant de puissantes simulation et analyses de circuits au flux de conception, Multisim aide les chercheurs et les concepteurs à réduire les itérations des prototypes de cartes de circuit imprimés et réduire les coûts de développement.

Multisim possède une grande base de données de modèles de composants de puissance configurables ainsi que les modèles SPICE existants de divers fabricants de semi-conducteurs. Les capacités de simulation de Multisim permettent d'évaluer les différentes puissances à un stade précoce de la conception. Ceci est le premier d'une série de travaux sur les nouveaux modèles d'électronique de puissance spécialement développés pour les simulations d'applications d'énergie renouvelable dans NI Multisim. Les modèles ont été développés en collaboration avec le laboratoire d'instrumentation virtuelle et d'énergie renouvelable de l'Université de Brasov en Roumanie [18].



Figure 2.1 : NI Multisim 14.1.

2.2.2 Le Panneau solaire MSX 60 :

Le MSX 60 a été en 1998 parmi les puissants modules PV de la série Méga module de Solarex au Silicium polycristallin, délivrant plus de 3 A de courant à la puissance de crête. Ce panneau peut être utilisé en module unique ou déployé dans des champs multi-modules, câblés en combinaison série/parallèle selon les besoins [19].

Le MSX 60 est conçu sous "IntegraSystem", Concept d'intégration du système, qui garantit une compatibilité avec d'autres sous systèmes solaires et composants [20].

Le tableau 2.1 contient les caractéristiques électriques typiques du panneau fournies par le constructeur et trouvées dans la littérature de recherche [21], [22].

Tableau 2.1 Caractéristiques Typiques électriques du panneau MSX 60

Désignations		Valeurs
Puissance maximale	(Pmax)	60 W
Tension @ Pmax	(Vmp)	17.1 V
Courant @ Pmax	(Imp)	3.5 A
Pmax minimale garantie		58 W
Courant de court-circuit	(Isc)	3.8 A
Tension de circuit ouvert	(Voc)	21.1 V
Coefficient de T° de la tension à circuit ouvert	(kv)	-(80±10 mV)/°C

Coefficient de T° du courant en court-circuit	(ki)	(0.065±0.015)%/°C
Coefficient de T° de puissance		-(0.5±0.05)%/°C
NOCT		47 ± 1 °C
Courant de saturation	(I ₀)	0.1866 μA
Facteur d'idéalité de la diode	(n)	1.358
Résistance série	(R _s)	0.22 Ω
Résistance parallèle	(R _{sh})	358.569 Ω
Surface utile du panneau	(Area)	5083.44 cm ²

2.2.3 La Cellule idéale :

Son modèle compact est réalisé comme le spécifie son programme SPICE, sous forme de sous-circuit donné dans la figure 2.2, a, par une source de courant I_{ph} en parallèle avec une diode. Ce modèle est dit à trois paramètres : Le photo-courant (I_{ph}), la densité du courant de saturation (I₀) et la surface (A).

Pour réaliser un circuit similaire à ce modèle compact on a repris les mêmes valeurs des paramètres utilisés en faisant intervenir un convertisseur tension courant pour modéliser le flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule et fixer son courant I_{sc} = I₀ en supposant que la surface normalisée d'une cellule est A = 1, Figure 2.2, b

- **Programme SPICE du modèle compact idéal :**

```

SPICE Netlist Viewer
[Icons]
** Testing the Solar Cell Modules_1 **
*
* NI Multisim to SPICE Netlist Export
* Generated by: Crash
* Tue, Jun 16, 2020 17:10:30
*
*** Multisim Component U1 ***
xU1 0 2 1 CELL_1__SOLAR__5

*** Multisim Component Vbias ***
vVbias 2 0 dc 1 ac 0 0
+      distof1 0 0
+      distof2 0 0

*** Multisim Component Virrad ***
vVirrad 1 0 dc 1000 ac 0 0
+      distof1 0 0
+      distof2 0 0

.subckt CELL_1__SOLAR__5  n0 n1 n2 params: Area=1, I0=1e-11, Isc=0.034
girrad n0 n1 value={({Isc/1000}*v(n2))*Area}
dl n1 n0 diode
.model diode d(is={I0*Area})
.ends cell_1

```

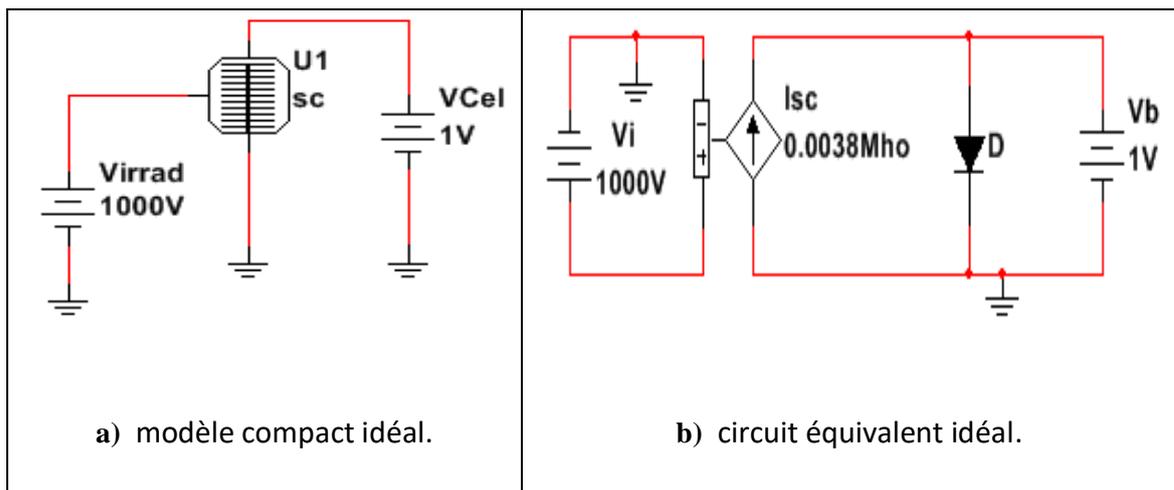


Figure 2.2 : Cellule photovoltaïque idéale.

2.2.4 La Cellule à deux résistances :

Son modèle compact est réalisé comme le spécifie son programme SPICE, sous forme de sous-circuit donné dans la figure 2.3, a, par une source de courant I_{ph} en parallèle avec une diode. Pour tenir compte de phénomènes supplémentaires au niveau de la cellule, le modèle contient une résistance série R_s et une résistance Shunt (R_{sh}).

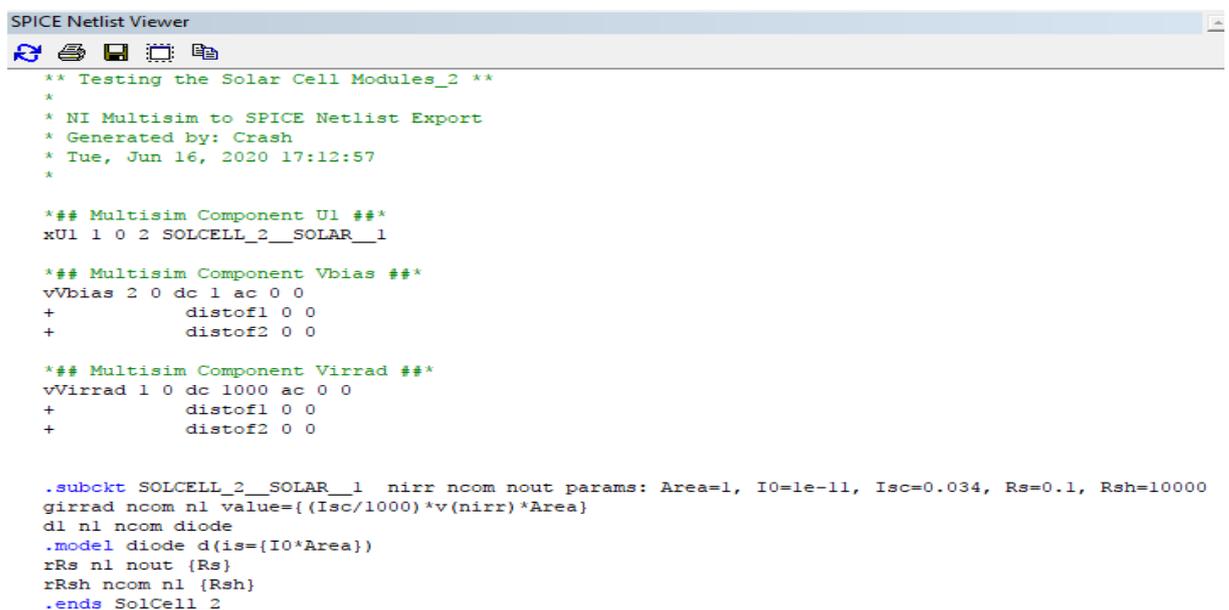
La résistance série : représente la résistance interne de la cellule, elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.

La résistance shunt : est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

Ce modèle est dit à cinq paramètres : Le photo-courant (I_{ph}), le courant de saturation (I_0), la surface (A), la résistance série (R_s) et la résistance shunt (R_{sh}).

Si on néglige l'effet de la résistance shunt R_{sh} , en le considérant nul, on retrouve le modèle à quatre paramètres qui est très utilisé. Si en plus, on néglige la résistance série, on retrouvera alors le modèle à 3 paramètres déjà étudié. Le choix de ces simplifications se fait en fonction des besoins de l'étude, mais Le modèle à cinq paramètres offre un bon compromis entre simplicité et précision.

- Programmes SPICE du modèle compact à deux résistances :



```
SPICE Netlist Viewer
** Testing the Solar Cell Modules_2 **
*
* NI Multisim to SPICE Netlist Export
* Generated by: Crash
* Tue, Jun 16, 2020 17:12:57
*
*** Multisim Component U1 ***
xU1 1 0 2 SOLCELL_2__SOLAR__1

*** Multisim Component Vbias ***
vVbias 2 0 dc 1 ac 0 0
+      distof1 0 0
+      distof2 0 0

*** Multisim Component Virrad ***
vVirrad 1 0 dc 1000 ac 0 0
+      distof1 0 0
+      distof2 0 0

.subckt SOLCELL_2__SOLAR__1 nirr ncom nout params: Area=1, I0=1e-11, Isc=0.034, Rs=0.1, Rsh=10000
girrad ncom n1 value={(Isc/1000)*v(nirr)*Area}
d1 n1 ncom diode
.model diode d(is={I0*Area})
rRs n1 nout {Rs}
rRsh ncom n1 {Rsh}
.ends SolCell_2
```

Pour réaliser un circuit similaire au modèle compact à deux résistances on a ajouté au circuit de la figure 2.2, b une résistance en parallèle R_{sh} et en série R_s comme indiqué dans la Figure 2.3, b

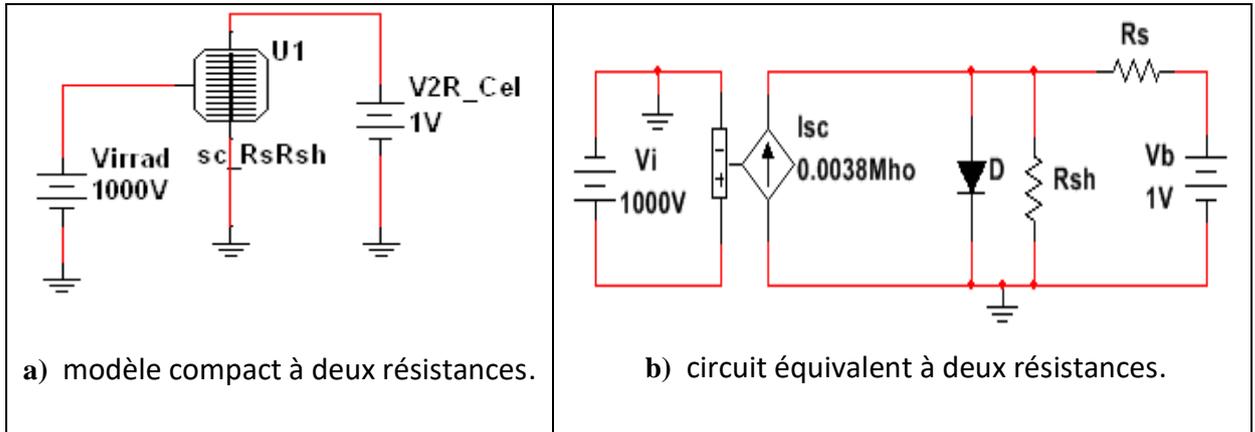


Figure 2.3 : Cellule photovoltaïque à deux résistances (série et shunt).

2.2.5 Le Panneau Photovoltaïque :

- Programmes SPICE du modèle compact du Panneau :

```

SPICE Netlist Viewer
*
* NI Multisim to SPICE Netlist Export
* Generated by: Crash
* Tue, Jun 16, 2020 17:12:57
*
*** Multisim Component U1 ***
xU1 1 0 2 PV_I_G_SOLAR_1 params: isc=3.87,voc=42.1, kv=-0.16, ki=-0.0251550, rs=0.47, rsh=1365,nd=1.397, ns=72

*** Multisim Component Vbias ***
vVbias 2 0 dc 1 ac 0 0
+      distof1 0 0
+      distof2 0 0

*** Multisim Component Virrad ***
vVirrad 1 0 dc 1000 ac 0 0
+      distof1 0 0
+      distof2 0 0

.subckt PV_I_G_SOLAR_1 nirr ncom nout params: Isc=3.87,Voc=42, kv=-0.16, ki=-0.5, Rs=0.47, Rsh=1365,nd=1.397, ns=72
.param t=TEMP
.param tref=25
.func Vt(te)=nd*8.617314e-5*(te+273.15)
.func VocI(te)=Voc+kv*(te-tref)
.func IscI(te)=Isc*(1+(ki/100)*(te-tref))
.func IOI(te)=(IscI(te)-(VocI(te)-IscI(te)*Rs)/Rsh)*exp(-VocI(te)/(ns*Vt(te)))
.func IphI(te)=IOI(te)*exp(VocI(te)/(ns*Vt(te)))+VocI(te)/Rsh
.func IscG(ir,te)=IscI(te)*ir
.func IphG(ir,te)=IphI(te)*ir

girrad ncom n1 value={IphG(v(nirr)/1000,t)}
d1 n1 ncom diode
.model diode d(is={IOI(t)}, n=(ns*nd), vj={0.65}, eg={1.1})
rRs n1 nout {Rs}
rRsh ncom n1 {Rsh}
.ends PV_I_G

```

Le logiciel Multisim utilise le modèle électrique à une seule diode. Il considère le Panneau photovoltaïque comme un sous circuit composé d'une diode (D), d'une résistance série (Rs), une résistance parallèle (Rsh) et d'un générateur de courant continue (girrad) commandé par une tension d'entrée externe Virrad (qui représente l'irradiation solaire H en W/m^2).

```
girrad ncom nl value={IphG(v(nirr)/1000,t)}
dl nl ncom diode
.model diode d(is={IOT(t)}, n={ns*nd}, vj={0.65}, eg={1.1} )
rRs nl nout {Rs}
rRsh ncom nl {Rsh}
.ends PV_T_G
```

Le courant I_{ph} du générateur (girrad) est calculé par l'équation

$$I_{ph} = (I_{sc}(T)e^{\frac{V_{oc}(T)}{N_s \cdot V_t(T)}} - \frac{V_{oc}(T) - R_s \cdot I_{sc}(T)}{R_{sh}} + \frac{V_{oc}(T)}{R_{sh}}) \cdot H \quad (6)$$

Avec N_s le nombre de cellules raccordées en série, I_{sc} le courant de court-circuit, V_{oc} la tension de circuit-ouvert et V_t la tension thermique. Ces trois derniers paramètres (I_{sc} , V_{oc} et V_t) sont variables avec la température T selon les équations :

$$I_{sc}(T) = I_{sc_{ref}} \cdot (1 + k_i(T - T_{ref})) \quad (7)$$

$$V_{oc}(T) = V_{oc_{ref}} + k_v(T - T_{ref}) \quad (8)$$

$$V_t(T) = n \cdot k \cdot T \quad (9)$$

Avec $I_{sc_{ref}}$, $V_{oc_{ref}}$ les valeurs de I_{sc} , V_{oc} pour les conditions standards de mesure ($E_{ref}=1000W/m^2$ et $T_{ref}=25^\circ C$), k_i et k_v sont les coefficients de variation de ces deux paramètres avec la température, n est le facteur d'idéalité ($1 < n < 2$) et k la constante de Boltzmann.

NB : L'équation (6) est programmée en trois étapes : (H représente l'éclairement)

$$I_{ph}(H, T) = I_{ph}(T) \cdot H \quad (10)$$

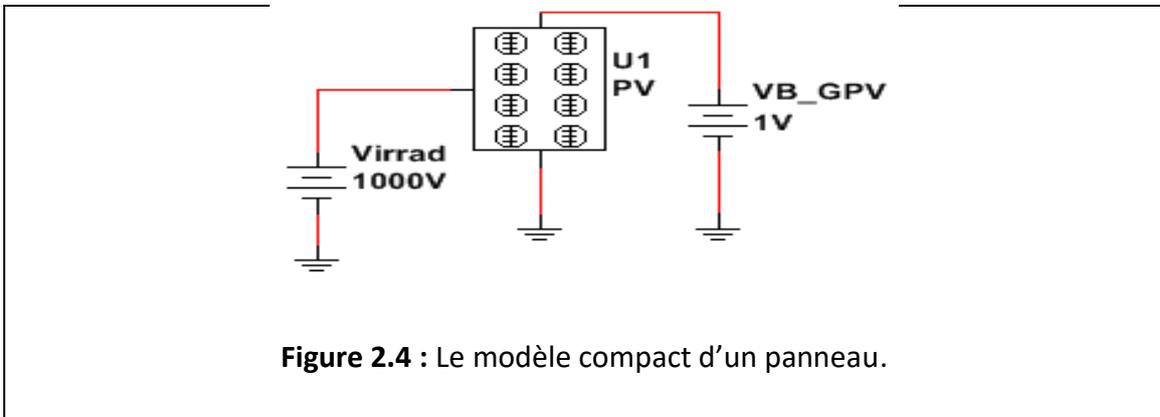
$$I_{ph}(T) = I_0(T) \cdot e^{\frac{V_{oc}(T)}{N_s \cdot V_t(T)}} + \frac{V_{oc}(T)}{R_{sh}} \quad (11)$$

$$I_0(T) = I_{sc}(T) - \frac{V_{oc}(T) - R_s \cdot I_{sc}(T)}{R_{sh}} \cdot e^{-\frac{V_{oc}(T)}{N_s \cdot V_t(T)}} \quad (12)$$

```

.subckt PV_T_G_SOLAR_1__1  nirr ncom nout params: Isc=3.87,Voc=42, kv=-0.16, ki=-0.5, Rs=0.47, Rsh=1365,nd=1.397, ns=72
.param t=TEMP
.param tref=25
.func Vt(te)=nd*8.617314e-5*(te+273.15)
.func VocI(te)=Voc+kv*(te-tref)
.func IscI(te)=Isc*(1+(ki/100)*(te-tref))
.func I0I(te)=(IscI(te)-(VocI(te)-IscI(te)*Rs)/Rsh)*exp(-VocI(te)/(ns*Vt(te)))
.func IphI(te)=I0I(te)*exp(VocI(te)/(ns*Vt(te)))+VocI(te)/Rsh
.func IscG(ir,te)=IscI(te)*ir
.func IphG(ir,te)=IphI(te)*ir

```



2.2.6 Création et enregistrement du Subcircuit dans la base de données de Multisim :

Après avoir réalisé et testé les modèles électriques on envisage de les sauvegarder comme composant enregistré sur MULTISIM. Pour cela on peut utiliser un Subcircuit, ce qui signifie qu'on peut remplacer le modèle conçu par un composant compact et le placer dans la base des composants sur MULTISIM.

a) Cas du modèle compact téléchargé :

On utilise pour sauvegarder le subcircuit déjà prêt les deux fenêtres Figure 2.5 et 2.6 qui apparaissent après avoir cliqué sur le subcircuit et choisi " save component to DB"

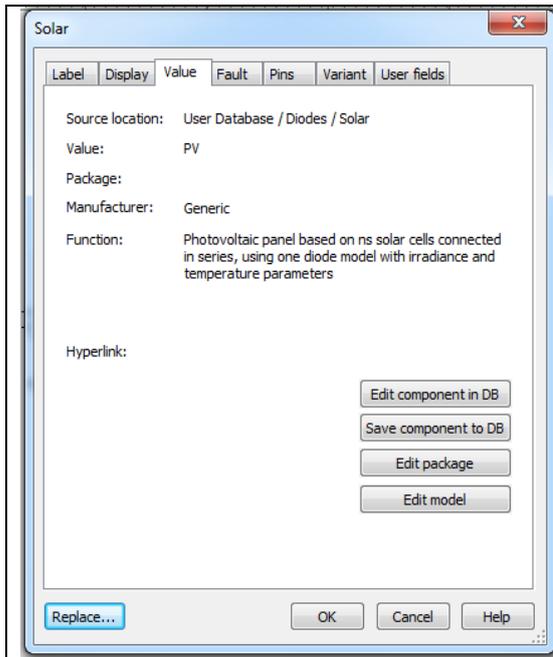


Figure 2.5 : Sauvegarde dans DB.

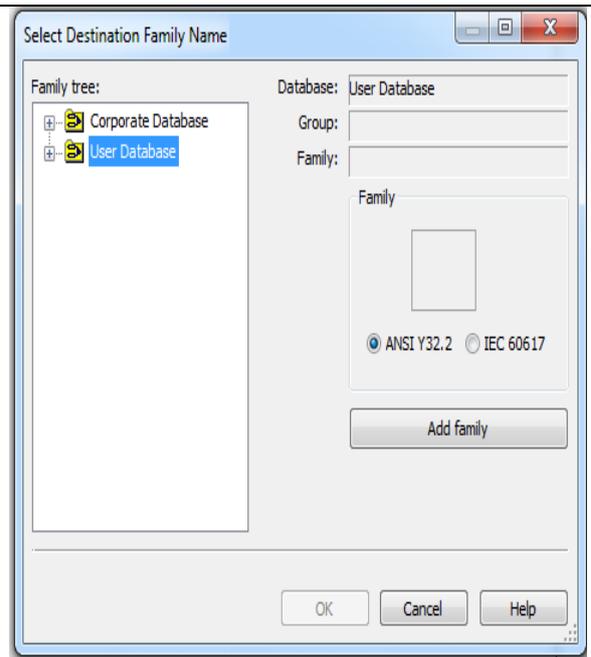


Figure 2.6 : Enregistrement dans DB.

b) Cas du modèle réalisé sur Multisim :

Les étapes suivantes montrent comment réaliser cette opération :

En 1er lieu on sélectionne tout le modèle concerné avec un clic droit figure 2.7 et après ouverture de la fenêtre de dialogue figure 2.8, on choisit « Replace by subcircuit ». Il faut ensuite donner un nom à ce nouveau composant dans la sous fenêtre qui apparaît figure 2.9, juste après une nouvelle fenêtre apparaît avec le modèle compact à symboliser figure 2.21.

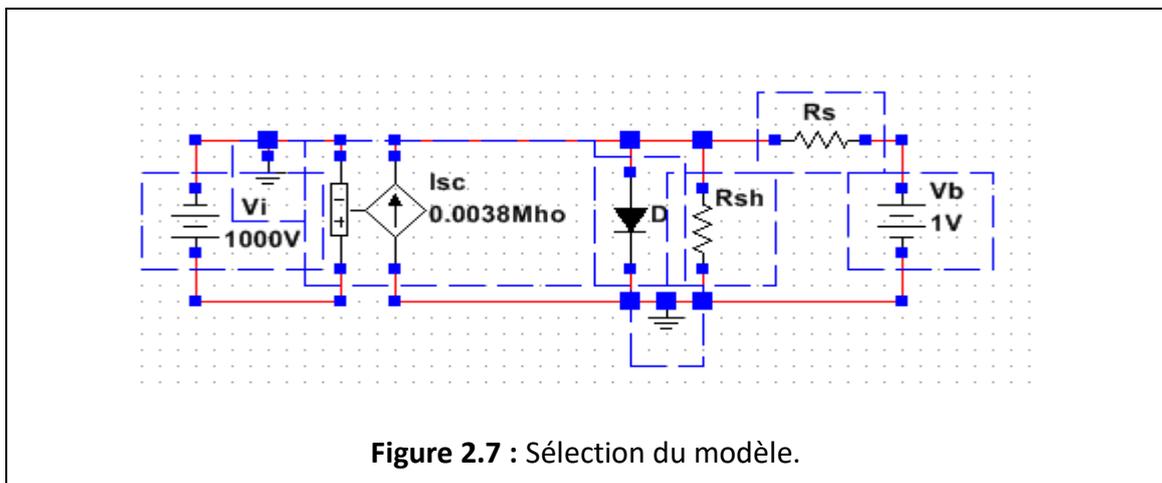


Figure 2.7 : Sélection du modèle.

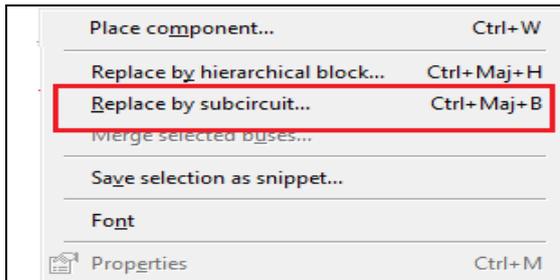


Figure 2.8 : Sélection d'outil Subcircuit.

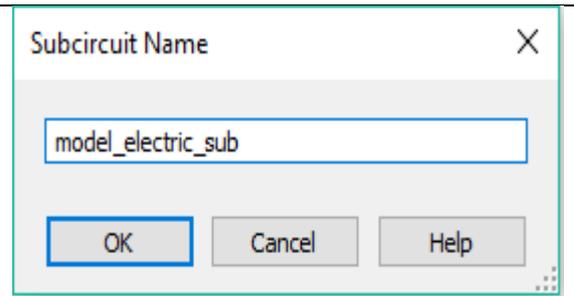


Figure 2.9 : Nom du nouveau modèle compact.

Pour revenir au modèle principal il suffit d'un double clic sur le modèle et choisir "open subsheet » figure 2.11.

Pour consulter les paramètres de configuration il suffit d'un double clic sur le modèle compact et choisir " Advanced RefDes configuration " figure 2.12.

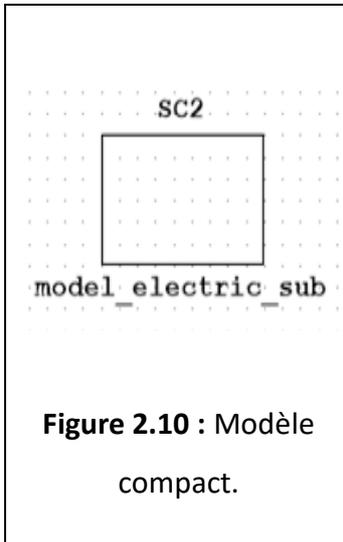


Figure 2.10 : Modèle compact.

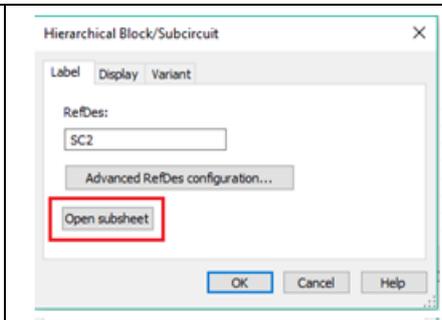


Figure 2.11 : Retour au modèle principal.

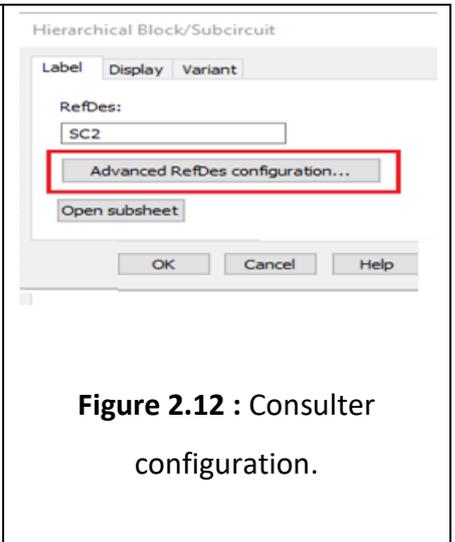


Figure 2.12 : Consulter configuration.

2.3 Caractérisations de la cellule MSX 60 :

2.3.1 La cellule MSX 60 idéale :

Pour modéliser cette cellule, on utilise les modèles présentés par les figures 2.2, a et 2.2, b, pour les caractéristiques électriques données dans le tableau 2.2 suivant :

Tableau 2.2 Caractéristiques électriques sous les conditions standards de la cellule idéale

Courant de saturation ajusté	$110 \cdot 10^{-11}$ A
Courant de court-circuit ($I_s c$)	3.8 A
Surface de la cellule	141.2 cm ²
Eclairement standard	E=1000 W/m ²
Température standard	T=25 °C

a) Configuration des paramètres de simulation :

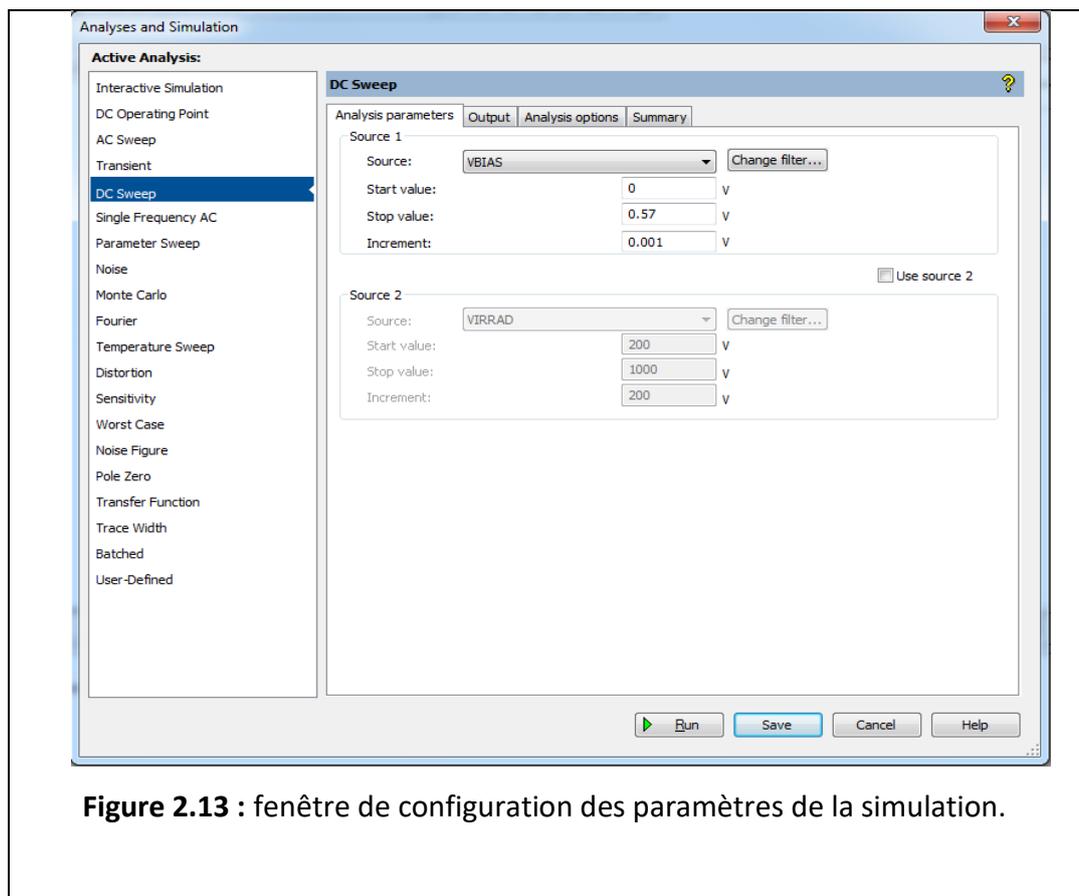


Figure 2.13 : fenêtre de configuration des paramètres de la simulation.

Pour fixer les paramètres de simulation de la cellule il faut ouvrir la fenêtre de configuration "*analyses and simulation*", choisir l'option « DC SWEEP" et spécifier l'intervalle de variation de la tension de la charge " V_{BIAS} " par ses valeurs initiales, finales et le pas d'incrément. Il faut ensuite passer sur la sous fenêtre "*output*" pour désigner les sorties à calculer qui sont dans le cas étudié le courant $I(V_{BIAS})$ et la

puissance $P(V_{BIAS})$ de la charge. Les courbes obtenues de la simulation de la caractéristique courant-tension $I(V)$ et puissance-tension $P(V)$ de la cellule photovoltaïque dans les conditions standards ($T=25^\circ C$, $E=1000 W/m^2$) sont représentés dans la figure (2.14).

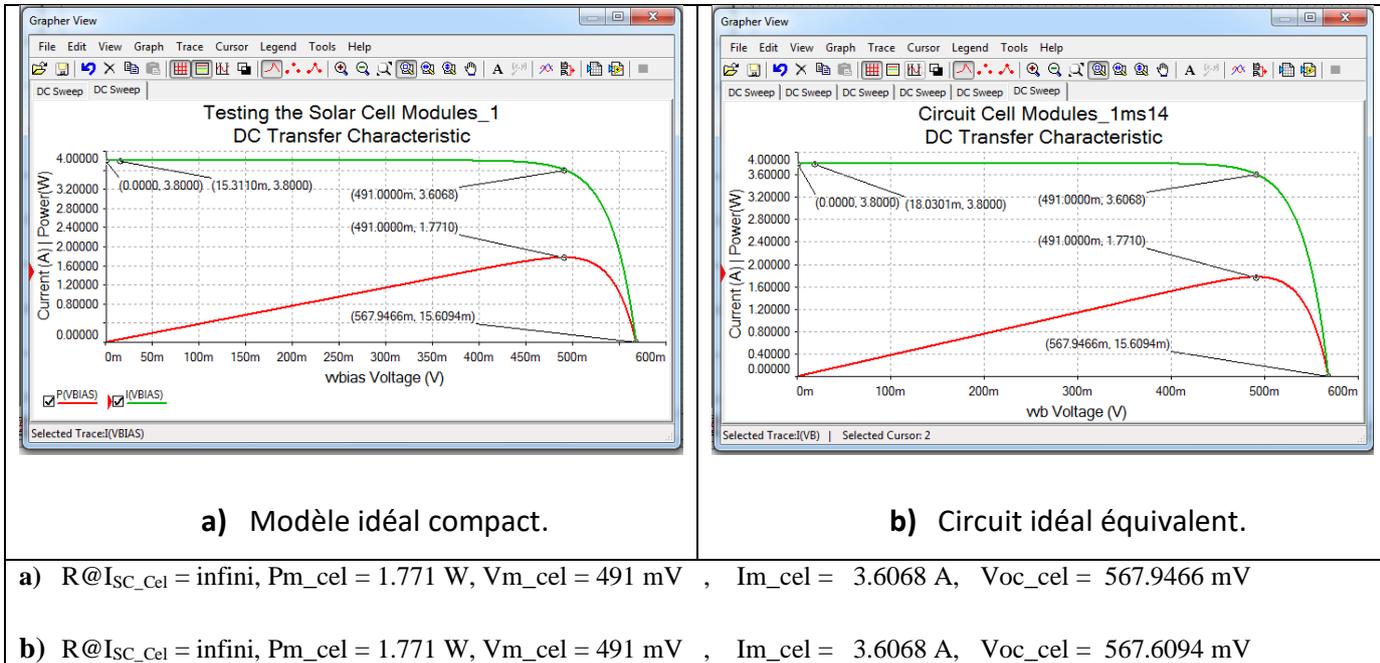


Figure 2.14 : Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ de la cellule MSX 60 idéale.

b) Interprétation des caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$:

On observe que la caractéristique $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque est identique à celle d'une jonction P-N

- Bloquée de 0 à V_{cond} , mais décalée le long de l'axe du courant d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement ($I_{ph} = I_{sc}$)
- Conductrice de V_{cond} jusqu'à la tension V_{OC}

Pour expliquer cette allure on considère l'équation du courant de sortie donnée dans le chapitre 1 : $I(V_{BIAS}) = I_{SC} - I_D$,

Où $I_D = I_s(\exp(eV_B/n.kT) - 1)$ est le courant direct de la diode

- Pour $0 < V_{BIAS} < V_{cond}$ la diode est bloquée et $I(V_{BIAS}) = I_{sc}$ car $I_D = 0$
- Pour $V_{cond} \leq V_{BIAS} < V_{OC}$, la diode conduit et $I(V_{BIAS}) = (I_{sc} - I_D)$ varie de I_{sc} jusqu'à 0 lorsque le courant dans la diode augmente de 0 jusqu'à I_{sc} .

Comme l'augmentation de $I_D(V_{BIAS}) = I_0 (\exp(eV_B/n.kT) - 1)$ est égale à la diminution de $I(V_{BIAS})$ de I_{sc} à 0, l'allure de $I(V_{BIAS})$ est analogue de V_{cond} à V_{oc} à celle de la caractéristique inversée d'une jonction PN.

La caractéristique puissance–tension de la cellule solaire dans les conditions de $E=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$, augmente jusqu'à atteindre la valeur optimale (P_{max}), ensuite elle décroît pour s'annuler à V_{oc} . Cette valeur de puissance maximale est l'un des paramètres clés dans l'utilisation des panneaux PV.

L'inverse de la valeur de la pente à I_{sc} , qui est utilisée pour déduire la résistance R_{sh} de la cellule ou du panneau, vérifie bien que $R_{sh} = R@I_{SC_cel} = \text{infini}$.

2.3.2 La cellule MSX 60 à deux résistances :

Pour modéliser cette cellule, on utilise les modèles présentés par les figures 2.3, a et 2.3, b, pour les caractéristiques électriques données dans le tableau 2.3 suivant :

Tableau 2.3 Caractéristiques électriques sous les conditions standards de la cellule à 2R.

Courant de saturation ajusté	$110. 10^{-11} \text{ A}$
Courant de court-circuit (I_{sc})	3.8 A
Surface de la cellule	141.2 cm^2
Résistance série R_s	0.006Ω
Résistance shunt R_{sh}	10Ω
Eclairement standard	$E=1000 \text{ W/m}^2$
Température standard	$T=25^\circ\text{C}$

En adoptant les mêmes paramètres de configuration précédents, les courbes obtenues de la simulation des caractéristiques courant–tension $I(V)$ et puissance–tension $P(V)$ de la cellule MSX 60 à deux résistances dans les conditions standards ($T=25^\circ\text{C}$, $E=1000 \text{ W/m}^2$), sont représentés dans la figure (2.15).

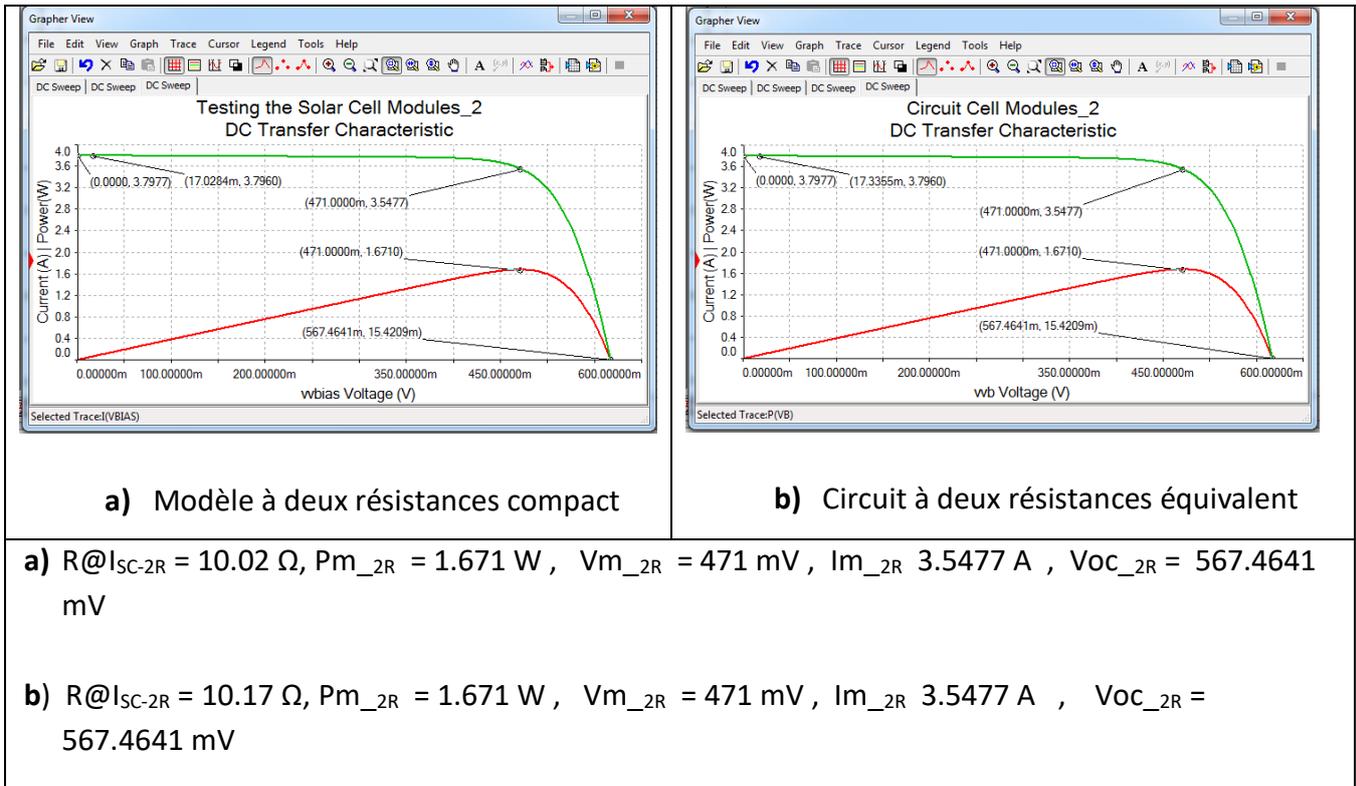


Figure 2.15 : Caractéristiques I(V) et P(V) de la cellule MSX 60 à résistances série et shunt.

L'introduction des deux résistances R_s et R_{sh} ont eu pour effets sur les caractéristiques idéales de :

- De diminuer la puissance maximale P_{max} fournie à la charge
- De reculer le point de puissance maximale à cause des pertes du courant dues à R_{sh}

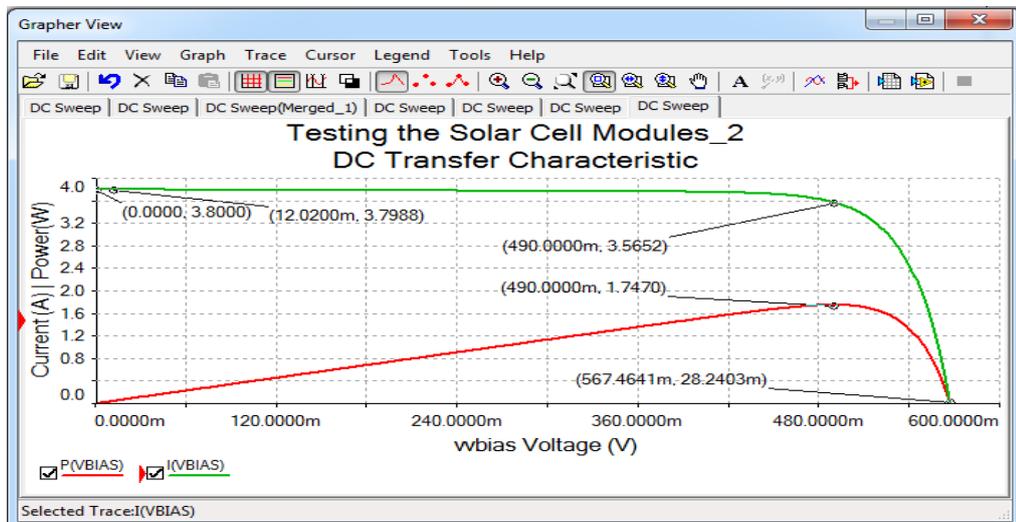
Les effets de la résistance R_s sur l'allure des courbes caractéristiques n'est pas remarquable à cause de sa valeur très faible par rapport à R_{sh} .

2.3.3 La cellule MSX 60 à une résistance R_{sh} :

Pour modéliser cette cellule, on utilise l'un des modèles présentés par les figures 2.3, a et 2.3, b, pour les caractéristiques électriques données dans le tableau 2.4. Les paramètres extraits des courbes I(V) et P(V), figure 2.16 seront utiles pour déduire la valeur de R_s par une méthode simple faisant intervenir le bilan d'énergie au point de puissance maximale P_{max} , comme indiqué dans le paragraphe suivant.

Tableau 2.4 Caractéristiques électriques sous les conditions standards de la cellule à Rsh.

Courant de saturation ajusté	$110 \cdot 10^{-11}$ A
Courant de court-circuit (I_{sc})	3.8 A
Surface de la cellule	141.2 cm ²
Résistance série R_s	0
Résistance shunt R_{sh}	10 Ω
Eclairement standard	$E=1000$ W/m ²
Température standard	$T=25$ °C



$R@I_{sc}-R_{sh} = 10.02 \Omega$, $P_{m_cel,Rsh} = 1.7470$ W, $V_{m_Rsh} = 490$ mV, $I_{m_Rsh} = 3.5652$ A, $V_{oc_Rsh} = 567.4641$ mV

Figure 2.16 : Caractéristiques I(V) et P(V) de la cellule MSX 60 à résistance shunt.

2.3.4 Extraction de la valeur de R_s :

On démontre théoriquement qu'il est possible d'extraire à partir du bilan d'énergie au point de puissance maximale exprimé par les équations (1) ou (2) la résistance R_s , connaissant R_{sh} en utilisant l'une des méthodes exposées en a) ou b).

$$P_{m,cel} = P_{m,2R} + P_{m,Rsh} + P_{m,Rs} \quad (13)$$

$$P_{m,cel,Rsh} = P_{m,2R} + P_{m,Rs} \quad (14)$$

a) Méthode basée sur le bilan d'énergie au point $P_{m,cel}$ de la cellule idéale

On obtient en développant l'équation (1)

$$P_{m_cel} = P_{m,2R} + (V_{m,2R} - R_s \cdot I_{m,2R})^2 / R_{sh} + R_s (I_{m,2R})^2 \quad (3)$$

$$P_{m_cel} - P_{m,2R} - (V_{m,2R})^2 / R_{sh} = ((I_{m,2R})^2 / R_{sh}) \cdot R_s^2 + 2 \cdot ((I_{m,2R})^2 / 2) - P_{m,2R} / R_{sh} \cdot R_s \quad (4)$$

Si on pose :

$$a = ((I_{m,2R})^2 / R_{sh}) > 0$$

$$c = P_{m_cel} - P_{m,2R} - (V_{m,2R})^2 / R_{sh} > 0$$

$$b = ((I_{m,2R})^2 / 2) - P_{m,2R} / R_{sh} > 0$$

L'équation (4) devient: $aR_s^2 + 2bR_s - c = 0$ avec $\Delta = (b^2 + ac) > b^2$

$$\text{On tire:} \quad R_s = ((-b + (b^2 + ac)^{1/2}) / a) = b \cdot ((1 + ac/b^2)^{1/2} - 1) / a$$

$$\text{Si } ac/b^2 < 0.1 \text{ alors } R_s \approx c/2b$$

$$\text{Calcul : } a = 1.2425 \text{ (SI)} \quad b = 6.128 \text{ (SI)} \quad c = 0.0781 \text{ (SI)} \quad ac/b^2 = 2.58 \cdot 10^{-3} \text{ (SI)}$$

$$R_s \approx c/2b = 6.37 \text{ m}\Omega$$

b) Méthode basée sur le bilan d'énergie au point $P_{m, cel, Rsh}$ de la cellule à $R_s = 0$

On obtient en développant l'équation (2)

$$P_{m, cel, Rsh} - P_{m, 2R} = P_{m, Rs} = R_s I_{m, 2R}^2$$

$$\text{Soit } R_s = (1.7470 - 1.6771) / 3.5477^2 = 5.55 \text{ m}\Omega$$

Le deuxième résultat est plus simple à extraire dans le cas du panneau où il n'est pas possible de rendre R_{sh} infinie. Par contre les valeurs bien qu'approchées des deux résultats de la valeur fixée $6 \text{ m}\Omega$, constitueront une bonne estimation initiale dans le cas de l'utilisation d'une approche par "essai et erreur" pour améliorer la recherche de R_{sh} et R_s à partir des données du constructeur.

2.4 Caractérisations du panneau MSX 60 aux conditions Standards :

On se propose de caractériser le panneau MSX 60 tiré à partir des caractéristiques typiques électriques du tableau 2.1 en utilisant le modèle représenté par la figure 2.4 et le panneau MSX 60 à une seule résistance déduite à partir du même modèle en posant $R_s = 0$.

Les caractéristiques électriques sous les conditions standards des deux panneaux sont rassemblées dans le tableau 2.5 et leurs courbes représentatives avec l'extraction des différents paramètres sont données par les figures 2.18 et 2.19.

Tableau 2.5 Caractéristiques électriques sous conditions standards du panneau MSX 60.

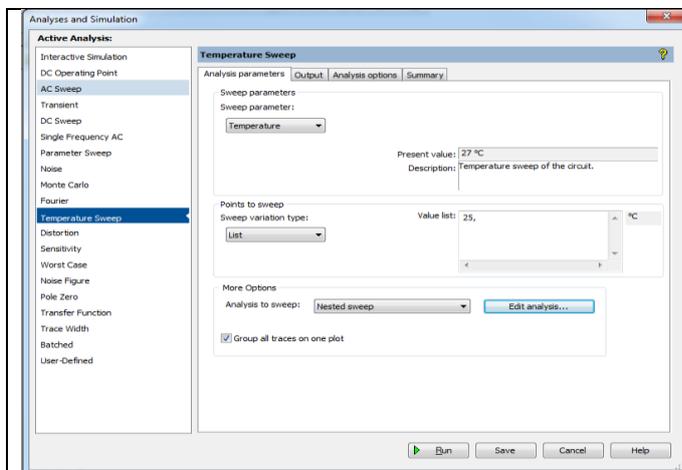
Caractéristiques	MSX 60	MSX 60_Rsh
Courant de court-circuit (Isc)	3.8 A	3.8 A
Tension de circuit ouvert (Voc)	21.1 V	21.1 V
Coefficient de T° de la tension à circuit ouvert (kv)	$-(80 \pm 10 \text{ mV})/^\circ\text{C}$	$-(80 \pm 10 \text{ mV})/^\circ\text{C}$
Coefficient de T° du courant en court-circuit (ki)	$(0.065 \pm 0.015)\%/^\circ\text{C}$	$(0.065 \pm 0.015)\%/^\circ\text{C}$
Coefficient de T° de puissance	$-(0.5 \pm 0.05)\%/^\circ\text{C}$	$-(0.5 \pm 0.05)\%/^\circ\text{C}$
NOCT	$47 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$	$47 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$
Courant de saturation (I0)	$110 \cdot 10^{-11} \text{ A}$	$110 \cdot 10^{-11} \text{ A}$
Eclairement standard (E)	1000 W/m^2	1000 W/m^2
Température standard (T)	$25 \text{ }^\circ\text{C}$	$25 \text{ }^\circ\text{C}$

Résistance série (Rs)	0.216 Ω	0
Résistance parallèle (Rsh)	360 Ω	360 Ω
Facteur d'idéalité de la diode (n)	1.358	1.358
Nombre de cellule en série (Ns)	36	36
Nombre de cellule en parallèle (Nd)	1.358	1.358

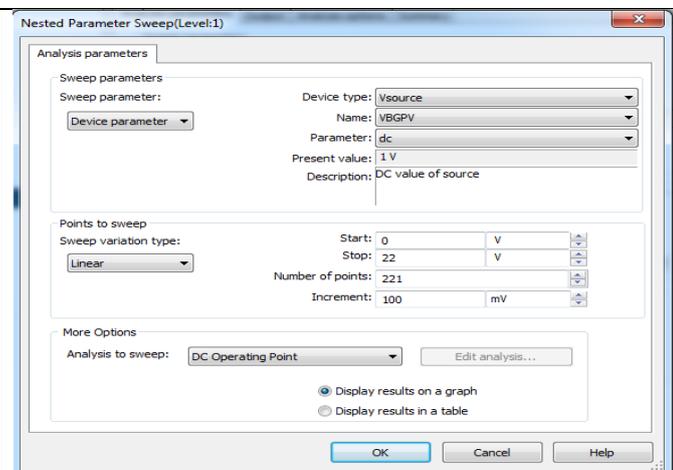
a) Configuration des paramètres de simulation :

Pour fixer les paramètres de simulation des deux panneaux on utilise deux fenêtres en cascade

- Une première fenêtre "Temperature Sweep" pour fixer la liste des températures choisies de caractérisation figures 2.17, a et 2.17, b
- Une deuxième fenêtre en cascade "Nested Parameter Sweep" pour fixer les variations de la tension (V) représentant l'axe des X, ainsi que les valeurs de sortie Y obtenues en fonction de X, (I(V) et P(V)).



a) Fenêtre "Temperature Sweep"



b) Fenêtre « Nested Parameter Sweep »

Figure 2.17 : Fenêtres en cascade de configuration de la simulation du MSX 60

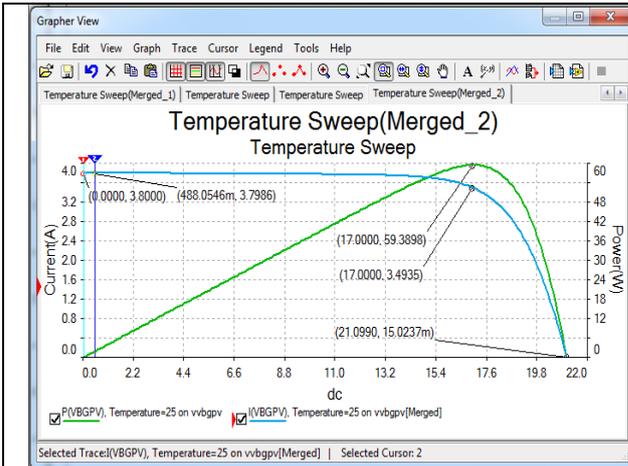


Figure 2.18 : I(V) & P(V) du MSX 60

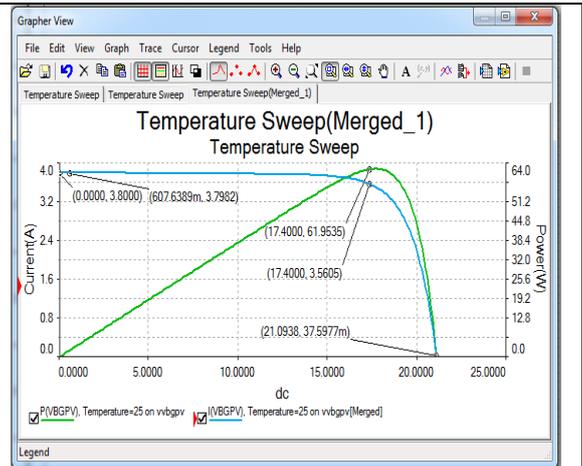


Figure 2.19 : I(V) & P(V) du MSX 60_Rsh

- Paramètres MSX 60

$R@I_{sc_gpv} = 348.61 \Omega$, $P_{m_gpv} = 59.3898 W$, $V_{m_gpv} = 17.00 V$, $I_{m_gpv} = 3.4935 A$
 $V_{oc_gpv} = 21.0990V$

- Paramètres MSX 60_Rsh

$R@I_{sc,gpv_Rsh} = 337.58 \Omega$ $P_{m,gpv_Rsh} = 61.9535 W$, $V_{m,gpv_Rsh} = 17.4 V$, $I_{m,gpv_Rsh} = 3.5605 A$ $V_{oc,gpv_Rsh} = 21.0938 V$

b) Calcul de Rs :

En utilisant la Méthode basée sur le bilan d'énergie au point $P_{m,gpv,Rsh}$ de MSX 60 à R_{sh} seule ou à $R_s = 0$, on déduit la valeur de la résistance série par :

$$R_s = (61.9535 - 59.3898)/3.4935^2 = 0.21 \Omega$$

$$R_{sh} = (348.61 + 337.58)/2 = 343.1 \Omega$$

2.5 Caractérisations du panneau MSX 60 aux températures 0, 25, 50 et 75 °C :

On se propose d'étendre la caractérisation du panneau MSX 60 à deux résistances R_{sh} et R_s et à une seule résistance R_{sh} effectuée dans les conditions standards, aux températures 0, 50, et 75 °C sous éclairage standard $E = 1000 \text{ W/m}^2$.

2.5.1 Courbes I (V, T) du panneau MSX 60 aux températures 0, 25, 50 et 75 °C :

a) Configuration des paramètres de simulation :

Pour fixer les paramètres de simulation du panneau on fixe dans la liste des températures choisies de la figure 2.17, a les valeurs (0,25,50,75) et on garde la même configuration utilisée dans la fenêtre de la figure 2.17, b. Les courbes représentatives I (V, T) ainsi définies sont rassemblées dans la figure 2.20 suivante.

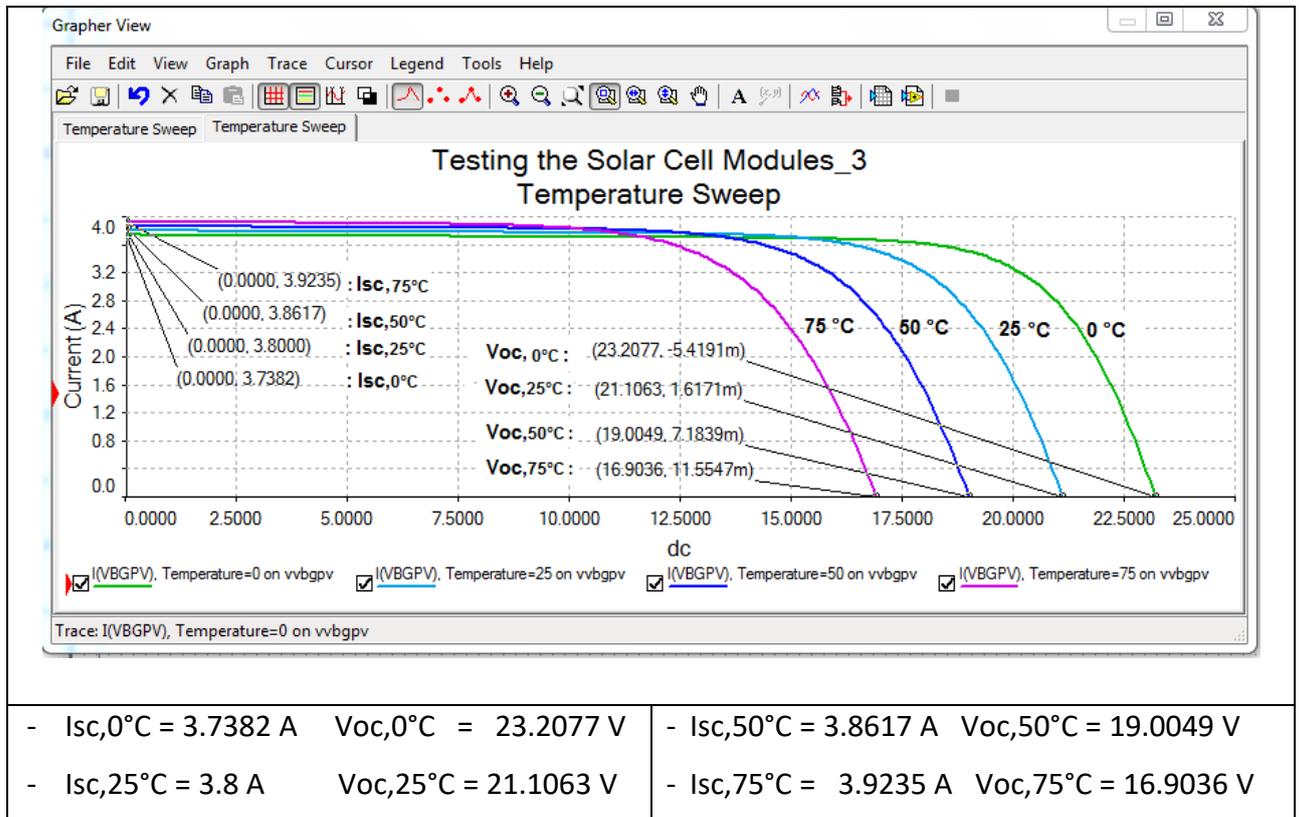


Figure 2.20 : Caractéristiques I (V, T) du panneau MSX 60 pour différentes températures

b) Interprétation des résultats :

On remarque que la température a une influence non négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte. Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue environ de 0,5% par chaque degré d'augmentation de la température de la cellule au-dessus de 25 °C, d'après les tableaux 2.1 et 2.5.

2.5.2 Extraction des paramètres du panneau MSX 60 aux températures 0, 50 et 75 °C :

On adopte pour chaque température choisie la même démarche effectuée pour extraire les différents paramètres du panneau MSX 60 dans le cas des conditions standards à 25 °C.

a) Caractérisation du panneau MSX 60 à 0 °C :

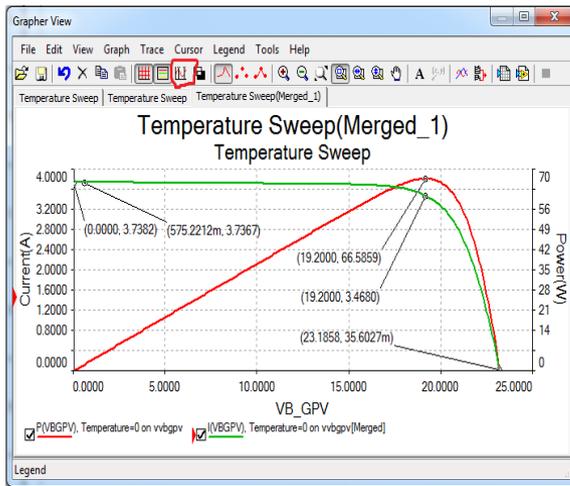


Figure 2.21 : I(V) & P(V) du MSX 60.

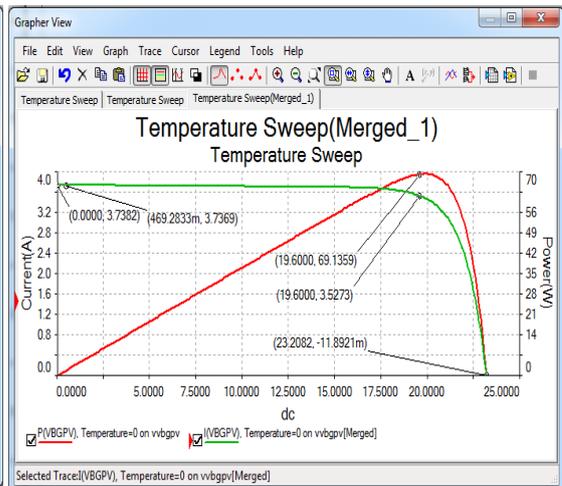


Figure 2.22 : I(V) & P(V) du MSX 60_ Rsh.

- Paramètres MSX 60 à 0°C :

$R@I_{sc_msx\ 60} = 383.48\ \Omega,$

$P_{m_msx\ 60} = 66.5859\ W,$

$V_{m_msx\ 60} =$

19.20 V,

$I_{m_msx\ 60} = 3.4680\ A$, $V_{oc_msx\ 60} = 23.1858\ V$

- Paramètres MSX 60_Rsh à 0°C

$R@I_{sc_msx\ 60_Rsh} = 360.99\ \Omega$, $P_{m_msx\ 60_Rsh} = 69.1359\ W$, $V_{m_msx\ 60_Rsh} = 19.60\ V$,

$I_{m_msx\ 60_Rsh} = 3.5273\ A$ $V_{oc_msx\ 60_Rsh} = 23.2082\ V$

- Extraction de Rsh et Rs :

$R_{sh} = (383.48 + 361)/2 = 372.24\ \Omega$ $R_s = (69.1359 - 66.5859)/3.4680^2 = 0.212\ \Omega$

b) Caractérisation du panneau MSX 60 à 50 °C :

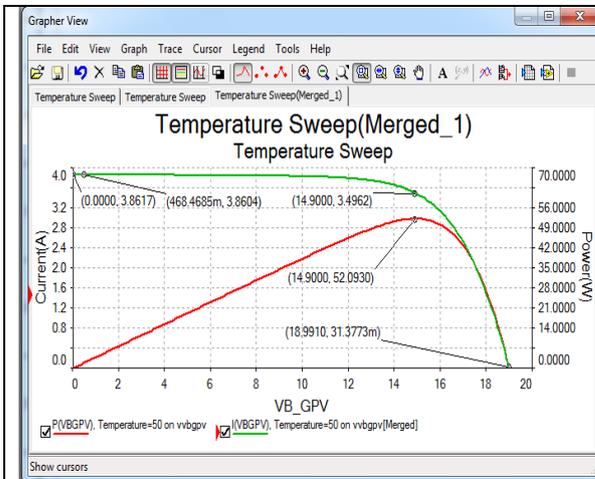


Figure 2.23 : I(V) & P(V) du MSX 60 à 50 °C.

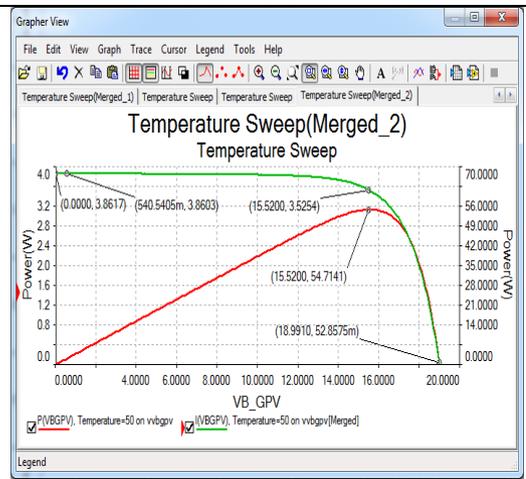


Figure 2.24 : I(V) & P(V) du MSX 60_Rsh à 50 °C.

- Paramètres MSX 60 à 50°C : $R@I_{sc_msx\ 60} = 360.36\ \Omega$, $P_{m_msx\ 60} = 52.0930\ W$, $V_{m_msx\ 60} = 14.9\ V$, $I_{m_msx\ 60} = 3.4962\ A$, $V_{oc_msx\ 60} = 18.991\ V$

- Paramètres MSX 60_Rsh à 50°C :

$R@I_{sc_msx\ 60_Rsh} = 386.1\ \Omega$, $P_{m_msx\ 60_Rsh} = 54.7141\ W$, $V_{m_msx\ 60_Rsh} = 15.52\ V$, $I_{m_msx\ 60_Rsh} = 3.5254\ A$, $V_{oc_msx\ 60_Rsh} = 18.9910\ V$

- **Extraction de Rsh et Rs**

$$R_{sh} = (360.36 + 386.1)/2 = \mathbf{373.23 \Omega}$$

$$\mathbf{0.214 \Omega}$$

$$R_s = (54.7141 - 52.0930)/3.4962^2 =$$

c) Caractérisation du panneau MSX 60 à 75 °C :

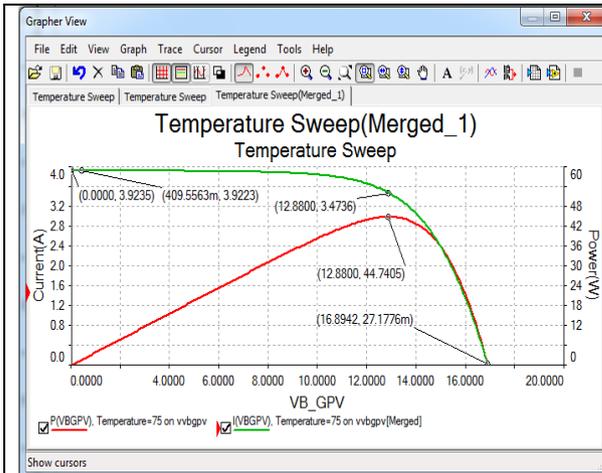


Figure 2.25 : I(V) & P(V) du MSX 60 à 75 °C.

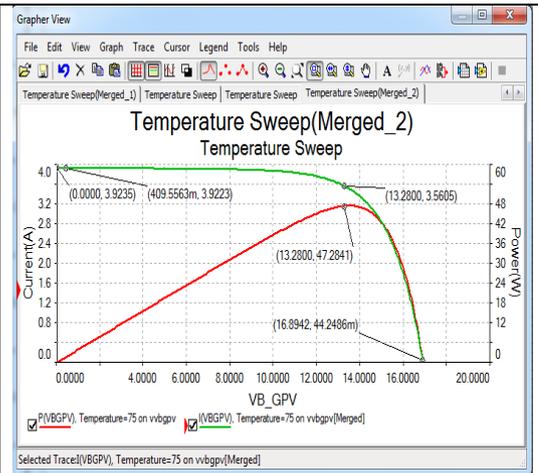


Figure 2.26 : I(V) & P(V) du MSX 60_ Rsh à 75 °C.

- **Paramètres MSX 60 à 75 °C :** $R@I_{sc_msx\ 60} = 341.3 \Omega$, $P_{m_msx\ 60} = 44.7405\ W$, $V_{m_msx\ 60} = 12.88\ V$, $I_{m_msx\ 60} = 3.4736\ A$, $V_{oc_msx\ 60} = 16.8942\ V$

- **Paramètres MSX 60_ Rsh à 75 °C :** $R@I_{sc_msx\ 60_Rsh} = 341.3 \Omega$, $P_{m_msx\ 60_Rsh} = 47.2841\ W$, $V_{m_msx\ 60_Rsh} = 13.28\ V$, $I_{m_msx\ 60_Rsh} = 3.5605\ A$, $V_{oc_msx\ 60_Rsh} = 16.8942\ V$

- **Extraction de Rsh et Rs :**

$$R_{sh} = \mathbf{341.3 \Omega}$$

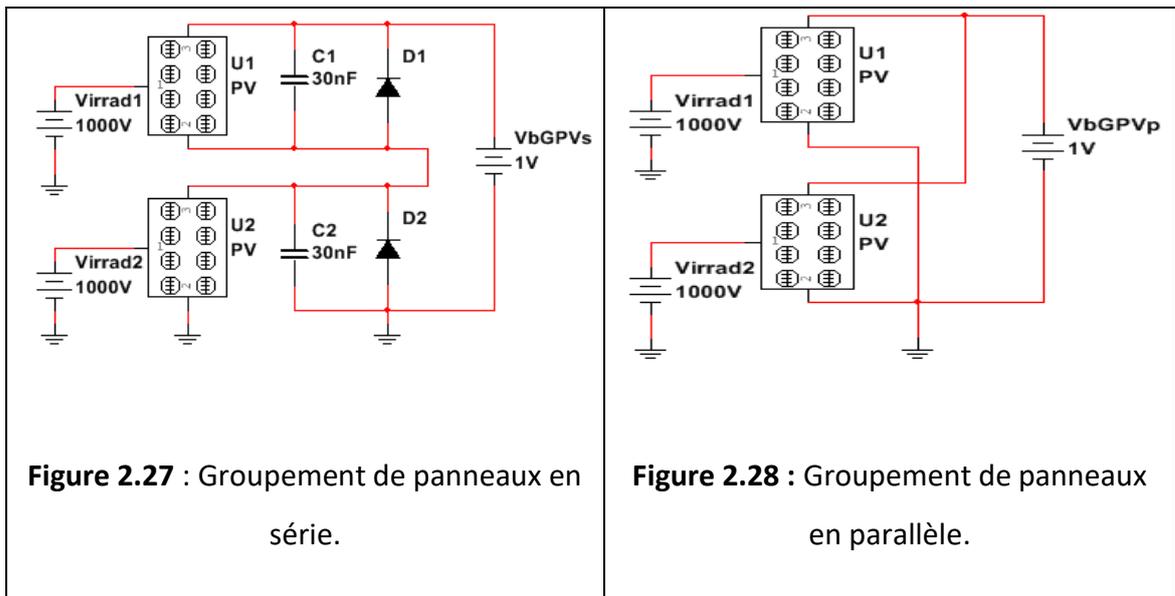
$$R_s = (47.2841 - 44.7405)/3.4736^2 = \mathbf{0.211 \Omega}$$

2.6 Groupement de panneaux MSX 60 en série et parallèle

On se propose de caractériser un GPVs constitué de deux panneaux MSX 60 montés en série, représenté par la figure 2.27 et un GPVp, constitué de deux panneaux

MSX 60 montés en parallèle, représenté par la figure 2.28, dans les conditions standards.

On utilise dans les deux cas de figures le modèle MSX 60 tiré à partir des caractéristiques typiques électriques du tableau 2.1 représenté par la figure 2.4 et le panneau MSX 60 à une seule résistance déduite à partir du même modèle en posant $R_s = 0.0001 \Omega$. On obtient ainsi pour chaque cas deux ensembles de caractéristiques pour aboutir à la caractérisation complète de chaque générateur.



2.6.1 Caractérisation du groupement de deux panneaux MSX 60 en série :

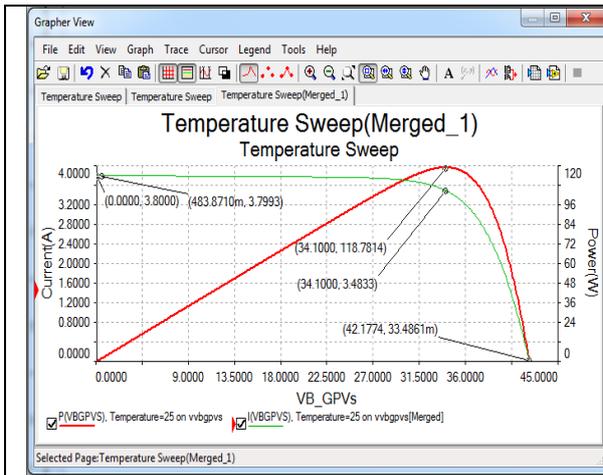


Figure 2.29 : I(V) & P(V) de deux MSX 60 en série.

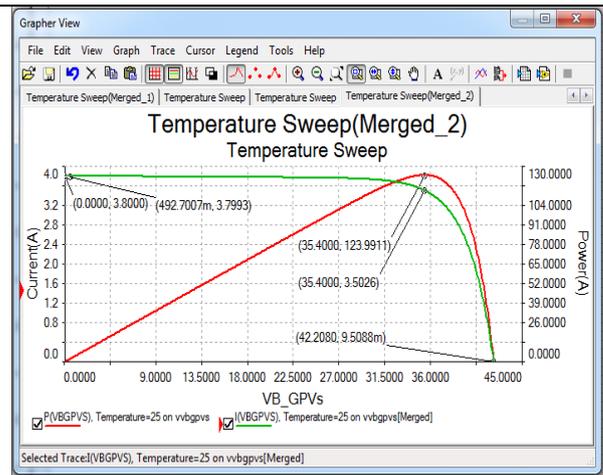


Figure 2.30 : I(V) & P(V) de deux MSX 60_ Rshs en série.

- Paramètres de 2-MSX 60_série à 25 °C

$R@I_{scs_2-msx\ 60} = 691.24\ \Omega$, $P_{ms_2-msx\ 60} = 118.7814\ W$, $V_{ms_2-msx\ 60} = 34.1\ V$,

$I_{ms_2-msx\ 60} = 3.4833\ A$, $V_{ocs_2-msx\ 60} = 42.1774\ V$

- Paramètres de 2-MSX 60_ Rshs à 25 °C

$R@I_{scs_2-msx\ 60_Rshs} = 703.86\ \Omega$, $P_{ms_2-msx\ 60_Rshs} = 123.99\ W$, $V_{ms_2-msx\ 60_Rshs} = 35.4\ V$,

$I_{ms_2-msx\ 60_Rshs} = 3.5026\ A$ $V_{ocs_2-msx\ 60_Rshs} = 42.2080\ V$

- Extraction de Rsh et Rs

$R_{shs} = (691.24 + 703.86)/2 = 697.57\ \Omega$ $R_{ss} = (123.99 - 118.7814)/3.4833^2 = 0.429\ \Omega$

2.6.2 Caractérisation du groupement de deux panneaux MSX 60 en parallèle :

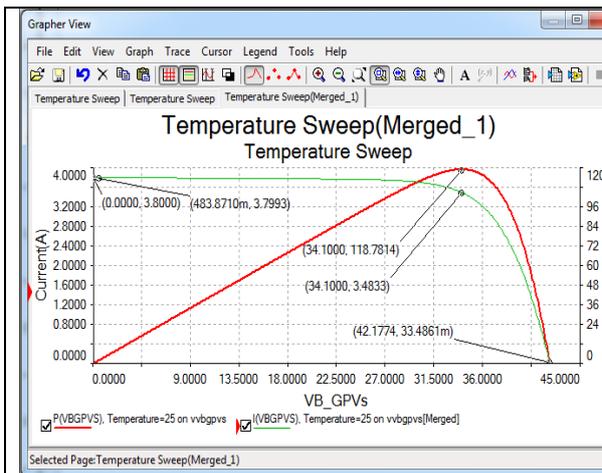


Figure 2.31 : I(V) & P(V) de deux MSX 60 en parallèle.

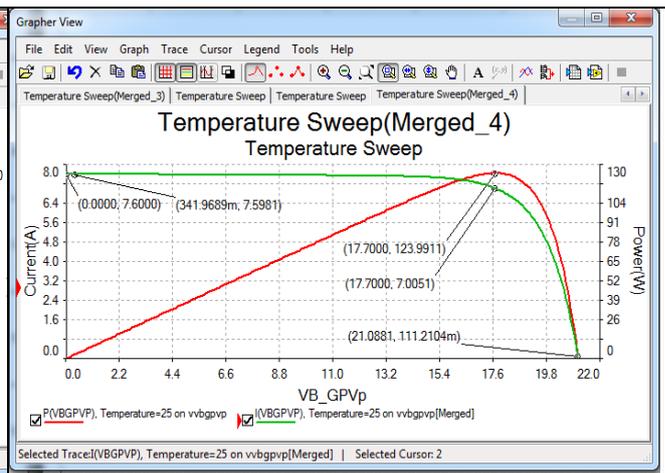


Figure 2.32 : I(V) & P(V) de deux MSX 60_ Rshs en parallèle.

- Paramètres de 2-MSX 60_parallèle à 25 °C

$$R@Iscp_2\text{-msx } 60 = 180.94 \, \Omega , \quad Pmp_2\text{-msx } 60 = 118.7797 \, \text{W} , \quad Vmp_2\text{-msx } 60 = 17.00 \, \text{V} ,$$

$$Imp_2\text{-msx } 60 = 6.9870 \, \text{A} , \quad Vocp_2\text{-msx } 60 = 21.0881 \, \text{V}$$

- Paramètres de 2-MSX 60_ Rshp à 25 °C

$$R@Iscp_2\text{-msx } 60_Rshp = 179.98 \, \Omega , \quad Pmp_2\text{-msx } 60_Rshp = 123.9911 \, \text{W} , \quad Vmp_2\text{-msx } 60_Rshs = 17.7 \, \text{V} ,$$

$$Imp_2\text{-msx } 60_Rshp = 7.0051 \, \text{A} \quad Vocp_2\text{-msx } 60_Rshp = 21.0881 \, \text{V}$$

- Extraction de Rshp et Rsp

$$Rshp = (180.94 + 179.98)/2 = \mathbf{180.46 \, \Omega} \quad Rsp = (123.9911 - 118.7797)/6.9870^2 = \mathbf{0.107 \, \Omega}$$

2.7 Conclusion

On a utilisé le logiciel MultiSim pour caractériser le module MSX 60 de SOLAREX, aux niveaux Cellule idéale, Cellule à deux résistances, module à deux résistances Rs et Rsh et module à résistance Rs nulle, dans les conditions standard (E=1000 W/m² et T = 25 °C). On a ensuite étendu la caractérisation du panneau MSX 60

pour $E=1000 \text{ W/m}^2$ à trois températures différentes 0° , 50°C et 75°C puis pour les conditions standards à un groupement de deux MSX 60 en série et un groupement de deux MSX 60 en parallèle.

Les différentes simulations ont permis d'extraire les paramètres électriques relatifs à chaque niveau de caractérisation et d'aboutir à une très bonne conformité des résultats obtenus avec l'aspect théorique et pratique des générateurs photovoltaïques.

Il reste maintenant à aborder avec ce bagage le chapitre 3 où il sera question d'envisager une co-simulation du travail effectué par l'introduction de la plate-forme LabVIEW.

Chapitre 3 CO-SIMULATION DES

CARACTERISTIQUES PAR SOLARIVTOOLKIT

3.1 Introduction

Le chapitre 2 a permis de simuler les différentes caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ du panneau MSX 60 de SOLAREX à partir de ses caractéristiques électriques fournies par le constructeur et trouvées dans la littérature. Ce travail effectué aux niveaux cellule idéale, cellule non idéale, panneau et groupement de panneaux a permis d'extraire les paramètres électriques relatifs à chaque niveau de caractérisation et d'aboutir à une très bonne conformité des résultats obtenus avec l'aspect théorique et pratique des générateurs photovoltaïques.

Malgré leur adéquation, ces résultats constituent un traitement de premier niveau qui demande à être repris par un traitement de deuxième niveau ou plus, beaucoup plus appropriés permettant d'aboutir aux caractéristiques recherchées avec plus d'exactitude.

Ce traitement complémentaire ou co-simulation peut être automatique, c'est-à-dire que les informations issues du premier niveau sont communiquées directement au deuxième niveau de traitement pour obtenir les résultats finaux. Il peut aussi être manuel comme dans le cas étudié, où les valeurs obtenues du traitement de premier niveau constituent une estimation initiale pour une approche par "essai et erreur" afin d'améliorer la recherche de paramètres non fournis par le Data sheet du panneau PV.

Pour effectuer cette co-simulation, on a associé à la plate-forme NI MultiSim le logiciel "SolarIVToolkit_hardwareindependent" exécutable sur la plate-forme LabVIEW, afin de procéder à une analyse complémentaire des résultats obtenus par les deux outils mis en œuvre dans ce mémoire.

3.2 Présentation des moyens et ressources mis en œuvre

3.2.1 Caractéristiques MSX 60 :

Le **tableau 1** rassemble toutes les valeurs des caractéristiques du panneau MSX 60 obtenues à l'issue des simulations effectuées aux différents niveaux de modélisation dans le chapitre 2.

Tableau 1 : les valeurs des caractéristiques du panneau MSX 60

MSX 60	Isc (A)	Voc(V)	Pm(W)	Vm(V)	Im(A)	Rsh(Ω)	Rs(Ω)
Cell	3.80	0.57	1.77	0.49	3.61	infini	0
Cell 2R	3.80	0.57	1.67	0.47	3.55	10	0.006
Cell Rsh	3.80	0.57	1.75	0.49	3.57	10	0
MSX 25 °C	3.80	21.1	59.4	17	3.50	349	0.21
MSX Rsh	3.80	21.1	62	17.4	3.56	338	0
MSX 0 °C	3.74	23.2	66.6	19.2	3.47	384	0.21
MSX 50 °C	3.86	19	52.1	14.9	3.50	360	0.21
MSX 75 °C	3.92	16.9	44.7	12.9	3.47	341	0.21

3.2.2 LABVIEW :

LabVIEW (Laboratory of Virtual Instruments Engineering Workbench) ou Atelier d'ingénierie du laboratoire d'instruments virtuels est un environnement de développement spécialisé en informatique industrielle et scientifique. Sa particularité est qu'il s'appuie sur le langage G, créé par National Instruments, qui est entièrement graphique. Il permet de créer des logiciels complexes tout en facilitant la programmation et donc de diminuer les délais de développement. Grâce à ses bibliothèques de fonctions dédiées à l'acquisition de données, l'instrumentation, à l'analyse mathématique des mesures, mais également grâce à la création rapide d'interfaces graphiques de qualité et le codage simplifié, l'ingénieur a plus de temps pour se concentrer sur les fonctions métiers de l'instrumentation et du traitement des mesures [6].

LabVIEW est particulièrement recommandé pour développer des systèmes de contrôle, supervision et les bancs de test et mesure.



a)- Acquisition avec LabVIEW :

LabVIEW permet l'acquisition de données par l'intermédiaire de diverses connectiques :

- PCI (Peripheral Component Interconnect)
- CompactFlash
- LAN (Local Area Network)
- PXI (PCI eXtensions for Instrumentation)
- PCMCIA (Personal Computer Memory Card International Association)
- Wi-Fi (IEEE 802.11 b/g/n) (Wireless Fidelity)
- Bluetooth
- IrDA (Infrared Data Association)
- USB (Universal Serial Bus)
- GPIB (IEEE 488) (General Purpose Interface Bus)
- Firewire (IEEE 1394)
- Ethernet
- Série (RS 232, RS 449, RS 422, RS 423, RS 485)
- VXI (VME eXtensions for Instrumentation)

b) - Analyse avec LabVIEW :

LabVIEW inclut des outils pour l'analyse des données :

- Traitement du signal : Convolution, analyse spectrale, transformées de Fourier, ...
- Traitement d'images : Masque, détection de contours, profils, manipulations de pixels, ...

- Mathématiques : Interpolation, statistiques (moyennes, écart-type, ...), équations différentielles, ...

c)- Présentation avec LabVIEW :

LabVIEW inclut des outils d'aide à la présentation (communication) des données :

- Graphiques, tableaux, images, génération de rapport, ...
- Par l'intermédiaire d'Internet : outils de publication web, serveur datasocket, TCP/IP, envoi d'alertes par email, ...

d)- Les programmes LabVIEW appelés Virtual Instruments (VI) :

On parle d'instruments virtuels car leur apparence et leur fonctionnement sont semblables à ceux d'instruments réels, tels que les oscilloscopes et les multimètres.

Composantes d'un VI

Les VI se composent de
3 éléments principaux :

- Face avant**

 - **Interface utilisateur**
 - Contrôles = entrées
 - Indicateurs = sorties
- Diagramme**

 - **Fenêtre de programmation et d'affichage du code source**
 - Interaction entre face avant et diagramme (**Ctrl+E**)
- Icône/Connecteur**







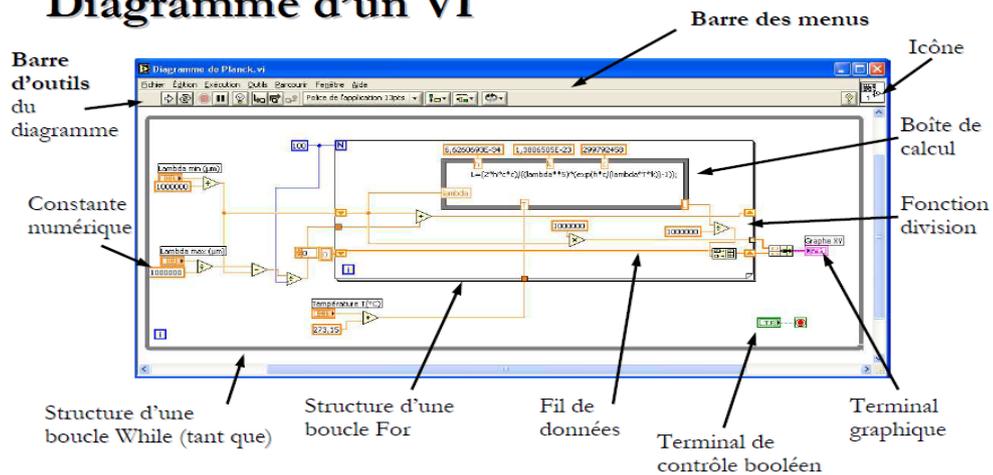


Par Nicolas POUSET

17

Figure 3.2 : Présentation des composantes d'un Instrument Virtuel

Diagramme d'un VI



Dans le **diagramme** nous trouverons tous les éléments propres au code développé (structures, fonctions, constantes,...).

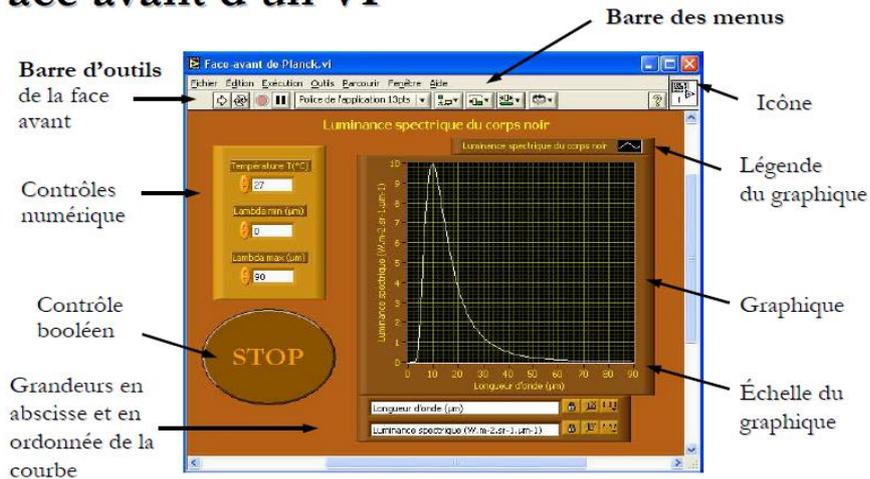


Par Nicolas POUSETT

19

Figure 3.3 : Présentation du diagramme fonctionnel d'un VI

Face avant d'un VI



Dans la **face-avant** nous trouverons tous les éléments interactifs du VI (commandes et indicateurs).



Par Nicolas POUSETT

18

Figure 3.4 : Présentation de la face avant ou interface graphique d'un VI

Icône/connecteur d'un VI



Icône par défaut

- Chaque VI affiche une **icône**, dans le coin supérieur droit des fenêtres de la face-avant et du diagramme. Une icône est la représentation graphique d'un VI.



- Un **connecteur** est un ensemble de terminaux correspondant aux commandes et aux indicateurs du VI qui sont accessibles.



Par Nicolas POUSSET

20

Figure 3.5 : Icône ou connecteur d'un VI

3.2.3 Les boîtes à outils "SolarIVToolkit" :

En utilisant les capacités d'analyse de LabVIEW, on peut évaluer les principaux paramètres de performance des cellules et modules photovoltaïques (PV). Afin de faciliter cette opération, National Instruments a créé des fonctions LabVIEW ou boîte à outils (Toolkits) pour effectuer l'analyse de caractérisation I-V de générateurs PV en polarisation directe. Il existe deux versions de la boîte à outils qui appliqueront les mêmes fonctions d'analyse IV aux données mesurées et qui sont disponibles au téléchargement :

- **"SolarIVToolkit_hardwareindependent"** indépendante du matériel et peut être utilisée avec des données précédemment acquises.

- **"solarivtoolkit_with_smu"** associée au matériel et peut en plus acquérir les données à l'aide d'un NI PXI-4130 Power SMU, figure 3.6.

Le SMU est un instrument d'alimentation de précision qui fournit une source de tension et de courant et une résolution de mesure à ou en dessous de 1 mV et 1 μ A, respectivement. En outre, les SMU disposent d'une sortie à quatre quadrants qui peut à la fois générer et absorber le courant et la tension pour tester les caractéristiques PV directes ou inverses.

Avec le PXI-4130 Power SMU, par exemple, on peut effectuer des balayages de courant et de tension pour déterminer les caractéristiques IV des cellules PV ou des modules et des diodes. Ce module peut consommer jusqu'à 10 W et possède des sorties isolées capables de fournir jusqu'à ± 20 V et 2 A. Il a également une résolution de mesure de courant de 1 nA et fournit une capacité de sortie sélectionnable par logiciel pour

améliorer la stabilité. Les SMU NI sont livrées avec des exemples de programmes LabVIEW prêts à l'emploi pour effectuer des balayages IV. Il est possible de mettre en cascade plusieurs SMU de puissance PXI-4130 en série pour atteindre des tensions plus élevées lors de la source d'alimentation (pour les tests de polarisation inverse).



Figure 3.6 : PXI-4130 Power SMU

Les boîtes à outils téléchargeables contiennent le code suivant pour les tests de caractérisation I-V de polarisation directe figure 3.7

- Fichier de projet contenant les principaux VIs, des exemples de données, des fonctions d'analyse I-V
- Un ensemble de VIs principal pour lire et analyser les données précédemment acquises et enregistrées dans format LVM
- Un VI principal qui peut être exécuté avec du matériel National Instruments, il acquiert, analyse et présente les résultats de la caractérisation I-V. (Version SMU uniquement)
- Données d'échantillons collectées dans des conditions non standard à partir d'un module solaire polycristallin
- Fonctions d'analyse I-V (utilisables dans les projets ou pour créer son propre code).

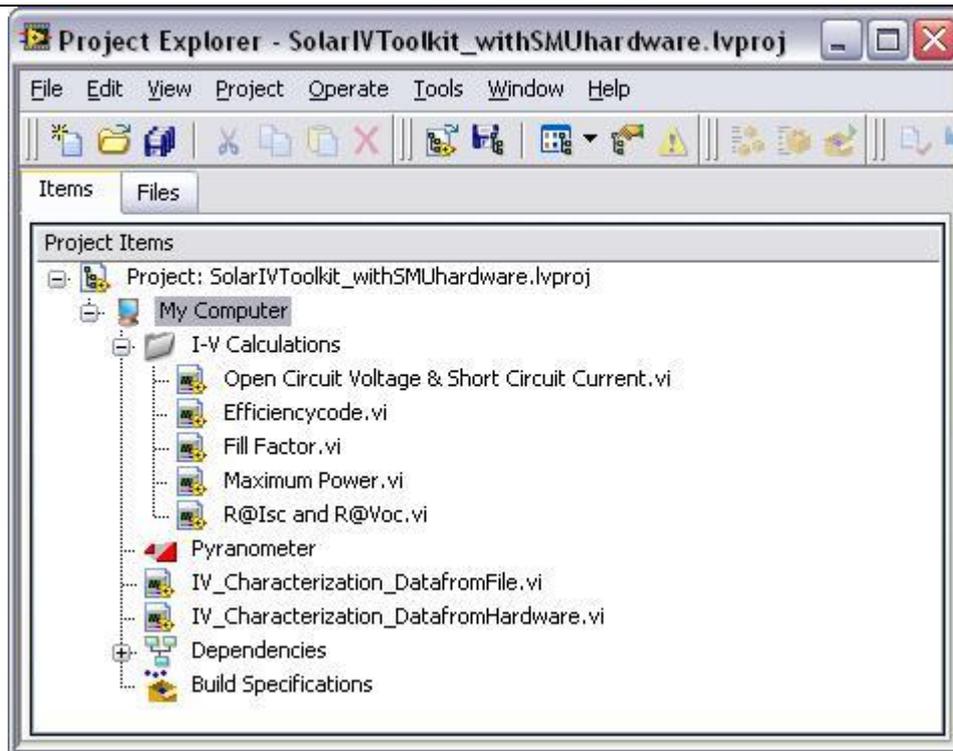


Figure 3.7 : Explorateur du projet SolarIVToolkit avec et sans Matériel

La figure 3.8 montre la face avant du VI principal de la boîte à outils qui lit les données d'un fichier.

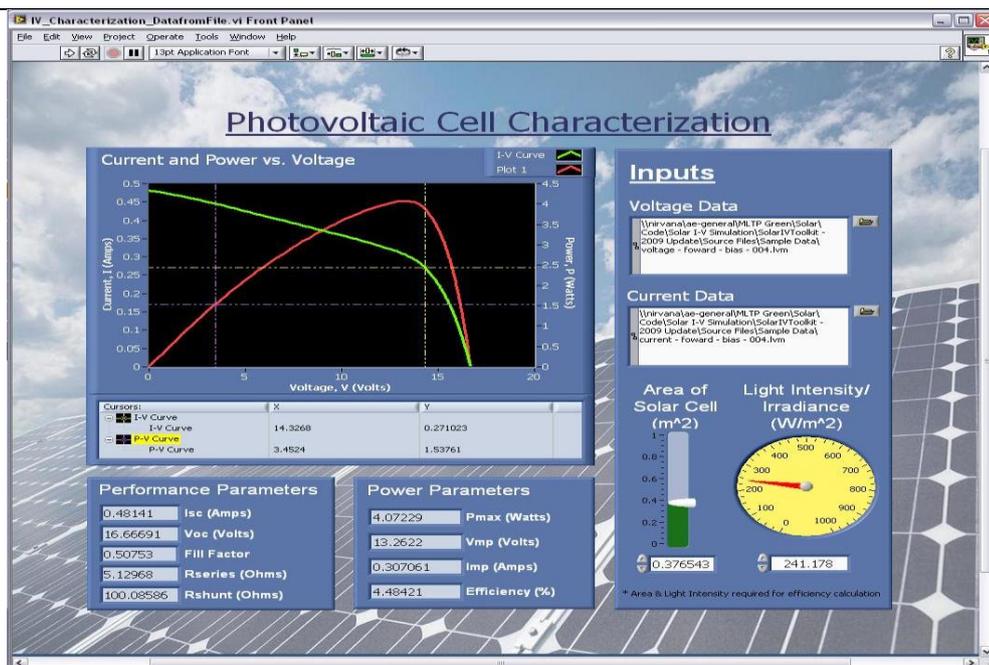


Figure 3.8 : LabVIEW VI pour la caractérisation des cellules solaires photovoltaïques

a) Guide de fonctionnement de "SolarIVToolkit hardwareindependent" :

Consulter l'annexe (1)

La **figure 3.9** fournit la fenêtre de l'explorateur du projet de la boîte à outils LabVIEW indépendante du matériel «SolarIVToolkit » utilisée pour effectuer l'analyse I-V en co-simulation avec NI MultiSim et la **figure 3.10**, son diagramme fonctionnel principal.

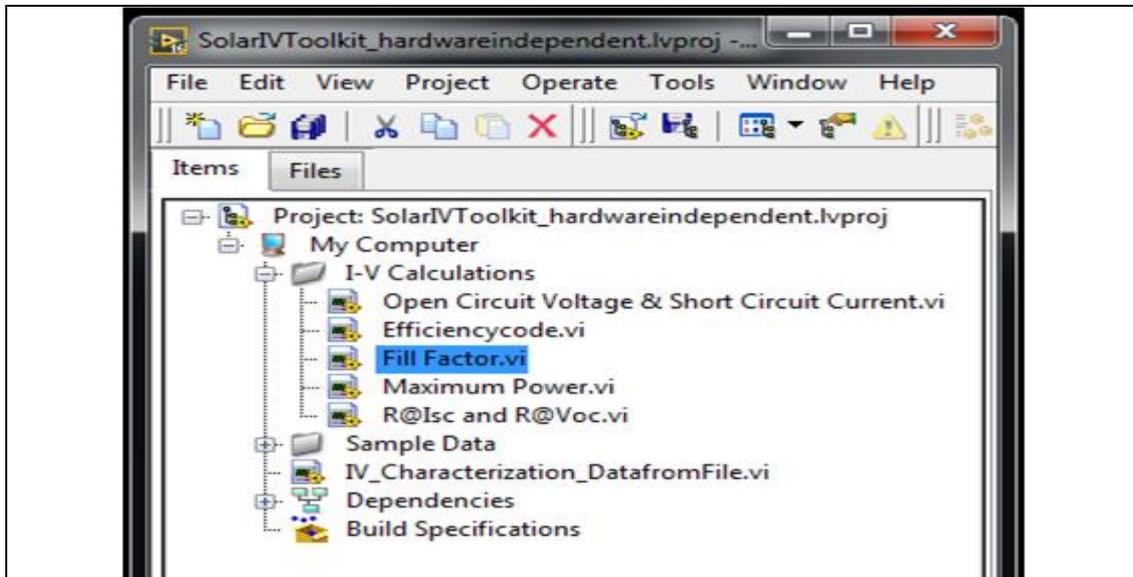


Figure 3.9 : Explorateur du projet SolarIVToolkit indépendant du Matériel

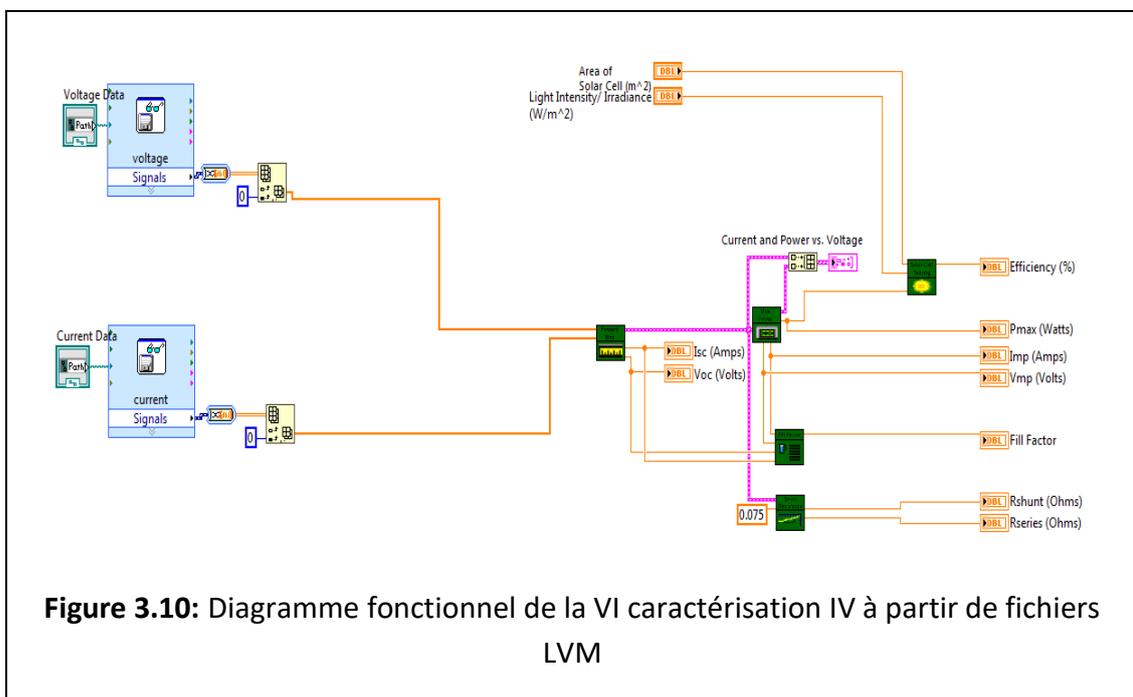


Figure 3.10: Diagramme fonctionnel de la VI caractérisation IV à partir de fichiers LVM

Les différentes étapes permettant d'exécuter "SolarIVToolkit_hardwareindependent" sous LabVIEW sont données **en Annexe 1**.

b) Génération de fichier lvm :

La boîte à outils "SolarIVToolkit_hardwareindependent" utilise en entrée les fichiers mesure développés par National Instruments, enregistrés sous format (LVM) automatiquement par Multisim à partir de son Graphe de caractérisation IV.

Le format de fichier de mesures LabVIEW (.lvm) est un format de fichier textuel pour les données unidimensionnelles. Ce fichier de mesures textuel est un fichier texte délimité par des tabulations qu'on peut ouvrir avec une application de type tableur ou un éditeur de texte. Le fichier. lvm comprend des informations d'en-tête sur les données, comme la date et l'heure auxquelles les données ont été générées. LabVIEW enregistre les données dans un fichier. lvm en utilisant jusqu'à six chiffres de précision.

Le format. lvm est facile à analyser et à lire lorsqu'il est importé dans une application de type tableur, comme Microsoft Excel, ou dans un éditeur de texte, comme Notepad. Le format. lvm supporte les ensembles de données multiples, le groupage, et l'ajout d'ensembles de données à des fichiers existants.

Le fichier. lvm utilise des virgules en guise de séparateurs entre les nombres. Pour convertir des données dans un fichier. lvm et les transformer de chaînes en nombres, il faut spécifier d'utiliser un point comme séparateur décimal, à l'aide du spécificateur de format du code de localisation.

Ce format de fichier n'est pas conçu pour les données haute-performance ni pour les ensembles de données volumineux, à l'inverse de tous les formats de fichier textuels.

La figure 3.11 représente le contenu du répertoire Data_lvm d'enregistrement des fichiers lvm dont la structure et le guide de génération sont donnés **en Annexe 2**.

Nom	Modifié le	Type	Taille
Current_cel	24/07/2020 18:37	Fichier LVM	20 Ko
Current_Cel2R	12/08/2020 21:26	Fichier LVM	20 Ko
Current_CelRsh	12/08/2020 21:28	Fichier LVM	20 Ko
Current_Msx 0	12/08/2020 21:48	Fichier LVM	775 Ko
Current_Msx 25	17/07/2020 09:10	Fichier LVM	711 Ko
Current_Msx 25Rsh	12/08/2020 21:40	Fichier LVM	711 Ko
Current_Msx 50	12/08/2020 21:52	Fichier LVM	647 Ko
Current_Msx 75	12/08/2020 21:57	Fichier LVM	582 Ko
Voltage_cel	24/07/2020 18:37	Fichier LVM	20 Ko
Voltage_Cel2R	12/08/2020 21:26	Fichier LVM	20 Ko
Voltage_CelRsh	12/08/2020 21:30	Fichier LVM	20 Ko
Voltage_Msx 0	12/08/2020 21:49	Fichier LVM	775 Ko
Voltage_Msx 25	17/07/2020 09:34	Fichier LVM	710 Ko
Voltage_Msx 25Rsh	12/08/2020 21:41	Fichier LVM	710 Ko
Voltage_Msx 50	12/08/2020 21:53	Fichier LVM	646 Ko
Voltage_Msx 75	12/08/2020 21:58	Fichier LVM	581 Ko

Figure 3.11: Répertoire Data_lvm d'enregistrement des fichiers LVM

3.3 Co-simulation MultiSim LabVIEW

3.3.1 Tableau des résultats de la co-simulation :

Les figures 3.11 (a) jusqu'à (h) présentent les différents résultats de simulation du panneau MSX 60 fournis par LabVIEW et le tableau 2 rassemble toutes les valeurs de ces caractéristiques obtenues par co-simulations :

<p>Performance Parameters</p> <p>3.80000 Isc (Amps)</p> <p>0.56800 Voc (Volts)</p> <p>0.82049 Fill Factor</p> <p>0.01373 Rseries (Ohms)</p> <p>20518111671 Rshunt (Ohms)</p>	<p>Power Parameters</p> <p>1.77095 Pmax (Watts)</p> <p>0.491 Vmp (Volts)</p> <p>3.60683 Imp (Amps)</p> <p>1.95009 Efficiency (%)</p>	<p>Performance Parameters</p> <p>3.79600 Isc (Amps)</p> <p>0.56700 Voc (Volts)</p> <p>0.77600 Fill Factor</p> <p>0.01722 Rseries (Ohms)</p> <p>10.00597 Rshunt (Ohms)</p>	<p>Power Parameters</p> <p>1.67022 Pmax (Watts)</p> <p>0.471 Vmp (Volts)</p> <p>3.54612 Imp (Amps)</p> <p>1.83917 Efficiency (%)</p>
<p>Figure 3.11_a : Paramètres MSX 60_Cel sous LabVIEW</p>		<p>Figure 3.11_b : Paramètres MSX 60_Cel_2R sous LabVIEW</p>	

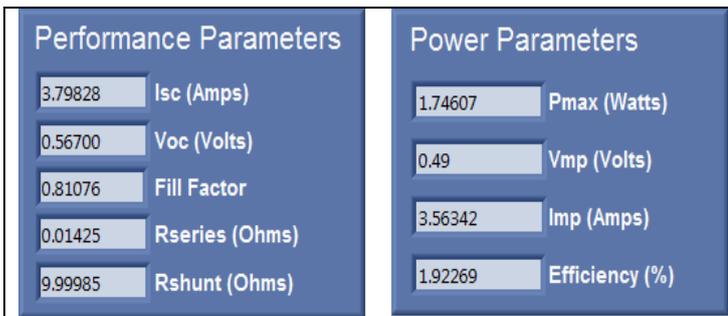


Figure 3.11_c : Paramètres MSX 60_Cel_Rsh sous LabVIEW

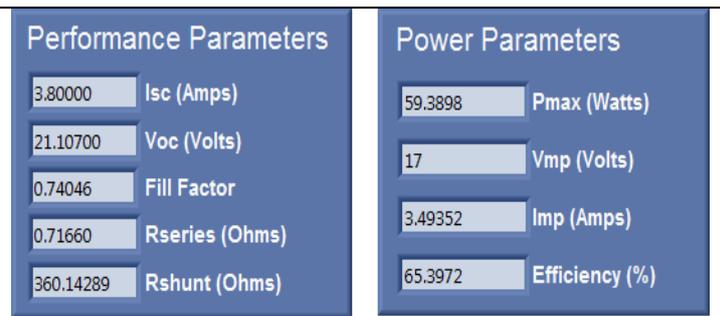


Figure 3.11_d : Paramètres MSX 60_25°C sous LabVIEW

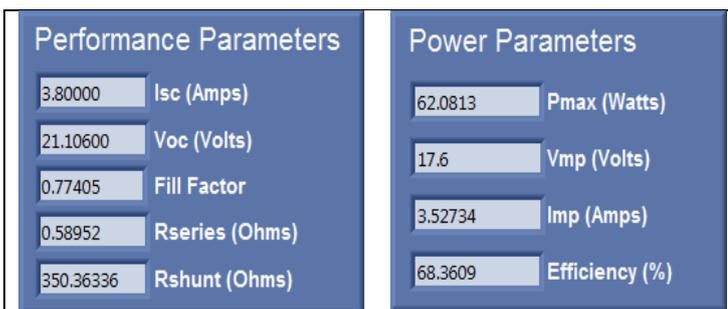


Figure 3.11_e : Paramètres MSX 60_Rsh sous LabVIEW

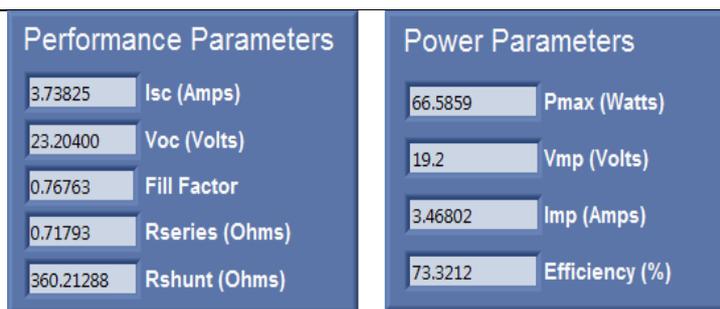


Figure 3.11_f : Paramètres MSX 60_0°C sous LabVIEW

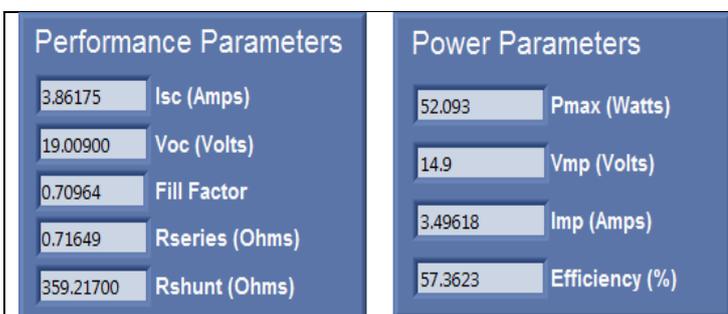


Figure 3.11_g : Paramètres MSX 60_50 °C sous LabVIEW

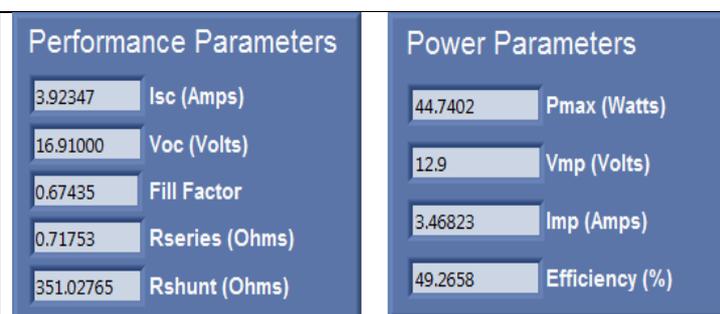


Figure 3.11_h: Paramètres MSX 60_75°C sous LabVIEW

Tableau 2 : les valeurs des caractéristiques du panneau MSX 60 par co-simulation :

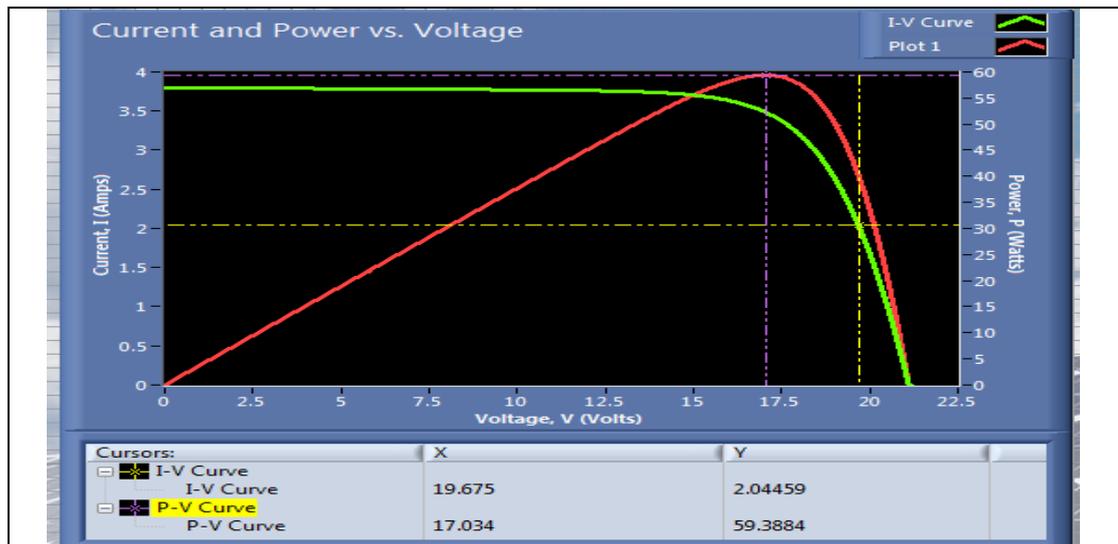
MSX 60	Isc (A)		Voc(V)		Pm(W)		Vm(V)		Im(A)		Rsh(Ω)		Rs(Ω)	
	Sim	LV	Sim	LV	Sim	LV	Sim	LV	Sim	LV	Sim	LV	Sim	LV
Cell	3.80	3.80	0.57	0.57	1.77	1.77	0.49	0.49	3.61	3.61	Infini	Infini	0	0.014
Cell 2R	3.80	3.80	0.57	0.57	1.67	1.67	0.47	0.47	3.55	3.55	10	10	0.006	0.017
Cell Rsh	3.80	3.80	0.57	0.57	1.75	1.75	0.49	0.49	3.57	3.56	10	10	0	0.014
MSX 25°C	3.80	3.80	21.1	21.1	59.4	59.4	17	17	3.50	3.50	349	360	0.21	0.72
MSX Rsh	3.80	3.80	21.1	21.1	62.0	62.1	17.4	17.6	3.56	3.53	338	350	0	0.59
MSX 0 °C	3.74	3.74	23.2	23.2	66.6	66.6	19.20	19.20	3.47	3.47	384	360	0.21	0.72
MSX 50°C	3.86	3.86	19	19	52.1	52.1	14.9	14.9	3.50	3.50	360	359	0.21	0.72
MSX 75°C	3.92	3.92	16.9	16.9	44.7	44.7	12.9	12.9	3.47	3.47	341	351	0.21	0.72

3.3.2 Analyse de la co-simulation :

a) sources des différences introduites par SOLARIVTOOLKIT :

L'analyse des résultats du **tableau 2** au niveau cellule et panneau permet d'affirmer :

- Que les paramètres fournis par le constructeur du générateur MSX 60 et simulés par Multisim tels que : Isc, Voc, Pm, Im sont confirmé à 100% par LabView
- Que les valeurs des résistances shunt Rsh sont comparables au minimum à 7% par les deux méthodes, ce qui peut être considéré comme acceptable.
- Que la seule différence introduite par LabVIEW sur les résultats obtenus par Multisim se trouve au niveau de la valeur de la résistance série Rs. Cette résistance, non fournie par le data-sheet, a été calculée par Multisim à partir du bilan de puissance du MSX 60 au point maximum en considérant Rs représentant les pertes par les fils de connexion. Le calcul de Rs effectué par LabVIEW est obtenu comme le montre **la figure 3.12** à partir de l'inverse de la pente au point Voc de la courbe IV.



Extraction de R_s : $R_s = R_{s@Voc} = (21.1 - 19.675)/2 = 0.7125 \Omega$

Figure 3.12 : Extraction de la valeur de R_s par LabVIEW

c) Ajustement des caractéristiques de multisim par SolarIVTOOLKIT :

Le **tableau 3.3** rassemble les Caractéristiques Typiques électriques du panneau MSX 60 aux conditions standards données dans la littérature et après co-simulation de premier niveau.

Tableau 3.3 : Caractéristiques Typiques électriques du panneau MSX 60 à 25 °C

Désignations		Valeurs Initiales	Valeurs co-simulées
Puissance maximale	(P_{max})	60 W	59.4 W
Tension @ P_{max}	(V_{mp})	17.1 V	17.00 V
Courant @ P_{max}	(I_{mp})	3.5 A	3.5 A
P_{max} minimale garantie		58 W	59.4 W
Courant de court-circuit	(I_{sc})	3.8 A	3.8 A
Tension de circuit ouvert	(V_{oc})	21.1 V	21.1 V
Coefficient de T° de la tension à circuit ouvert	(k_v)	$-(80 \pm 10 \text{ mV})/^\circ\text{C}$	$-(80 \pm 10 \text{ mV})/^\circ\text{C}$
Coefficient de T° du courant en court-circuit	(k_i)	$(0.065 \pm 0.015)\%/^\circ\text{C}$	$(0.065 \pm 0.015)\%/^\circ\text{C}$
Coefficient de T° de puissance		$-(0.5 \pm 0.05)\%/^\circ\text{C}$	

NOCT		$47 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$	
Courant de saturation	(I_0)	$0.1866 \text{ }\mu\text{A}$	$0.1866 \text{ }\mu\text{A}$
Facteur d'idéalité de la diode	(n)	1.358	1.358
Résistance série	(R_s)	$0.22 \text{ }\Omega$	$0.21 \text{ }\Omega$ & $0.72 \text{ }\Omega$
Résistance parallèle	(R_{sh})	$358.569 \text{ }\Omega$	$360 \text{ }\Omega$
Surface utile du panneau	(Area)	5083.44 cm^2	5083.44 cm^2

Il faut signaler que pour aller plus loin dans l'ajustement des caractéristiques par LabVIEW il est nécessaire de résoudre d'abord l'extraction de la valeur de R_s qui met en jeu le modèle de la diode par la détermination de son facteur d'idéalité (n) et son courant de saturation I_0 . Ces deux paramètres n'ayant pas été introduit de manière explicite dans le chapitre 2, il est prudent de considérer les résultats obtenus comme suffisant pour respecter les performances du panneau MSX 60 garanties par le constructeur.

3.4 Conclusion :

Le but de ce chapitre a été de passer d'une simulation de premier niveau effectuée par les modèles schématiques à une simulation de deuxième niveau réalisée par co-simulation *en* associant à la plate-forme NI MultiSim le logiciel "SolarIVToolkit", exécutable sur la plate-forme LabVIEW. Les résultats de la co-simulation ont montré que les caractéristiques IV générées par Multisim et présentées en entrée du logiciel sur LabVIEW ont permis d'obtenir les paramètres du Générateur MSX 60 extraits avec une bonne approximation et une bonne conformité, mis à part la valeur de la résistance série R_s .

Il a été démontré que cette différence introduite par LabVIEW revient à la méthode d'extraction de cette résistance série R_s qui nécessitait pour son exploitation le modèle interne de la diode qui n'a pas été introduit dans les différents modèles schématiques présentés au chapitre 2. Ainsi il n'a pas été possible de pousser plus loin la co-simulation par des opérations "essais et erreurs" entre NI Multisim et LabView pour un ajustement meilleur du point maximum de puissance P_m , et de la résistance série R_s .

Conclusion générale

Ce travail de mémoire a porté sur l'étude d'exploiter les deux environnements Multisim et LabVIEW de NI qui mettent à la disposition de l'utilisateur des modèles électriques de cellules et modules PV et des Toolkits de caractérisation pour caractériser les générateurs PV (Cellules, Modules, panneaux).

Les connaissances actuelles sur le comportement (rendement) de ces générateurs PV vient des essais à l'échelle expérimentale en accord avec les considérations théoriques. Ces essais sont généralement très onéreux et laborieux. Par conséquent, le développement des méthodes numériques appropriées est important, afin d'être en mesure d'étudier les différents paramètres qui pourraient influencer sur leur rendement et éventuellement fournir une meilleure compréhension de la complexité du système PV.

Pour développer le sujet de ce mémoire, on a présenté en premier lieu les notions générales sur l'énergie solaire photovoltaïque : son origine, son transfert et son exploitation au niveau terrestre.

On a utilisé le logiciel MultiSim pour caractériser le module MSX 60 de SOLAREX, aux niveaux Cellule idéale, Cellule à deux résistances, module à deux résistances R_s et R_{sh} et module à résistance R_s nulle, dans les conditions standard ($E=1000 \text{ W/m}^2$ et $T = 25 \text{ °C}$). On a ensuite étendu la caractérisation du panneau MSX 60 pour $G=1000 \text{ W/m}^2$ à trois températures différentes 0° , 50°C et 75 °C puis pour les conditions standards à un groupement de deux MSX 60 en série et un groupement de deux MSX 60 en parallèle.

Les différentes simulations ont permis d'extraire les paramètres électriques relatifs à chaque niveau de caractérisation et d'aboutir à une très bonne conformité

des résultats obtenus avec l'aspect théorique et pratique des générateurs photovoltaïques.

Pour conclure le projet, on est passé d'une simulation de premier niveau effectuée par les modèles schématiques à une simulation de deuxième niveau réalisée par co-simulation en associant à la plate-forme NI MultiSim le logiciel "SolarIVToolkit", La co-simulation a montré que les caractéristiques IV générées par Multisim et présentées en entrée du logiciel sur LabVIEW ont permis d'obtenir les paramètres du Générateur MSX 60 extraits avec une bonne approximation, mis à part la valeur de la résistance série R_s qui est dû à la méthode d'extraction de cette résistance série R_s qui nécessitait pour son exploitation le modèle interne de la diode.

On espère que les résultats de ce travail contribueront significativement à entamer la suite de son développement par les actions suivantes :

- Programmation SPICE des générateurs PV
- Mise en œuvre d'une co-simulation automatique
- Application à la caractérisation pratique des panneaux PV

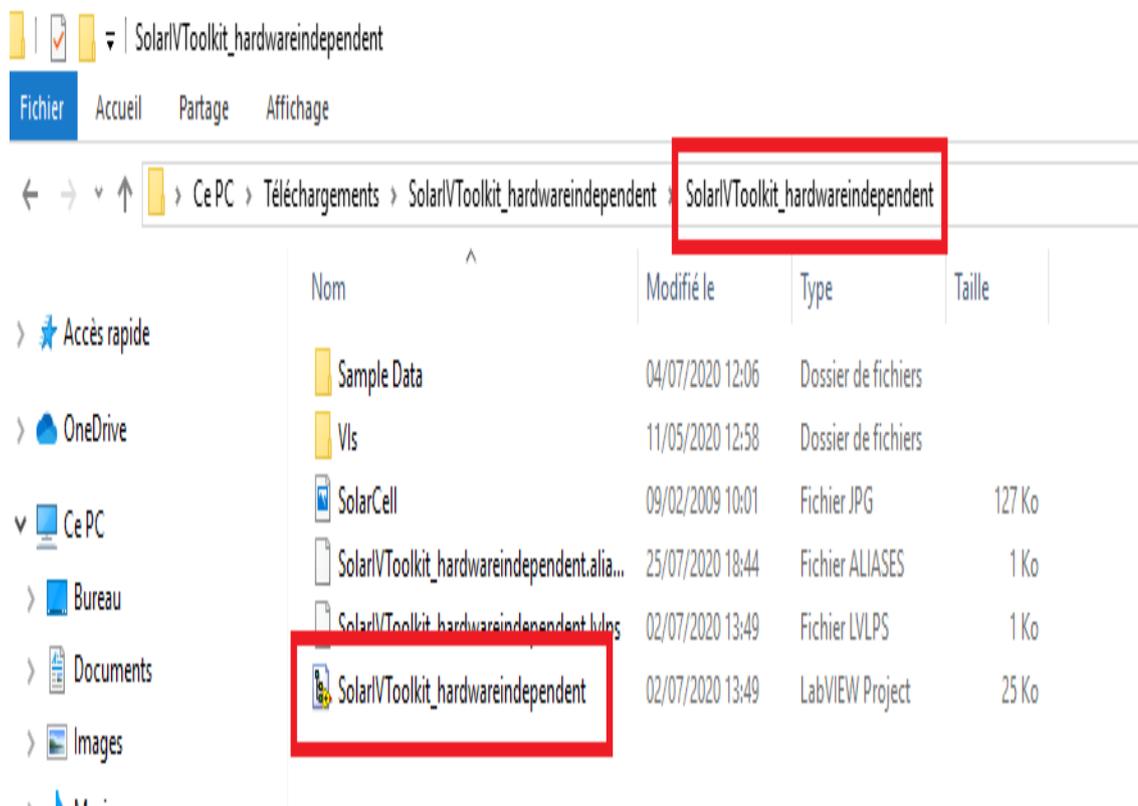
Annexes

Annexes:

1- Guide de fonctionnement de "SolarIVToolkit_hardwareindependent"

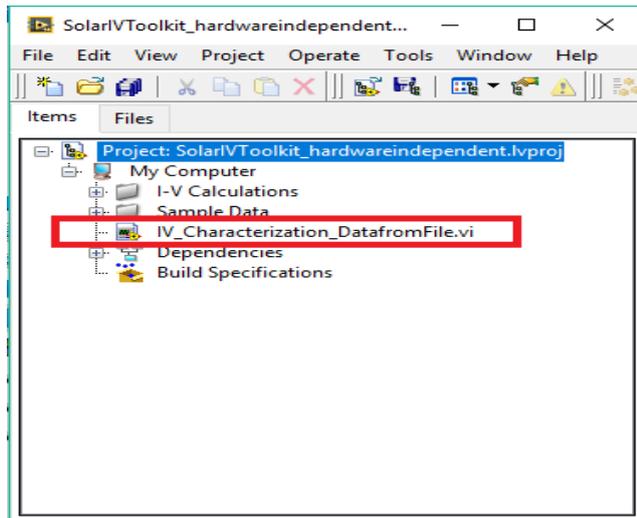
Etape 1 :

- Placer le dossier "SolarIVToolkit_hardwareindependent" dans le répertoire de travail.
- Ouvrir le projet SolarIVToolkit_hardwareindependent.

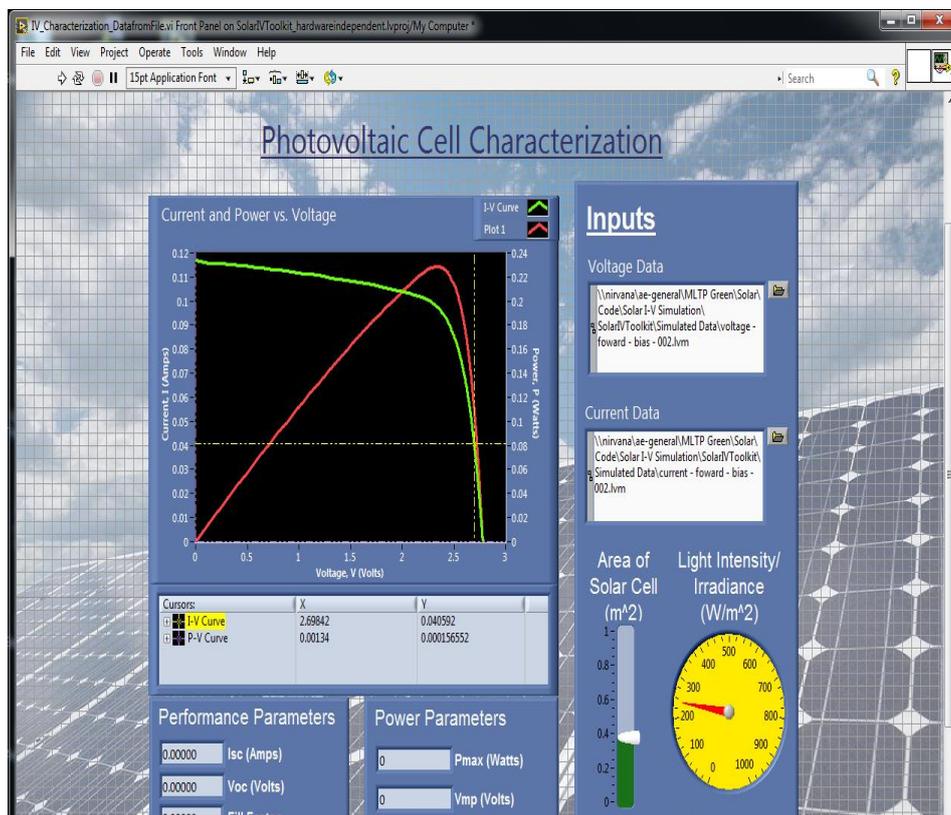


Etape 2 :

- Exécuter VI_Characterization_Dataformfile.vi.

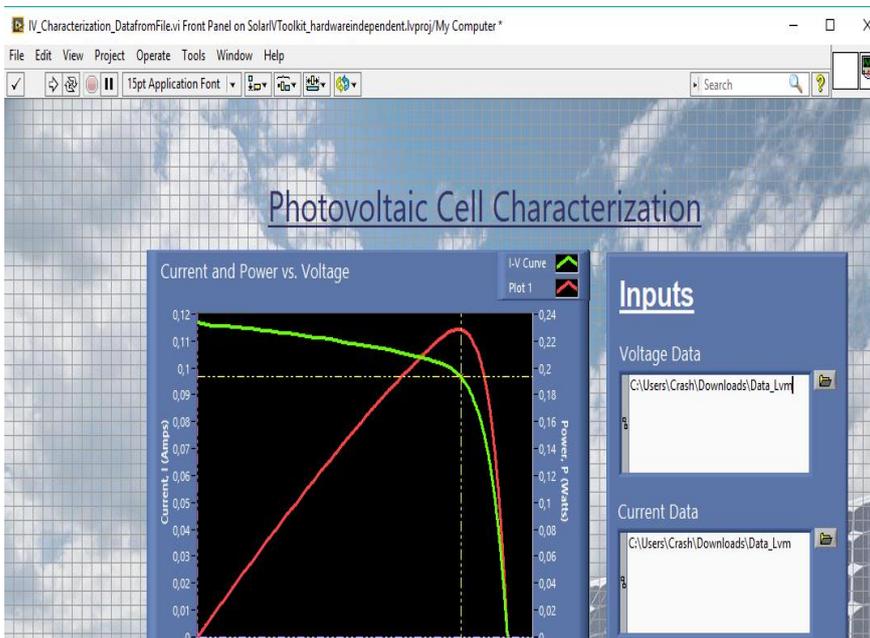
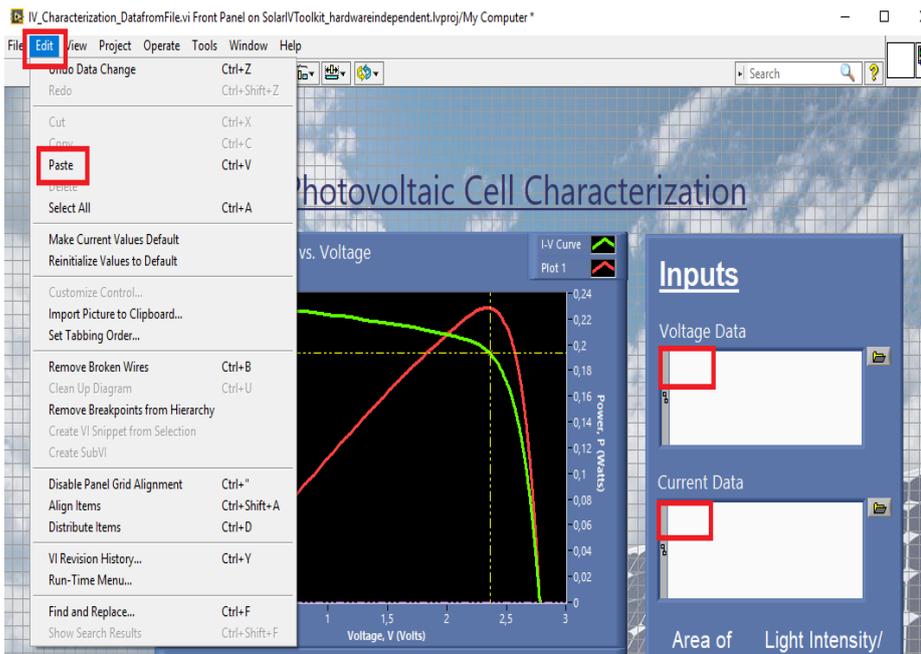
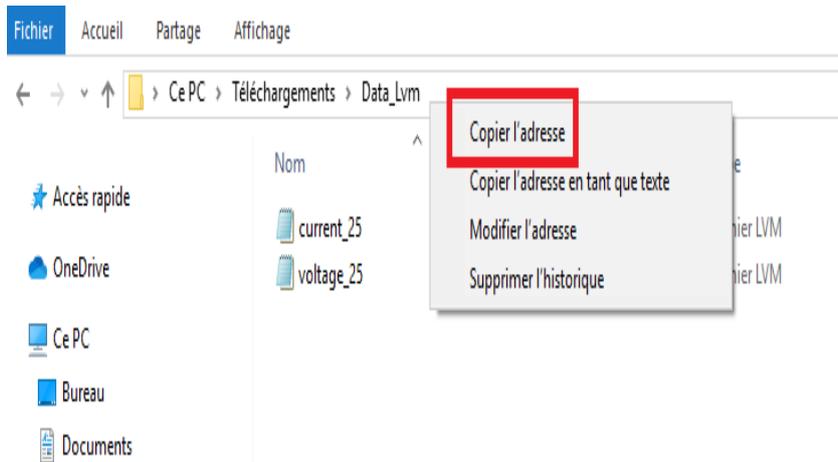


- Le diagramme interface apparaît comme suit.



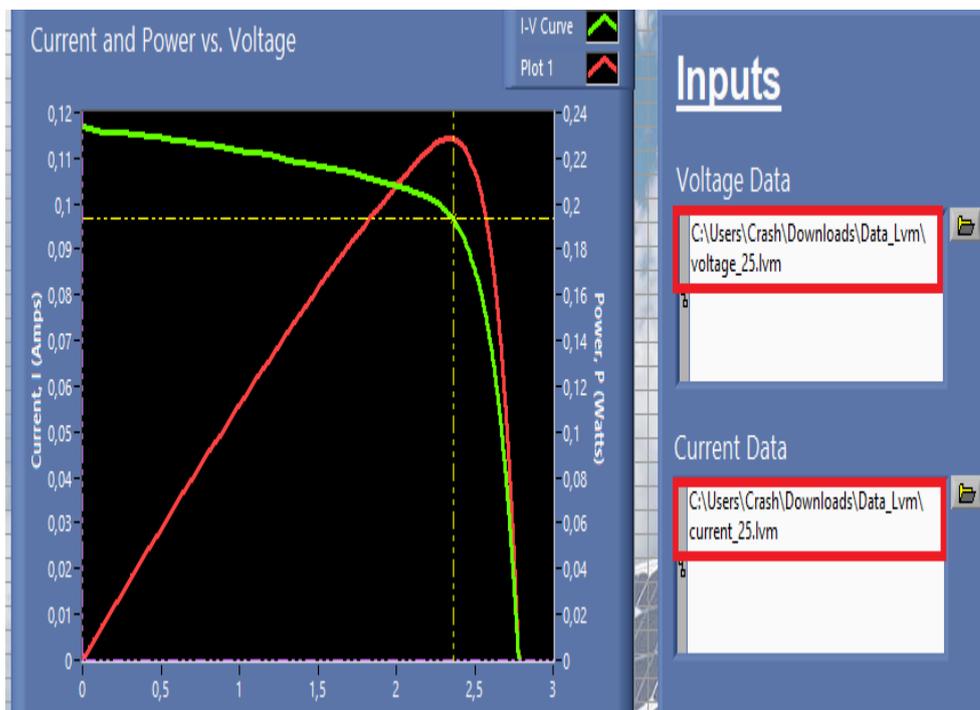
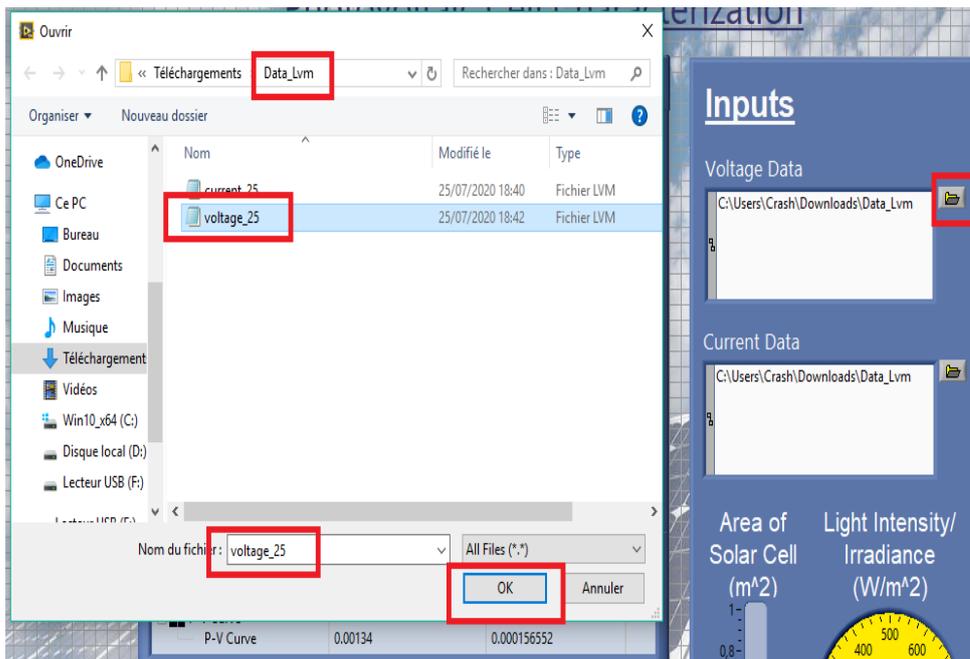
Etape 3 :

- Copier l'adresse du dossier "Data_lvm" en cliquant sur le bouton droit de la souris et en choisissant "copie adresse".
- Insérer l'adresse copiée dans les espaces Inputs Voltage et Current de l'interface.



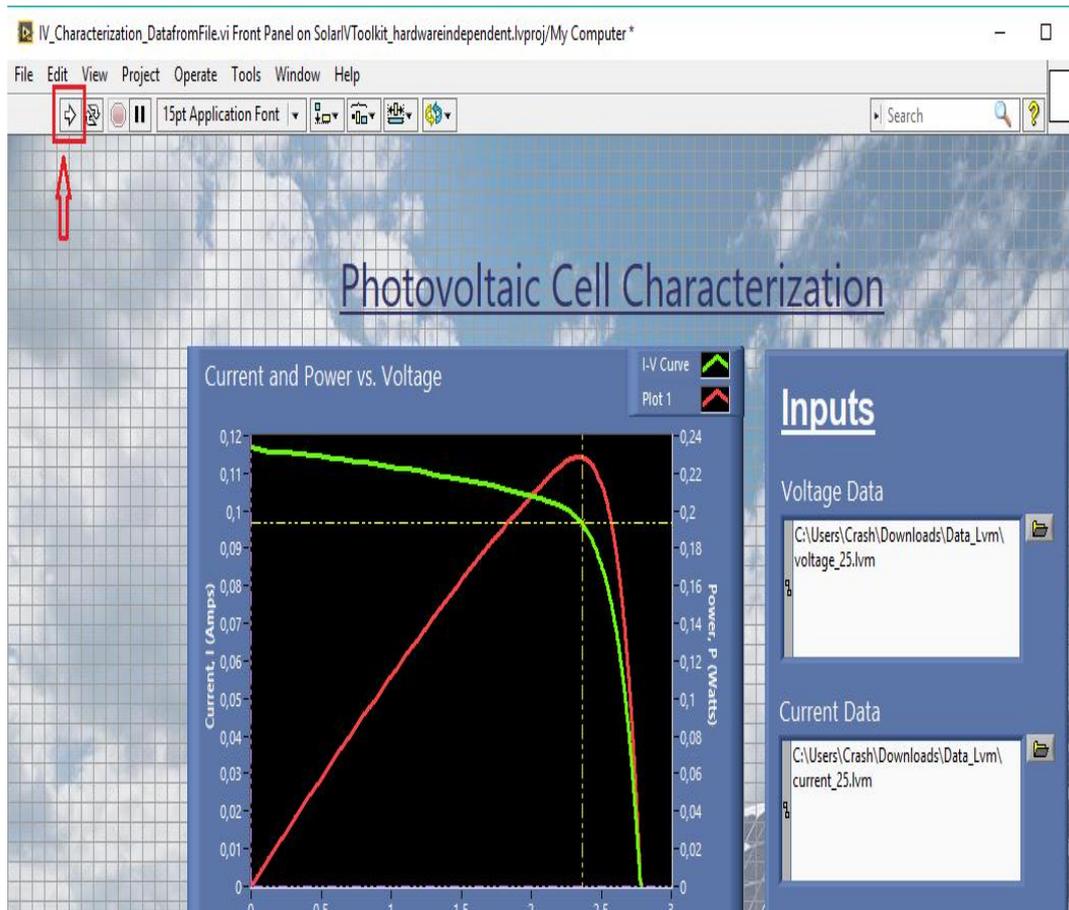
Etape 4 :

Charger en cliquant sur l'icône "Ouvrir" successivement les fichiers Data Voltage et Current à partir de la base " Data_lvm".



Etape 5 :

-Exécuter le projet et comparer les résultats trouvés.



2- Structures des fichiers de mesures LabVIEW :

Fichier Voltage

LabVIEW Measurement

Writer_Version 0.92

Reader_Version 1

Separator Tab

Multi_Headings Yes

X_Columns Multi

Time_Pref Relative

Description Generated from Multisim

Date 2020/07/17

Time 09:34:14

End_of_Header

Start_Special

Page_tab_name DC Sweep

Page_title Testing the Solar Cell Modules_3

End_Special

Start_Special

Graph name DC Transfer Characteristic
Left Axis LINEARLabel=Voltage (V)
Bottom Axis LINEARLabel=vvbgpv Voltage (V)
End_Special

Channels 1
Samples 22000
Date 2020/07/17
Time 09:34:14
Y_Dimension Voltage
Y_Unit_Label V
X_Dimension vvbgpv Voltage
X_Unit_Label V
X0 0.000000e+000
Delta_X 1.000000e-003

End_of_Header

X_Value_1	Trace_1(V(2))	Comment
0.000000e+000	0.000000e+000	---
1.000000e-003	1.000000e-003	---
2.000000e-003	2.000000e-003	---
3.000000e-003	3.000000e-003	---
4.000000e-003	4.000000e-003	---
5.000000e-003	5.000000e-003	---
6.000000e-003	6.000000e-003	---
7.000000e-003	7.000000e-003	---
8.000000e-003	8.000000e-003	---
9.000000e-003	9.000000e-003	---
1.000000e-002	1.000000e-002	---
1.100000e-002	1.100000e-002	---
1.200000e-002	1.200000e-002	---
1.300000e-002	1.300000e-002	---
1.400000e-002	1.400000e-002	---
1.500000e-002	1.500000e-002	---
1.600000e-002	1.600000e-002	---

.....

2.198400e+001	2.198400e+001	---
2.198500e+001	2.198500e+001	---
2.198600e+001	2.198600e+001	---
2.198700e+001	2.198700e+001	---
2.198800e+001	2.198800e+001	---
2.198900e+001	2.198900e+001	---
2.199000e+001	2.199000e+001	---
2.199100e+001	2.199100e+001	---
2.199200e+001	2.199200e+001	---

2.199300e+001	2.199300e+001	---
2.199400e+001	2.199400e+001	---
2.199500e+001	2.199500e+001	---
2.199600e+001	2.199600e+001	---
2.199700e+001	2.199700e+001	---
2.199800e+001	2.199800e+001	---
2.199900e+001	2.199900e+001	---

Fichier Courant

LabVIEW Measurement

Writer_Version 0.92
 Reader_Version 1
 Separator Tab
 Multi_Headings Yes
 X_Columns Multi
 Time_Pref Relative
 Description Generated from Multisim
 Date 2020/07/17
 Time 09:10:28
 End_of_Header

Start_Special

Page_tab_name Temperature Sweep
 Page_title Testing the Solar Cell Modules_3
 End_Special

Start_Special

Graph name Temperature Sweep
 Left Axis LINEARLabel=Current (A)
 Bottom Axis LINEARLabel=dc
 End_Special

Channels 1
 Samples 22000
 Date 2020/07/17
 Time 09:10:28
 Y_Dimension Current
 Y_Unit_Label A
 X_Dimension dc
 X_Unit_Label -
 X0 0.000000e+000
 Delta_X 1.000000e-003
 End_of_Header

X_Value_1	Trace_1(I(VBGPV), Temperature=25 on vvbgpv)	Comment
0.000000e+000	3.800000e+000	---
1.000000e-003	3.799997e+000	---

2.000000e-003	3.799994e+000	---
3.000000e-003	3.799991e+000	---
4.000000e-003	3.799989e+000	---
5.000000e-003	3.799986e+000	---
6.000000e-003	3.799983e+000	---
7.000000e-003	3.799980e+000	---
8.000000e-003	3.799978e+000	---
9.000000e-003	3.799975e+000	---
1.000000e-002	3.799972e+000	---
1.100000e-002	3.799969e+000	---
1.200000e-002	3.799967e+000	---
1.300000e-002	3.799964e+000	---
1.400000e-002	3.799961e+000	---
1.500000e-002	3.799958e+000	---

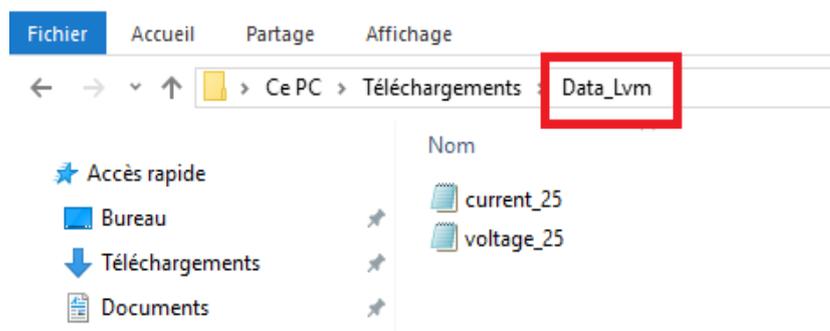
.....

2.199000e+001	-1.802752e+000	---
2.199100e+001	-1.804993e+000	---
2.199200e+001	-1.807235e+000	---
2.199300e+001	-1.809476e+000	---
2.199400e+001	-1.811718e+000	---
2.199500e+001	-1.813960e+000	---
2.199600e+001	-1.816201e+000	---
2.199700e+001	-1.818443e+000	---
2.199800e+001	-1.820684e+000	---
2.199900e+001	-1.822926e+000	---

3- Guide de génération de fichier lvm :

Etape 1 :

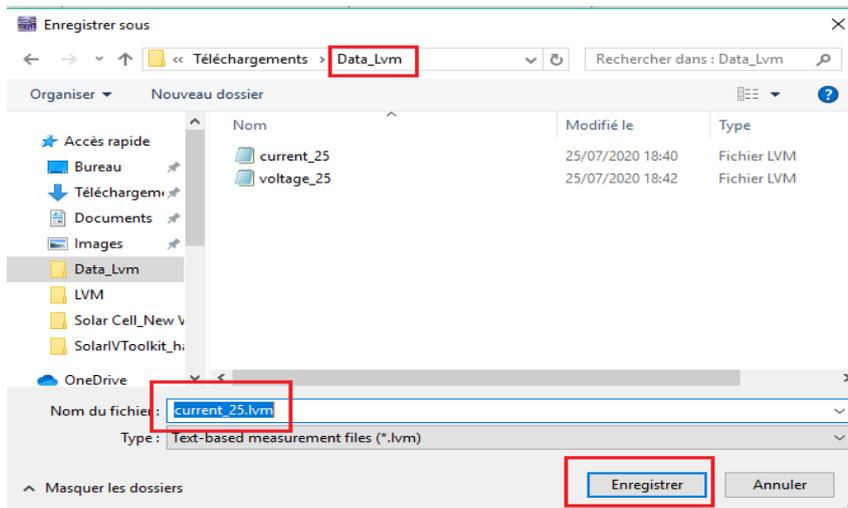
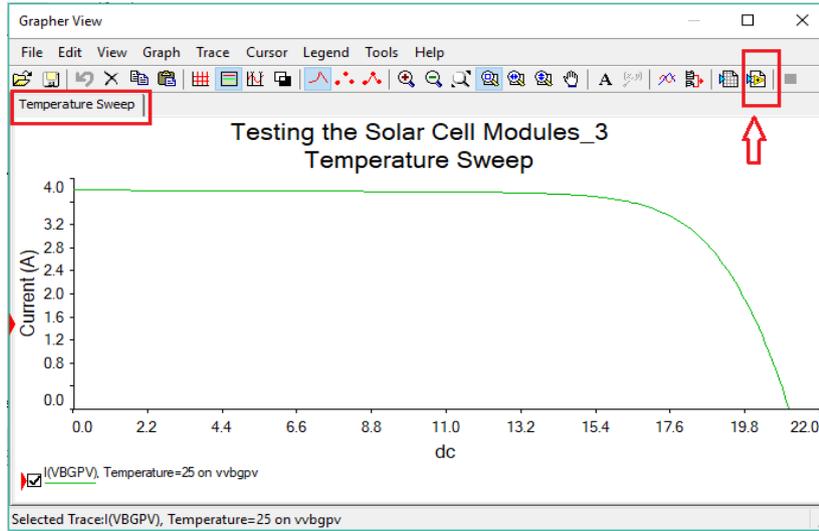
Créer un répertoire « Data_lvm » dans le répertoire de travail.

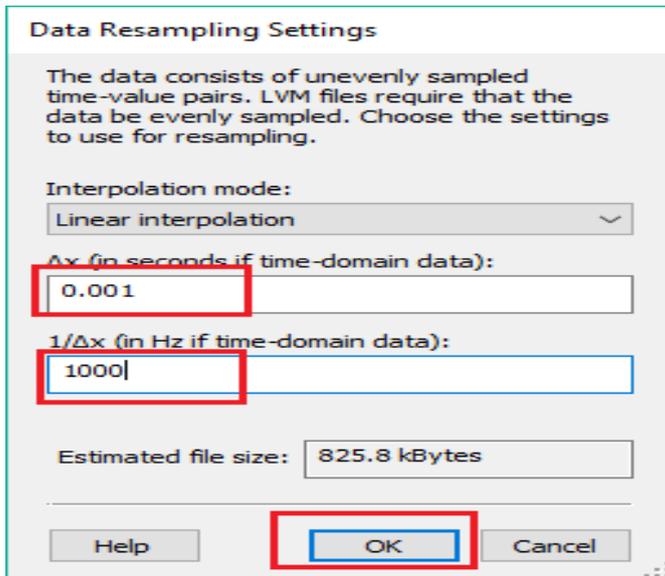


Etape 2 :

- Tracer la courbe I(V) du générateur MSW 60 comme indiqué dans le chapitre 2

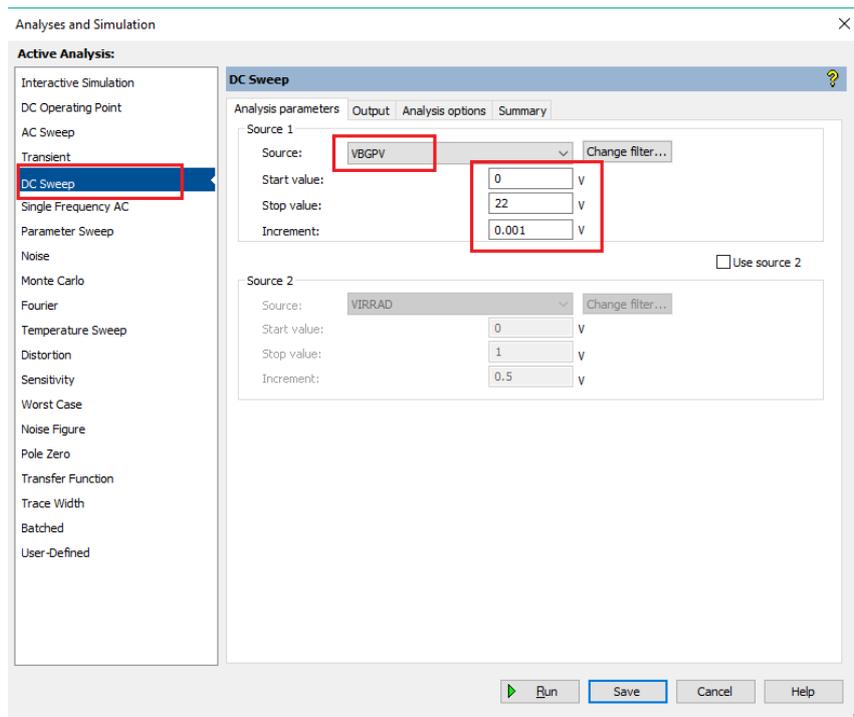
- b) Sauvegarder la courbe en utilisant « Save to measurement file » sous format lvm
- c) Confirmer la page choisie en appuyant sur Ok
- d) Fixer l'échantillonnage comme indiqué

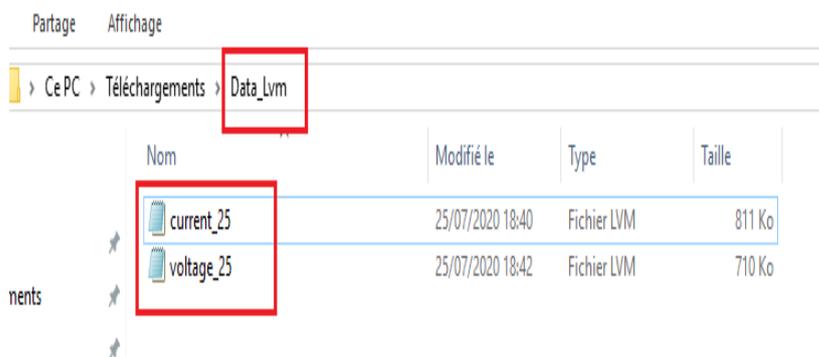
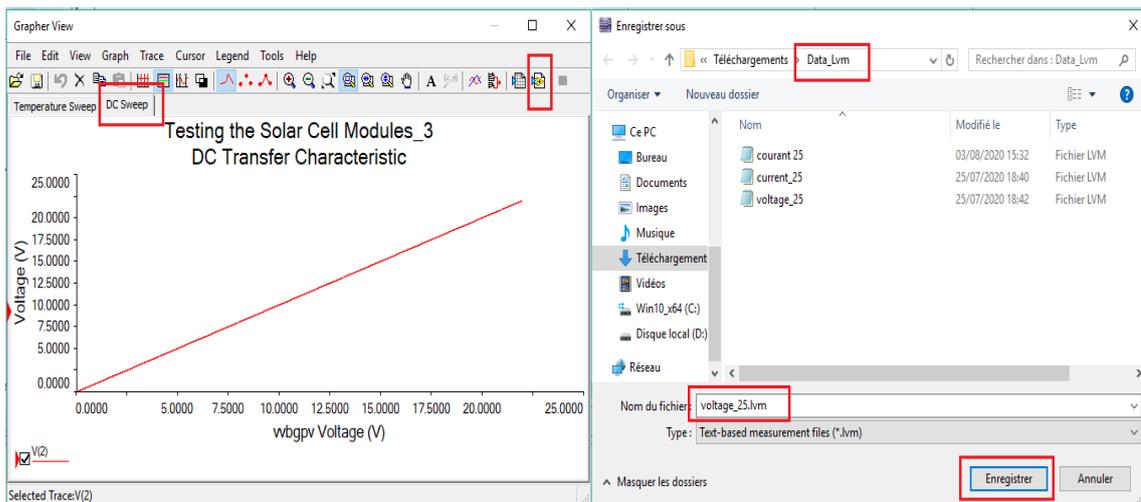
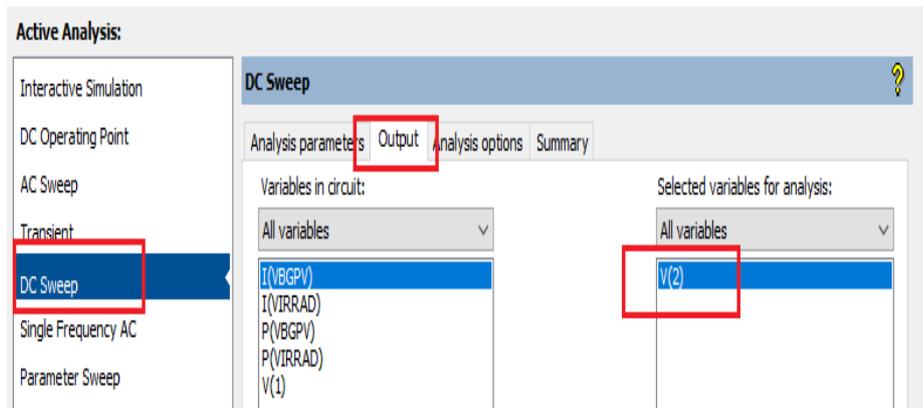




Etape 3 :

- Tracer la courbe Variation de la tension de sortie du générateur MSW 60 en utilisant la simulation "DC Sweep" et choisir sortie sur V(2)
- Répéter les sous étapes de (a) jusqu'à (d) de l'étape 2 pour enregistrer l'axe des X
- Vérifier que les deux fichiers de données Current_1.lvm et Voltage_1.lvm sont sauvegardés dans le répertoire "Data_lvm"





Etape 4 :

Une fois les deux fichiers sont sauvegardés, ils sont prêts à être exploités par le logiciel "SolarIVToolkit". Pour cela il faut aller au « **Guide d'exécution de l'exemple SolarIVToolkit** ».

Bibliographie

[1] THOMAS Mambrini, caractérisation de panneaux solaires photovoltaïque en conditions réelles d'implémentation et en fonction des différentes technologies, Thèse de doctorat, université PARIS- SUD, 2014.

[2] MISSOUM Mohamed, contribution de l'énergie photovoltaïque dans la performance énergétique de l'habitat à haute qualité énergétique en Algérie, mémoire de magister, UNIVERSITE HASSIBA BENBOULI, CHLEF, 2011.

[3] BAADJI Ahlem et CHERGUI Imène, extraction des paramètres du module photovoltaïque, diplôme de master académique, UNIVERSITEE MOHAMED BOUDIAF, M'SILA, 2018/2019.

[4] KHENFER Riad, Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques, Thèse de doctorat en sciences, UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF-1, ALGERIE, 2016/2017.

[5] BELAIDI LALOUNI Sofia, Cours Energies Solaire Photovoltaïque, UNIVERSITE de Bejaia, 2014/2015.

[6] KORICHI Taki Eddine, Modélisation et Commande d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique, Mémoire de Master, UNIVERSITE du MOHAMED BOUDIAF, M'SILA, 2016.

[7] AKIHIRO Oi, Design and Simulation of Photovoltaic Water Pumping System, Faculty of Cali-fornia Polytechnic State University, 2005

[8] CHEKIRED.F, Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA, mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.

[9] BOUGUERRA.T, Optimisation d'un système photovoltaïque : Application en continu et en alternatif, Mémoire Magister, UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE 1, 2014.

[10] ZAHAR Soria et MAKHLOUF Cheymaa, Etude et Simulation d'un générateur photovoltaïque Muni d'un convertisseur MPPT pour une Meilleure gestion énergétique, Mémoire de Master, UNIVERSITE du MOHAMED BOUDIAF, M'SILA, 2016/2017.

[11] AOUI. S, Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque, Mémoire Magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF-1 UFAS (ALGERIE), 2014

[12] BOUKHERS Djamil, Optimisation D'un Système D'énergie Photovoltaïque application au pompage, Mémoire Magister en électrotechnique, UNIVERSITE MENTOURI de CONSTANTINE, ALG2RIE, 2007.

[13] MSX-60 and MSX-64 Photovoltaic Modules 1998 Solarex, fiche technique

[14] MSX Laminates 1997 Solarex, fiche technique

[15] Ahmed A.EL TAYYAN, An approach to extract the parameters of solar cells from illuminated I-V curves using the Lambert W function, Turkish Journal of Physics, AL-Azhar University-GAZA, PALESTINE, 2015.

[16] Photovoltaic Cell I-V Characterization Theory and LabVIEW Analysis Code, Free downloadable library of LabVIEW, 2012

WEBOGRAPHIE :

- Site SOLAR GAIN, <https://solargaininc.com/introduction-to-photovoltaic-systems/>. Consulté AVRIL 2020.

- Site PV EDUCATION.ORG, <https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/the-sun>. Consulté AVRIL 2020.

- Site ENERGIE PLUS <https://energieplus-lesite.be/theories/climat8/ensoleillement-d8/>. Consulté AVRIL 2020 [en ligne]

- Site CNRS Archives des communiqués de presse <http://archives.cnrs.fr/presse/article/371>. Consulté AVRIL 2020.

- Site ENERGIE PLUS <https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaique6/effets-photoelectrique-et-electroluminescent/>. Consulté [en ligne] le 03 MARS 2020.

- Site PLANETE ENERGIES, publié le 02 AVRIL 2019, <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/la-cellule-photovoltaique-comment-ca-marche>. Consulté [en ligne] le 12 MARS 2020.

- Site HELLOWATT <https://www.hellowatt.fr/blog/fonctionnement-panneau-solaire-photovoltaique/>. Consulté le 28 MARS 2020.

- Site du DUALSUN <https://news.dualsun.com/technologie-solaire/rendement-production-panneau-solaire/>. Consulté le 17 MARS 2020.
- Site HELLOWATT <https://www.hellowatt.fr/blog/fonctionnement-panneau-solaire-photovoltaïque/>. Consulté le 17 MARS 2020.
- Patrick HOUÉE, forum des technologies, RESSOURCES POUR LES STI2D Une installation photovoltaïque en site isolé consulté [en ligne] AVRIL 2020 <https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/techniques/1358/1358-175-p32.pdf>. consulté [en ligne] AVRIL 2020
- Site de SOLARPEDIA, consulté avril 2020 [en ligne] http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Fichier:Sch_install_raccordee.jpg.
- Adrien Jolly, ingénieur Freelance en Système industriel et scientifique Labview, TestStand, LabWindows/CVI BANC de Test, Mesure, Contrôle, Qualité et supervision [en ligne] <http://www.ajolly.fr/fr/conseil-et-deloppement-mainmenu-27/19-LabVIEW.html>. Consulté JUIN 2020.
- Site REVIVER SOFT <https://www.reviversoft.com/fr/file-extensions/lvm>. Consulté 05 AOÛT 2020.

Ouvrages généraux :

- BOURSALI Wassila, Modélisation et simulation de l'influence de la résistance série sur les caractéristique I(V) P(V) D'une cellule photovoltaïque, Master en Physique, UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID-TELEMCEN ,20/06/2017.
- Fethi BENYAROU, Conception Assisté Par Ordinateur Des Systèmes Photovoltaïque Modélisation, Dimensionnement Et Simulation, Thèse De Doctorat D'état En Physique, UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID-TELEMCEN, 2004.
- Mansouri Samia et ABAR Zineb, Consultation et exploitation sous réseau des données d'une mini centrale photovoltaïque de 800 WC, Mémoire de Master, UNIVERSITE de BLIDA-01, 2012/2013.
- TP Energie solaire, master et environnement.
- Solar cell Analysis using LABVIEW.
- New Models For photovoltaic Cells in Multisim.