

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REpubLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
وزارة

التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –  
Faculté de TECHNOLOGIE



## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**En :** (Electrotechnique)

**Spécialité :** (Commandes Electriques)

**Par :** (M. BENAMAR Abderrahim et M. BAKHTI Walid)

### Sujet

## Identification des paramètres de différents panneaux photovoltaïques

Soutenu publiquement, le / / , devant le jury composé de :

Mme BENMANSOUR. S	MCB	Université de Tlemcen	Président
M BENHABIB. MC	Pr	Université de Tlemcen	Examineur
Mme BOURI. S	MCA	Université de Tlemcen	Encadreur
Mme ABED. H	Dr	Université de Tlemcen	Invitée

Année universitaire : 2022 /2023

## Résumé

Pour bien comprendre le comportement d'une cellule photovoltaïque, et être capable de simuler numériquement ses caractéristiques, à partir d'un modèle mathématique donné afin d'optimiser leur rendement, il faut d'abord identifier leurs paramètres. C'était l'objectif de ce travail. A cause de la complexité des méthodes de mesure dynamique, plusieurs méthodes d'extraction paramétrique ont été proposées auparavant, parmi lesquelles celles qui se basent sur les méthodes itératives qui est le cas de l'approche adoptée dans notre travail. Nous allons étudier deux méthodes pour la résolution des systèmes d'équations non linéaires à savoir la méthode de Newton-Raphson et la méthode explicite simplifiée pour l'identification des paramètres de la cellule solaire dans le cas d'une diode et deux diodes.

Mots clés

Panneaux photovoltaïques, Méthodes d'identification, Energie photovoltaïque

## Abstract

This study aims to understand a photovoltaic cell's behavior and to digitally simulate its characteristics from a given mathematical model. And in order to optimize its efficiency, we must first identify its parameters.

Because of the complexity of dynamic measurement methods, several parametric extraction methods have been proposed previously, among which those are based on iterative methods which is the case of the approach adopted in our work.

We will study two methods for the resolution of systems of nonlinear equations, namely the Newton-Raphson method and the simplified explicit method for the identification of solar cell parameters in the case of one diode and two diodes.

Keywords

Photovoltaic panels, Identification methods, Photovoltaic energy

## ملخص

أجل من معين رياضي نموذج من ، عدديا خصائصها محاكاة على قادرا تكون ولكي ، كامل بشكل الكهروضوئية الخلية سلوك لفهم الاستخراج طرق من العديد اقتراح تم ، العمل هذا من الهدف هو هذا كان .معلماتها تحديد أولا الضروري من ، كفاءتها تحسين لحل طريقتين ندرس سوف .عملنا في المعتمد النهج حالة هي التي التكرارية الطرق على القائمة تلك ذلك في بما ، قبل من البارامترية حالة في الشمسية الخلايا معلمات لتحديد المبسطة الصريحة والطريقة رافسون نيوتن طريقة وهما الخطية غير المعادلات أنظمة والثنائيين الواحد الثنائي الصمام

الرئيسيه الكلمات

الكهروضوئية الطاقة ، الشمسية الخلايا معلمات تحديد طرق ، الكهروضوئية الألواح

---

## Dedicaces 1

Avec l'aide de Dieu tout puissant, nous avons achevé ce modeste travail que je dédie :

- à mes très chers parents, pour leur soutien matériel et moral, en espérant que je puisse leur rendre le minimum de bonheur qu'ils m'ont offert ;
- Mon cher frère Abdelfetah et ma chère sœur Bouchra
- à mes chères amies proches ,BILAL , NADJI , SOHEIB ,WANIS , MOUAD , IMAD
- à mon binome Walid .
- Enfin à toute la promotion Electrotechnique, option Commande électrique de l'année 2022-2023 .

BENAMAR ABDERRAHIM

Tlemcen, le Juin 2023

---

## Dedicaces 2

**J**E dédie ce modeste travail á tout ceux qui ont contribué de prés ou de loin à la réalisation de ce présent projet, ainsi je le dédie á :

- A mes très chers parents, que dieu les garde et les Protége pour leurs soutien ;
- A mon frère Youcef et Imad et ma unique sœur Souhila et mes neveux Wassim et Mouad et ma nièce Meriem que j'adore ;
- A toutes familles Bakhti ;
- A mon binome Abderrahim ;
- Aux chers amis : Omar , Nedjmou , Mohammed , Ahmed et Oussama ;
- Enfin à toute la promotion Électrotechnique , Option Commande électrique de l'année 2022-2023

BAKHTI WALID  
Tlemcen, le Juin 2023

---

## Remerciements

Ce document présente les travaux effectués dans le cadre de notre projet de fin d'étude de Master au Département de Génie Électrique et Électronique de la Faculté de Technologie de l'Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen.

En premier lieu, nous tenons à exprimer notre gratitude à notre encadrant, Docteur BOURI Sihem pour nous avoir proposé et dirigé ce travail, nous la remercions pour nous avoir fait profiter de son expérience, pour orientations qui nous ont permis de mener à bien ce travail.

Nous sommes sensibles à l'honneur que nous a fait Mme BENMANSOUR , pour avoir accepté de présider et de nous honorer de sa présence au sein du jury de soutenance du présent mémoire ; qu'elle trouve ici l'expression de notre reconnaissance et de notre respect.

Nous tenons également à adresser nos vifs remerciements au Professeur BENHABIBE Choukri, nous le remercions chaleureusement pour avoir accepté d'examiner le présent mémoire et pour ses observations et remarques pertinentes et constructives.

Enfin, nous tenons également à adresser nos vifs remerciements Melle ABED Hyzia de nous avoir aidé dans ce mémoire et nous honorer de sa présence comme invité.

Merci enfin à tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont aidé et donc ont contribué au succès de ce travail.

***BENAMAR ABDERRAHIM      BAKHTI WALID***  
*Tlemcen, le 23 Juin 2023*

# CONTENTS

DEDICACES 1	i
DEDICACES 2	ii
REMERCIEMENTS	iii
Liste des acronymes	viii
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
<b>I GÉNÉRALITÉS SUR LES PHOTOVOLTAÏQUE</b>	<b>3</b>
I.1 INTRODUCTION	4
I.2 HISTORIQUE SUR L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE	4
I.3 L'ÉNERGIE SOLAIRE	5
I.3.1 Unités utilisées	5
I.3.2 Normalisation	6
I.4 POSITION DU SOLEIL	7
I.4.1 Coordonnées équatoriales	8
I.4.2 Coordonnées horizontales du soleil	8
I.4.2-a L'azimut du soleil ( $\alpha$ )	8
I.4.2-b La hauteur du soleil	9
I.5 SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE	10
I.6 AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS	11
I.6.1 Avantages	11
I.6.2 Inconvénients	12
I.7 PRINCIPE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE	12
I.8 LA COMPOSITION D'UN PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE	13
I.9 DURÉE DE VIE D'UN PANNEAU SOLAIRE	14
I.10 LES PRINCIPAUX TYPES DE CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES	14
I.10.1 La cellule monocristalline	14
I.10.2 La cellule polycristalline	15
I.10.3 La cellule au silicium amorphe	15
I.10.4 La cellule photovoltaïque tandem	16
I.10.5 La cellule photovoltaïque CIGS	16
I.10.6 La cellule en couche mince de tellure de cadmium	17
I.10.7 La cellule photovoltaïque multi-jonction	17
I.11 MODÉLISATION D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE	18

I.11.1	Modèle d'une cellule photovoltaïque à une diode idéal . . . . .	18
I.11.1-a	Modèle d'une cellule photovoltaïque idéale . . . . .	18
I.11.1-b	Modèle d'une cellule photovoltaïque réelle [15] . . . . .	19
I.11.2	Modèle d'une cellule photovoltaïque á double diode . . . . .	20
I.12	CONCLUSION . . . . .	22
<b>II</b>	<b>MÉTHODES D'IDENTIFICATION</b>	<b>23</b>
II.1	INTRODUCTION . . . . .	24
II.2	MÉTHODES D'IDENTIFICATIONS . . . . .	24
II.2.1	Méthodes analytiques . . . . .	24
II.2.2	Méthode de modèle de référence . . . . .	26
II.2.3	La méthode de Newton-Raphson . . . . .	27
II.2.4	Méthode explicite simplifiée . . . . .	28
II.2.5	Méthode de cinq points: . . . . .	29
II.2.6	Méthode de la pente ( $V_{co}, 0$ ) . . . . .	30
II.3	CONCLUSION . . . . .	31
<b>III</b>	<b>SIMULATION ET RÉSULTATS</b>	<b>32</b>
III.1	INTRODUCTION . . . . .	33
III.2	MÉTHODES D'EXTRACTION PROPOSÉES . . . . .	33
III.2.1	Méthode explicite simplifiée . . . . .	33
III.2.1-a	Organigramme . . . . .	33
III.2.1-b	Résultats pour une Diode . . . . .	34
III.2.1-c	Résultats pour deux Diodes . . . . .	39
III.2.1-d	Comparaison entre une diode et deux diodes par la méthode explicite Simplifiée . . . . .	43
III.2.2	Méthode Newton-Raphson . . . . .	44
III.2.2-a	Organigramme . . . . .	44
III.2.2-b	Résultats pour une diode: . . . . .	45
III.2.2-c	Résultats pour deux diodes . . . . .	49
III.2.2-d	Comparaison entre une diode et deux diodes par la méthode Newton Raphson : . . . . .	52
III.2.3	Comparaison entre la méthode Explicite Simplifiée et la méthode Newton Raphson . . . . .	53
III.3	CONCLUSION: . . . . .	54
	CONCLUSION GÉNÉRALE	<b>55</b>
	BIBLIOGRAPHIE	<b>56</b>
	ANNEXE	<b>60</b>

# LIST OF FIGURES

I.1	Représentation d'un disque recevant une puissance solaire égale à celle reçue par la Terre [21]. . . . .	5
I.2	Source:cellules solaire [21] . . . . .	6
I.3	carte du monde d'ensoleillement moyen annuel [21] . . . . .	7
I.4	Coordonnées horizontales du soleil [22] . . . . .	9
I.5	Système de coordonnées horizontales [23] . . . . .	10
I.6	les divers éléments du système photovoltaïque [24] . . . . .	11
I.7	principe de l'énergie photovoltaïque [25] . . . . .	13
I.8	La composition d'un panneau photovoltaïque [26] . . . . .	13
I.9	La cellule monocristalline [27] . . . . .	15
I.10	La cellule polycristalline [27] . . . . .	15
I.11	La cellule au silicium amorphe [27] . . . . .	15
I.12	La cellule photovoltaïque tandem [27] . . . . .	16
I.13	La cellule photovoltaïque CIGS [27] . . . . .	16
I.14	La cellule en couche mince de tellurure de cadmium [27] . . . . .	17
I.15	La cellule photovoltaïque multi-jonction [27] . . . . .	17
I.16	Schéma équivalent d'une cellule PV idéale [28] . . . . .	18
I.17	Schéma équivalent d'une cellule PV réelle [29] . . . . .	19
I.18	Schéma équivalent d'une cellule PV à double diode [29] . . . . .	21
II.1	les deux points sur la courbe I-V [30] . . . . .	25
II.2	Schéma de principe de la méthode de modèle de référence [30] . . . . .	26
II.3	Les cinq points sur la courbe I-V [30] . . . . .	30
II.4	Le calcul de pente au point de tension du circuit ouvert [30] . . . . .	31
III.1	Organigramme de la méthode explicite simplifiée . . . . .	34
III.2	Caractéristique I(V) . . . . .	35
III.3	Caractéristique P(V) . . . . .	35
III.4	Influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V) . . . . .	37
III.5	Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V) . . . . .	37
III.6	Influence de la Température sur la Caractéristique P(V) . . . . .	38
III.7	Influence de la Température sur la Caractéristique I(V) . . . . .	38
III.8	Caractéristique I(V) . . . . .	39
III.9	Caractéristique P(V) . . . . .	40
III.10	Influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V) . . . . .	41
III.11	Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V) . . . . .	41
III.12	Influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V) . . . . .	42



---

III.13	Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V)	42
III.14	Caractéristique P(V)	43
III.15	Caractéristique I(V)	43
III.16	Organigramme de la méthode Newton Raphson	44
III.17	Caractéristique I(V)	45
III.18	Caractéristique P(V)	46
III.19	Influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V)	47
III.20	Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V)	47
III.21	Influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V)	48
III.22	Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V)	48
III.23	Caractéristique I(V)	49
III.24	Caractéristique P(V)	50
III.25	Influence de l'éclairement sur la Caractéristique P(V)	51
III.26	Influence de l'éclairement sur la Caractéristique P(V)	51
III.27	Caractéristique I(V)	52
III.28	Caractéristique P(V)	52
III.29	Caractéristique I(V)	53
III.30	Caractéristique P(V)	54

---

## Liste des Acronymes

Acronyme	Signification
PV	Panneau Photovoltaïque
MPP	Maximum Power Point
MPPT	Maximum Power Point Tracking
STC	Conditions d'essai standard
P&	Perturbe and Observe
$I_{PH}$	Courant photovoltaïque
$I_d$	Courant de la diode
$V_{PV}$	Tension aux bornes du PV
$V_{PV}$	Tension aux bornes du PV
$I_{sh}$	Le courant de la branche parallèle du PV
$I_s$	Le courant de saturation inverse
$I_{sn}$	Le courant de saturation
$V_t$	La tension thermique
$N_s$	Le nombre de cellules connecté en série.
$N_p$	Le nombre de cellules connecté en parallèle.
$V_{co}$	La tension en circuit ouvert de la cellule solaire,
$I_{cc}$	Le courant de court circuit de la cellule solaire,
$T_{ref}$	la température de la cellule à conditions d'essai standard
$G_{ref}$	l'irradiance de la cellule à conditions d'essai standard
$E_{g0}$	la bande interdite d'énergie du semi-conducteur
n	Facteur d'idealité de la diode
$I_{PV}$	Courant de sortie du PV
$V_d$	Tension aux bornes de la diode
$V_s$	Tension d'entrée de l'Hacheur parallèle.
$V_o$	Tension de sortie de l'Hacheur parallèle.

---

## Introduction générale

Ces dernières décennies, l'énergie électrique est devenue indispensable et très utilisée dans les différents domaines, des plus grandes usines aux plus petits appareils électroniques. Pour produire cette énergie, plusieurs techniques sont utilisées, mais la méthode la plus importante, et celle qui nous concerne dans ce mémoire, est la méthode basée sur le principe de la photovoltaïque, elle a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable.

L'électricité Photovoltaïque connaît un intérêt ces dernières années sur le plan scientifique et économique. Cet intérêt est dû à la demande croissante d'énergie dans la plupart des secteurs industriels, mais aussi aux obligations environnementales. Les cellules photovoltaïques sont au cœur de la chaîne de production d'électricité.

Dans la littérature, plusieurs méthodes ont été proposées pour l'extraction des paramètres, chacune de ces méthodes, présente des inconvénients, soit au niveau de la complexité de l'utilisation et la précision, soit au niveau de la convergence et la rapidité. Elles peuvent être réparties comme suit:

- Méthodes Graphiques
- Méthodes Analytiques
- Méthodes numériques

Ce travail présente l'identification des paramètres d'un panneau photovoltaïque d'un modèle à une diode et deux diodes avec les deux méthodes, la méthode de Newton-Raphson et la méthode explicite simplifiée. Notre travail a été réparti comme suit:

Dans le premier chapitre, on va décrire les notions essentielles sur l'énergie solaire. Puis, on va citer les différents types des cellules photovoltaïques. Au final, on va faire la modélisation d'une cellule photovoltaïque dans le cas d'une diode et deux diodes.

Le deuxième chapitre consistera à présenter les différentes méthodes d'identification des paramètres d'un panneau photovoltaïque.

Le troisième chapitre aura comme objectif de comparer entre les deux méthodes que nous allons travailler avec pour les deux cas, une diode et deux diodes et les résultats

de la simulation des programmes permettront d'identifier les paramètres du panneau photovoltaïque.

## Chapter I

---

# Généralités sur les photovoltaïque

---

### SOMMAIRE

---

I.1	INTRODUCTION . . . . .	4
I.2	HISTORIQUE SUR L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE . . . . .	4
I.3	L'ÉNERGIE SOLAIRE . . . . .	5
I.3.1	Unités utilisées . . . . .	5
I.3.2	Normalisation . . . . .	6
I.4	POSITION DU SOLEIL . . . . .	7
I.4.1	Coordonnées équatoriales . . . . .	8
I.4.2	Coordonnées horizontales du soleil . . . . .	8
I.5	SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE . . . . .	10
I.6	AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS . . . . .	11
I.6.1	Avantages . . . . .	11
I.6.2	Inconvénients . . . . .	12
I.7	PRINCIPE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE . . . . .	12
I.8	LA COMPOSITION D'UN PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE . . . . .	13
I.9	DURÉE DE VIE D'UN PANNEAU SOLAIRE . . . . .	14
I.10	LES PRINCIPAUX TYPES DE CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES . . . . .	14
I.10.1	La cellule monocristalline . . . . .	14
I.10.2	La cellule polycristalline . . . . .	15
I.10.3	La cellule au silicium amorphe . . . . .	15
I.10.4	La cellule photovoltaïque tandem . . . . .	16
I.10.5	La cellule photovoltaïque CIGS . . . . .	16
I.10.6	La cellule en couche mince de tellure de cadmium . . . . .	17
I.10.7	La cellule photovoltaïque multi-jonction . . . . .	17
I.11	MODÉLISATION D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE . . . . .	18
I.11.1	Modèle d'une cellule photovoltaïque à une diode idéal . . . . .	18
I.11.2	Modèle d'une cellule photovoltaïque á double diode . . . . .	20
I.12	CONCLUSION . . . . .	22

---

## I.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous procéderons à une brève synthèse des énergies renouvelables, en nous concentrant spécifiquement sur l'énergie solaire photovoltaïque. Nous examinerons en profondeur le processus de transformation du rayonnement solaire en énergie électrique, ainsi que la technologie sous-jacente aux panneaux solaires, leurs propriétés électriques et leur impact sur les facteurs environnementaux tels que la chaleur. Enfin, nous dresserons une liste exhaustive des défauts des panneaux solaires afin de mieux les identifier. Cela conclura notre exploration approfondie de ce sujet.

## I.2 Historique sur l'énergie photovoltaïque

En 1839, le scientifique français Alexandre Edmond Becquerel a découvert l'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la capacité de certains matériaux à produire de l'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière du soleil. Cette découverte est à la base du développement de l'énergie solaire photovoltaïque [1].

Dans les années 1880, le scientifique américain Charles Fritts a construit la première cellule solaire à base de sélénium. Cette cellule solaire a été la première à convertir la lumière solaire directement en électricité [2].

Au cours des années 1950 et 1960, les recherches ont porté sur l'utilisation de nouveaux matériaux pour améliorer l'efficacité des cellules solaires. C'est à cette époque que les cellules solaires en silicium ont été développées et ont commencé à être produites en série [3].

Dans les années 1970, le coût des cellules solaires a commencé à baisser et la production de panneaux solaires a augmenté, notamment pour les applications spatiales. Les premières stations spatiales utilisant des panneaux solaires ont été lancées dans les années 1970, marquant ainsi l'expansion de l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque en dehors de la Terre [4].

Dans les années 1980, les gouvernements et les entreprises ont commencé à investir massivement dans la recherche et le développement de l'énergie solaire photovoltaïque. Des technologies nouvelles et plus efficaces ont été développées pour augmenter la production d'électricité à partir des cellules solaires et pour réduire les coûts de production [5].

Depuis le début des années 2000, l'énergie solaire photovoltaïque connaît une croissance exponentielle, avec des avancées technologiques constantes pour améliorer l'efficacité et réduire les coûts. L'installation de panneaux solaires est devenue plus abordable et accessible pour les particuliers, les entreprises et les gouvernements, ce qui a contribué à une adoption plus large de cette technologie [6].

## I.3 L'énergie solaire

L'énergie solaire est une forme d'énergie renouvelable qui utilise la lumière du soleil pour produire de l'électricité ou de la chaleur. C'est une source d'énergie propre, abondante et disponible dans le monde entier. L'énergie solaire est de plus en plus utilisée pour répondre aux besoins énergétiques de la société, notamment pour la production d'électricité, le chauffage des bâtiments, l'eau chaude et la cuisson. Elle est également utilisée dans des applications plus spécialisées, telles que la désalinisation de l'eau et l'alimentation des satellites.

### I.3.1 Unités utilisées

- **L'éclairement ou irradiance:** est défini comme une puissance reçue par une surface. Il s'exprime en  $W/m^2$  (watt par mètre carré). Le S.I. (système international d'unités) recommande d'utiliser le symbole E.
- **L'irradiation ou rayonnement:** est l'énergie reçue par une surface. Elle s'exprime en  $Jm^{-2}$  (joule par mètre carré). L'ISES (International Solar Energy Society) recommande le symbole H. D'autres unités plus courantes sont le  $Wh/m^2$  (wattheure par mètre carré) bien que ce dernier ne doive pas être utilisé puisque n'appartenant pas au système international d'unités (SI).

Comme le montre la figure I.1, Le disque fictif, de même rayon  $R_T$  que la Terre, est situé à la même distance du Soleil que la Terre.

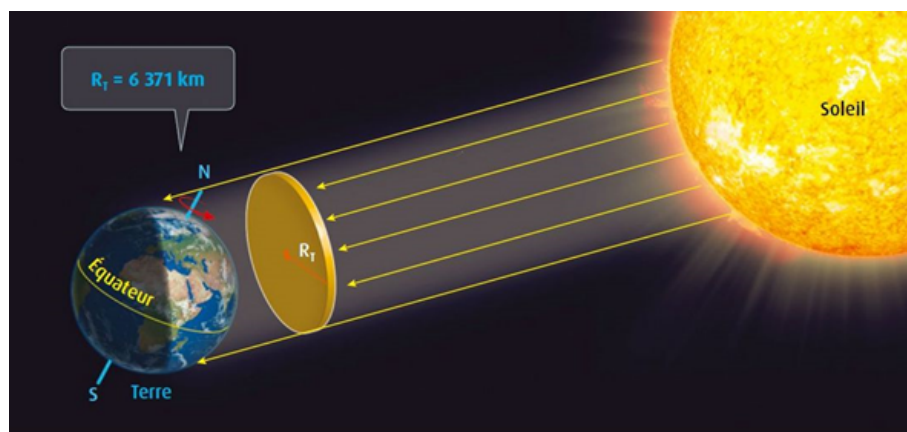


Figure I.1: Représentation d'un disque recevant une puissance solaire égale à celle reçue par la Terre [21].

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne Terre-soleil de 150 Millions de km), c'est ce que l'on appelle la constante solaire égale à  $1367W/m^2$ . La part d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air AM.

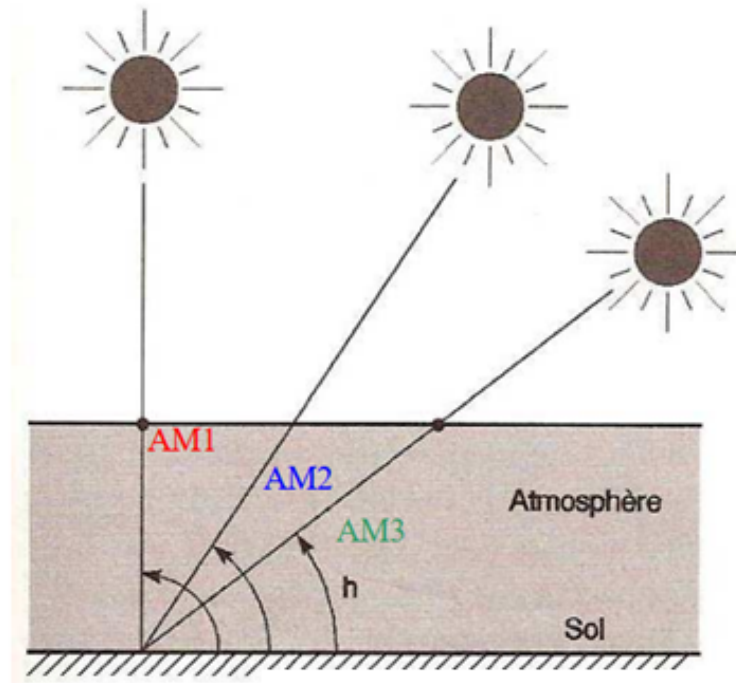


Figure I.2: Source:cellules solaire [21]

Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de  $1000W/m^2$  et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps.

Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith (correspondant à une inclinaison du soleil de  $45^\circ$  par rapport au zénith). Le "G" représente le rayonnement "global" incluant rayonnement direct et rayonnement diffus et la lettre "D" tient compte seulement du rayonnement direct [7].

### I.3.2 Normalisation

Les conditions standards de qualification des modules photovoltaïques sont : un spectre AM1.5 sous un éclairement de  $1000W/m^2$  et une température de  $25^\circ C$ . Les constructeurs de panneaux solaires spécifient les performances de leur matériel dans les conditions normalisées citées ci-dessus (S.T.C. : Standard Test Conditions)



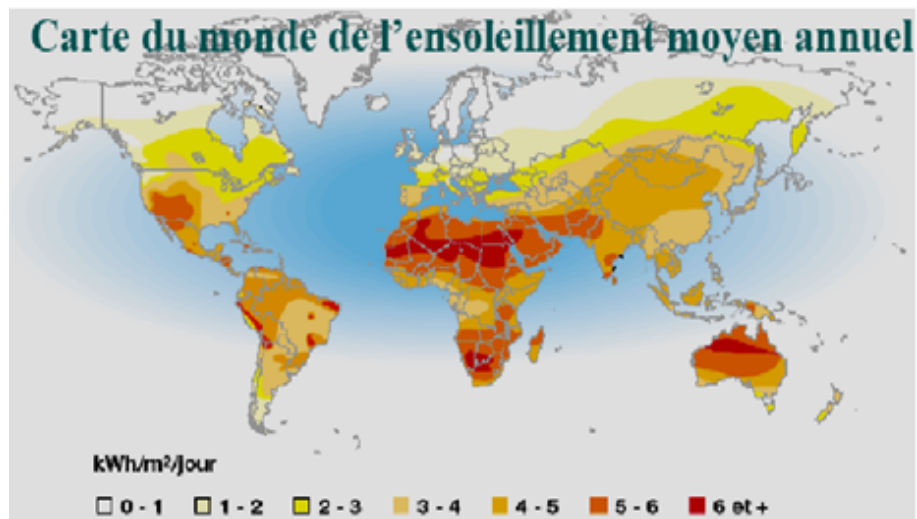


Figure I.3: carte du monde d'ensoleillement moyen annuel [21]

## I.4 Position du soleil

La position du soleil est un facteur important à considérer lors de l'installation des panneaux photovoltaïques. L'angle d'inclinaison et l'orientation des panneaux doivent être optimisés pour capter le maximum de rayonnement solaire possible.

Selon une étude réalisée par le Laboratoire National des Energies Renouvelables des Etats-Unis (NREL), l'angle d'inclinaison idéal des panneaux photovoltaïques varie en fonction de la latitude géographique du site d'installation. Pour une latitude de 30 degrés, l'angle d'inclinaison optimal est de 30 degrés, tandis que pour une latitude de 40 degrés, l'angle idéal est de 35 degrés.

En ce qui concerne l'orientation des panneaux, ils doivent être orientés vers le sud dans l'hémisphère nord et vers le nord dans l'hémisphère sud pour maximiser l'exposition au soleil.

Plusieurs études ont été menées sur l'impact de la position du soleil sur le rendement des panneaux photovoltaïques. Selon une étude réalisée par l'Université de Warwick, l'orientation optimale des panneaux peut augmenter le rendement de 15 à 20 par rapport à une orientation aléatoire.

En conclusion, la position du soleil est un facteur important à considérer lors de l'installation des panneaux photovoltaïques pour assurer un rendement maximal. Les études ont démontré que l'angle d'inclinaison et l'orientation optimale peuvent avoir un impact significatif sur le rendement des panneaux [8].

### I.4.1 Coordonnées équatoriales

Les coordonnées équatoriales sont un système de coordonnées utilisé en astronomie pour localiser des objets dans le ciel. Elles sont basées sur la projection de la sphère céleste sur un plan équatorial, qui est un plan perpendiculaire à l'axe de rotation de la Terre [9].

Le système de coordonnées équatoriales est basé sur deux paramètres principaux :

- **éclinaison solaire ( $\delta$ )** : C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan équatorial. La déclinaison du soleil varie quotidiennement selon la relation

$$\delta = 23.45 \cdot \sin \left[ \frac{360}{365} \cdot (J - 80) \right] \quad (\text{I.1})$$

Avec : J le numéro du jour de l'année compté à partir du 1er janvier, c.-à-d. varie de 1 à 365 ou 366 selon l'année.

- **L'angle horaire (H)** : C'est l'angle que font sur le plan équatorial les projections de la direction du soleil et de la direction du sud pour le lieu considéré. Il rend compte de la rotation quotidienne de la terre autour de l'axe des pôles et on a la relation:

1 heure de temps =  $15^\circ$  d'angle horaire

$H < 0$  le matin

$H > 0$  après midi

$H = 0$  à midi

### I.4.2 Coordonnées horizontales du soleil

#### I.4.2-a L'azimut du soleil ( $\alpha$ )

C'est l'angle que fait sur le plan horizontal la projection de la direction du soleil avec la direction du sud. Cet angle ( $\alpha$ ) est noté avec les mêmes conventions que l'azimut du plan  $\alpha$  [10].

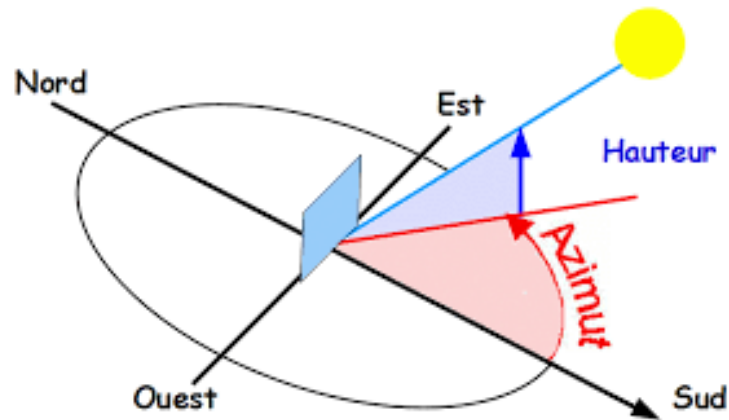


Figure I.4: Coordonnées horizontales du soleil [22]

#### I.4.2-b La hauteur du soleil

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan horizontal. La hauteur du soleil varie à chaque instant de la journée et de l'année selon la relation suivante :

$$\sin(h) = \cos(\delta) \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(H) + \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) \quad (\text{I.2})$$

$\varphi$ : Latitude du lieu

Varie entre 90 et -90

Zénith :  $h = +90$

Nadir :  $h = -90$

$h > 0$  : correspond au jour

$h < 0$  : correspond à la nuit

$h = 0$  : correspond au lever et au coucher du soleil

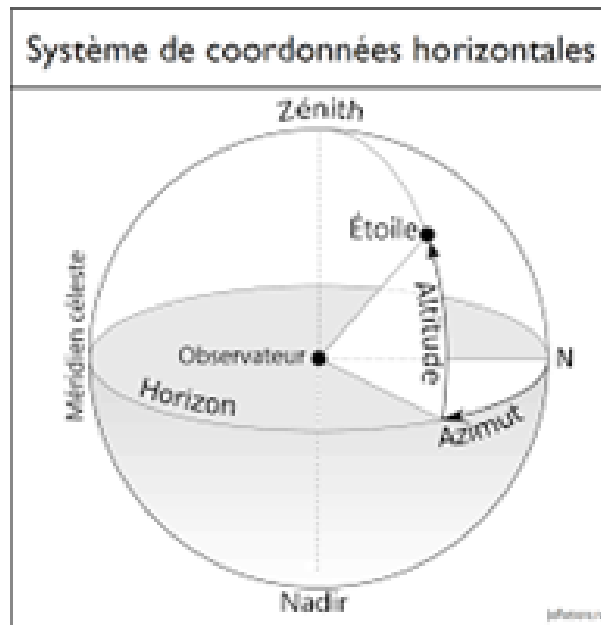


Figure I.5: Système de coordonnées horizontales [23]

## I.5 Système photovoltaïque

Bien qu'il soit fondamental, le module photovoltaïque à lui seul ne peut pas faire grand chose, pour répondre à un besoin défini, il faut l'associer à un système complet correspondant à une application bien spécifique. Un système photovoltaïque est donc constitué d'un générateur, généralement associé à un ou plusieurs des éléments suivants [11] :

- Un système d'orientation ou de suivi (rencontré assez rarement sous nos latitudes),
- Une gestion électronique (stockage, mise en forme du courant, transfert de l'énergie),
- Un stockage palliant la nature aléatoire de la source solaire,
- Un convertisseur DC/AC
- Une charge en courant continu basse tension ou en courant alternatif standard.

Les systèmes PV les plus couramment utilisés sont :

- Soit directement en courant continu
- Soit en courant alternatif par l'intermédiaire d'un convertisseur continu - alternatif (onduleur)

Les systèmes à couplage direct sans batterie (fonctionnement dit aussi "au fil du soleil").

Les appareils d'utilisation sont branchés soit directement sur le générateur solaire, soit, éventuellement, par l'intermédiaire d'un convertisseur continu - continu (adaptateur d'impédance).

Pour les systèmes sans batterie, il y a possibilité d'avoir recours à une forme de stockage qui ne soit pas de nature électrochimique

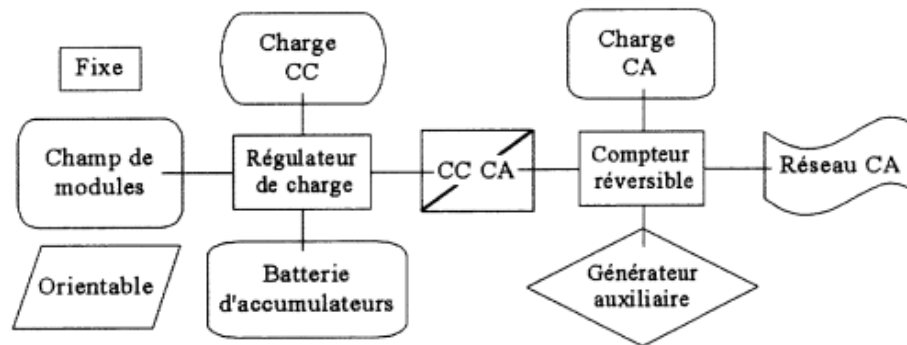


Figure I.6: les divers éléments du système photovoltaïque [24]

Les systèmes connectés au réseau local par l'intermédiaire d'un onduleur piloté à la fréquence du réseau, le réseau servant de stockage.

La Figure I.6 représente symboliquement les divers éléments du système le plus général. Dans la pratique, bien sûr, les systèmes utilisent les éléments appropriés au type de charge et aux conditions locales.

## I.6 Avantages et inconvénients

### I.6.1 Avantages

Avantages de l'énergie solaire

- Énergie renouvelable  
Malgré sa durée de vie limitée, à l'échelle humaine, le soleil est considéré comme étant une source d'énergie inépuisable.
- Respect de l'environnement et diminution de la pollution  
L'électricité et l'eau chaude sanitaire produites par l'énergie solaire n'émettent pas de gaz à effet de serre. Par ailleurs, l'énergie solaire permet de réduire l'utilisation des énergies fossiles, qui sont nocives pour l'environnement. C'est pour ces raisons qu'elle est considérée comme étant une énergie propre.
- Idéale pour les sites isolés  
Lorsque l'accès au réseau électrique est compliqué, l'installation de capteurs solaires ou de panneaux photovoltaïques peut s'avérer être une très bonne option.
- Aucune nuisance sonore  
Par rapport aux éoliennes et à d'autres technologies renouvelables, les installations de panneaux solaires n'émettent aucun bruit puisqu'aucune pièce mobile n'est impliquée.

## I.6.2 Inconvénients

Inconvénients de l'énergie solaire

- Une moins bonne efficacité énergétique  
En comparaison avec d'autres sources d'énergie, telles que le nucléaire, il y a une certaine faiblesse entre l'apport en énergie reçue et le volume d'énergie électrique obtenue. Néanmoins, ce dernier vous permet de faire de belles économies, ce qui reste un atout non négligeable
- Un rendement et une performance limités  
La performance d'un panneau solaire dépend de l'ensoleillement, du type de panneau et de l'orientation. Au maximum, il permet un rendement de 80% à 90%. En conséquence, la solution idéale est d'opter pour une solution qui puisse stocker l'énergie avant de la redistribuer quand vous le souhaitez. C'est donc le cas de nos panneaux solaires portables EcoFlow, qui, associés à nos batteries solaires, vous permettent non seulement de collecter l'énergie, mais aussi de l'emmagasiner pour pouvoir l'utiliser à tout moment. Dans ce sens, nous mettons à votre disposition nos kits solaires EcoFlow, une solution tout-en-un vous permettant de profiter d'une solution durable et économique, directement depuis chez vous ou depuis l'extérieur.

## I.7 Principe d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est constituée d'un matériau semi-conducteur absorbant l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Son principe de fonctionnement est basé sur les propriétés d'absorption du rayonnement lumineux par des matériaux semi-conducteurs.

Le choix des matériaux utilisés pour concevoir des cellules PV se fait en fonction des propriétés physiques de certains de leurs électrons susceptibles d'être libérés de leurs atomes lorsqu'ils sont excités par des photons provenant du spectre solaire et possédant une certaine quantité d'énergie selon leurs longueurs d'onde. Une fois libérés, ces charges se déplacent dans le matériau formant globalement un courant électrique de nature continu (DC). La circulation de ce courant donne alors naissance à une force électromotrice (fém.) aux bornes du semi-conducteur correspondant ainsi au phénomène physique appelé effet photovoltaïque.

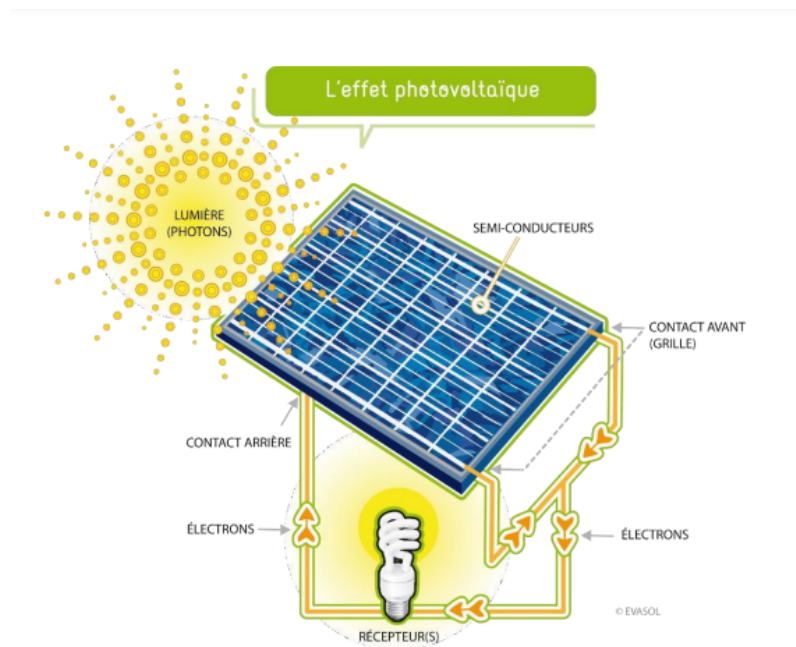


Figure I.7: principe de l'énergie photovoltaïque [25]

## I.8 La composition d'un panneau photovoltaïque

Les panneaux solaires traditionnels sont composés de plusieurs strates permettant de protéger les cellules photovoltaïques des agressions extérieures [13].

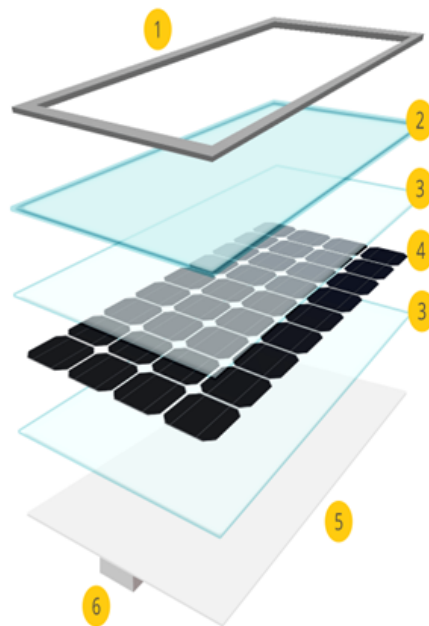


Figure I.8: La composition d'un panneau photovoltaïque [26]

**1. Le cadre en aluminium :**

Utilisé pour solidifier l'ensemble, le cadre permet la manutention et la fixation du panneau.

**2. Le verre de protection:**

Pour protéger les cellules solaires photovoltaïques des chocs comme la grêle.

**3. Film d'encapsulation EVA :**

Ce film est une résine transparente qui enrobe les cellules photovoltaïques (mise en sandwich). Cette encapsulation est hermétique, elle empêche l'air et l'humidité d'atteindre la cellule photovoltaïque et doit résister le plus longtemps possible aux radiations solaires.

**4. Les cellules solaires photovoltaïques :**

Les cellules transforment le rayonnement solaire en électricité, tous les éléments qui les entourent assurent leur protection.

**5. La membrane en tedlar :**

Cette membrane permet de protéger le panneau des agressions extérieures : corrosion, variation température...

**6. La boîte de jonction :**

Son utilité est simple, connecter les cellules photovoltaïques au reste de l'installation électrique.

## I.9 Durée de vie d'un panneau solaire

Un panneau solaire a l'avantage de ne nécessiter aucun fluide, ni aucune pièce en mouvement.

Hors système défectueux ou malfaçon, un panneau solaire photovoltaïque possède une durée de vie supérieure à 25 ans, certainement entre 30 et 40ans pour des panneaux solaires de qualité installés correctement.

La première installation photovoltaïque raccordée au réseau électrique en Europe a été installée en 1982 sur le toit de l'actuelle Haute école spécialisée de la Suisse italienne (SUPSI). 35ans après son inauguration, les panneaux solaires photovoltaïques produisaient encore 70% de sa puissance initiale.

## I.10 Les principaux types de cellules photovoltaïques

### I.10.1 La cellule monocristalline

C'est la plus répandue, elle est obtenue à partir de silicium monocristallin, appliqué en une tranche simple. Elle permet de produire de l'électricité destinée à alimenter une habitation ou le réseau public.



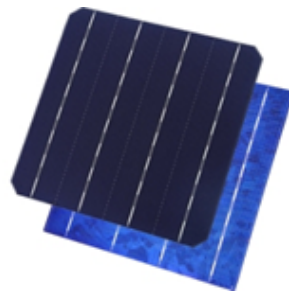


Figure I.9: La cellule monocristalline [27]

### I.10.2 La cellule polycristalline

Cette cellule se compose d'une seule tranche de silicium, elle est de forme carrée et on la trouve souvent dans les installations domestiques, agricoles ou industrielles.

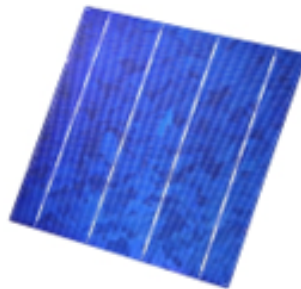


Figure I.10: La cellule polycristalline [27]

### I.10.3 La cellule au silicium amorphe

Elle est composée d'une couche fine de silicium, bien plus fine que les monocristallines ou les polycristallines. On la trouve essentiellement dans l'alimentation des appareils de faible puissance, comme les montres solaires, les éclairages de jardin ou encore les calculatrices solaires .



Figure I.11: La cellule au silicium amorphe [27]

#### I.10.4 La cellule photovoltaïque tandem

Elle conçue à partir de deux couches semi-conductrices simples qui peut être une couche de silicium amorphe et une autre de silicium cristallin (mono ou poly) par exemple. Elle est utilisée en industrie.

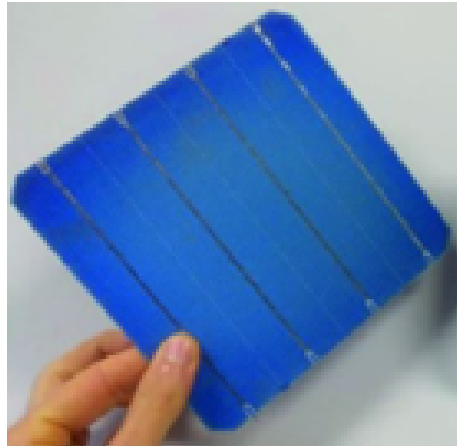


Figure I.12: La cellule photovoltaïque tandem [27]

#### I.10.5 La cellule photovoltaïque CIGS

Elle est faite d'un alliage de cuivre, d'indium, de sélénium et de gallium. Ce mélange est disposé en couche très fine sur un support.

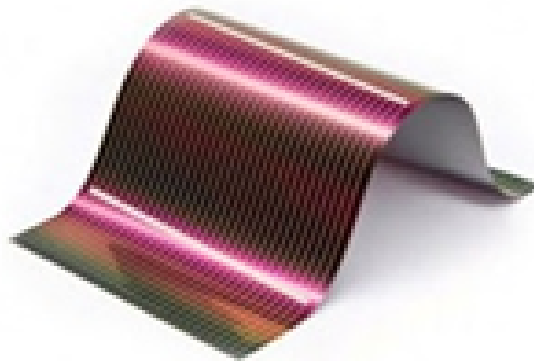


Figure I.13: La cellule photovoltaïque CIGS [27]

### I.10.6 La cellule en couche mince de tellure de cadmium

Elle est composée à partir du tellure de cadmium qui est employé en une seule couche scellée entre deux plaques de verre.



Figure I.14: La cellule en couche mince de tellure de cadmium [27]

### I.10.7 La cellule photovoltaïque multi-jonction

La cellule photovoltaïque multi-jonction se compose de différentes couches de matériaux semi-conducteurs qui convertissent chaque rayon solaire, quelle que soit l'exposition. Les couches sont empilées, formant la cellule photovoltaïque multi-jonction. Pour l'instant, seuls les engins spatiaux en sont pourvus.

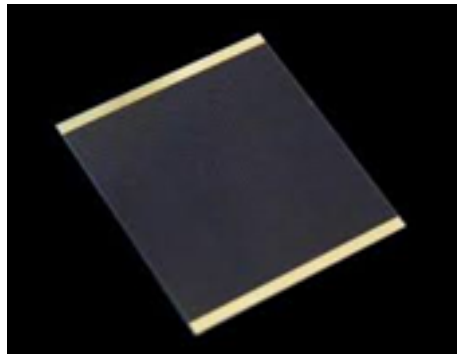


Figure I.15: La cellule photovoltaïque multi-jonction [27]

## I.11 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

### I.11.1 Modèle d'une cellule photovoltaïque à une diode idéal

#### I.11.1-a Modèle d'une cellule photovoltaïque idéale

Le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque idéal Les équations retenues de ce modèle

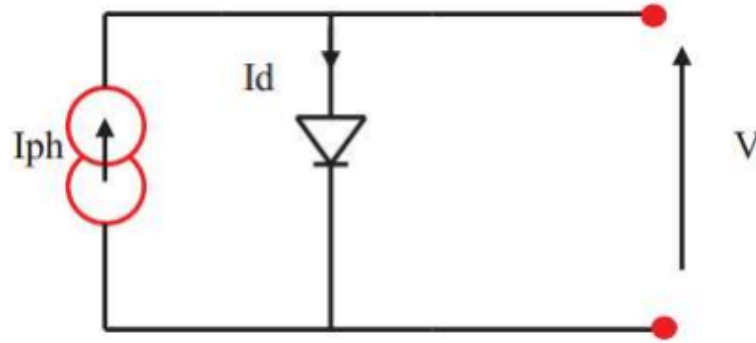


Figure I.16: Schéma équivalent d'une cellule PV idéale [28]

sont:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (\text{I.3})$$

Le courant  $I_{ph}$  est assimilé au courant  $I_{sc}$  avec  $V_{pv} = 0$ , courant de court-circuit obtenu en court ci cuitant la charge.

$$I_{ph} = I_{sc} = \frac{E}{E_{ref}} \quad (\text{I.4})$$

$E$  : L'éclairement absorbé par la cellule

$E_{ref}$ : L'éclairement de référence ( $1000W/m^2$ )

$$I_d = I_0 \left( \exp \left( \frac{V_d}{V_t} \right) - 1 \right) \quad (\text{I.5})$$

$I_0$  : Courant de saturation inverse de la diode [A]

$$V_t = \frac{nkt}{q} \quad (\text{I.6})$$

$V_t$  : Tension thermique [V]

$N$  : Facteur d'idéalité de la photopile

$K$  : Constant de Boltzmann ( $1.38.10^{-23}$  J/K)

$q$  : Charge de l'électron ( $1,6.10^{-19}$  C)

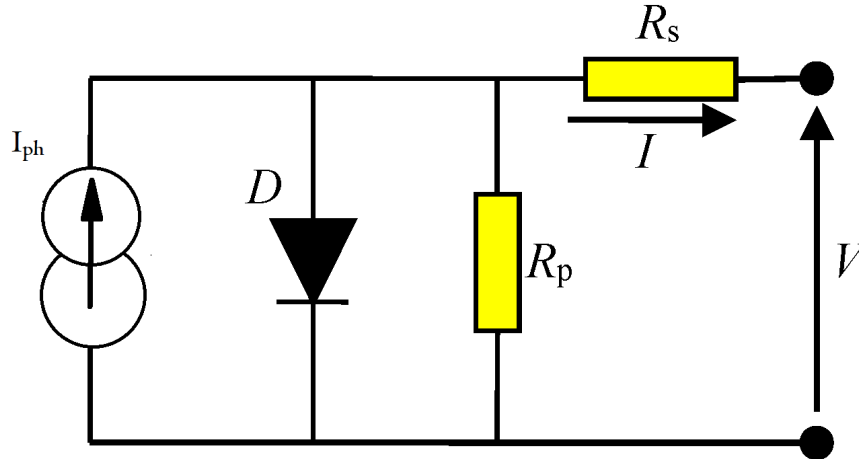


Figure I.17: Schéma équivalent d'une cellule PV réelle [29]

### I.11.1-b Modèle d'une cellule photovoltaïque réelle [15]

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_p \quad (I.7)$$

$I_{pv}$  : représente le courant de sortie fournie par la cellule solaire

$I_{ph}$  : représente le courant généré par la cellule solaire lorsqu'elle est exposée à la lumière du soleil.

$I_p$  : représente le courant circulant dans la résistance  $R_p$

$I_d$  : représente le courant de la diode, il est exprimé comme suit :

$$I_d = I_s \left[ \exp \left( \frac{V + R_s I}{A \cdot V_t} \right) - 1 \right] \quad (I.8)$$

La tension  $V_t$  est souvent donnée par :

$$V_t = N_s \cdot \left( \frac{K \cdot T}{q} \right) \quad (I.9)$$

Sachant que  $I_s$  représente le courant de saturation inverse de la diode qui peut être exprimé par :

$$I_s = I_{rs} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^{\frac{3}{A}} \cdot \exp \left[ \frac{q \cdot E_g}{A \cdot K} \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (I.10)$$

Le courant de la résistance shunt  $I_p$  :

$$I_p = \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \quad (I.11)$$

$V$  : la tension aux bornes de la cellule [V].

$R_s$  : résistance en série

$R_{sh}$  : Résistance shunt

le courant  $I_{rs}$  est donné par l'expression ci-dessous:

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\exp\left(\frac{V_{oc}}{A \cdot V_t}\right) - 1} \quad (\text{I.12})$$

$V_{oc}$  : Tension en circuit ouvert (V)

$V_t$  : représente la potentielle thermodynamique.

Le photo courant  $I_{ph}$  est généralement défini par:

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} (I_{sc} + K_i(T - T_{ref})) \quad (\text{I.13})$$

$I_{sc}$ : le courant de court-circuit standard (aux conditions standards)

$T_{ref}$  : la température de référence (298,15 K)

$K_i$  : le coefficient de température du courant du court-circuit (A/K)

$G_{ref}$ : l'ensoleillement de référence (1000W/m<sup>2</sup>)

G : l'ensoleillement (Watt)

Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante :

$$I = I_{ph} - I_s \left( \exp\left(\frac{q(V + R_s \cdot I)}{A \cdot V_t}\right) - 1 \right) - \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \quad (\text{I.14})$$

$I_{ph}$  : le courant photonique de la diode (A).

$I_s$ : le courant de saturation inverse de la diode (A).

q : la charge de l'électron ( $1.603 \times 10^{-19}C$ )

A : le facteur d'idéalité de la diode dépendant de sa technologie (matériau) est compris généralement entre 1 et 2

K : la constante de Boltzmann  $1.38 \times 10^{-23}$

### I.11.2 Modèle d'une cellule photovoltaïque à double diode

A partir de la figure I.18, il est clair d'observer que le courant de sortie de la cellule solaire est décrit par l'équation ci-dessous :

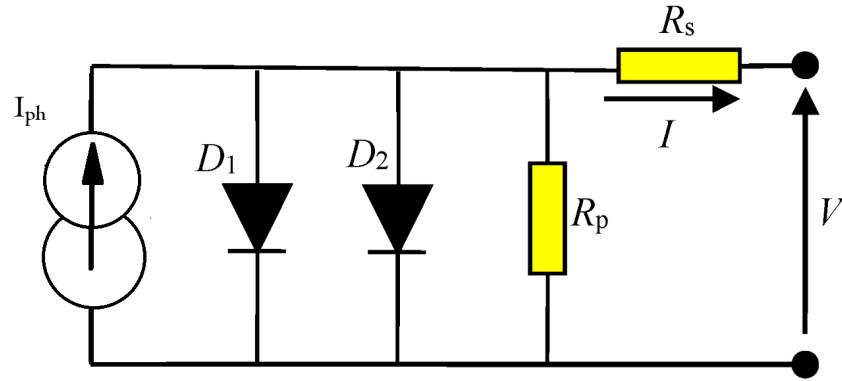


Figure I.18: Schéma équivalent d'une cellule PV à double diode [29]

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - I_p \quad (\text{I.15})$$

$I_{D1}$  et  $I_{D2}$  sont les courants de saturation de la première et la deuxième diode respectivement. donc on a :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left( \exp \left( \frac{q(V + R_s \cdot I)}{A_1 \cdot V_{t1}} \right) - 1 \right) - I_{s2} \left( \exp \left( \frac{q(V + R_s \cdot I)}{A_2 \cdot V_{t2}} \right) - 1 \right) \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \quad (\text{I.16})$$

Avec :

$I_{s1}$  représente le courant de saturation de la première diode  $D_1$  ;

$I_{s2}$  représente le courant de saturation de la seconde diode  $D_2$  ;

$A_1$  et  $A_2$  représentent respectivement, les facteurs d'idéalité de deux diodes  $D_1$  et  $D_2$  .

$$V = V_{t1} = V_{t2} = N \cdot \frac{K \cdot T}{q} \quad (\text{I.17})$$

Le courant de saturation inverse de l'une des diodes ( $I_s = I_{s1} = I_{s2}$ ) peut être trouvé en utilisant l'équation ci-après :

$$I_s = I_{rs} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^{\frac{3}{A}} \cdot \exp \left[ \frac{q \cdot E_g}{A \cdot K} \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (\text{I.18})$$

Sachant que le courant  $I_{rs}$  est défini par :

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\exp \left( \frac{V_{oc}}{A \cdot V_t} \right) - 1} \quad (\text{I.19})$$

Bien que le modèle à double diode présente une plus grande précision que le modèle à une seule diode, il nécessite malheureusement des efforts de calcul considérables.

## **I.12 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté le principe de la conversion d'énergie solaire à l'énergie électrique et on a bien détaillé le fonctionnement du panneau et comment il réagit avec la position du soleil et les coordonnées principales pour donner une bonne qualité, ensuite nous avons abordé la modélisation du panneau avec sa composition et les différents types des panneaux. Dans le prochain chapitre, nous allons parler sur les différentes méthodes d'identification les plus connues pour faire l'identification d'un panneau photovoltaïque.



## Chapter II

---

# Méthodes d'identification

### SOMMAIRE

---

II.1 INTRODUCTION . . . . .	24
II.2 MÉTHODES D'IDENTIFICATIONS . . . . .	24
II.2.1 Méthodes analytiques . . . . .	24
II.2.2 Méthode de modèle de référence . . . . .	26
II.2.3 La méthode de Newton-Raphson . . . . .	27
II.2.4 Méthode explicite simplifiée . . . . .	28
II.2.5 Méthode de cinq points: . . . . .	29
II.2.6 Méthode de la pente ( $V_{co}, 0$ ) . . . . .	30
II.3 CONCLUSION . . . . .	31

---

## II.1 Introduction

Pour mieux comprendre les mécanismes physiques à l'intérieur des cellules solaires ainsi que les paramètres affectant ses différentes caractéristiques, il existe plusieurs façons proposées d'identifier ces paramètres, pas seulement en augmentant l'efficacité des cellules photovoltaïques et la capacité à modéliser leur comportement mais aussi en optimisant ses différentes fonctionnalités.

Il existe plusieurs modèles dans la littérature, et leurs précision dépend des modèles mathématiques des différents phénomènes physiques intrinsèques mis en jeu dans le processus de production d'énergie:

- **Le modèle à Cinq paramètres fait intervenir :**  $I_{ph}$  (le photo-courant),  $I_s$  (le courant de saturation),  $A$ (le facteur d'idéalité),  $R_s$  (la résistance série) et  $R_{sh}$  (la résistance parallèle).
- **Le modèle à quatre paramètres fait intervenir :**  $I_{ph}$ (le photocourant),  $I_s$  (le courant de saturation),  $A$ (le facteur d'idéalité) et  $R_s$  (la résistance série).

Ces paramètres ne sont généralement pas des quantités mesurables et ne sont pas inclus dans les données du fabricant. Ils doivent donc être déterminés à partir du jeu d'équations (IV) à différents points de fonctionnement fournis par le constructeur ou obtenus à partir d'essais expérimentaux.

L'objet de ce chapitre est de présenter les méthodes numériques à quatre paramètres et à cinq paramètres les plus couramment utilisées du point de vue de la caractérisation des cellules solaires à base de silicium, à savoir : méthode explicite simplifiée, méthode de Newton Raphson, méthode analytique, méthode en cinq points et au point  $(V_{co}, 0)$  pour la méthode de la pente.

## II.2 Méthodes d'identifications

### II.2.1 Méthodes analytiques

La méthode analytique est utilisée pour trouver les paramètres inconnus en utilisant les trois points remarquables de la courbe I-V et deux autres points. Ces points sont :

- Le point de court-circuit  $(0, I_{cc})$
- Le point de circuit ouvert  $(V_{co}, 0)$  ,
- Le point de puissance maximale  $(V_{mpp}, I_{mpp})$
- La pente au point du circuit ouvert qui est  $R_{so}$ ,
- La pente au point du court-circuit  $R_{sho}$  .

Les paramètres sont tirés des expressions suivantes :

$$A_1 = \frac{V_{mpp} + I_{mpp} \cdot R_{so} - V_{co}}{N_s \cdot V_t \left[ \ln \left( I_{cc} - \frac{V_{mpp}}{R_{sh0}} - I_{mpp} \right) - \ln \left( I_{cc} - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \right) + \frac{I_{mpp}}{I_{cc} - \frac{V_{co}}{R_{sh0}}} \right]} \quad (\text{II.1})$$

$$I_{01} = \left( I_{cc} - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \right) \cdot \exp \left( \frac{-V_{co}}{A_1 \cdot N_s \cdot V_t} \right) \quad (\text{II.2})$$

$$R_{sh} = R_{sh0} \quad (\text{II.3})$$

$$I_{ph} = I_{cc} \cdot \left( 1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) + I_{01} \left( \exp \left( \frac{I_{cc} \cdot R_s}{A_1 \cdot N_s \cdot V_t} - 1 \right) \right) \quad (\text{II.4})$$

$$R_s = R_{so} - \frac{A_1 \cdot N_s \cdot V_t}{I_{01}} \exp \left( \frac{-V_{co}}{A_1 \cdot N_s \cdot V_t} \right) \quad (\text{II.5})$$

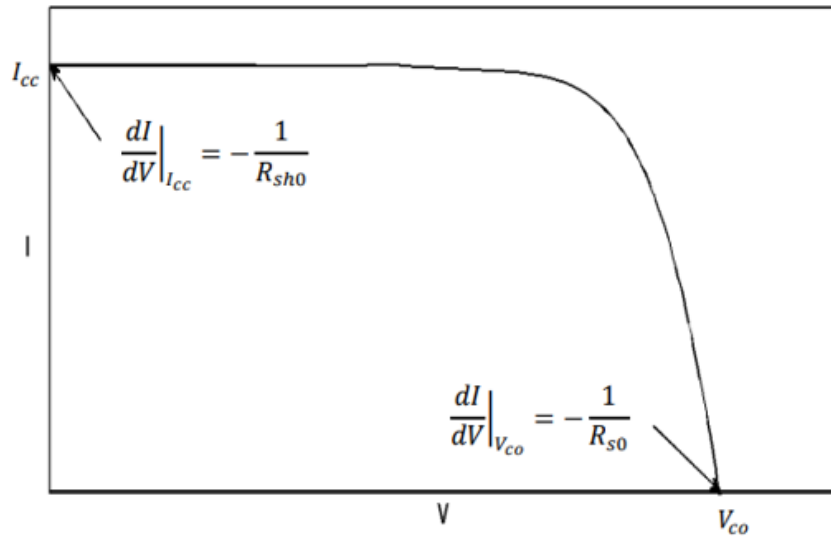


Figure II.1: les deux points sur la courbe I-V [30]

D'après la figure II.1:

$$R_{sho} = -\frac{dV}{dI}\Big|_{I=I_{cc}} \quad (\text{II.6})$$

$$R_{sho} = -\frac{dV}{dI}\Big|_{V=V_{co}} \quad (\text{II.7})$$

### II.2.2 Méthode de modèle de référence

La méthode de modèle de référence utilise des signaux d'entrée-sortie pour permettre d'identifier les paramètres des modèles mathématiques de structures variées. La figure II.2 montre le schéma de principe de la méthode[20][21].L'entrée et la sortie sont adaptées au régime souhaité (transitoire, Éternel)

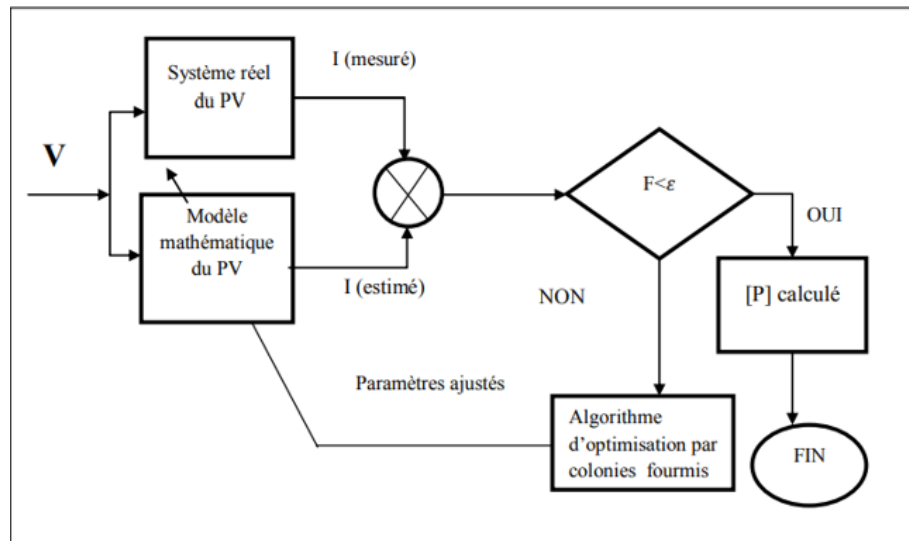


Figure II.2: Schéma de principe de la méthode de modèle de référence [30]

L'estimation du vecteur de paramètres est ensuite effectuée en minimisant les critères d'évaluation choisis. Ce dernier représente généralement une erreur  $F$  quadratique entre les grandeurs mesurées et calculées du système ont la même tension  $V$  que le système.

Le problème est de trouver le minimum de la fonction du critère quadratique  $F$  en fonction des paramètres. Si le critère est linéaire par rapport aux paramètres, alors sa valeur minimale peut être calculée analytiquement par les moindres carrés par exemple. D'autre part, si la fonction est non linéaire par rapport aux paramètres, alors la solution est résolue par un algorithme itératif de programmation non linéaire.

La méthode utilisée pour l'estimation des paramètres des panneaux photovoltaïques du modèle de référence, c'est-à-dire l'approximation des valeurs expérimentales par un modèle mathématique, repose sur le choix d'un critère objectif qualifiant l'approximation mesure / modèle. L'écart entre les mesures effectuées sur le système réel et les valeurs calculées par simulation à partir du modèle est :

$$\epsilon(k) = I_m(k) - I_c(k) \quad k = 1, \dots, N \quad (\text{II.8})$$

où  $N$  représente la dimension vectorielle métrique.

L'objectif de l'estimation des paramètres est de minimiser les paramètres  $\epsilon(k)$  qui ne s'annulent pas complètement en raison d'erreurs de mesure ou d'erreurs de structure de modèle.

Si on considère directement  $F$  comme critère de  $\epsilon(k)$ , on trouve que l'erreur positive compense l'erreur négative des  $N$  ensembles de mesures. Pour pallier cette limitation, deux solutions existent:

- considérer la valeur absolu de  $\epsilon(k)$
- considérer le carré de  $\epsilon(k)$

L'élévation au carré est préférée à la valeur absolue car elle accorde plus d'importance aux grandes erreurs; elle permet donc une compensation mieux adaptée des paramètres.

Donc le critère quadratique s'écrit sous la forme suivante:

$$F = \sum_{k=1}^N \epsilon(k)^2 = \sum_{k=1}^N (I_m(k) - I_c(K))^2 \quad (\text{II.9})$$

### II.2.3 La méthode de Newton-Raphson

La méthode de Newton-Raphson[23] est l'une des méthodes les plus utilisées pour la résolution des équations non linéaires. C'est une méthode itérative basée sur l'évaluation de la fonction objectif ainsi que sa dérivée dans un point  $X_n$ . Sa formule s'écrit comme suit :

$$X_{n+1} = X_n - \frac{f(X_n)}{f'(X_n)} \quad (\text{II.10})$$

où:

- $f'(X_n)$ : : Evaluation de la dérivée de la fonction objectif  $f(X)$  au point solution  $X_n$ .
- $f(X_n)$ : Évaluation de la fonction objectif  $f(X)$  à la valeur actuelle  $X_n$
- $X_{n+1}$ : mise à jour de la solution actuelle  $X_n$

Pour former la fonction objectif, l'équation  $I=F(V)$  donnée par l'expression II.8 est réécrite sous la forme suivante [24]:

$$F = I_{ph} - I_{01} \left[ \exp \left( \frac{V + I.R_s}{A_1.N_s.V_t} \right) - 1 \right] - I_{02} \left( \exp \left( \frac{V + I.R_s}{A_2.N_s.V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + I.R_s}{R_{sh}} - I \quad (\text{II.11})$$

Donc, en exploitant toutes les mesures du courant et tension issues directement à partir d'une cellule panneau PV, on construit un système de  $N$  équations et de sept inconnues.

$$\begin{cases} F(I_{m1}, V_{m1}, I_{ph}, I_{01}, I_{02}, A_1, A_2, R_s \text{ et } R_{sh}) = 0 \\ F(I_{m2}, V_{m2}, I_{ph}, I_{01}, I_{02}, A_1, A_2, R_s \text{ et } R_{sh}) = 0 \\ F(I_{m3}, V_{m3}, I_{ph}, I_{01}, I_{02}, A_1, A_2, R_s \text{ et } R_{sh}) = 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ F(I_{mN}, V_{mN}, I_{ph}, I_{01}, I_{02}, A_1, A_2, R_s \text{ et } R_{sh}) = 0 \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

ou  $I_m, V_m$  sont respectivement le courant et la tension mesuré.

En partant d'une valeur initiale, la formule de Newton-Raphson permettant de trouver la solution du système d'équations non linéaires est donnée comme suit:

$$X_{n+1} = X_n - J^{-1}(X_n)F(X_n) \quad (\text{II.13})$$

Ou

$$J = \begin{bmatrix} \frac{dF_1}{dI_{ph}} & \frac{dF_1}{dI_{01}} & \frac{dF_1}{dI_{02}} & \frac{dF_1}{dA_{01}} & \frac{dF_1}{dA_{02}} & \frac{dF_1}{dR_s} & \frac{dF_1}{dR_{sh}} \\ \frac{dF_2}{dI_{ph}} & \frac{dF_2}{dI_{01}} & \frac{dF_2}{dI_{02}} & \frac{dF_2}{dA_{01}} & \frac{dF_2}{dA_{02}} & \frac{dF_2}{dR_s} & \frac{dF_2}{dR_{sh}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{dF_N}{dI_{ph}} & \frac{dF_N}{dI_{01}} & \frac{dF_N}{dI_{02}} & \frac{dF_N}{dA_{01}} & \frac{dF_N}{dA_{02}} & \frac{dF_N}{dR_s} & \frac{dF_N}{dR_{sh}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

et

$$X = \begin{bmatrix} I_{ph} \\ I_{01} \\ I_{02} \\ A_{01} \\ A_{02} \\ R_s \\ R_{sh} \end{bmatrix} \text{ et } F(X) = \begin{bmatrix} F_1(X) \\ F_2(X) \\ F_3(X) \\ F_4(X) \\ F_5(X) \\ F_6(X) \\ F_7(X) \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

#### II.2.4 Méthode explicite simplifiée

Pour calculer les paramètres du panneau, quelques simplifications ont été faites sur l'équation I.7. Car le courant de saturation dans des dispositifs de silicium (comparés à la limite exponentielle) est très petit, le terme  $' - 1'$  peut être négligé [27]. Une autre simplification, qui a été faite afin d'obtenir des équations relativement simples et traitables rapproche le photo-courant produit  $I_{ph}$  avec ( $I_{ph} \approx I_{cc}$ ). Il est dans des habitudes courants d'ignorer la différence entre le photo courant produit et le courant de court-circuit, car elle est généralement négligeable [27], dans ce cas I.7 devient:

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp \left( \frac{q \cdot (V + R_s I)}{N_s \cdot A \cdot K \cdot T} \right) \right] \quad (\text{II.16})$$

donc  $I_{ph} = I_{cc}$

$$0 = I_{ph} - I_s \left[ \exp \left( \frac{q \cdot (V + R_s I)}{N_s \cdot A \cdot K \cdot T} \right) \right] \quad (\text{II.17})$$

$$I_m = I_{ph} - I_s \left[ \exp \left( \frac{q \cdot (V + R_s I)}{N_s \cdot A \cdot K \cdot T} \right) \right] \quad (\text{II.18})$$

De la relation II.13, on peut déduire le courant de saturation  $I_s$ :

$$I_s = I_{cc} \left[ \exp \left( \frac{-q \cdot V_{co}}{N_s \cdot A \cdot K \cdot T} \right) \right] \quad (\text{II.19})$$

on remplace l'équation II.31 dans l'équation II.27 on peut la réécrire comme suite:

$$I = I_{cc} \left[ 1 - \exp \left( q \cdot \frac{V - V_{co} + I \cdot R_s}{N_s \cdot A \cdot K \cdot T} \right) \right] \quad (\text{II.20})$$

l'équation au point de la puissance maximale, devient

$$I_m = I_{cc} \left[ 1 - \exp \left( q \cdot \frac{V_m - V_{co} + I_m \cdot R_s}{N_s \cdot A \cdot K \cdot T} \right) \right] \quad (\text{II.21})$$

a partir de cette équation, on peut tirer la valeur de la résistance de la série  $R_s$  explicitée par:

$$R_s = \frac{\frac{N_s \cdot A \cdot K \cdot T}{q} \ln \left( 1 - \frac{I_m}{I_{cc}} \right) + V_{co} - V_m}{I_m} \quad (\text{II.22})$$

Le dernier paramètre à déterminer est le facteur d'idéalité A, en exploitant le fait que la dérivée de la puissance maximale est nulle  $d_p/d_v = 0$ , et en utilisant la formulation suivante:

$$\frac{d_p}{d_v} = 0 = \frac{\sigma I}{\sigma V} V + I \frac{\sigma V}{\sigma V} \quad (\text{II.23})$$

on trouve

$$A = \frac{q \cdot 2 \cdot V_m - V_{co}}{N_s \cdot K \cdot T \left[ \frac{I_{cc}}{I_{cc} - I_m} + \ln \left( I - \frac{I_m}{I_{cc}} \right) \right]} \quad (\text{II.24})$$

A partir de l'équation II.30, on peut tirer la valeur de photo courant par :

$$I_{ph} = I_s \left[ \exp \left( \frac{q \cdot V_{co}}{N_s \cdot A \cdot K \cdot T} \right) \right] \quad (\text{II.25})$$

La substitution des différents paramètres par leurs formules respectives, dans l'équation II.24 donne une équation simple reliant le courant I et V aux différentes températures et ensoleillements.

### II.2.5 Méthode de cinq points:

Cette méthode est utilisée pour trouver des paramètres inconnus en utilisant plus de trois points de la courbe IV au lieu de seulement trois points significatifs, en fonction du nombre d'inconnues par modèle. Pour le modèle à une seule diode, cinq points sont nécessaires pour trouver les paramètres inconnus. La méthode est basée sur la résolution de système de cinq équations non linéaires résultant de l'application des équations à cinq points doit être : Points de court-circuit ( $0; I_{cc}$ ) le point de circuit ouvert ( $V_{co}, 0$ ) le point de puissance maximale ( $V_{mpp}, I_{mpp}$ ), et deux autres points ( $V_x, I_x$ ) et ( $V_{xx}, I_{xx}$ ) tel que:  $V_x = \frac{1}{2} V_{co}$  et  $V_{xx} = \frac{1}{2} (V_{co}, V_{mpp})$ .

Ces points sont mentionnés sur le tracé de la figure Donc, en réécrivant l'équation II.1

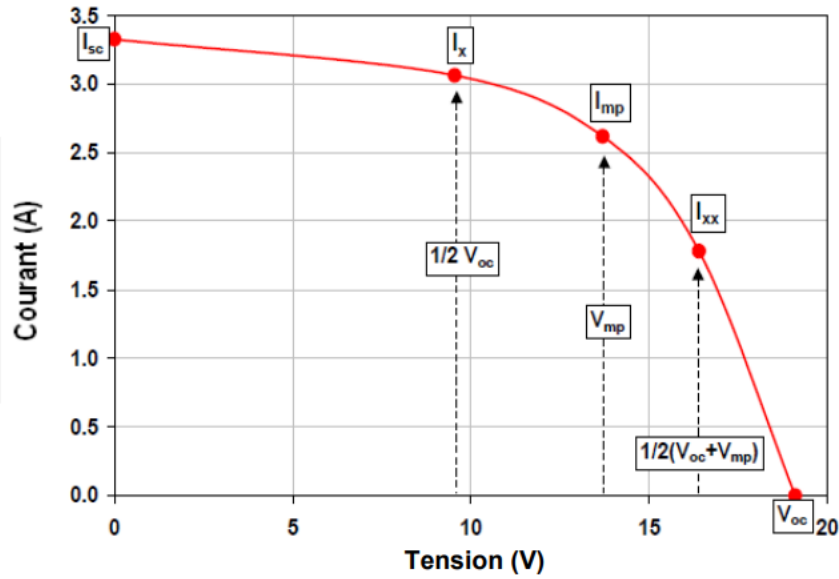


Figure II.3: Les cinq points sur la courbe I-V [30]

sous la forme  $f(I,V)=0$  aux cinq points considérés, les cinq équations du système sont les suivantes:

$$I_{ph} - I_{01} \left( \exp \frac{V_{c0}}{N_s \cdot A_1 \cdot V_t} - 1 \right) - \frac{V_{c0}}{R_{sh}} = 0 \quad (\text{II.26})$$

$$I_{cc} - I_{ph} + I_{01} \left( \exp \left( \frac{I_{cc} R_s}{N_s \cdot A_1 \cdot V_t} - 1 \right) + \frac{I_{cc} \cdot R_s}{R_s} \right) = 0 \quad (\text{II.27})$$

$$I_{mpp} - I_{ph} + I_{01} \left( \exp \frac{V_{mpp} + I_{mpp} \cdot R_s}{N_s \cdot A_1 \cdot V_t} - 1 \right) + \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{R_{sh}} = 0 \quad (\text{II.28})$$

$$I_x - I_{ph} + I_{01} \left( \exp \left( \frac{V_x + I_x \cdot R_s}{N_s \cdot A_1 \cdot V_t} \right) - 1 \right) + \frac{V_x + I_x \cdot R_s}{R_{sh}} = 0 \quad (\text{II.29})$$

$$I_{xx} - I_{ph} + I_{01} \left( \exp \left( \frac{V_{xx} + I_{xx} \cdot R_s}{N_s \cdot A_1 \cdot V_t} \right) - 1 \right) + \frac{V_{xx} + I_{xx} \cdot R_s}{R_{sh}} = 0 \quad (\text{II.30})$$

Les équations allant de II.12 à II.16 constituent donc un système non linéaire qu'on peut résoudre avec des méthodes itératives connues comme la méthode de Newton-Raphson.

### II.2.6 Méthode de la pente ( $V_{co}, 0$ )

La différence apportée par cette méthode par rapport la méthode précédente est principalement dans la manière de calcul de la résistance série  $R_s$  [27]. Elle est basée sur le fait que la résistance série influe remarquablement sur la pente de la courbe caractéristique (I-V) au voisinage du point  $(V_{co}, 0)$ . Donc afin de calculer  $R_s$ , on dérive l'équation II.24 afin d'obtenir:

$$\frac{dI}{dV} = -I_s \left[ \left( \exp \left( \frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{N_s \cdot A \cdot K \cdot T} - 1 \right) \right) \frac{q}{N_s \cdot A \cdot K \cdot T} (1 + R_s \frac{dI}{dV}) \right] \quad (\text{II.31})$$

ce qui donne au point  $(v_{co}, 0)$ :

$$R_s = - \frac{dI}{dV} \Big|_{V_{co}} \frac{1}{\frac{I_{sq}}{N_s \cdot A \cdot K \cdot T} \exp \left( \frac{q \cdot V_{co}}{N_s \cdot A \cdot K \cdot T} \right)} \quad (\text{II.32})$$



La pente  $M$  dans le point  $V_{co}$  est donnée par:

$$M = \frac{dv}{dI}$$

( $I=0$ )

Cette valeur est déduite à partir des résultats expérimentaux (Figure)

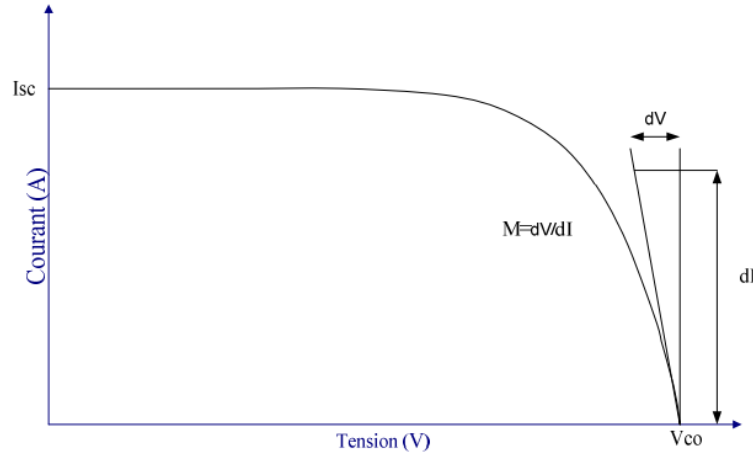


Figure II.4: Le calcul de pente au point de tension du circuit ouvert [30]

Le facteur d'idéalité "A" est déterminé par des méthodes itératives comme la méthode de Newton-Raphson, en vérifiant la concordance entre les résultats de simulation et ceux du fabricant aux conditions de mesure standard.

## II.3 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons abordé de manière globale les cinq différentes méthodes d'identification pour les panneaux photovoltaïques tels que la méthode analytique, la méthode des cinq points, la méthode de la pente ( $V_{co}, 0$ ), la méthode explicite simplifiée et la méthode de Newton-Raphson.

Dans le prochain chapitre, nous allons approfondir notre étude en nous focalisant sur deux méthodes spécifiques qui ont démontré leur efficacité : la méthode de Newton-Raphson et la méthode explicite simplifiée. Ces deux approches seront explorées en détail en les appliquant à deux modèles distincts : un modèle avec une diode et un modèle avec deux diodes.

## Chapter III

---

## Simulation et résultats

### SOMMAIRE

---

III.1 INTRODUCTION . . . . .	33
III.2 MÉTHODES D'EXTRACTION PROPOSÉES . . . . .	33
III.2.1 Méthode explicite simplifiée . . . . .	33
III.2.2 Méthode Newton-Raphson . . . . .	44
III.2.3 Comparaison entre la méthode Explicite Simplifiée et la méthode Newton Raphson . . . . .	53
III.3 CONCLUSION: . . . . .	54

---

## III.1 Introduction

L'évaluation des paramètres électriques d'une cellule solaire, en utilisant la caractéristique  $I(V)$  qui décrit son fonctionnement, revêt une importance cruciale dans la conception et la fabrication des cellules solaires. Cette approche permet d'acquérir des informations sur les mécanismes de transport électrique. Cependant, la précision de cette évaluation constitue un défi majeur pour les chercheurs, ce qui a conduit à la diversification des modèles et des méthodes numériques développés pour caractériser ces paramètres.

Le but principal de notre travail consiste à extraire les paramètres électriques d'une cellule solaire avec le modèle électrique considéré qui est celui à une seule diode et pour deux diodes, on appliquant deux méthodes « Simple explicite et Newton Raphson ».

## III.2 Méthodes d'extraction proposées

Les méthodes proposées et appliquées dans ce travail servent à extraire les paramètres électriques de la cellule solaire en exploitant le modèle électrique à une seule diode et pour deux diodes .

Les paramètres utilisaient dans notre travail:

$$V_{oc}=37.7$$

$$E_g=1.8e-19$$

$$I_{cc}=8.84$$

$$V_m=30.6$$

$$I_m=8.23$$

$$K_i=0.0032$$

$$K_v=-0.32$$

$$N_s=60$$

$$G=1000$$

$$G_n=1000$$

$$K=1.3806503e-23$$

$$q=1.60217646e-19$$

$$T=25+273.15$$

$$T_n=T$$

$$V_t=(K*T)/q$$

$$R_{sinc}=0.001$$

$$niter=500$$

$$P_{max}=V_m*I_m$$

### III.2.1 Méthode explicite simplifiée

#### III.2.1-a Organigramme

L'organigramme ci-dessous résume les différentes équations utilisées pour l'extraction des quatre paramètres de la cellule photovoltaïque.

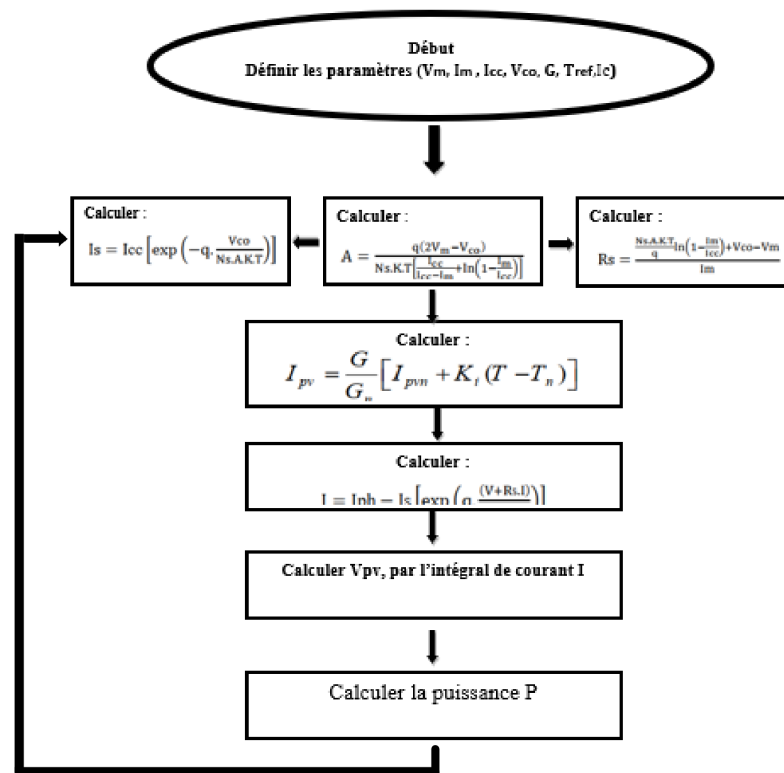


Figure III.1: Organigramme de la méthode explicite simplifiée

### III.2.1-b Résultats pour une Diode

Le tableau III.1 représente les résultats des quatre paramètres photovoltaïques qu'on a obtenus.

Table III.1: Résultat des paramètres photovoltaïques

$I_{ph}$ [A]	$I_s$ [A]	$R_s$ [ $\Omega$ ]	A
8.840	$1.4201e^{-7}$	0.1932	1.362

Les figures III.2 et III.3 représentent respectivement la caractéristique I(V) et la caractéristique P(V), générées avec les paramètres extraits pour un module solaire.

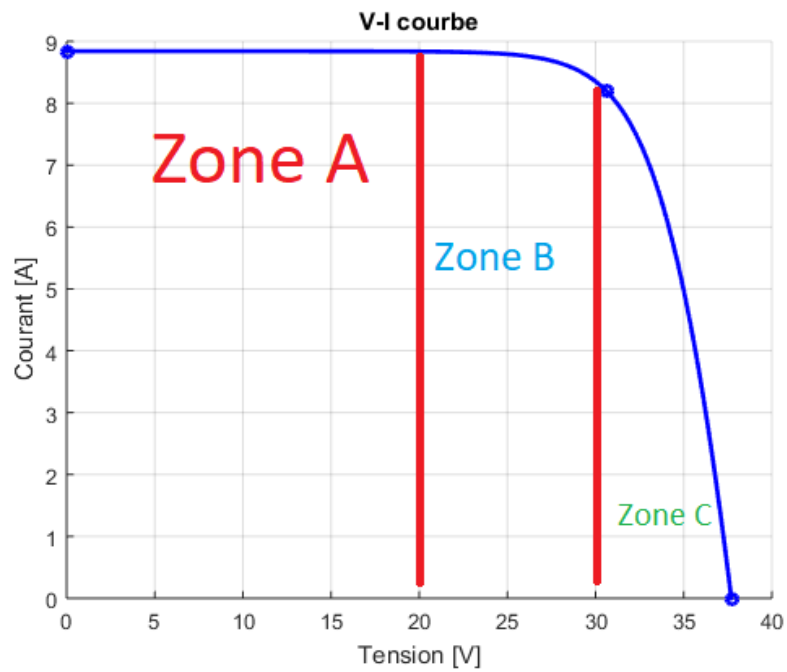


Figure III.2: Caractéristique I(V)

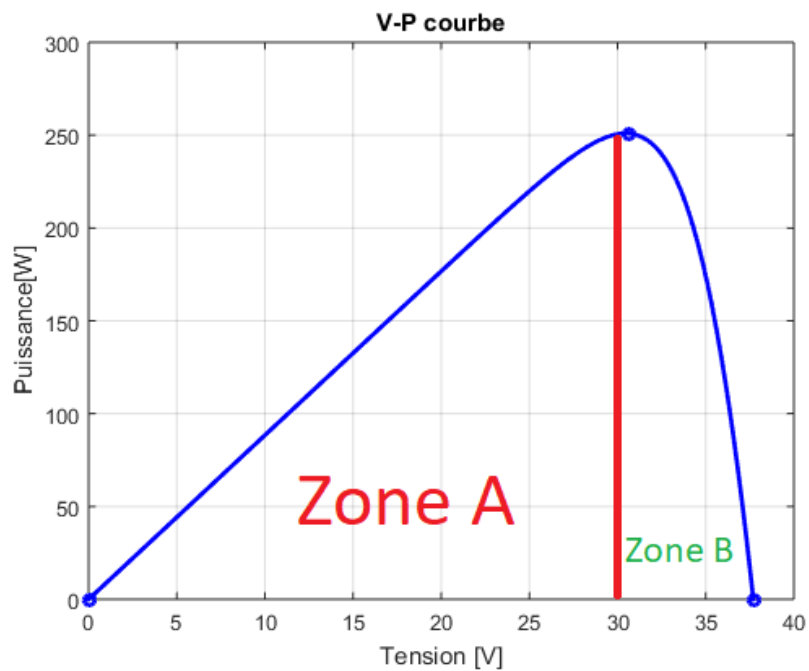


Figure III.3: Caractéristique P(V)

### 1) Zone de fonctionnement

La figure III.2 représente trois zones essentielles:

- Zone A [0 20] :où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le panneau photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.

- Zone B [20 30]: correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones, représente la région préférée pour le fonctionnement du Panneau, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.
- Zone C [30 37]: qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension

La figure III.3 représente deux zones essentielles:

- Zone A[0 30]: On peut donc conclure que la puissance électrique est directement proportionnelle à la tension
- Zone B[30 37]: après que la puissance atteigne son maximum sa diminue jusqu'à quelle sera nulle

## 2) Effet de la variation de l'ensoleillement

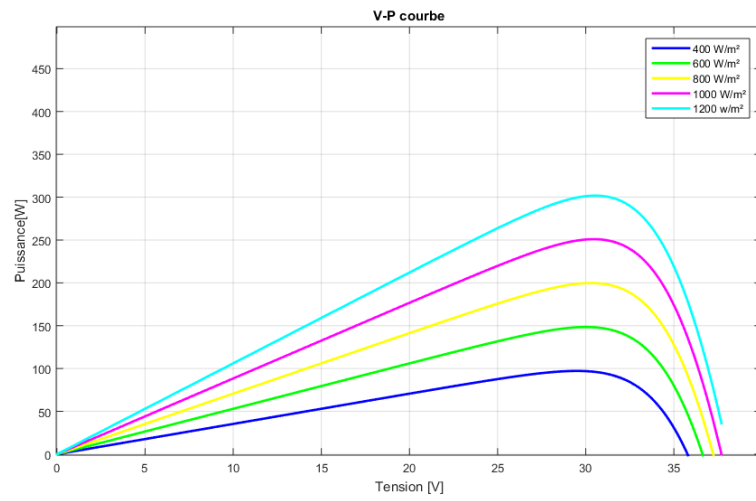


Figure III.4: Influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V)

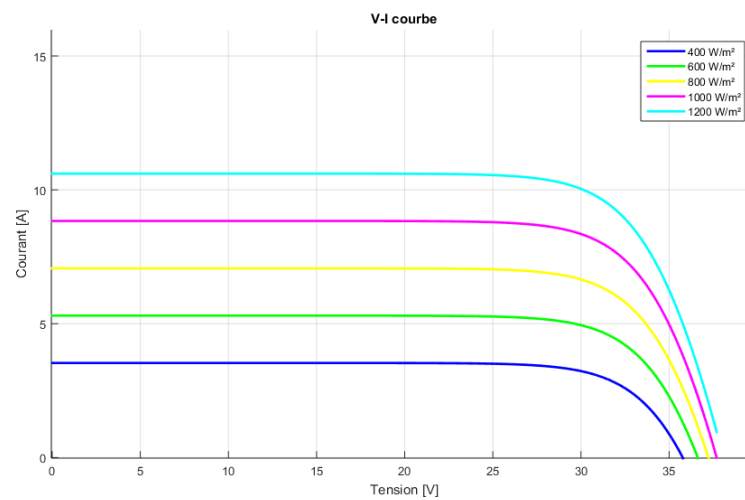


Figure III.5: Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V)

L'augmentation de l'éclairement provoque le déplacement de la caractéristique suivant l'axe des courants, car l'accroissement du courant de court-circuit est plus important que celui de la tension du circuit ouvert parce que le premier est une fonction linéaire et le second est une fonction logarithmique.

### 3) Effet de la variation de la Température

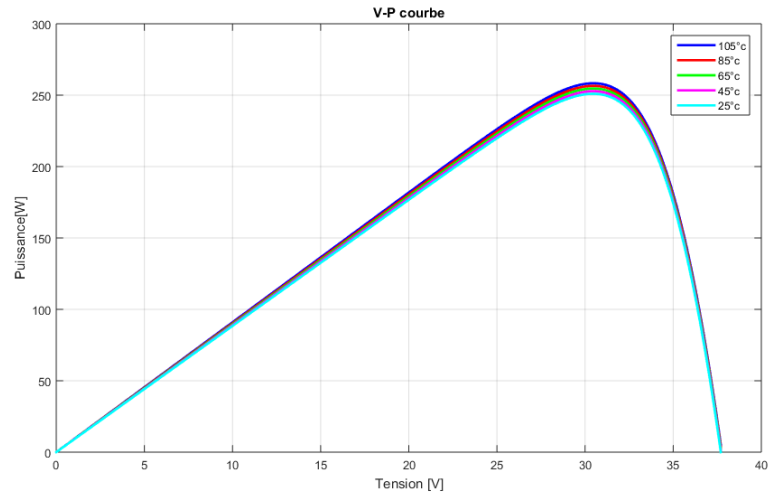


Figure III.6: Influence de la Température sur la Caractéristique P(V)

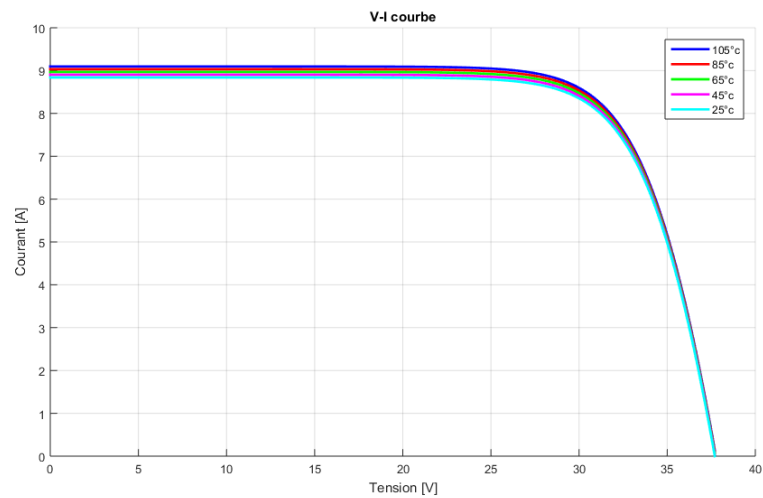


Figure III.7: Influence de la Température sur la Caractéristique I(V)



### III.2.1-c Résultats pour deux Diodes

Le tableau III.2 représente les résultats des quatre paramètres photovoltaïques qu'on a obtenus.

Table III.2: Résultat des paramètres photovoltaïques

$I_{ph}$ [A]	$I_{s1}$ [A]	$I_{s2}$ [A]	$R_s$ [ $\Omega$ ]
8.840	$7.3413e^{-7}$	$4.3246e^{-5}$	0.1255

Les figures III.8 et III.9 représentent respectivement la caractéristique I(V) et la caractéristique P(V), générées avec les paramètres extraits pour un module solaire.

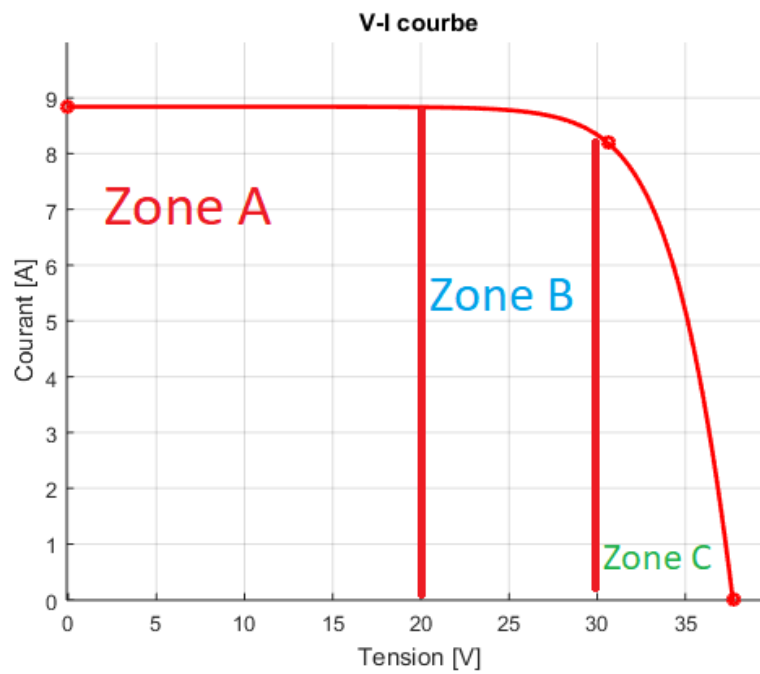


Figure III.8: Caractéristique I(V)

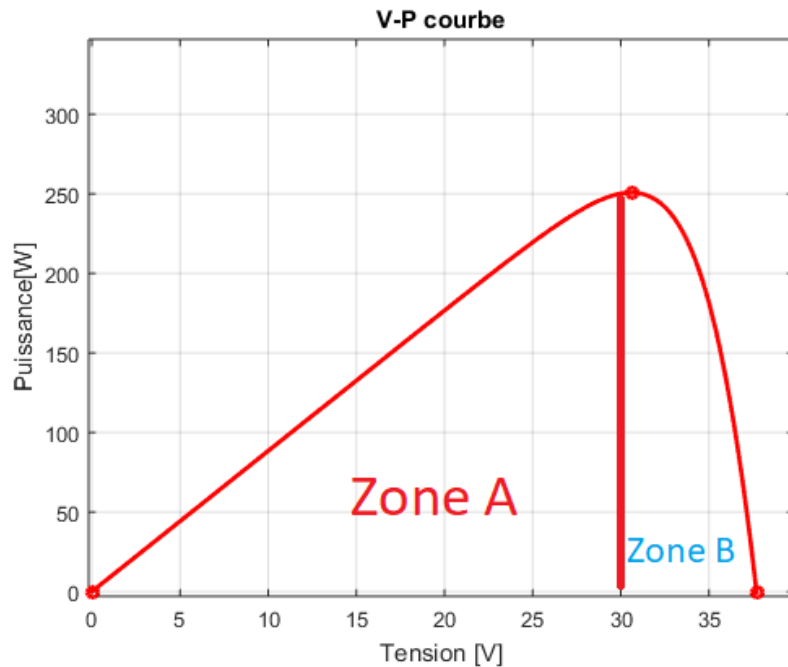


Figure III.9: Caractéristique P(V)

### 1) Zone de fonctionnement

La figure III.8 représente trois zones essentielles:

- Zone A [0 20] : dans le cas de deux diodes sur la zone A le courant reste constant malgré la variation de la tension , donc on constate que cette zone est la même dans les deux cas une diode et deux diodes
- Zone B [20 30]: correspondant a la région intermédiaire entre les deux zones il y a une variation légère du courant ,c'est la zone forte pour le fonctionnement du Panneau
- Zone C [30 37]: on remarque dans cette région que il ya une grande variation du courant et la tension est presque constante , dans ce cas le panneau il peut jouer le rôle d'un générateur de tension

La figure III.9 représente deux zones essentielles:

- Zone A[0 30]: On peut donc conclure que la puissance électrique est directement proportionnelle à la tension a chaque fois la tension augmente la puissance augmente jusqu'à elle atteinte le point maximal  $P_{max}$
- Zone B[30 37]: après que la puissance atteindre son maximum sa diminue jusqu'à quelle sera nulle

## 2) Effet de la variation de l'ensoleillement

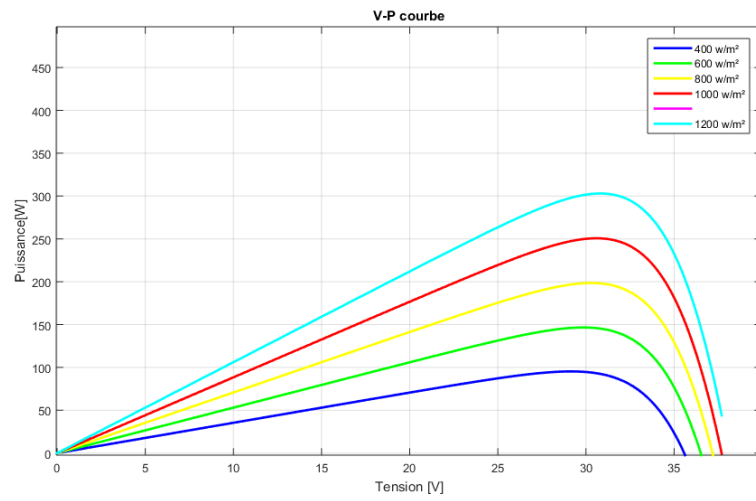


Figure III.10: Influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V)

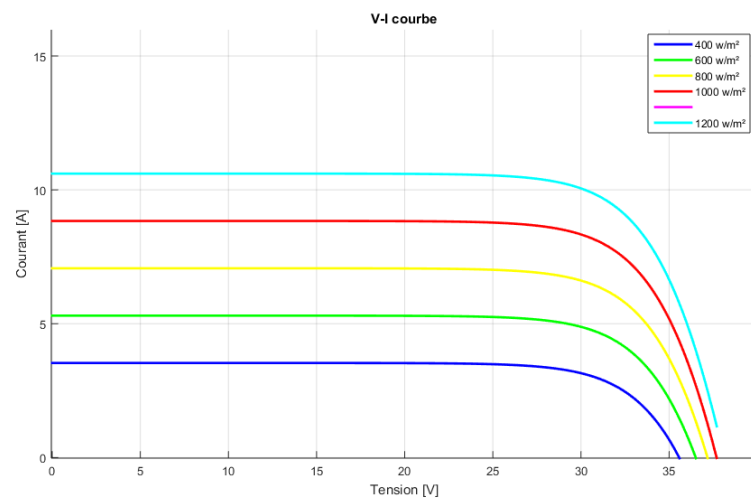


Figure III.11: Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V)

### 3) Effet de la variation de la Température

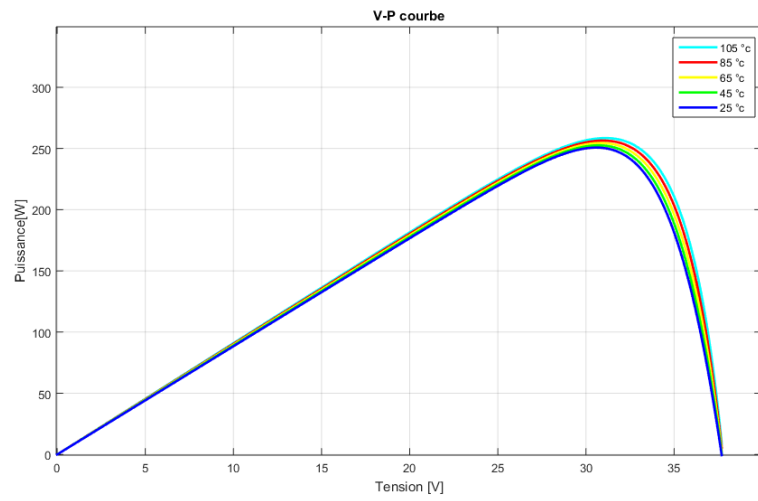


Figure III.12: Influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V)

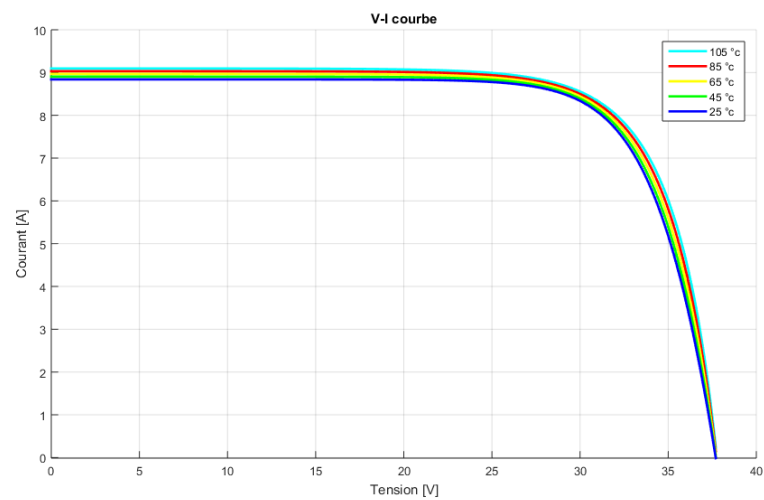


Figure III.13: Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V)

### III.2.1-d Comparaison entre une diode et deux diodes par la méthode explicite Simplifiée

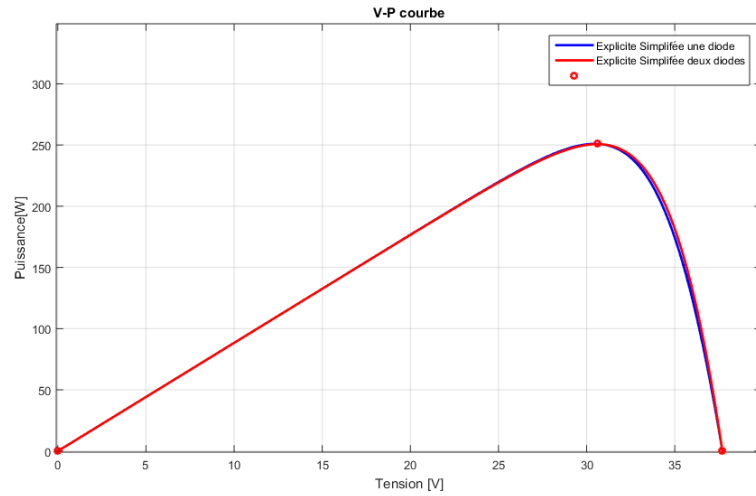


Figure III.14: Caractéristique P(V)

#### Commentaire:

- Sur la zone B, on remarque que le modèle à deux diodes est mieux que le modèle à une diode

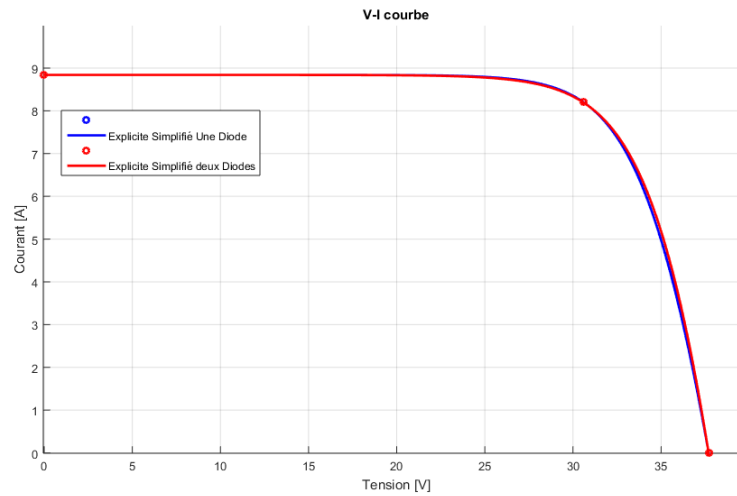


Figure III.15: Caractéristique I(V)

- Dans la zone B et zone C on remarque que le modèle à une diode est faible par rapport au modèle à deux diodes ce qui dis que la meilleure est celle de deux diodes coté puissance et qualité

### III.2.2 Méthode Newton-Raphson

#### III.2.2-a Organigramme

L'organigramme ci-dessous résume les différentes équations utilisées pour l'extraction des cinq paramètres de la cellule photovoltaïque.

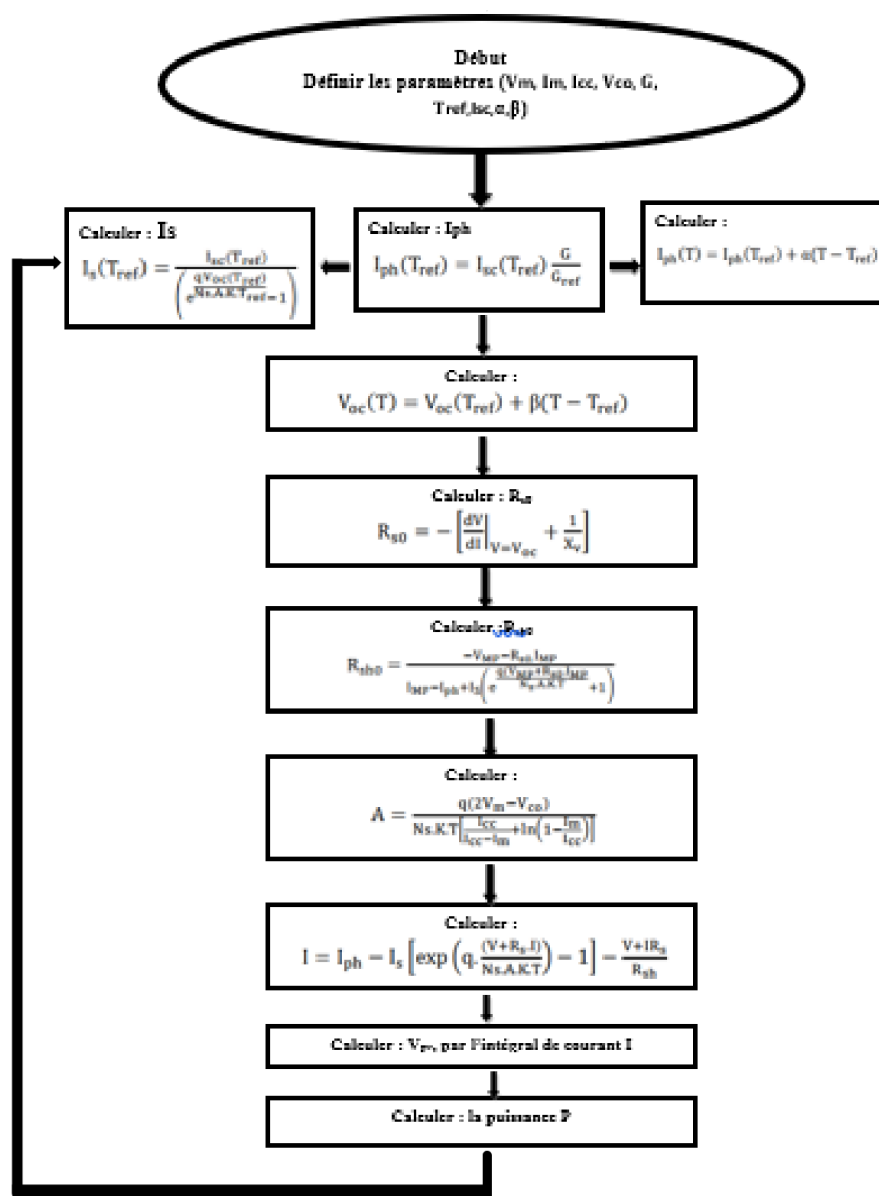


Figure III.16: Organigramme de la méthode Newton Raphson

### III.2.2-b Résultats pour une diode:

Le tableau III.3 représente les résultats des cinq paramètres photovoltaïques qu'on a obtenus

Table III.3: Résultat des paramètres photovoltaïques

$I_{ph}$ [A]	$I_{s1}$ [A]	$R_s$ [ $\Omega$ ]	$R_{sh}$ [ $\Omega$ ]	A
8.840	$3.4173e^{-10}$	0.350	49.301	1.020

Les figures III.17 et III.18 représentent respectivement la caractéristique I(V) et la caractéristique P(v), générées avec les paramètres extraits pour un module solaire.

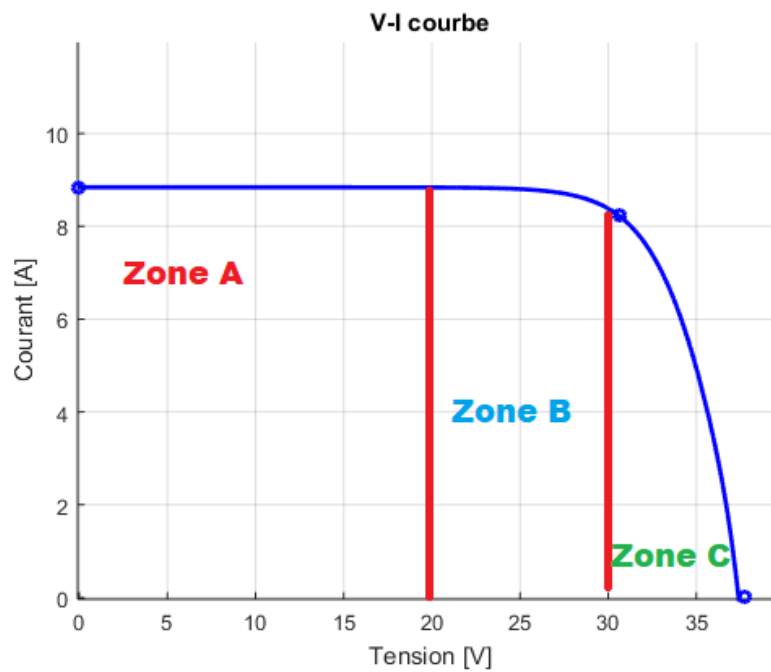


Figure III.17: Caractéristique I(V)

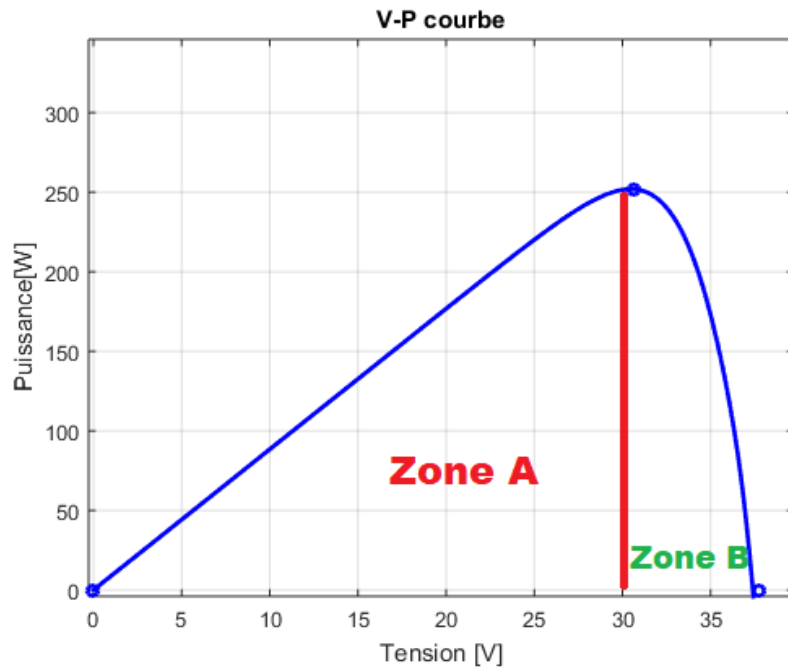


Figure III.18: Caractéristique P(V)

### 1) Zone de fonctionnement

- La figure III.17 représente trois zones essentielles:
  - Zone A [0 20] : dans cette zone on remarque que le courant est stable et constant malgré que la tension en augmentation
  - Zone B [20 30] : dans cette zone le panneau atteint sa valeur maximale
  - Zone C [30 37] : après que le panneau touche le point fort on remarque que le courant diminue jusqu'à il sera nul



- La figure III.18 représente deux zones essentielles:
  - Zone A[0 30]: si la tension augmente la puissance augmente
  - Zone B[30 37]: après que la puissance atteigne son maximum sa diminue jusqu'à quelle sera nulle

## 2) Effet de la variation de l'ensoleillement

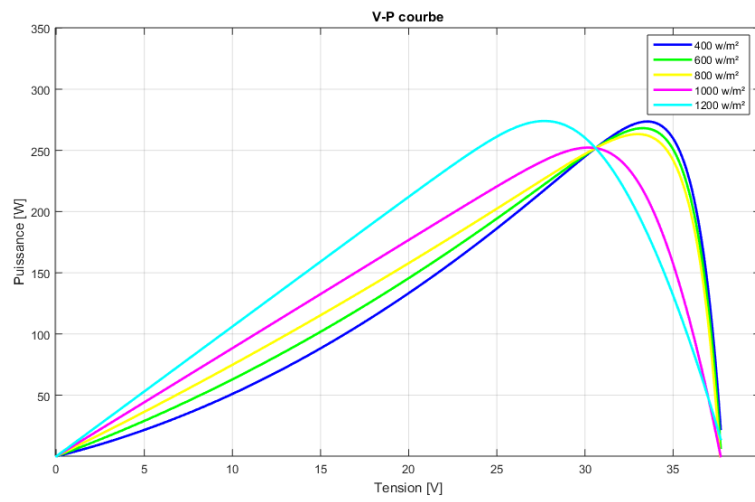


Figure III.19: Influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V)

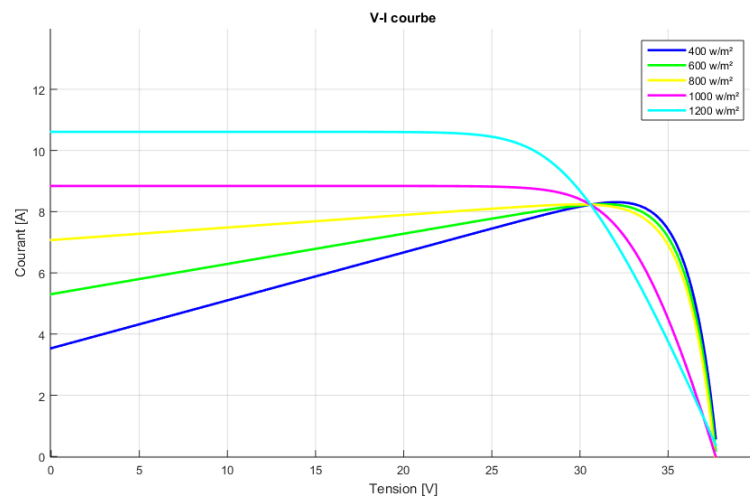


Figure III.20: Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V)

## 2) Effet de la variation de la Température

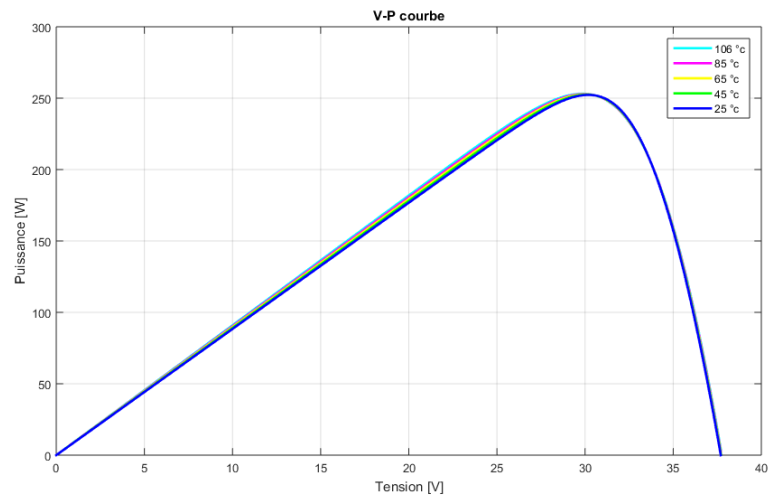


Figure III.21: Influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V)

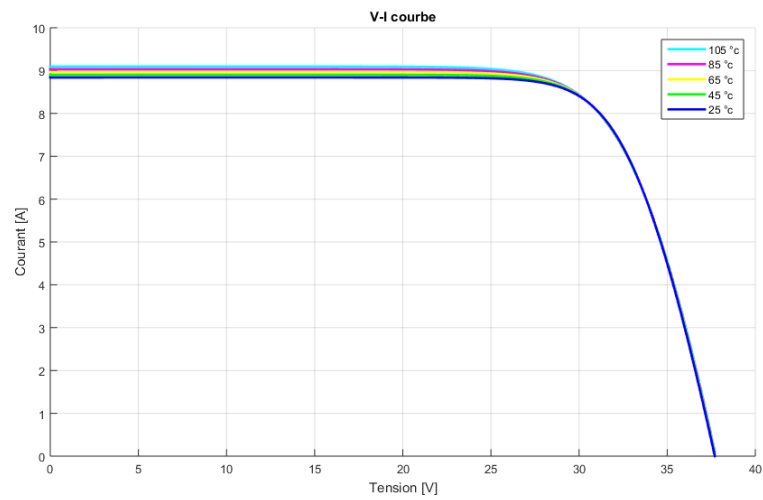


Figure III.22: Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V)

### III.2.2-c Résultats pour deux diodes

Le tableau III.4 représente les résultats des cinq paramètres photovoltaïques qu'on a obtenus

Table III.4: Résultat des paramètres photovoltaïques

$I_{ph}$ [A]	$I_{s1}$ [A]	$I_{s2}$ [A]	$R_s$ [ $\Omega$ ]	$R_{sh}$ [ $\Omega$ ]
8.840	$5.448e^{-106}$	$5.1579e^{-8}$	0.217	49.301

Les figures III.23 et ?? représentent respectivement la caractéristique I(V) et la caractéristique P(v), générée avec les paramètres extraits pour un module solaire.

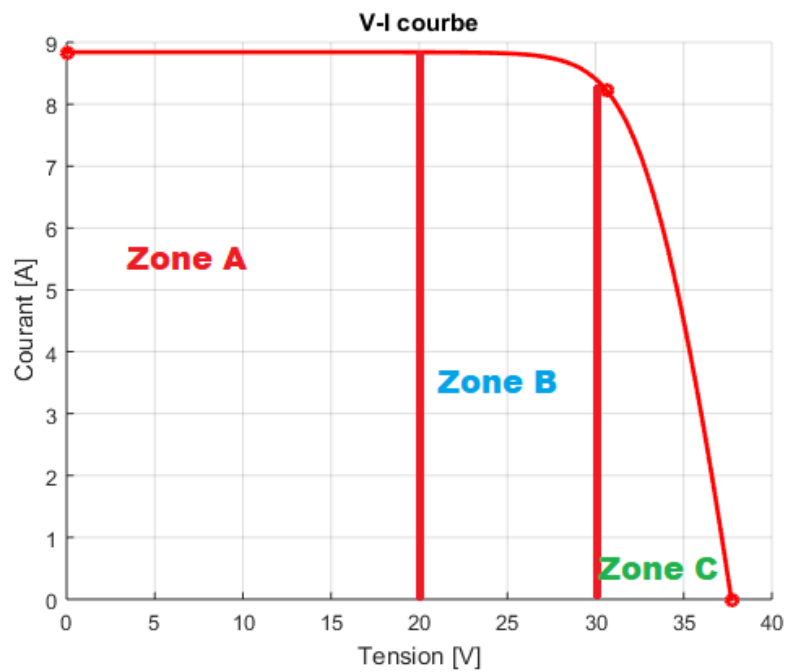


Figure III.23: Caractéristique I(V)

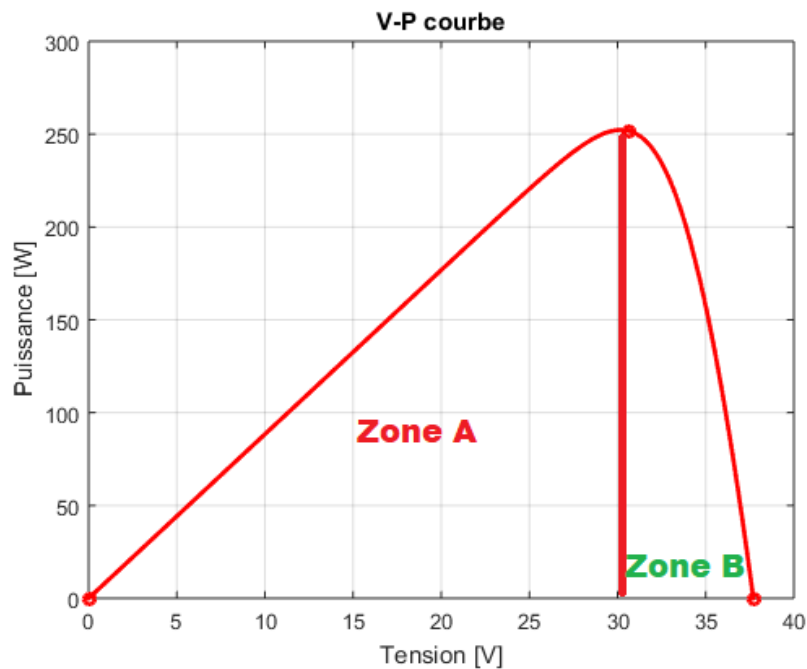


Figure III.24: Caractéristique P(V)

### 1) Zone de fonctionnement

La figure III.23 représente trois zones essentielles:

- Zone A [0 20] : dans cette zone on remarque que le courant est stable et constant malgré que la tension en augmentation
- Zone B [20 30]: dans cette zone le panneau atteint sa valeur maximal
- Zone C [30 37]: après que le panneau touche le point fort on remarque que le courant diminue jusqu'à il sera nul

La figure III.24 représente deux zones essentielles:

- Zone A [0 30]: si la tension augmente la puissance augmente
- Zone B [30 37]: après que la puissance atteigne son maximum sa diminue jusqu'à quelle sera nulle

## 2) Effet de la variation de l'ensoleillement

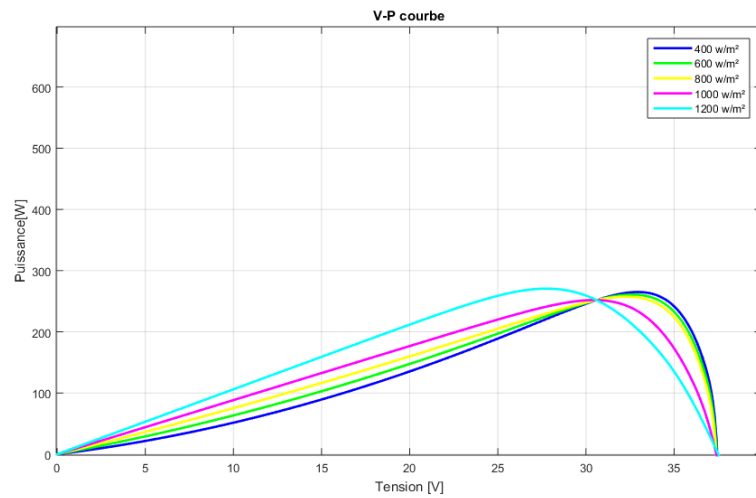


Figure III.25: Influence de l'éclairement sur la Caractéristique P(V)

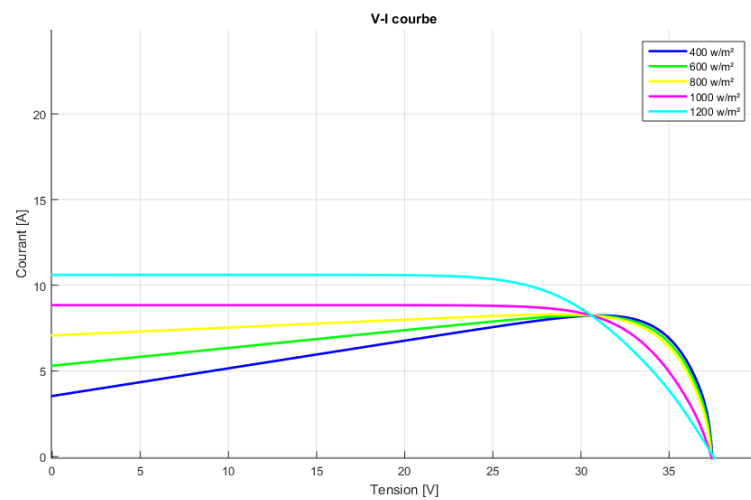


Figure III.26: Influence de l'éclairement sur la Caractéristique P(V)

### III.2.2-d Comparaison entre une diode et deux diodes par la méthode Newton Raphson :

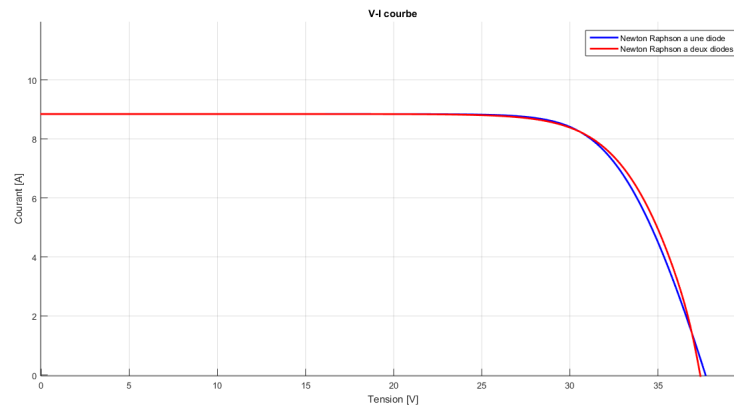


Figure III.27: Caractéristique I(V)

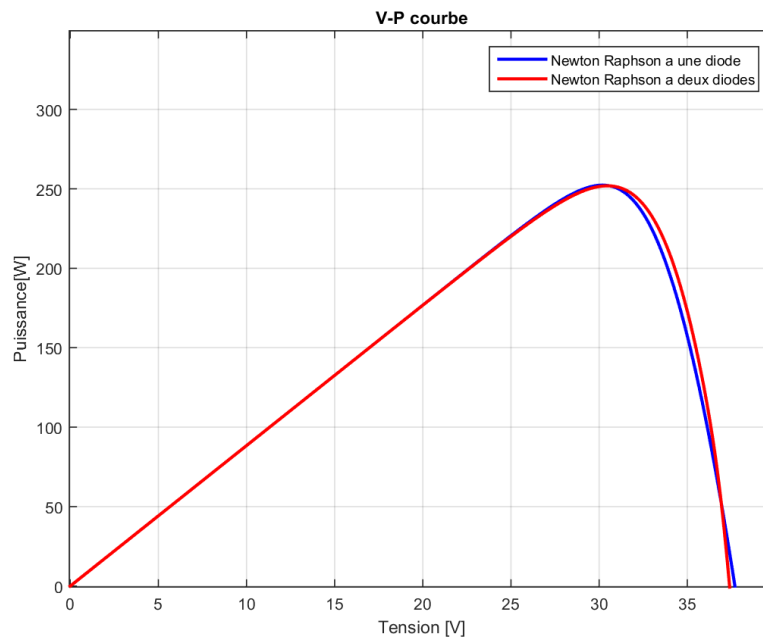


Figure III.28: Caractéristique P(V)

### Commentaire

Dans la caractéristique  $I(V)$ , on remarque que sur la zone C la technique de deux diodes est mieux que la technique d'une seule diode. Dans la caractéristique  $P(V)$ , on remarque sur la zone B que la technique de deux diodes est puissante par rapport à celle d'une diode.

### III.2.3 Comparaison entre la méthode Explicite Simplifiée et la méthode Newton Raphson

Les figures III.29 et III.30 représentent respectivement les caractéristiques  $I(V)$  et les caractéristiques  $P(v)$ , regroupant les deux méthodes.

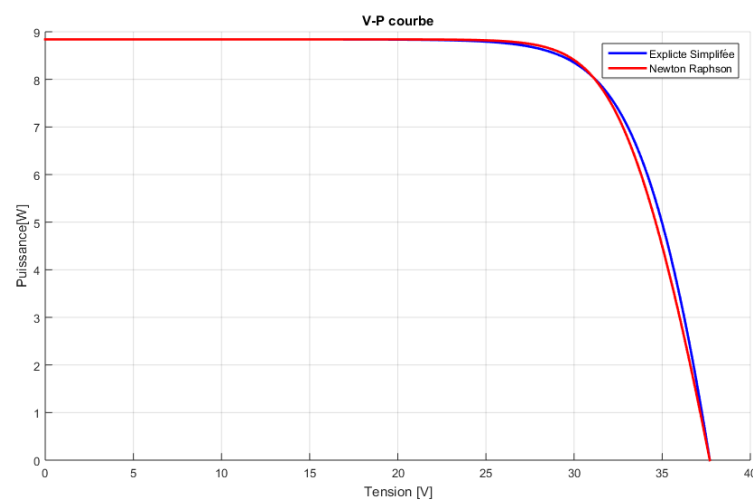


Figure III.29: Caractéristique  $I(V)$

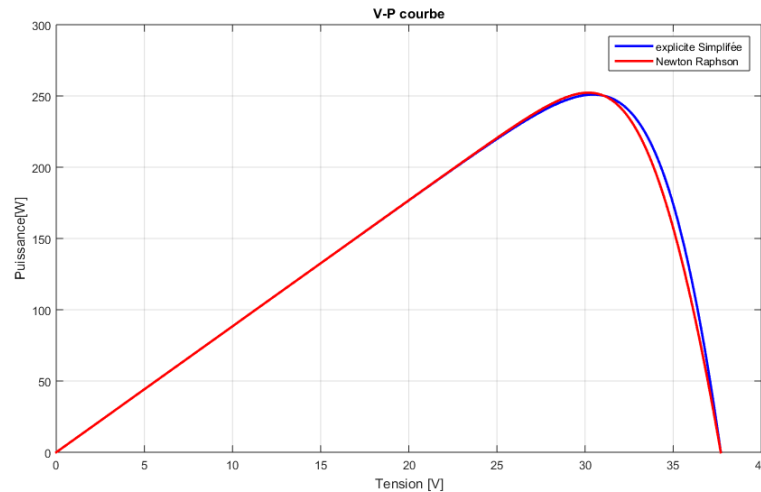


Figure III.30: Caractéristique P(V)

On remarque que malgré le courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert sont presque les mêmes pour les différentes méthodes, le suivi à proximité du point de puissance maximal reste dépendant de la précision des paramètres déduits.

On constate que la méthode Newton Raphson a plus de précision que la méthode Explicite Simplifiée

### III.3 Conclusion:

Dans ce chapitre, on a travaillé avec deux méthodes d'identification Explicite Simplifié et Newton Raphson pour déterminer les deux caractéristiques d'un panneau photovoltaïque I(V) et P(V) avec une diode et deux diodes.

La méthode Explicite Simplifiée est basée sur la résolution analytique par contre la méthode Newton Raphson est basée sur la résolution numérique, cela veut dire que la méthode Newton Raphson est la plus précise .



---

## Conclusion générale

LE panneau solaire photovoltaïque est une nouvelle technologie qui utilise une énergie renouvelable, elle est verte et gratuite. La demande mondiale d'électricité augmente depuis ces 13 dernières années, donc entraîne une augmentation de la production d'électricité.

Pour bien comprendre le comportement d'une cellule photovoltaïque, et être capable de simuler numériquement ces caractéristiques, à partir d'un modèle mathématique donné afin d'optimiser leur rendement, il faut d'abord identifier leurs paramètres. C'était l'objectif de ce travail.

Nous avons entrepris une première étape consistant à réaliser une revue plutôt globale sur la technologie photovoltaïque, abordant le principe de fonctionnement, les différentes technologies utilisées et la modélisation des cellules photovoltaïques dans les deux cas : une diode et deux diodes.

Dans la seconde partie du mémoire, nous avons abordé les différentes méthodes d'identification existantes. Ensuite, nous avons effectué la modélisation des deux méthodes d'identification : la méthode de Newton-Raphson et la méthode explicite simplifiée. Nous avons donc développé des programmes de calcul en utilisant MATLAB. Ces programmes nous ont permis d'identifier les paramètres de la cellule photovoltaïque et de tracer ses caractéristiques

Enfin, Nous avons effectué une comparaison entre les résultats de simulation obtenus et nous avons constaté que la méthode de Newton-Raphson montre une précision supérieure à celle de la méthode explicite simplifiée.

---

## Bibliographie

---

## Bibliography

- [1] BECQUEREL, M. E. Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires. Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences, 1839, vol. 9, p. 561-567.
- [2] FRITTS, Charles E. On a new form of selenium cell, and some electrical discoveries made by its use. American Journal of Science, 1883, vol. 3, no 156, p. 465-472.
- [3] LIU, Fangyang, ZENG, Qiang, LI, Jianjun, et al. Emerging inorganic compound thin film photovoltaic materials: Progress, challenges and strategies. Materials Today, 2020, vol. 41, p. 120-142.
- [4] Merali, Z. (2017). The space race to solar power. Nature, 547(7663), 406-408.
- [5] SWANSON, Richard M. A vision for crystalline silicon photovoltaics. Progress in photovoltaics: Research and Applications, 2006, vol. 14, no 5, p. 443-453.
- [6] ABDELILAH, Y., BAHAR, H., CRISWELL, T., et al. Renewables 2020: Analysis and Forecast to 2025. IEA: Paris, France, 2020.
- [7] DELAGNES, B. Flèche-D. et FLÈCHE, B. Energie solaire photovoltaïque. doc. juin 2007, 2007.
- [8] NG, H. G., MATJAFRI, M. Z., ABDULLAH, K., et al. Comparison of turbidity measurement by MODIS and AVHRR images. In : 2008 Fifth International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualisation. IEEE, 2008. p. 398-403.
- [9] MEEUS, J. Astronomical algorithms.(2dEdition.) Willmann-Bell. Richmond, VA, 1998.
- [10] FELDMAN, Bernard J. An introduction to solar cells. The Physics Teacher, 2010, vol. 48, no 5, p. 306-308.
- [11] Systèmes photovoltaïques Polytech' Savoie 5eme année Iain Ricaud, Oct 2011.p.11/155
- [12] avantages et inconvénients d'un système photovoltaïque :<https://www.maison-travaux.fr/maison-travaux/>

- [renovation-par-type/toiture-charpente/toiture-toiture-charpente/avantages-inconvenients-dune-toiture-photovoltaique-fp-194680.html](https://www.ecosources.org/renovation-par-type/toiture-charpente/toiture-toiture-charpente/avantages-inconvenients-dune-toiture-photovoltaique-fp-194680.html)
- [13] Composition et fabrication d'un panneau solaire :<https://www.ecosources.org/panneau-solaire-photovoltaique>
- [14] Ismail HADDAD, Mémoire de fin d'étude [Modélisation Avancée d'un Panneau Solaire] 2019 univ Guelma
- [15] SERA, Dezso, TEODORESCU, Remus, et RODRIGUEZ, Pedro. PV panel model based on datasheet values. In : 2007 IEEE international symposium on industrial electronics. IEEE, 2007. p. 2392-2396.
- [16] Abdelhak MAOUCHA-Etude et Identification paramétrique d'une cellule photovoltaïque organique-memoire de MAGISTER- 2011-département d'Electronique -Université de Batna
- [17] MODULES—DESIGN, Crystalline Silicon Terrestrial Photovoltaic. Qualification and Type Approval. International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2005.
- [18] SERA, Dezso, TEODORESCU, Remus, et RODRIGUEZ, Pedro. PV panel model based on datasheet values. In : 2007 IEEE international symposium on industrial electronics. IEEE, 2007. p. 2392-2396.
- [19] <https://www.theses-algerie.com/2705901109652333/memoire-de-master/universite-abderrahmane-mira---bejaia/mthodes-d-identification-des-panneaux-photovoltaiques> - consulté le 02/05/2023 à 10h
- [20] K. L. Kennerud, "Analysis of Performance Degradation in," Ieee Transactions On Aerospace and Electronic Systems, no. 6, 1969.
- [21] La figure 1,2,3: Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07
- [22] La figure 4: [http://michel.lalos.free.fr/cadrans\\_solaires/doc\\_cadrans/theorie\\_cs/schemas/azimut.gif](http://michel.lalos.free.fr/cadrans_solaires/doc_cadrans/theorie_cs/schemas/azimut.gif)
- [23] La figure 5 : <https://jeretiens.net/altitude-azimut-zenith-nadir-comprendre-le-systeme>
- [24] La figure 6 :Systèmes photovoltaïques Polytech' Savoie 5eme année lain Ricaud, Oct 2011 page 10
- [25] La figure 7 :<https://lesolarimpulse2.wordpress.com/les-panneaux-photovoltaiques/>
- [26] La figure 8 :<https://www.ecosources.org/panneau-solaire-photovoltaique>
- [27] Les figures des types de panneau : [https://www.mdpi.com/energies/energies-12-04209/article\\_deploy/html/images/energies-12-04209-g001.png](https://www.mdpi.com/energies/energies-12-04209/article_deploy/html/images/energies-12-04209-g001.png)

- 
- [28] La figure 16:[https://www.researchgate.net/figure/Schema-equivalent-dune-cellule-ideale-Les-equations-retenues-de-ce-modele-sont\\_fig5\\_329980090](https://www.researchgate.net/figure/Schema-equivalent-dune-cellule-ideale-Les-equations-retenues-de-ce-modele-sont_fig5_329980090)
- [29] La figure 17/18:[https://www.mdpi.com/energies/energies-12-04209/article\\_deploy/html/images/energies-12-04209-g001.png](https://www.mdpi.com/energies/energies-12-04209/article_deploy/html/images/energies-12-04209-g001.png)
- [30] les figures du chapitre 2 :OTSMANE Ouissem et Diboune Yaakoub,mémoire "identification des paramètres d'un panneau photovoltaïque à l'aide d'un algorithme colonies de fourmis" univ Blida année 2019/2020

# Annexe

ELECTRICAL CHARACTERISTICS						
Characteristics (STC)	250W	255W	260W	265W	270W	275W
Open Circuit Voltage - Voc (V)	37.51	37.65	37.86	38.00	38.10	38.31
Short Circuit Current - Isc (A)	8.70	8.79	8.83	8.93	9.01	9.04
Maximum Power Voltage - Vmpp (V)	30.42	30.70	31.15	31.41	31.83	32.13
Maximum Power Current - Impp (A)	8.22	8.31	8.35	8.44	8.48	8.56
Maximum Power - Pmax (W)	250	255	260	265	270	275
Module Efficiency - $\eta$ (%)	15.24	15.54	15.85	16.15	16.46	16.76

Values at Standard Test Conditions STC (Air Mass AM1.5, Irradiance 1000W/m<sup>2</sup>, Cell Temperature 25°C). Power measurement uncertainty  $\pm 3\%$

THERMAL CHARACTERISTICS	
Characteristics	Value
Voltage Temperature Coefficient (%/°C)	- 0.33
Current Temperature Coefficient (%/°C)	+ 0.05
Power Temperature Coefficient (%/°C)	- 0.41
NOCT (°C)	46 $\pm$ 2