

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ-BOUIRA



Faculté des Sciences et Sciences Appliquées
Département Génie électrique

Mémoire de fin d'étude

Présenté par :

MERZOUK Makhoulf

En vue de l'obtention du diplôme de **Master en :**

Filière : ELECTRONIQUE

Option : Electronique des Systèmes Embarqués

Thème :

**Etude et réalisation d'un caractériser des
modules photovoltaïques**

Devant le jury composé de :

MADI Saida	MCB	UAMOB	Présidente
KHARCHI Mohamed	MAA	UAMOB	Encadreur
MOHAMMEDI Ahmed	MCA	UAMOB	Examinateur

Année Universitaire 2019/2020

Remercîment

*Je voudrais tout d'abord remercier **DIEU** de m'avoir donné la force et la patience afin de pouvoir accomplir ce travail.*

Je désire aussi remercier mes parents pour leur soutien constant et leurs encouragements.

*Je tiens à témoigner toute ma gratitude à mon encadreur **M. KHARCHI Mohamed** pour sa patience, sa confiance et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.*

Je remercie également les membres de jury qui ont bien voulu examiner ce travail.

*Le travail expérimental de ce mémoire a été fait au laboratoire GE. Je remercie **M^{me} MOSTEFAI Fatma** responsable de labo, pour l'accueil et son aide.*

J'adresse mes sincères remerciements à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation tout au long de mes études.

Enfin, je voudrais exprimer ma reconnaissance envers mes amis et collègues qui m'ont apporté le soutien moral et intellectuel tout au long de ma démarche.

Sommaire

RESUME

LISTE DES ACRONYMES

LISTE DES FIGURES

INTRODUCTION GENERAL 1

CHAPITRE I : CARACTERISTIQUE DES MODULES PV

I.1. Introduction.....	3
I.2. Energie solaire	3
I.2.1. Energie solaire thermique	3
I.2.2. Energie solaire photovoltaïque	4
I.2.2.1. Effet photovoltaïque.....	4
I.2.3. Cellule photovoltaïque	4
I.2.3.1. Principe de fonctionnement	5
I.3. Module photovoltaïque	5
I.3.1. Types et technologies des modules PV.....	6
I.3.1.1. Cellules solaires à base de silicium.....	6
I.3.1.2. Cellules solaires en couches minces	7
I.3.1.3. Autres technologies.....	8
I.4. Modélisation cellule/module PV.....	9
I.4.1. Modèle à une diode d'un module PV	10
I.4.2. Modèle a deux diodes d'un module PV	11
I.4.3. Modèle a trois diodes d'un module PV.....	11
I.5. Tests et performance des modules	11
I.5.1. Organismes de standardisation	11
I.5.2. Tests électrique et de durée de vie	12
I.5.2.1. Tests électriques.....	12
I.5.2.2. Tests de la durée de vie et d'endurance	12
I.6. Caractéristiques des modules PV	13
I.6.1. Courant de court-circuit I_{SC}	13
I.6.2. Tension de circuit ouvert V_{OC}	14
I.6.3. Puissance maximal P_{MAX}	14
I.6.4. Facteur de forme FF.....	14

I.6.5. Rendement η	15
I.7. Conclusion	15

CHAPITRE II : CARACTERISATION I-V ET PERFORMANCE DES GPV

II.1. Introduction	17
II.2. Assemblage des modules au GPV	17
II.2.1. String PV	18
II.2.2. Champ PV.....	18
II.3. Structure d'un système PV	18
II.3.1. Système de protection.....	19
II.3.1.1. Diode de by-pass	19
II.3.1.2. Diode anti-retour.....	19
II.4. Impact environnemental sur les performances d'un GPV	19
II.4.1. Influence du faible éclaircissement	20
II.4.2. Influence de la température	20
II.5. Caractérisation en fonctionnement réel	21
II.6. Diagnostic des Générateurs PV	21
II.6.1. Méthodes de diagnostic courantes industrialisées	22
II.6.1.1. Méthodes non-électriques.....	22
II.6.1.2. Méthodes électriques	23
II.6.2. Méthodes dans la littérature.....	23
II.6.2.1. Méthode de réflectométrie.....	23
II.6.2.2. Analyse de la puissance et de l'énergie produite.....	24
II.6.2.3. Analyse du point de fonctionnement	25
II.6.2.4. Analyse de la caractéristique I-V.....	25
II.7. Caractérisation I-V d'un module/générateur PV	26
II.7.1. Caractérisation I-V dans le diagnostic.....	27
II.8. Conclusion	28

CHAPITRE III : TRACEURS I-V

III.1. Introduction	30
III.2. Traceur I-V	30
III.2.1. Fonctionnement de base d'un traceur.....	30
III.3. Types des traceurs I-V.....	30
III.3.1. Traceurs à base de charge électronique.....	30
III.3.1.1. Fonctionnement d'un MOSFET	31

III.3.1.2. MOSFET et module PV	33
III.3.2. Traceurs à base de charge capacitive	34
III.3.2.1. Dimensionnement de la capacité de condensateur	34
III.3.3. Traceurs à base de résistance variable.....	36
III.3.4. Traceurs à base d'amplificateur de puissance bipolaire	37
III.3.5. Traceurs à base d'amplificateur de puissance à quatre quadrants	37
III.3.6. Traceurs à base d'Hacheurs.....	38
III.4. Indices de performance d'un traceur	39
III.4.1. Facteur de performance	39
III.4.2. Écart sur les points critiques et courbe complète	39
III.4.3. Facteur de remplissage	40
III.4.4. Rapport du courant et de la tension	41
III.4.5. Déviation de la pente	41
III.5. Conclusion.....	41

CHAPITRE IV : SIMULATION ET REALISATION

IV.1. Introduction.....	43
IV.2. Simulation	43
IV.2.1. Etapes de la modélisation.....	43
IV.2.1.1. Spécification du module modéliser.....	44
IV.2.1.2. Modélisation de module sous Proteus.....	44
IV.2.1.3. Courbe I-V et P-V avec Graphs de Proteus	44
IV.2.1.4. Sub-circuit de module modélisé.....	45
IV.2.2. Implémentation des traceurs	45
IV.2.2.1. Configuration de la partie commande et visualisation.....	46
IV.2.2.2. Capteur de tension et de courant	46
IV.2.3. Traceur à base d'une résistance variable.....	47
IV.2.3.1. Algorithme de traceur	47
IV.2.3.2. Courbe et caractéristiques obtenus.....	48
IV.2.4. Traceur à base d'une charge électronique.....	49
IV.2.4.1. Algorithme de traceur	49
IV.2.4.2. Courbe et caractéristiques obtenus.....	50
IV.2.5. Traceur à base d'une charge capacitive	51
IV.2.5.1. Algorithme de traceur	51
IV.2.5.2. Courbe et caractéristiques obtenus.....	52

IV.2.6. Résultats de la simulation	53
IV.3. Réalisations	53
IV.3.1. Carte de développement EasyPIC V7	53
IV.3.2. Capteur de courant	54
IV.3.3. Capteur de tension.....	55
IV.3.4. Partie puissance de la réalisation	55
IV.3.5. Partie puissance et commande de la réalisation.	56
IV.3.6. Caractéristiques des panneaux de teste	56
IV.3.6.1. Module Semtoni modèle SR05-10.....	56
IV.3.6.2. Module KPV-170 modèle STP085B-12/BEA	57
IV.3.7. Résultats de la réalisation.....	57
IV.3.7.1. Test sur le module KPV-170 (170W)	58
IV.3.7.2. Test sur le module KPV-170 (85W)	58
IV.3.8. Test d'ombrage partiel	59
IV.4. Interprétation des résultats	60
IV.5. Conclusion	60
CONCLUSION GENERALE	62
BIBLIOGRAPHIE	
ANNEXE	

Abstract

The **characterization** of photovoltaic devices is an important process for revealing the quality of its operation. This by extracting the main characteristic parameters, and comparing them with those present in its Datasheet. Thus, a **fault** or an unexpected **degradation** attempt will be easily detected, located and maintained if possible or replace the damaged module if necessary. The present work presents some technique of electrical characterization of **photovoltaic solar panels**, and this by a variation of a load between its terminals with instantaneous acquisition of the voltage-current operating points. The drawing of **I-V curve** will be possible with the various characteristic parameters extracted from the curve, in particular the maximum power **P_{MPP}**, the short-circuit current **I_{sc}** and the open circuit voltage **V_{oc}**, thus the parameter **FF** will be easily calculated which provides information on the module evaluation.

Keywords: characterization, degradation, photovoltaic solar panels, I-V curve, P_{MPP}, I_{sc}, V_{oc}, FF.

Résumé

La **caractérisation** d'un dispositif photovoltaïque est une démarche très importante pour la révélation des facteurs gouvernant sa qualité de fonctionnement. Ceci par l'extraction des principaux paramètres caractéristique, et les comparait avec ceux présents dans sa fiche technique. Ainsi, un **défaut** ou une tentative de **dégradation** inattendue sera facilement détecté, localisé et maintenu si possible ou le remplacer le module détérioré si nécessaire. Le présent travail présente quelque technique de caractérisation électrique des **panneaux solaire photovoltaïque**, et ceci par la variation d'une charge entre ses bornes avec l'acquisition instantanée des points de fonctionnement Tension-Courant. Le tracé de la **courbe I-V** sera possible avec l'extraction des différents paramètres caractéristiques, notamment la puissance maximale **P_{MPP}**, le courant de court-circuit **I_{sc}** et la tension de circuit ouvert **V_{oc}**, ainsi le paramètre **FF** sera facilement calculé ce qui renseigne sur l'évaluation de module analysé.

Mots clés : caractérisation, dégradation, panneaux solaire photovoltaïque, courbe I-V, P_{MPP}, I_{sc}, V_{oc}, FF.

Liste des acronymes

Abréviation	Signification	Unité
<i>AC</i>	Courant alternatif	
<i>C</i>	Valeur de capacité	<i>F</i>
<i>CdTe</i>	Tellurure de cadmium	
<i>CIGS</i>	Cuivre, indium, gallium et sélénium	
<i>DC</i>	Courant continu	
<i>Doc</i>	Déviaton critique sur la tension de circuit ouvert	
<i>Dsc</i>	Déviaton critique sur le courant de court-circuit	
<i>E</i>	L'éclairement	<i>W.m⁻²</i>
<i>EVA</i>	Ethylène Vinyl Acétate	
<i>FF</i>	Facteur de forme	
<i>FP</i>	Facteur de performance	
<i>GaAs</i>	d'arséniure de gallium	
<i>GPV</i>	Générateur photovoltaïque	
<i>I</i>	Courant	<i>A</i>
<i>Id</i>	courant qui circule dans le drain ou la diode	<i>A</i>
<i>IMPP</i>	Courant maximum au point <i>Pmpp</i>	<i>A</i>
<i>I_{ph}</i>	Photo courant	<i>A</i>
<i>Is</i>	Courant de saturation inverse de la jonction PN	<i>A</i>
<i>Isc</i>	Courant de court-circuit	<i>A</i>
<i>I-V</i>	Caractéristique Courant-Tension	
<i>I-V</i>	Courant-tension	
<i>K</i>	Constant de Boltzmann (1.38E-23)	<i>j/K</i>
<i>Pi</i>	Puissance incidente	<i>W/m²</i>
<i>P_{MPP}</i>	Puissance maximal généré	<i>W</i>
<i>P_{PV}</i>	Puissance généré	<i>W</i>
<i>PV</i>	Photovoltaïque	
<i>P-V</i>	Caractéristique Puissance-Tension	
<i>R</i>	Valeur de la résistance	Ω
<i>Req</i>	Résistance équivalente	Ω
<i>R_I</i>	Rapport de courant	

Liste des acronymes

R_S	Résistance série	Ω
R_{Sh}	Résistance shunt (parallèle)	Ω
R_V	Rapport de tension	
S	Surface	m^2
STC	Conditions du Test Standard	
T	Température absolue	K
V	Tension	V
V_{DS}	Tension Drain et Source	V
V_{GPV}	Tension au borne de GPV	V
V_{GS}	Tension entre Grille et Source	V
V_{MPP}	Tension maximale au point P_{mpp}	V
V_{OC}	Courant de court-circuit	A
V_{PV}	Tension au borne de module PV	V
V_t	Tension thermique	V
V_{th}	Tension thermique	V
W_c	Watt crête	
$a-Si$	silicium amorphe	
$c-Si$	Silicium cristallines	
$m-Si$	Silicium monocristallines	
$p-Si$	Silicium polycristallines	
q	charge élémentaire d'un électronique ($1.6E-19$)	C
α	Facteur d'idéalité de la jonction PN	
η	Rendement conversion	

Liste des figures

Figures chapitre I

Figure I.1 : Energie solaire thermique.....	3
Figure I.2 : Représentation schématique d'une pile solaire a jonction P-N.....	4
Figure I.3 : Constitution d'un module photovoltaïque	6
Figure I.4 : Module PV a base des cellules de silicium monocristallines.....	6
Figure I.5 : Module PV a base des cellules de silicium polycristallines.....	7
Figure I.6 : Module PV à base de silicium amorphe.....	7
Figure I.7 : Model d'une diode.....	10
Figure I.8 : courbe I(V) et P(V) d'un module PV et ses différentes caractéristiques.....	13

Figures chapitre II

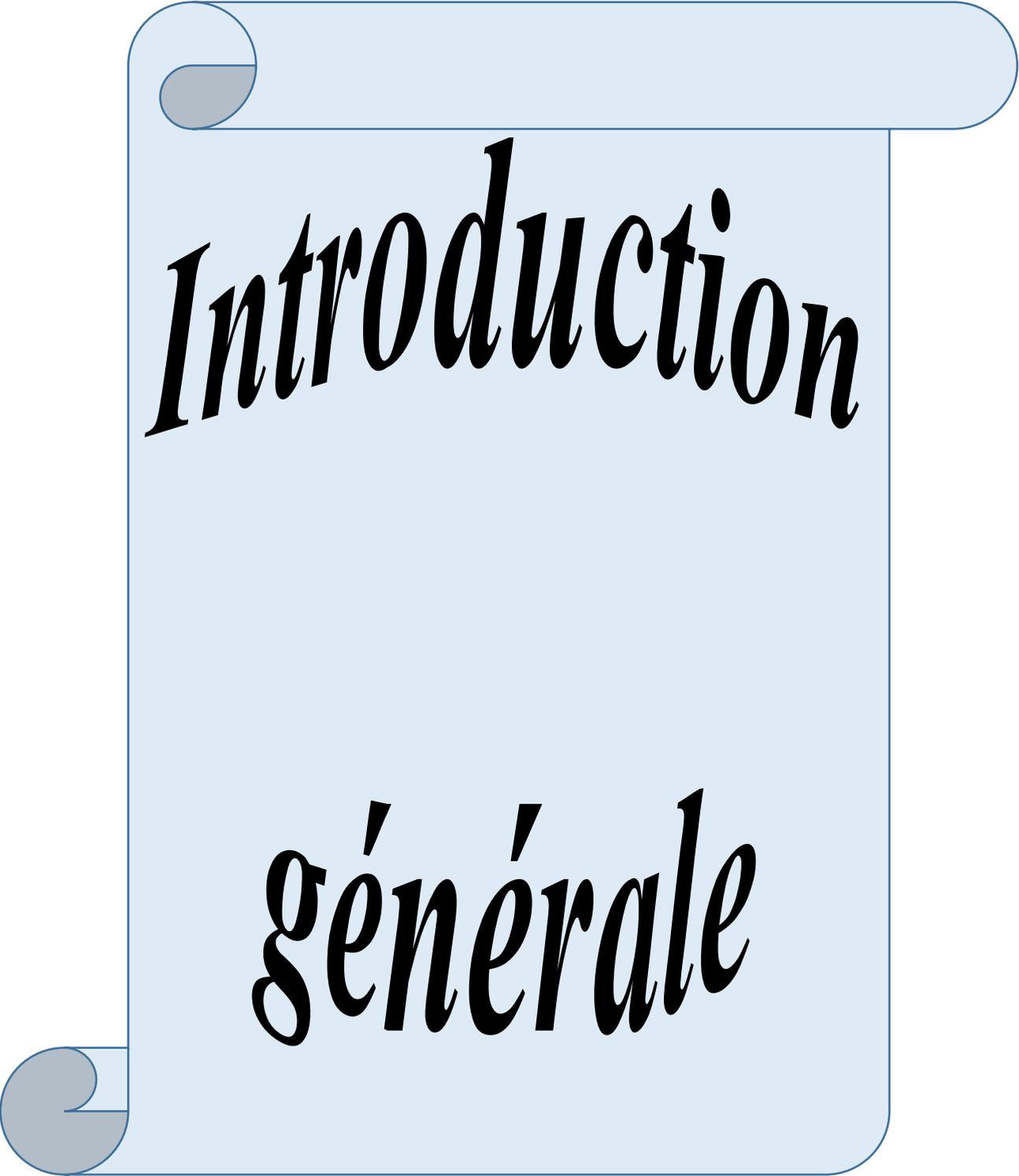
Figure II.1: Générateur PV avec une protection par diode by-pass et anti-retour.....	17
Figure II.2: Synoptique d'un système photovoltaïque.....	18
Figure II.3 : Influence d'ensoleillement sur le fonctionnement d'un module type BP SOLAR MSX-60 à T = 25°C.....	20
Figure II.4 : Influence de la température sur le fonctionnement d'un module type BP SOLAR MSX-60 a G= 1000 W/m ²	20
Figure II.5 : Méthode de diagnostic	21
Figure II.6 : Cellule court-circuitée dans un module.....	22
Figure II.7 : Corrosion dans la boîte de jonction.....	22
Figure II.8 : Principe de la réflectométrie pour localiser le défaut dans un GPV.....	24
Figure II.9 : Allure d'une caractéristique I-V d'un champ PV en fonctionnement défaillant.....	25
Figure II.10 : Model de traceur d'une caractéristique I-V d'un GPV.....	26
Figure II.11: Exemple de caractéristique I(V) d'une GPV issue d'un traceur I-V.....	27
Figure II.12 : Défauts et sa signature I-V.....	27

Figures chapitre III

Figure III.1 : Traceur de courbe I-V à base d'une charge électronique MOSFET.....	31
Figure III.2 : Caractéristique I(V) d'un MOSFET pour différents tension V _{GS}	32
Figure III.3 : Un model basic d'un traceur I-V à base d'un MOSFET come une charge électronique [26].....	33
Figure III.4 : Extraction de la courbe I-V d'un module PV par un traceur à base d'un MOSFET.....	33
Figure III.5: Module PV chargé par un condensateur.....	34
Figure III.6 : Model a une diode d'un module PV alimente une charge capacitive.....	34
Figure III.7 : Traceur de courbe I-V à base d'une résistance variable.....	36
Figure III.8 : Traceur à base d'amplificateur de puissance bipolaire.....	37
Figure III.9 : Schéma du traceur quatre quadrants.....	38
Figure III.10 : Traceur à base de convertisseur DC/DC.....	39

Figures chapitre IV

Figure IV.1 : Modélisation a une diode d'un module PV Solerex MSX-60 sous Proteus.	44
Figure IV.2 : Caractéristiques I-V (A) et P-V (B) de module sous les condition STC.....	45
Figure IV.3 : Sub-circuit de module PV avec ça charge optimal sous Proteus.....	45
Figure IV.4 : Configuration de la partie commande, visualisation et sauvegarde sous Proteus.	46
Figure IV.5 : Capteur de courant.....	46
Figure IV.6 : Capteur de tension.	46
Figure IV.7 : Traceur I-V à base d'une résistance variable.	47
Figure IV.8 : Algorigramme d'algorithme d'un traceur à base d'une charge résistive.	48
Figure IV.9 : Courbe et caractéristiques de simulation d'un traceur à base d'une résistance variable aux conditions STC.	48
Figure IV.10 : Circuit de régulateur de la tension V_{GS} de MOSFET.	49
Figure IV.11 : Traceur I-V à base d'une charge électronique.	49
Figure IV.12 : Algorigramme d'un traceur à base d'une charge électronique (MOSFET).	50
Figure IV.13 : Courbe et caractéristiques de simulation d'un traceur à base d'un MOSFET.	51
Figure IV.14 : Traceur I-V à base d'une charge capacitive.....	51
Figure IV.15 : Algorigramme de traceur à base d'une charge capacitive.	52
Figure IV.16 : Courbe et caractéristiques de simulation d'un traceur à base d'une capacité. .	52
Figure IV.17 : EasyPIC V7 et ses différents constituants.....	54
Figure IV.18 : Capteur de courant ACS712ELECTR-30A-T.....	54
Figure IV.19 : Capteur de courant basé sur le principe d'un diviseur de tension.	55
Figure IV.20 : photo de la partie puissance de la réalisation.	55
Figure IV.21 : Schéma et photo de traceur réalisé.	56
Figure IV.22 : Module Semtoni SR05-10.	57
Figure IV.23 : Module KPV-170.	57
Figure IV.24 : Courbe I-V et caractéristiques de module KPV-170 (170 Wc) avec $C = 4.7mF$ et aux condition $E = 861 W/m^2$, $T = 18.4 ^\circ C$	58
Figure IV.25 : Caractéristiques de module KPV-170 (85 Wc) avec $C = 5.58mF$ et aux conditions $E = 700 W/m^2$, $T = 22.4^\circ C$	58
Figure IV.26 : Caractéristiques de module Semtoni (10 Wc) avec $C = 0.88mF$ et aux conditions $E = 861 W/m^2$, $T = 18.4^\circ C$	59
Figure IV.27 : Courbe I-V de traceur après une injection d'un défaut type ombrage partiel. .	60
Figure IV.28 : Caractéristiques calculer par le traceur lors de l'apparition d'un défaut type ombrage partiel.....	60



Introduction

générale

Introduction général

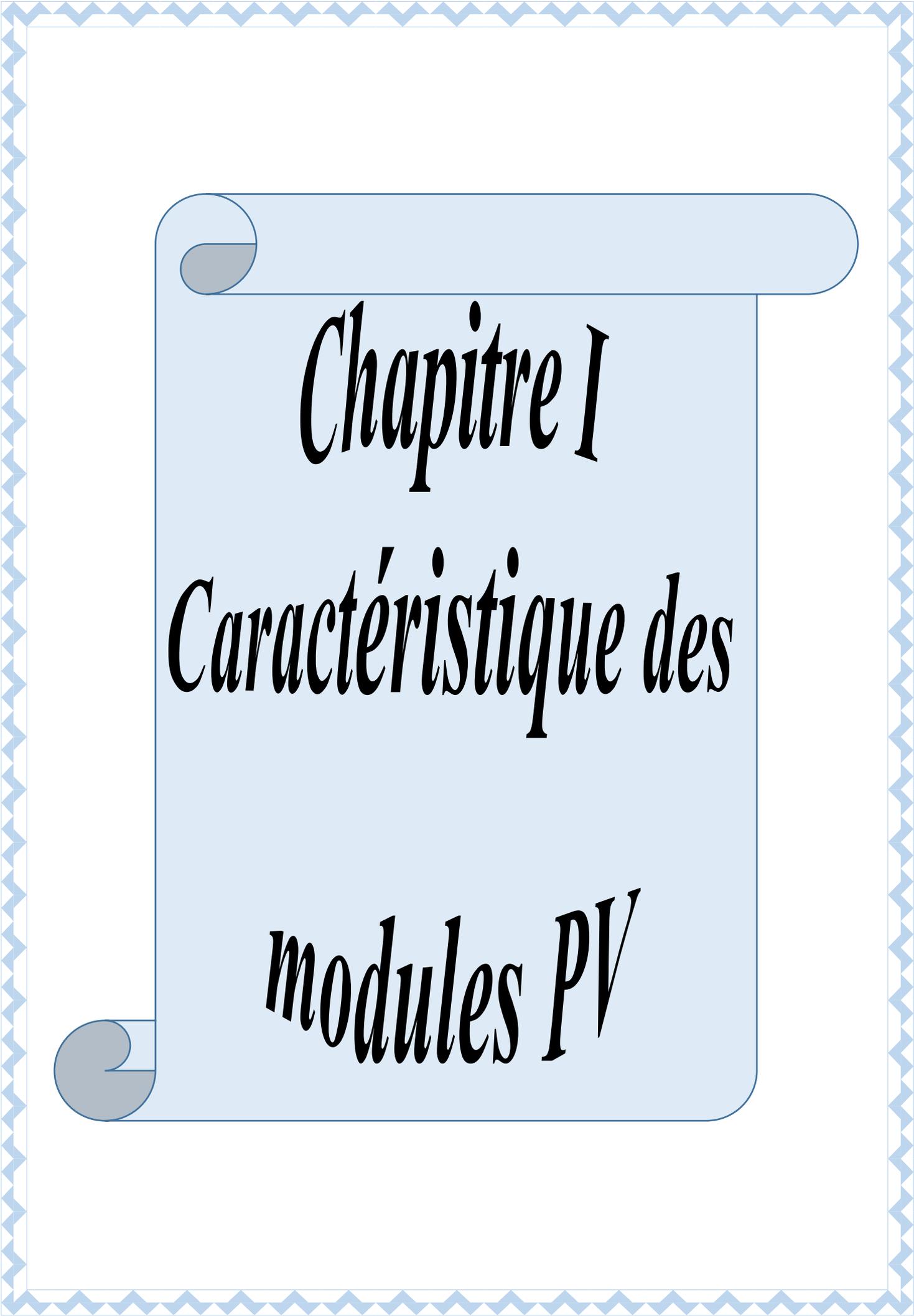
La croissance des investissements récents dans le domaine de la recherche et la production de l'énergie électrique d'origine renouvelable [1], est un indice pour une transition des sources énergétiques de base actuelle (les énergies fossiles ; le pétrole, le gaz et le charbon) qui ont l'inconvénient d'être limité, épuisable et polluant, vers des sources durables et verts comme l'énergie éolienne et photovoltaïque qui montrent des rendements de plus en plus satisfaisant.

Plusieurs efforts de l'industrie photovoltaïque ont été effectués, pour réduire le coût et d'augmenter les performances des modules photovoltaïques PV [2], afin de monopoliser le marché des énergies renouvelable par ces divers critères de disponibilité et d'autonomie. Contrairement à l'énergie éolienne qui a le désavantage d'être couteuse et relative à des emplacements précis pour une meilleure production [3].

La dépendance de la caractéristique qui définit le fonctionnement de la cellule PV par rapport à des paramètres environnementaux et de fabrication, et l'ignorance de son comportement avec, pose une problématique critique dans son utilisation [1]. D'où les fabricants de modules PV fournissent souvent des principaux paramètres électriques du module à des conditions de test spécifique. Ces conditions sont rarement rencontrées sur le terrain, conditions typiques des tests de laboratoire.

Notre travail consiste à étudier et de concevoir un système capable de vérifier les caractéristiques électriques d'un module PV en conditions réelles de fonctionnement en vue d'évaluer ces performances et de diagnostiquer une éventuelle dégradation.

Ce travail est alors organisé en quatre chapitres, dont le premier chapitre nous présentons premièrement l'énergie solaire (photovoltaïque et thermique), ainsi les caractéristiques électriques de module PV. Nous montrons ensuite au deuxième chapitre l'intérêt de la caractérisation I-V dans l'analyse des performances et le diagnostic des générateurs photovoltaïque GPV. Le troisième chapitre est consacré à l'étude de différents traceurs I-V et plus particulièrement celui à la base de la charge capacitive et de la charge électronique. Dans le dernier chapitre nous simulons les traceurs détaillés dans le chapitre précédent et nous réaliserons un traceur à base d'une charge capacitive dans le but de caractériser trois types de module PV monocristallin de 10, 85 et 170 Wc.



Chapitre I

Caractéristique des

modules PV

I.1. Introduction

Ce premier chapitre est un survol rapide sur le monde de l'énergie solaire photovoltaïque, par premièrement son aspect physique, où on va expliquer quelque fondement de l'énergie solaire, effet photovoltaïque, les cellules PV qui sont au cœur de la conversion de courant photonique en courant électrique et les modules PV qui constitue un assemblage série des cellules PV. Ensuite, l'aspect technologique qui couvre la modélisation des modules PV et les tests électriques qui subit après sa fabrication pour l'extraction de ses principaux paramètres qui gouvernant son fonctionnement.

I.2. Energie solaire

Au niveau de soleil, une succession des réactions thermonucléaires s'y produisant pour transformer l'hydrogène en hélium corrélé avec une dissipation d'énergie. Cette énergie se traduit par des rayonnements composés des longueurs d'ondes entre $0.2\mu\text{m}$ et $3\mu\text{m}$ émise dans l'espace, la terre étant à distance de $150\,106\text{ km}$ du soleil reçoit ses rayonnements qui sont source d'énergie renouvelable sous des caractères thermique (chaleur), et électrique (photovoltaïque) [4].

I.2.1. Energie solaire thermique

C'est la production de la chaleur à l'aide des panneaux sombre, son principe consiste à transformer le rayonnement solaire en énergie thermique grâce à un fluide qui circule dans des panneaux exposés au soleil, **figure I.1**. Cette chaleur peut aussi être exploitée pour produire de la vapeur puis convertir en électricité [4, 5].

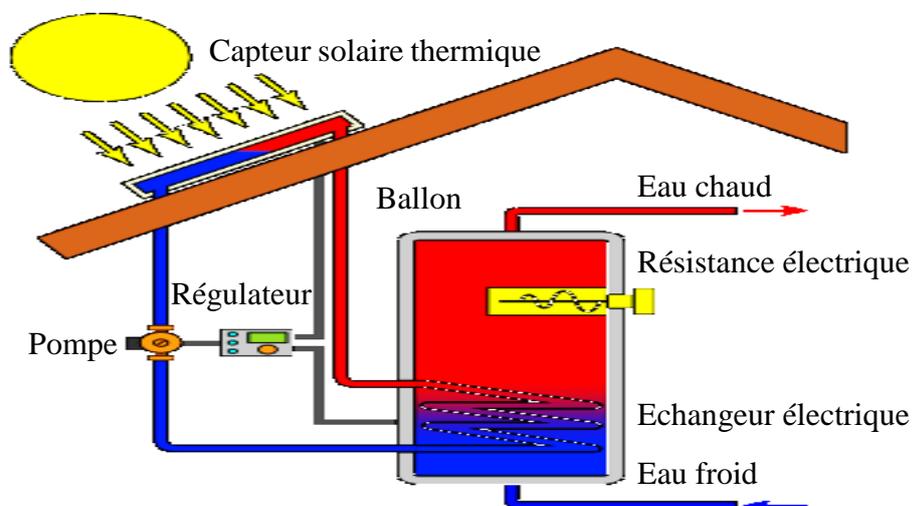


Figure I.1 : Energie solaire thermique [6].

I.2.2. Energie solaire photovoltaïque

C'est la conversion directe de la lumière (rayonnement solaire) en énergie électrique sous l'effet photovoltaïque, grâce aux propriétés des matériaux semi-conducteurs d'une cellule photovoltaïque.

I.2.2.1. Effet photovoltaïque

Le mot "Photovoltaïque" est la combinaison de deux mots: "photos" ; mot d'origine grecque qui signifie lumière, et "Volta" ; le nom du physicien italien Alessandro Volta, qui a inventé la première pile électrique au 1800.

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique des matériaux semi-conducteurs lorsqu'ils sont exposés à la lumière du soleil. Fut observée la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel. Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs de la compagnie Bell-Lab, aux États-Unis, parvinrent à fabriquer la première photopile, l'élément primaire d'un système photovoltaïque [7].

I.2.3. Cellule photovoltaïque

La Photopile ou la cellule photovoltaïque est un dispositif optoélectronique a base des matériaux semi-conducteur (généralement le silicium), qui a la capacité à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière sous l'effet photovoltaïque. La **figure I.2** présente les constituent de base d'une cellule PV.

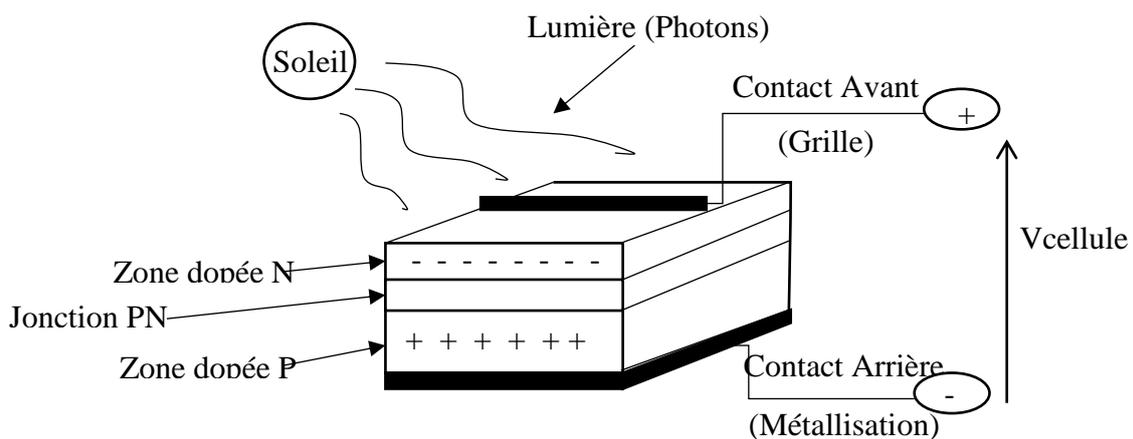


Figure I.2 : Représentation schématique d'une pile solaire a jonction P-N.

I.2.3.1. Principe de fonctionnement

La conversion de l'énergie lumineuse des rayons solaires en énergie électrique par la cellule photovoltaïque, est le biais de production et du transport des charges électriques positives et négatives de matériau semi-conducteur sous l'influence de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons (dopée de type N) et l'autre un déficit en électrons (dopée de type P).

Lorsque les deux parties sont en contact surfacique, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. Une jonction (dite p-n) a été formée [8]. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones N et P, une diode est obtenue.

Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi un pair électron - trou.

Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel le courant électrique circule [8].

I.3. Module photovoltaïque

Une cellule solaire peut produire une tension qui varie entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé, de sa disposition, de la température de la cellule ainsi que le vieillissement de la cellule [9]. Cette faible tension ne permet pas en pratique d'employer les cellules de façon individuelle. En général, les cellules solaires sont assemblées en série et/ou parallèle pour produire une tension/courant utile pour les applications pratiques [10]

Cette combinaison de cellules solaires forme ce qu'on appelle le module photovoltaïque. Cet assemblage est encapsulé sous verre ou sous composé plastique pour assurer la protection contre la fragilité des cellules, agression atmosphérique, la corrosion et l'humidité. La **figure I.3** donne la composition interne d'un module PV.

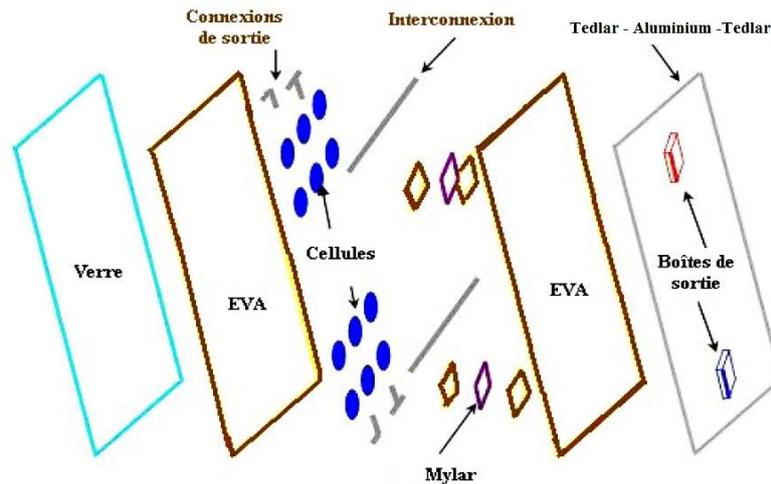


Figure I.3 : Constitution d'un module photovoltaïque. [11]

I.3.1. Types et technologies des modules PV

Il existe plusieurs types des modules photovoltaïques selon le matériau semi-conducteur utilisé et la technologie employée dans la construction des cellules qu'il le compose :

I.3.1.1. Cellules solaires à base de silicium

Le silicium est le matériau semi-conducteur le plus utilisé dans la fabrication des cellules photovoltaïques, il couvre 90% du marché photovoltaïque mondial [12].

A. Cellules solaires au silicium cristallin (c-Si)

Ce sont les cellules de la première génération (appelé aussi des technologies matures), comme elles ont été les premières à être commercialisées. Elles se présentent sous forme de plaquettes carrées ou pseudo-carrées, parfois rondes [12]. On trouve deux classes ;

A.1. Cellule au silicium monocristallin (m-Si) : constituée d'un seul cristal et elle a un aspect uniforme, de couleur gris bleuté, ou noir. La **figure I.4** présente un module PV à base des cellules de silicium monocristallines [12].

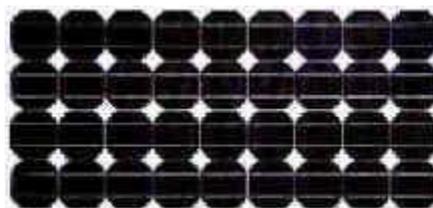


Figure I.4 : Module PV à base des cellules de silicium monocristallines [13].

A.2. Cellules au silicium polycristallin (p-Si): elle se compose de plusieurs cristaux assemblés, et présente l'aspect d'une « mosaïque » compacte de fragments métalliques bleutés de quelques millimètres à quelques centimètres, appelés « grains » [12]. La **figure I.5** montre un module PV a base des cellules de silicium polycristallines.

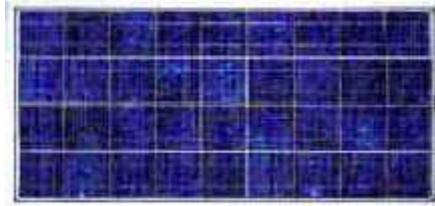


Figure I.5 : Module PV a base des cellules de silicium polycristallines [13].

B. Cellules solaires au silicium amorphe (a-Si)

Le silicium amorphe (a-Si) a été la première technologie de film mince utilisé dans le photovoltaïque. Des petites cellules en a-Si destinés aux produits de consommation tels que les montres et calculatrices, ont introduit des cellules solaires pour des millions de gens depuis les années 1980 [14]. La **figure I.6** indique un module PV à base de silicium amorphe.



Figure I.6 : Module PV à base de silicium amorphe [13].

I.3.1.2. Cellules solaires en couches minces

Elles constituent les cellules de la seconde génération. Cette technologie permet de diminuer le coût de fabrication, mais son rendement est généralement inférieur à celui des cellules en silicium cristallin. Il existe essentiellement quatre types de cellules solaires qui sont inclus dans cette catégorie, le silicium amorphe a-Si (mentionné précédemment), et trois autres qui sont fabriqués à partir de matériaux « non-silicium » à savoir [12] :

A. Tellure de cadmium (CdTe)

Ces cellules peuvent être chimiquement déposées dans une solution aqueuse, ou plus récemment par évaporation de CdTe sur un substrat. L'inconvénient majeur de ces cellules est dû aux contrôles environnementaux très stricts sur les éléments toxiques comme le cadmium (Cd). La pénurie de matières premières limite aussi la production de tellure (Te) [12].

B. Séléniure de cuivre d'indium et de gallium (CIGS)

Les premières cellules à base de l'alliage CIGS ont été fabriquées au début des années 1980 par évaporation des éléments constitués de cuivre (Cu), d'indium (In), de gallium (Ga), et de sélénium (Se). Malgré, que ces cellules atteignent actuellement un rendement maximal de l'ordre de 21 % en laboratoire et jusqu'à 17.5 % pour les modules commercialisés, des problèmes se posent en raison de la rareté de l'indium et ses impacts environnementaux [12].

C. Arséniure de gallium (GaAs)

Le GaAs est l'un des semi-conducteurs de type III-V (des matériaux composés d'un ou plusieurs éléments de la colonne III et de la colonne V du tableau périodique de Mendeleïev). Les cellules PV on couches minces qui intègrent cette technologie sont caractérisées par grand rendement qui atteint 28,8% en laboratoire mais leur coût étant encore très élevé, leur utilisation reste cantonnée à des applications très spécifiques comme le domaine spatial. Il est important de noter que le semi-conducteur GaAs a été utilisé aussi pour fabriquer des cellules solaires de haut rendement, en architectures simple jonction et multijonctions [12].

I.3.1.3. Autres technologies**A. Cellules à concentration**

La concentration photovoltaïque est une technologie alternative aux panneaux plats consistant à remplacer la surface plate de cellules solaires avec des éléments optiques (lentilles ou iroirs) qui augmentent la densité de rayonnement solaire et le concentrer sur des cellules spéciales dont la superficie est très inférieure à la surface de captage [12].

B. Cellules multijonctions

Les cellules multijonctions sont composées de plusieurs couches superposées, de matériaux différents, chacun sensible à une longueur d'onde différente, ce qui permet un balayage plus large du spectre solaire. Ce type de cellules est déjà commercialisé, mais principalement pour des applications spatiales. Le rendement obtenu en laboratoire par ces cellules est d'environ 37.9%. Le système de concentration (cellules multijonctions à concentration) a augmenté le rendement de ces cellules à plus de 46% ces dernières années [12].

C. Cellules organiques

Les cellules PV à base des molécules organiques ou polymères offrent de grandes opportunités à la conversion d'énergie de faible cout dues à plusieurs avantages technologiques

des semi-conducteurs organiques. Cette génération offre une grande flexibilité aux applications solaires, mais le rendement maximum obtenu en laboratoire (11.2%) reste faible [12].

D. Cellules à colorants

La génération d'électricité par ces cellules est basée sur l'absorption de la lumière par molécules colorantes (dite aussi sensibilisateurs). Le développement de ces cellules a commencé au début des années 1990. A ce jour, les meilleurs rendements avec ce type de technologie se situent autour de 11.9 % [12].

I.4. Modélisation cellule/module PV

Après la présentation de différentes technologies des modules PV par les types des cellules qui les compose, nous allons nous intéresser au domaine responsable d'élaboration des modèles qui décrivent son principe de fonctionnement, à savoir que ces modèles sont valides au niveau cellule, module et générateur PV.

La modélisation d'un système électrique est fréquemment utilisée afin de décrire son comportement électrique à l'aide de composants électriques élémentaires (source, résistance, diode, bobine, condensateur, etc.), De nombreux modèles électriques ont été développés pour représenter le comportement non linéaire qui résulte de celui des jonctions semi-conductrices d'un module PV, qui sont à la base de leurs réalisations. Ils varient en complexité, précision et adaptabilité à la modélisation de conditions environnementales variables. Parmi ces modèles on peut citer [15] :

- Modèle de base : Il repose sur le principe d'une diode (Jonction PN), lorsqu'elle est éclairée, un courant I et une tension V est observé quand on place une charge à ses bornes.
- Modèle idéal : C'est le modèle le plus simple qui représente la réflexion précédente d'une cellule photovoltaïque, car il ne tient compte que du phénomène de diffusion. Son circuit équivalent se compose d'une diode et d'une source de courant montés en parallèle.
- Modèle avec perte ohmiques : Ce modèle tient compte de la résistivité du matériau et des pertes ohmiques dues aux niveaux des contacts entre les cellules PV, ce qui permet une meilleure représentation du comportement électrique de la cellule par rapport au modèle idéal.

I.4.1. Modèle à une diode d'un module PV

C'est un modèle qui tient compte non seulement des pertes en tension exprimée par la résistance série R_S mais aussi des fuites de courants exprimées par une résistance parallèle R_{Sh} . C'est le modèle sur lequel s'appuient les constructeurs en donnant les caractéristiques techniques de leurs cellules solaires (datasheet), à savoir que ce modèle est considéré comme satisfaisant et même une référence [15]. La figure I.7 représente le model électrique d'un module PV a une diode.

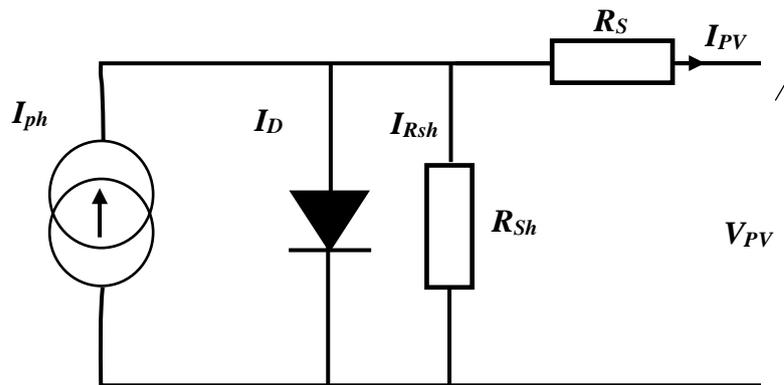


Figure I.7 : Model d'une diode.

D'après le circuit équivalent présenté sur la **figure I.7**, et en appliquant le théorème de Kirchhoff on a le courant I_{PV} qui se calcule par l'équation (I.1).

$$I_{PV} = I_{ph} - I_D - I_{Rsh} \quad I.1$$

Où ; I_{ph} est le courant photonique, I_D est le courant qui passe par la diode et I_{Rsh} est le courant de fuite par la résistance parallèle R_{Sh} .

Le courant qui passe par la diode est donne par l'équation (I.2)

$$I_D = I_S (e^{\frac{V_{PV}}{\alpha V_T}} - 1) \quad I.2$$

Où ; I_S est le courant de saturation de la diode, α est le facteur d'idéalité de la jonction PN et V_T est la tension thermique de la diode qui se calcule par la relation (I.3).

$$V_T = \frac{KT}{q} \quad I.3$$

Où ; q est la charge électronique, K est la constante de Boltzmann et T est la température de la jonction.

D'après l'équation (I.1) qui calcule le courant de module PV et celle de (I.2) qui représente le courant traverser par la diode ; le courant de module PV peut se calculer par la relation (I.4).

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_S \left(e^{\frac{V_{PV} + I_{PV} R_S}{\alpha V_T}} - 1 \right) - \frac{V_{PV} + I_{PV} R_S}{R_{Sh}} \quad I.4$$

I.4.2. Modèle a deux diodes d'un module PV

C'est le modèle le plus proche du comportement réel de module PV, du fait qu'il tient compte du phénomène de diffusion et de recombinaison par les deux diodes. Les modèles à une diode ont été fondés sur l'hypothèse que les pertes due au phénomène de la recombinaison sont absente. Tandis que dans les modules réels, la recombinaison représente une perte considérable, qui ne peut être adéquatement modélisés en utilisant une seule diode. L'examen de cette perte entraîne un modèle plus précis connu par le modèle à deux diodes. Toutefois, l'inclusion de la diode supplémentaire augmente les paramètres à sept (I_{Ph} , I_{D1} , I_{D2} , I_{Rsh} , I_S , F_1 , F_2). Le principal défi est maintenant d'estimer les valeurs de tous les paramètres du modèle, tout en maintenant un effort de calcul raisonnable [15].

I.4.3. Modèle a trois diodes d'un module PV

Ce modèle est proposé pour représenter avec précision le phénomène photovoltaïque, la troisième diode est équivalente aux effets non pris en compte dans les autres modèles comme l'influence des effets de courant de fuite par le périphérie (surface externe) lie aux diodes. L'inconvénient dans cette représentation c'est que le nombre de paramètre inconnus augmente en augmentant le nombre de diodes dans le schéma électrique [15].

I.5. Tests et performance des modules

Après leur fabrication, les modules photovoltaïques subissent, en laboratoire, des tests finaux. Ces tests sont effectués selon les recommandations prescrites par des organismes d'homologation. L'objectif principal visé par ces tests est de déterminer les facteurs clés d'environnement et les caractéristiques de conception qui pourraient aboutir à une durée de vie plus longue [10].

I.5.1. Organismes de standardisation

Plusieurs organismes qui sont charges d'établir des standards au PV, et ceci pour chaque pays fabriquant des modules PV. Quelques-uns de ces organismes sont énoncées ci-dessous [16]:

- ASTM International (American Society for Testing and Materials).
- SAC (Standardization Administration of China).

- CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization).
- DIN (Deutsches Institut für Normung).
- IEC (International Electrotechnical Commission).
- JSA (Japanese Standards Association).

I.5.2. Tests électrique et de durée de vie

Les tests effectuer pour l'extraction des caractéristiques électriques et l'évaluation de la durée de vie d'un module PV sont les procédures déterminant l'estimation de son cout, ainsi son domaine d'application.

I.5.2.1. Tests électriques

Durant les tests électriques effectués en laboratoire, on relève la caractéristique courant-tension du module et on détermine les principaux paramètres qui gouverne le fonctionnement du module (points de puissance maximale P_{MPP} , tension du circuit ouvert V_{OC} et du court-circuit I_{SC} , résistance série R_s , résistance shunt R_{sh} , coefficients de température, ...) [10] sous des conditions spécifiques appelé conditions standard de test STC.

Les conditions standard de test : dans le but de comparer les modules PV de différentes fabrications, il a été décidé par convention de choisir comme conditions standard de test STC [16];

- Irradiance normale de $1\ 000\ W\ m^{-2}$ (1 soleil).
- Répartition spectrale AM1.5.
- Température de cellule de $25^{\circ}C$.

I.5.2.2. Tests de la durée de vie et d'endurance

La plupart des discussions qui entourent les modules photovoltaïques concernent deux aspects: le taux de performance et la durée de vie. Cette dernière est considérée comme l'un des principaux avantages souhaitables pour un module photovoltaïque. Elle est un des quatre facteurs qui définissent le coût de l'électricité solaire (la sécurité, le coût économique, la fiabilité et l'esthétique) [10].

D'autres tests nécessaires s'y ajoutent: les effets des contraintes d'environnement, la charge mécanique, l'isolation électrique, l'effet du rayonnement ultraviolet, l'occultation partielle, la dégradation, l'inspection visuelle, cycles thermiques, exposition prolongée aux fortes températures, etc... [10].

I.6. Caractéristiques des modules PV

En exploitant l'équation I.4 du modèle d'une diode expliquer précédemment, avec les paramètres des conditions standards de test (I_{ph} et T), une courbe caractéristique de module est obtenue qui permet l'extraction des principaux paramètres de fonctionnement. Les fabricants des modules indiquent ces paramètres dans une plaque signalétique pour évaluer son comportement en conditions standards. La **figure I.8** représente la courbe $I(V)$ et $P(V)$.

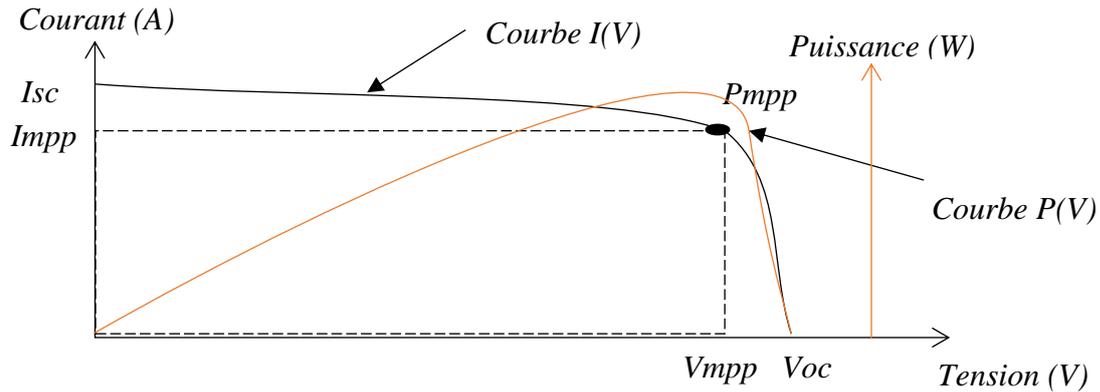


Figure I.8 : courbe $I(V)$ et $P(V)$ d'un module PV et ses différentes caractéristiques.

I.6.1. Courant de court-circuit I_{SC}

C'est la plus grande valeur de courant générée par le module sous les conditions de court-circuit où $V_{PV} = 0$. En appliquant cette condition sur l'équation I.4, le courant de court-circuit peut se calculer comme suit :

$$I_{SC} = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{I_{SC} R_S}{\alpha V_T}} - 1 \right) - \frac{I_{SC} R_S}{R_{Sh}} \quad I.5$$

Avec la valeur de la résistance série (R_S) plus faible que celle de la résistance shunt (R_{Sh}), et d'après l'équation I.5 on peut considérer l'équation I.6 et I.7 comme valable :

$$e^{\frac{I_{SC} R_S}{\alpha V_T}} = 1 \quad I.6 \quad \text{et} \quad \frac{I_{SC} R_S}{R_{Sh}} = 0 \quad I.7$$

Et remplacent les valeurs de I.6 et I.7 dans I.5, le courant de court-circuit est donné par la relation I.8 :

$$I_{SC} \approx I_{ph} \quad I.8$$

Cela signifie que le courant de court-circuit est approximativement égal au photocourant, qui est proportionnel à l'intensité de l'éclairement solaire (insolation E) [17].

I.6.2. Tension de circuit ouvert V_{OC}

C'est la tension pour laquelle le courant débité par le générateur PV est nul $I_{PV} = 0$ (la tension maximale d'un module PV). En appliquant cette condition sur l'équation I.4, la tension au circuit ouvert se calcule comme suit :

$$0 = I_{Ph} - I_S \left(e^{\frac{V_{OC}}{\alpha V_T}} - 1 \right) - \frac{V_{OC}}{R_{Sh}} \quad I.9$$

Le courant qui traverse la résistance shunt R_{Sh} est plus faible (Tend vers zéro) alors le terme $\frac{V_{OC}}{R_{Sh}}$ de l'équation I.9 est considéré nul, ce qui rend l'équation (I.10) valide.

$$0 = I_{Ph} - I_S \left(e^{\frac{V_{OC}}{\alpha V_T}} - 1 \right) \quad I.10$$

Et d'après l'équation I.10, le calcul de la tension au circuit ouvert est donné par la relation (I.11)

$$V_{OC} = \alpha V_T \ln \frac{I_{Ph} + I_S}{I_S} \quad I.11$$

On remarque que la tension à circuit ouvert est reliée au photocourant I_{Ph} (éclairage) à travers une fonction logarithmique, contrairement au courant de court-circuit qui est relié d'une manière linéaire à I_{Ph} [17].

I.6.3. Puissance maximal P_{MAX}

C'est la caractéristique la plus importante d'un module PV ou un dispositif photovoltaïque, qui représente la puissance électrique maximale que peut fournir ce dernier. Associé à une tension maximale V_{MPP} et à une intensité maximale I_{MPP} , et obtenue par transposition de la caractéristique I-V avec celle de P-V.

I.6.4. Facteur de forme FF

A l'aide de la caractéristique I-V d'un module, il est possible d'évaluer le degré de performance de son comportement électrique par le calcul d'un paramètre défini comme le facteur de forme F. Le facteur de forme ou facteur de remplissage est le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer le module notée P_{MAX} et la puissance formée par le rectangle ($I_{sc} \times V_{oc}$). Ce facteur est défini par l'équation (I.12)

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad I.12$$

Ce paramètre compris entre 0 et 1, on l'exprime en % pour qualifie la forme plus ou moins rectangulaire de la caractéristique I-V du module PV. Si celle-ci était carrée le facteur de forme serait égale à 1, la puissance P_{MPP} sera aux cordonnées (V_{OC} , I_{SC}).

I.6.5. Rendement η

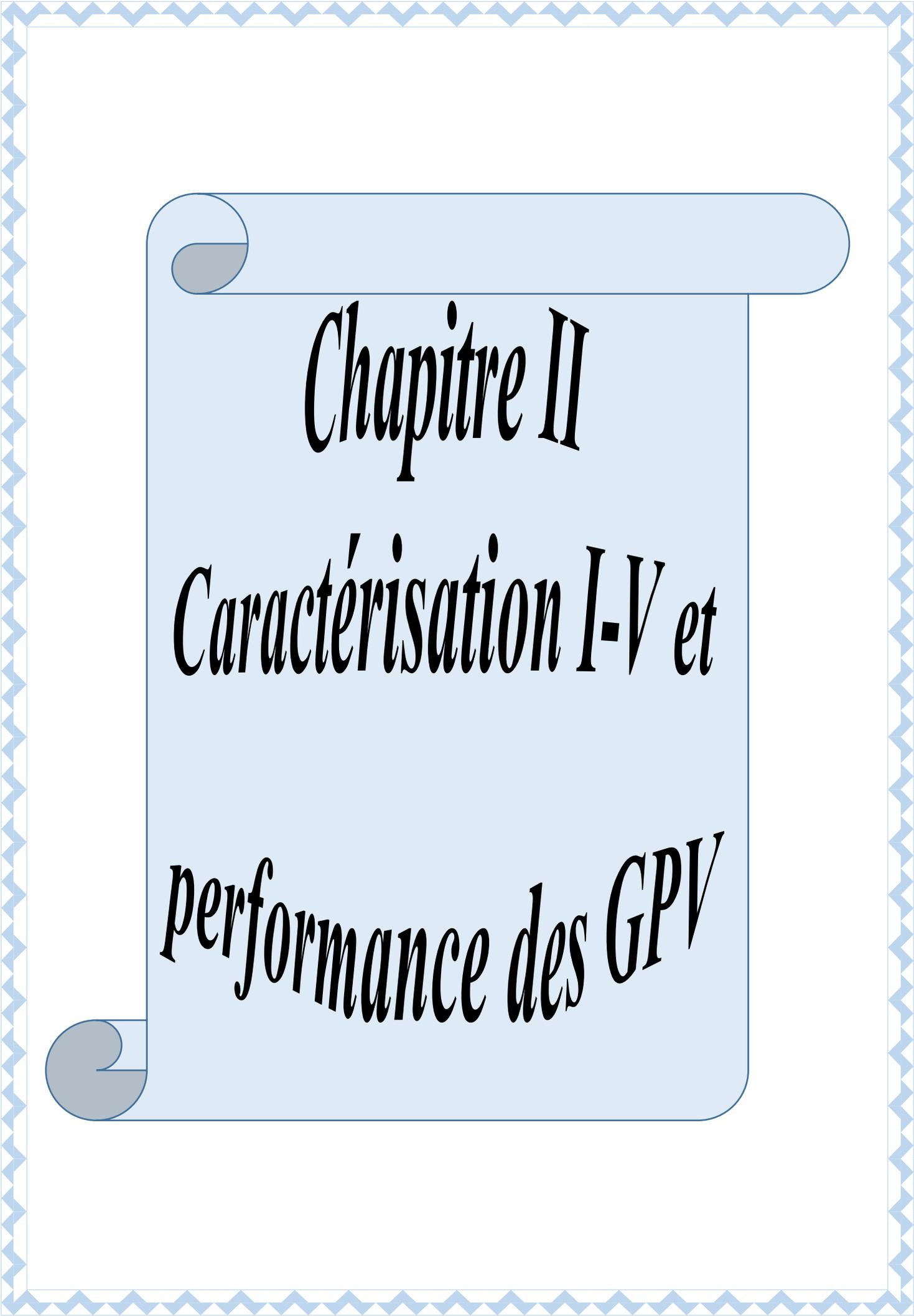
Le rendement d'un module PV désigne le rendement de conversion en puissance, on le considère comme le rapport entre la puissance maximale délivrée par le module PV et la puissance lumineuse incidente P_i , il est donné par la relation suivante :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_i \cdot S} = \frac{FF \cdot V_{oc} \cdot I_{sc}}{E \cdot S} \quad I.13$$

Pour un bon rendement, on augmente le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. La seule connaissance de la valeur qui permet d'évaluer les performances de module est le rendement de conversion qui est un paramètre essentiel.

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié le principe de fonctionnement d'un module PV par une présentation de l'énergie solaire, l'effet photoélectrique et la cellule photovoltaïque qui sont à la base de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Par la suite, nous avons présenté les types et les technologies de fabrication des cellules/modules PV ainsi sa modélisation électrique qui décrit son comportement par celui d'une diode. Enfin, une variété de paramètres caractérisent un module PV sont énuméré dans le but de comparer les performances des modules dans les conditions standards.



Chapitre II

Caractérisation I-V et

performance des GPV

II.1. Introduction

Dans ce deuxième chapitre, nous allons premièrement présenter les composants de base d'un système photovoltaïque et les facteurs influencent sa production, après nous expliquent l'intérêt de la caractérisation dans diagnostic d'éventuel dysfonctionnement d'un GPV. Enfin, un type bien spécifique de caractérisation sera détaillé et son intérêt dans l'analyse de performance.

II.2. Assemblage des modules au GPV

Après la fabrication et la caractérisation électrique des modules PV sous les conditions standards de test (STC), ces derniers sont commercialisés vers des applications à faible ou moyenne puissance, où assembler en série et/ou parallèle pour construire un générateur photovoltaïque (GPV). Le GPV est l'unité de production d'énergie électrique de base d'un système photovoltaïque sous forme de courant continu. La **Figure II.1** schématise la technique d'assemblage des modules en GPV ainsi ces différents constituent de protection.

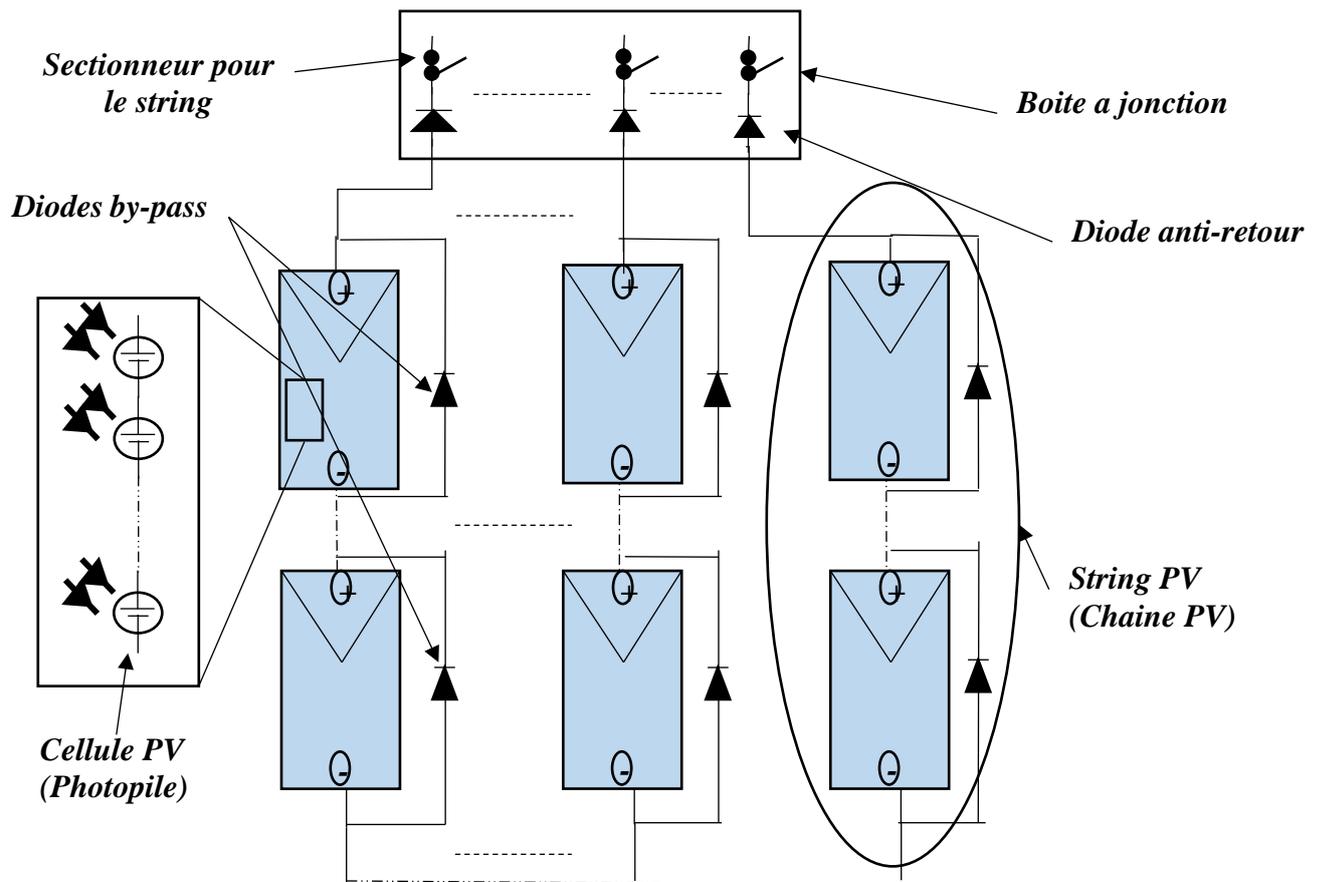


Figure II.1: Générateur PV avec une protection par diode by-pass et anti-retour [18].

II.2.1. String PV

Un string PV, appelé également chaîne PV, est un ensemble de modules connectés en série afin de générer la tension de sortie spécifiée [18].

II.2.2. Champ PV

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire de regrouper les modules en série et en parallèle. Ce groupement forme un champ photovoltaïque [18].

II.3. Structure d'un système PV

Un système photovoltaïque est composé des éléments qui sont nécessaires pour conduire, contrôler, convertir, distribuer et stocker correctement l'énergie produite par le générateur PV en toute fiabilité. Il est composé d'un module photovoltaïque, d'un régulateur et d'une batterie. Il existe deux types de système PV [19] :

- Système autonome
- Raccorde à un réseau local.

La **figure II.2** représente le synoptique d'un système PV.

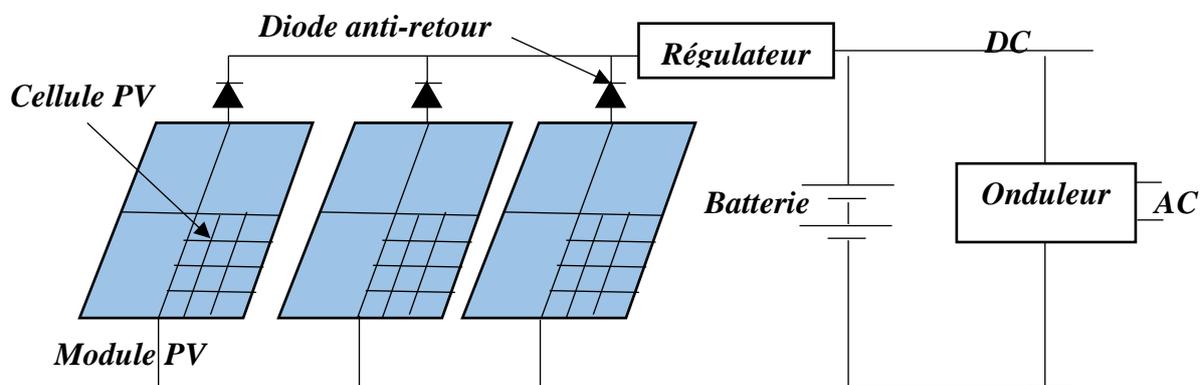


Figure II.2: Synoptique d'un système photovoltaïque.

- Un accumulateur (batterie électrolyte généralement au plombe-acide) souvent utilisé dans les systèmes photovoltaïques pour stocker l'énergie produite par le générateur photovoltaïque pendant la journée et pour alimenter au besoin en électricité (pendant la nuit et par temps nuageux) [20]. Elle se caractérise par sa capacité, profondeur de décharge, tension d'utilisation, rendement, taux d'autodécharge, et la durée de vie [21].

- Un régulateur de charge dans le but d'éviter des surcharges ou des décharges excessives de l'accumulateur, qui produirait des dommages irréversibles, et aussi pour assurer que le système travaille toujours à l'efficacité maximale [20].
- Un inverseur ou onduleur (facultatif) pour la conversion DC/AC donc le courant continu de 12 ou 24 V stockée dans l'accumulateur, en courant alternatif de 230 V [20]. L'inconvénient d'utilisation d'un onduleur est qu'il spécifique à un intervalle de fonctionnement fixe par le constructeur, ce qui implique qu'il ignore l'excès de puissance produit par le GPV et il ne produit rien en cas de déficit de la puissance minimal supporte par ce dernier [21].

II.3.1. Système de protection

Comme pour les autres centrales électriques, il existe plusieurs sortes de protection pour une installation photovoltaïque : protection des intervenants, protection contre la foudre, protection du générateur PV [18]. Du fait que notre chapitre porte uniquement sur les performances des GPV, nous intéressons donc qu'aux composants servant à sa protection contre une baisse de production ou des dommages irréversible.

II.3.1.1. Diode de by-pass

C'est une diode placer en antiparallèle avec un groupe de cellules (généralement 18 cellules dans la technologie monocristalline), pour éviter la tension inverse produit par les autres cellules quand celles-ci est inactif (ombrée). L'étude expérimentale sur différentes cellules de type cristallin a montré que la valeur de la tension de claquage varie entre -10 V et -30 V [18].

II.3.1.2. Diode anti-retour

Cette diode est montée en série avec chaque string PV, son rôle est d'éviter l'absorption de courant inverse due par les strings de faible tension dans un champ photovoltaïque. L'utilisation de la diode anti-retour introduit pourtant une perte dans la production du fait de la chute de tension causée par cette diode pendant le fonctionnement normal du champ PV. De plus, ces diodes peuvent se mettre en défaut et demandent par conséquent un contrôle régulier. [18].

II.4. Impact environnemental sur les performances d'un GPV

Lors de son fonctionnement, un module PV subit une série des alternances environnementaux (jour-nuit, été-hiver) qui affectant sont rendement et ca durée de vie.

II.4.1. Influence du faible éclairement

Pour de nombreux modules commerciaux, le rendement n'est pas constant en fonction de l'éclairement, une chute de manière drastique à faible éclairement (typiquement lorsque l'intensité lumineuse devient inférieure à 200 W/m^2). Ce phénomène est bien souvent négligé par les fabricants, qui ne donnent aucune indication sur le comportement de leur module à faible éclairement [16]. La représentation des courbes I-V sous différentes ensoleillement est donnée par la **figure II.3** [15].

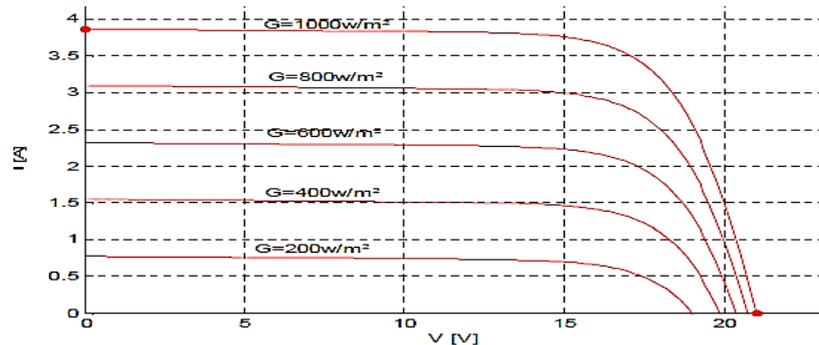


Figure II.3 : Influence d'ensoleillement sur le fonctionnement d'un module type BP SOLAR MSX-60 à $T = 25^\circ\text{C}$ [15].

II.4.2. Influence de la température

L'effet de la température sur le panneau varie en fonction de l'éclairement, de la température ambiante, de la vitesse du vent et tous ces paramètres changent en fonction du site choisi pour l'installation photovoltaïque. De plus les coefficients liés à la température diffèrent en fonction des matériaux utilisés pour la fabrication des cellules [16]. La représentation des courbes I-V sous différentes températures est donnée par la **figure II.4** [15].

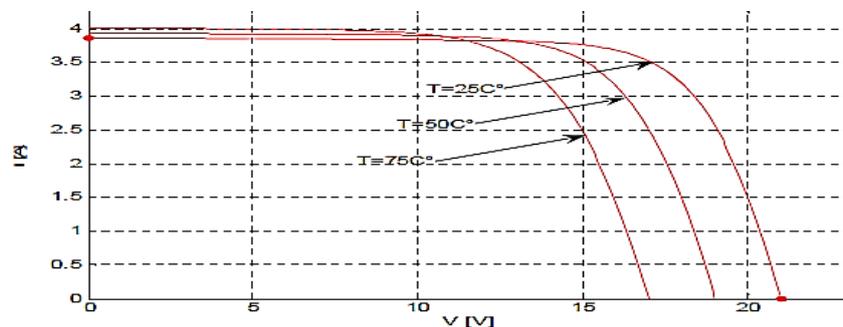


Figure II.4 : Influence de la température sur le fonctionnement d'un module type BP SOLAR MSX-60 à $G = 1000 \text{ W/m}^2$ [15].

II.5. Caractérisation en fonctionnement réel

Certains fabricants apposent sur chacun des modules, une étiquette individuelle indiquant les paramètres principaux effectivement mesurés dans les conditions STC (présenté dans le chapitre précédent), et le comportement du module en utilisation réelle. En effet, il peut être plus intéressant, notamment pour les filières autres que le silicium cristallin, de s'éloigner des conditions STC. Par exemple, pour les cellules au silicium amorphe, le rendement est meilleur pour un éclairage inférieur à $1\ 000\ \text{W m}^{-2}$, l'échauffement des cellules sera moins pénalisant [16].

Dans n'importe quel système photovoltaïque, le champ joue un rôle principal dans sa balance énergétique. Par conséquent, il doit être examiné de plus près pendant l'analyse de tout le système photovoltaïque. L'étude des générateurs photovoltaïque signifie, en particulier, la détermination des principaux paramètres de l'équation gouvernant sa caractéristique électrique. Une fois ces paramètres déterminés, on pourra alors, évaluer facilement les paramètres et performances du module (puissance maximale, rendement, etc...) [16].

II.6. Diagnostic des Générateurs PV

C'est l'ensembles des méthodes et techniques d'inspection employer pour la détection et/ou localisation des chuts des performances ou le dysfonctionnement d'un GPV. La représentation de la hiérarchie des méthodes de diagnostic présente dans l'industrie et la littérature est donnée par la **figure II.5** [18].

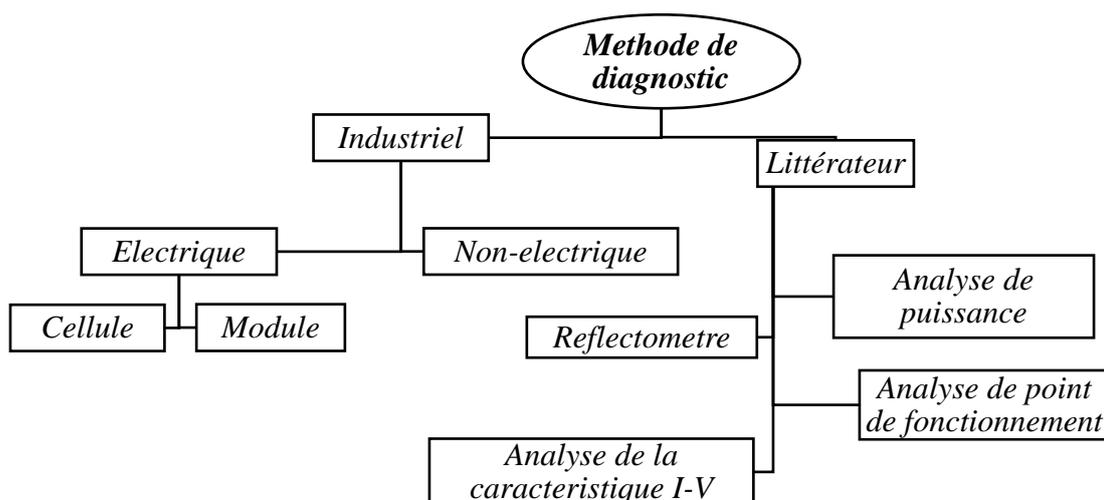


Figure II.5 : Méthode de diagnostic [18].

II.6.1. Méthodes de diagnostic courantes industrialisées

On peut distinguer deux catégories de méthodes de diagnostic courantes industrialisées [18] :

- ✓ Des méthodes électrique (reposant sur l'analyse du courant (I) et de la tension (V) délivré par le module).
- ✓ Des méthodes non-électrique (reposant sur l'analyse d'autres grandeurs que I et V).

II.6.1.1. Méthodes non-électriques

➤ Au niveau de la cellule PV :

- ❖ Les essais mécaniques de flexion.
- ❖ L'imagerie par photoluminescence.
- ❖ Electroluminescence.
- ❖ Tests de thermographie.

➤ Au niveau du module PV :

La méthode de l'imagerie d'infrarouge (caméra thermique) est largement appliquée. Cette méthode repose sur le fait que tous les matériels émettent un rayonnement infrarouge sur une plage de longueur d'onde qui dépend de la température du matériau. En examinant la distribution de la température au niveau du module, des anomalies (si elles ont lieu) peuvent être détecté et localisées. La **figure II.6** et **II.7** des exemples d'utilisation [18].

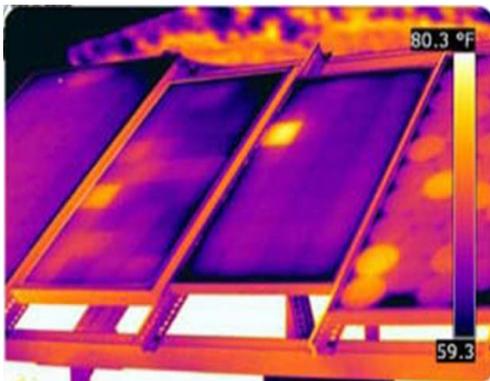


Figure II.6 : Cellule court-circuitée dans un module.

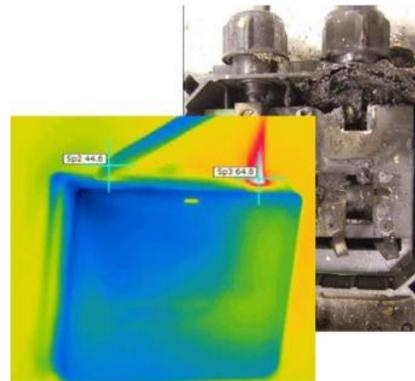


Figure II.7 : Corrosion dans la boîte de jonction.

Il est possible, grâce à la méthode de l'imagerie d'infrarouge, de localiser précisément le lieu où apparaissent les défauts dans des différents niveaux du système (module, string, champ), elle ne permet pourtant pas d'identifier la nature de défauts. En plus, une telle intervention ne sera envisagée qu'après l'apparition d'un défaut avérée. Ceci revient à dire qu'il

est impossible d'automatiser le processus de diagnostic qui nécessite l'intervention d'un tiers [18].

Les méthodes non-électriques offrent la possibilité de localiser très finement le défaut d'une cellule. Mais, il est à savoir qu'ils sont appliqués dans la phase de développement des cellules, ou pour le test de qualification ou encore plus pour un diagnostic plus approfondi pour des modules défectueux en fonctionnement [18].

II.6.1.2. Méthodes électriques

La plupart des systèmes de monitoring exploité actuellement dans un système PV sont essentiellement intégrés aux onduleurs (convertisseur continu-alternatif assure les injections au réseau de distribution). Dans ce cadre, les données mesurées sont souvent les mêmes d'un système à l'autre. Les grandeurs mesurées les plus courantes sont :

- Le courant débité par le GPV.
- La tension aux bornes du GPV.
- La résistance d'isolement entre les bornes positive et négative du GPV.

Ainsi, d'autres grandeurs complémentaires sont utiles à ajouter comme :

- La température ambiante du site.
- L'ensoleillement aux mesures électriques.

Il convient, dans le cas où les données collectées par les capteurs spécifiques aux grandeurs mesurées sont nécessaires de les traiter localement (un système embarqué) ou à distance, sur une ou plusieurs installations [18].

II.6.2. Méthodes dans la littérature

De nombreuses méthodes de diagnostic ont été proposées pour détecter et localiser les défauts dans un système PV. Nous résumons dans cette partie les différentes méthodes proposées.

II.6.2.1. Méthode de réflectométrie

La méthode de réflectométrie est une méthode électrique qui consiste à injecter un signal de type échelon dans le système ou le milieu à inspecter. Ce signal se propage selon la loi de propagation du milieu étudié et lorsqu'il rencontre un défaut, une partie de son énergie est renvoyée vers le point d'injection. Cette technique nous permet de mesurer les caractéristiques électriques d'une ligne de transmission et de détecter tout point de discontinuité. La

réflectométrie est couramment utilisée pour la détermination de l'état électrique de câbles par la localisation du défaut de type circuit ouvert, court-circuit, augmentation ou diminution de l'impédance (**figure II.8**) [18, 22].

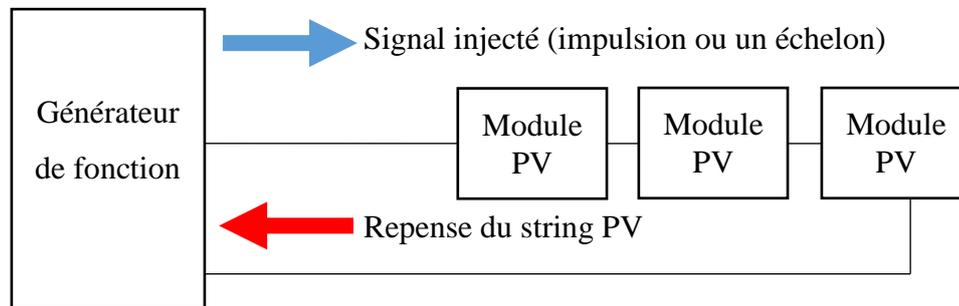


Figure II.8 : Principe de la réflectométrie pour localiser le défaut dans un GPV.

Cette méthode est limitée en nombre de défauts localisables (court-circuit, circuit ouvert, augmentation de l'impédance du câble/connectique). De plus, une telle intervention (injection du signal dans le string) nécessite une interruption du système et l'analyse du signal de retour nécessite également un traitement du signal bien sophistiqué [18].

II.6.2.2. Analyse de la puissance et de l'énergie produite

Cette méthode repose sur la mesure de la puissance ou l'énergie de générateur PV et de comparée à celle attendue, lorsqu'une déviation importante a lieu, on considère qu'il y a un défaut. Par contre, une meilleure localisation de défauts peut être accomplie dans ces travaux grâce à une analyse plus approfondie sur les grandeurs mesurées.

L'analyse mentionnée consiste à générer des attributs supplémentaires de la chute de la puissance ou de l'énergie produite telles que : la durée, l'amplitude, la fréquence et les instants de la chute. Ces mêmes attributs sont également prédéterminés pour les différents défauts considérés. Lors de leur comparaison, le défaut dont la valeur des attributs considérés est la plus proche de celle déduite des grandeurs mesurées est considéré comme le défaut responsable de la chute [18, 22].

Celle-ci offre la possibilité de détecter automatiquement la présence d'un défaut sans interrompre le système. Cependant, seule la famille de défauts peut être détectée. Il s'avère impossible de discriminer les défauts dans une même famille. En plus, une telle méthode s'applique uniquement pour un champ PV et non pas pour un string ou module [18].

II.6.2.3. Analyse du point de fonctionnement

Outre la comparaison de la puissance ou de l'énergie produite actuelle et celle attendue, la comparaison du point de la puissance maximale actuel (courant et tension correspondant à la puissance maximale) et celui attendu peut apporter plus d'information sur l'état du système PV, la comparaison relationnelle entre ces courants et entre ces tensions donne deux couples de valeur binaire (0 ou 1). Suivant la combinaison de ces deux couples, la nature des problèmes du champ PV peut être identifiée [18].

L'analyse du point de fonctionnement offre un atout supplémentaire par rapport à l'analyse de la puissance ou de l'énergie produite. Grâce à cette analyse, il est possible d'identifier le niveau du système (module ou string) qui est en dysfonctionnement. Par contre, il est impossible d'identifier la nature des défauts apparus [18].

II.6.2.4. Analyse de la caractéristique I-V

Cette méthode consiste à représenter l'allure d'une caractéristique I-V d'un générateur PV en fonctionnement défaillant et de la comparée avec celle en fonctionnement normal. Ainsi, la modification d'une telle caractéristique peut être espérée lorsque qu'il y a un changement de l'état du champ PV provoqué par un changement de la condition de fonctionnement (ensoleillement et température) ou par une apparition d'un ou de défauts dans le champ. La **figure II.9** montre l'allure d'une caractéristique I-V en fonctionnement normal et défaillant (ombrage partiel) [18].

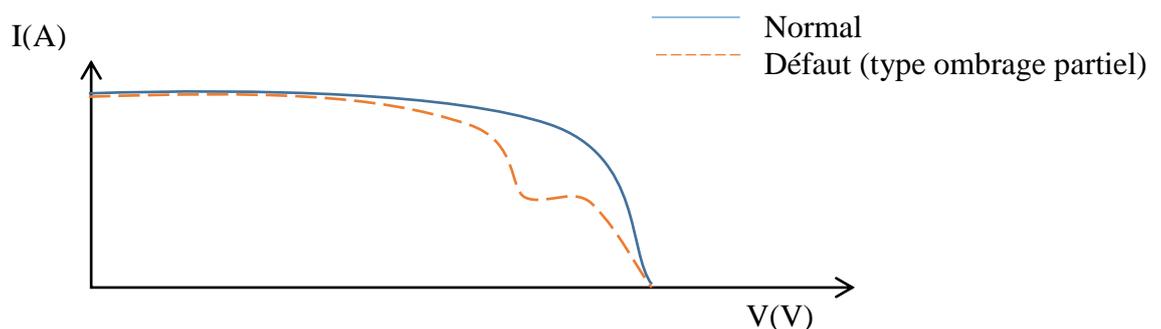


Figure II.9 : Allure d'une caractéristique I-V d'un champ PV en fonctionnement défaillant.

L'étude bibliographique a montré que de nombreuses études ont porté sur l'évaluation de l'impact des différents défauts par l'analyse de la caractéristique I-V résultante. Par contre, l'utilisation d'une telle caractéristique pour remonter à la nature des défauts n'est pas largement répandue. Deux raisons principales peuvent être citées comme barrière à l'application d'une telle méthode pour faire le diagnostic : la difficulté d'obtention en ligne de la caractéristique

complète I-V et la manque d'une base de données pertinente sur les causalités défauts/caractéristiques I-V [18].

II.7. Caractérisation I-V d'un module/générateur PV

Pour une cellule, module et de même pour un générateur photovoltaïque, la caractéristique courant-tension est considérée comme étant sa « carte d'identité », elle exprime les points de fonctionnement (courant en fonction de la tension $I(V)$) possible d'un panneau relatif à son état interne de conversion (dégradation et vieillissement), et l'influence environnemental (ensoleillement, température, humidité...).

La caractéristique I-V d'un dispositif PV est obtenu par une variation d'une charge variable a ses bornes de la tension de circuit ouvert (V_{OC}) au courant de court-circuit (I_{SC}) ou inversement. Au cours de la procédure, les valeurs de la tension et de courant sont recorder par un système de traitement, pour la représentation de la courbe $I(V)$ et le calcul des différents paramètres caractérisent le fonctionnement de module dans les conditions de test.

Plusieurs études théoriques et expérimentales sont menées pour la conception et la réalisation des traceurs de la caractéristique I-V (ou la courbe I-V), avec le principe de varie une charge aux bornes d'un panneau solaire, ainsi une révélation instantanée des valeurs de tension et de courant. La **figure II.10** présente un modèle d'un traceur pour les GPV, et la

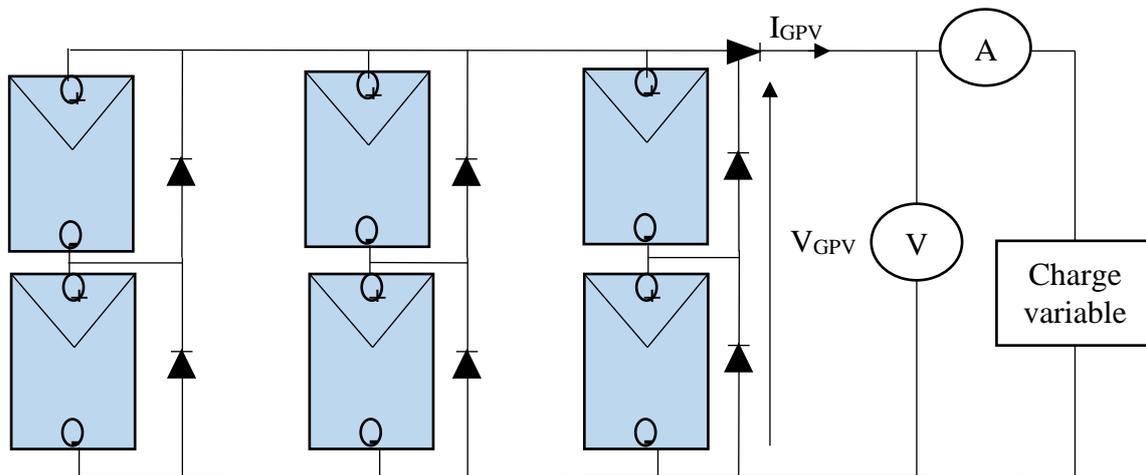


Figure II.10 : Model de traceur d'une caractéristique I-V d'un GPV.

La courbe I-V dessiner est de l'allure montrer par **figure II.11** et ceci si aucun défaut existe au niveau de module/générateur PV lors de l'opération de la caractérisation.

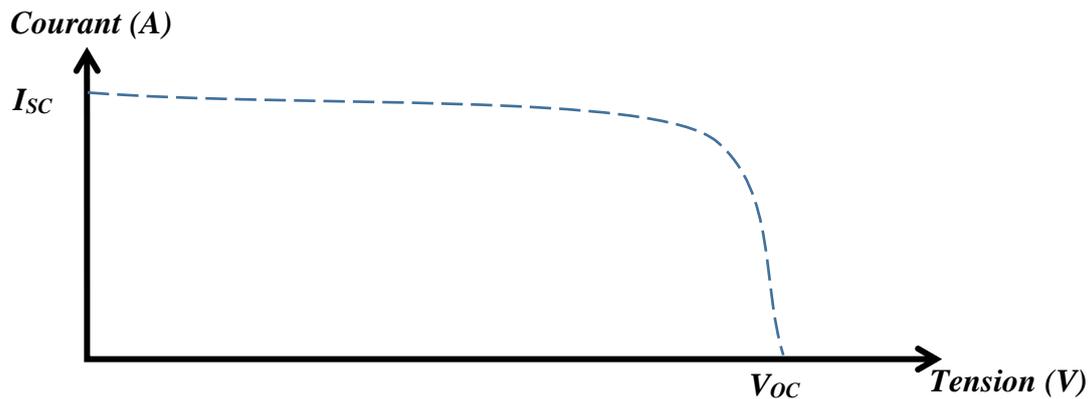


Figure II.11: Exemple de caractéristique $I(V)$ d'une GPV issue d'un traceur I-V.

II.7.1. Caractérisation I-V dans le diagnostic

La forme de la courbe I-V dans des informations sur des défauts, comme les cellules défectueuses, diode de bypass court-circuitée, ombrage, mismatch de module, augmentation de la résistance shunt et série. La commission d'électrotechnique international (IEC) à classer les six courbe I-V comme une signature pour chaque défaut [23].

La forme d'une courbe I-V fournit des informations sur les dégradations, y compris les cellules endommagées, le court-circuit des diodes de dérivation, l'ombrage local, mismatch de module, augmentation des résistances shunts et séries. L'IEC 62446-1 classe la forme de la courbe I-V comme des signatures pour ces six variations [23]. Les signature I-V de quelques défauts et défaillance sont données par la **figure II.12** [23].

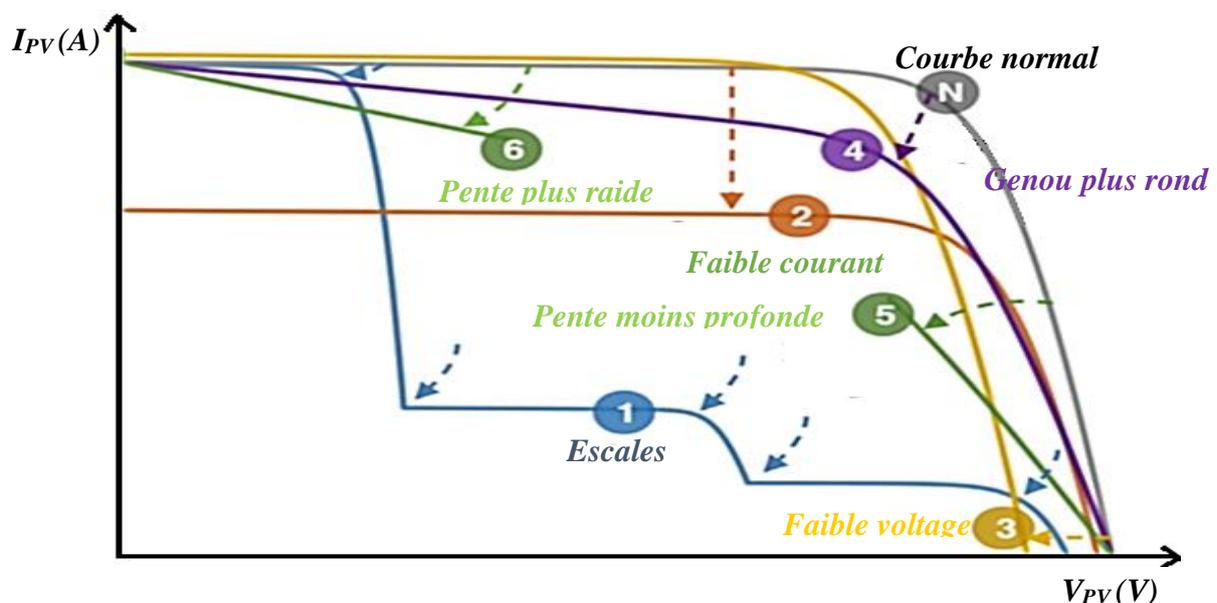


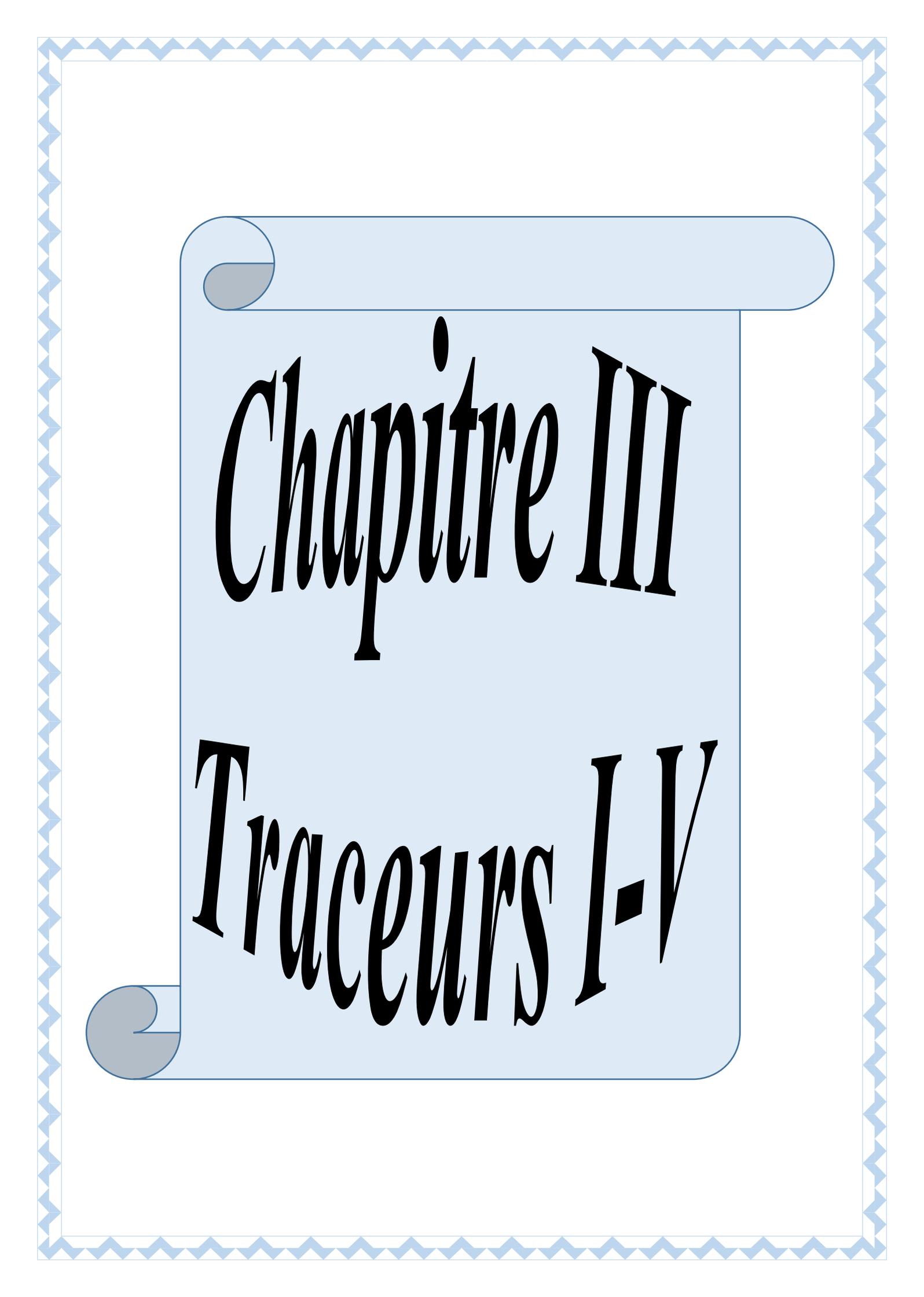
Figure II.12 : Défauts et sa signature I-V [23]

1. Les escales indiquent une incompatibilité entre les modules ou les baies. Celles-ci se produisent le plus souvent lorsqu'une partie des modules solaires est ombragé par une branche d'arbre, un bâtiment ou de la poussière, ce qui provoque une distribution de rayonnement solaire inégalement répartie entre les modules PV.
2. Un courant faible indique une salissure, un ombrage ou une dégradation uniformes.
3. Une basse tension indique des diodes de dérivation court-circuitées ou induites par le potentiel dégradation (PID).
4. Un genou plus rond indique le processus de vieillissement.
5. Une pente moins profonde dans la région de la source de tension indique des défauts de câblage ou augmentation de la résistance série du module.
6. Une pente plus raide dans la région source actuelle indique des chemins de shunt dans l'incompatibilité des cellules PV ou des modules.

Le diagnostic des défauts est important si l'efficacité et la fiabilité de des systèmes PV doivent être augmentés. Le traceur de courbe I–V fournit une méthode rapide et précise pour vérifier les performances et la maintenance rapidement des pannes [23].

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les composants de base d'un système PV et les principaux facteurs qui perturbent son fonctionnement normal. Ensuite, nous avons présenté des méthodes qui détectent des défauts et des défaillances des générateurs PV, et l'utilité de la caractérisation I-V dans l'analyse de performance de n'importe quels dispositifs photovoltaïques.



Chapitre III

Traceurs I-V

III.1. Introduction

Dans les chapitres précédents des caractéristiques d'un module PV sont révélés par des tests standards et des procédures de caractérisation électriques à travers la caractéristique I-V, mais sans mentionner le type de la charge variable utilisé pour faire varier les points de fonctionnements d'un module PV ou d'un GPV de courant de court-circuit I_{SC} à la tension de circuit ouvert V_{OC} .

Ce chapitre est consacré à l'étude des différentes charges employées afin de tracer la courbe I-V (Traceur I-V) d'un panneau solaire. Ainsi que, les normes utilisées pour évaluer leur fiabilité, précision et rapidité.

III.2. Traceur I-V

Un traceur I-V est un instrument qui capture les caractéristiques d'un module ou d'un générateur PV correspondant à des conditions environnementales variables. Ce dispositif est largement utilisé pour l'évaluation des performances et le diagnostic des défauts [23].

III.2.1. Fonctionnement de base d'un traceur

La caractéristique I-V d'un module PV est généralement obtenue en variant une charge entre le courant de court-circuit I_{SC} (Impédance nulle) et la tension de circuit ouvert V_{OC} (Impédance infini), un capteur de tension et un capteur courant sont employés pour l'acquisition des mesures par une unité de traitement, ainsi pour simplifier le dessin de la courbe I-V sur un afficheur ou la partage de ces données pour une exploitation ultérieure.

III.3. Types des traceurs I-V

Diverses techniques de traceurs I-V ont été développées et proposées pour la caractérisation électrique afin d'assurer une grande précision et une rapidité de scan élevée [23].

Les traceurs se différencient principalement par le type de la charge utilisée pour que le contrôle du courant fourni par le module photovoltaïque varie entre le point $(0, I_{SC})$ au point $(V_{OC}, 0)$ ou inversement.

III.3.1. Traceurs à base de charge électronique

Cette méthode utilise un transistor comme une charge, ce transistor est généralement un MOSFET, un transistor bipolaire à jonction (BJT) ou un bipolaire à grille isolée (IGBT) sont aussi employés [23]. La tension entre le drain et la source V_{DS} est modulée par la tension entre

la grille et la source V_{GS} , et par conséquent le débit de courant délivrer par le module. Le transistor doit fonctionner dans ces trois modes (coupure, ohmique et actif) pour qu'il puisse tracer la courbe I-V. L'absorption de la partie majeure de la puissance fournie par le module limite son application pour les puissances moyenne [24, 20, 9]. La **figure III.1** représente le schéma d'un traceur à base d'une charge électronique.

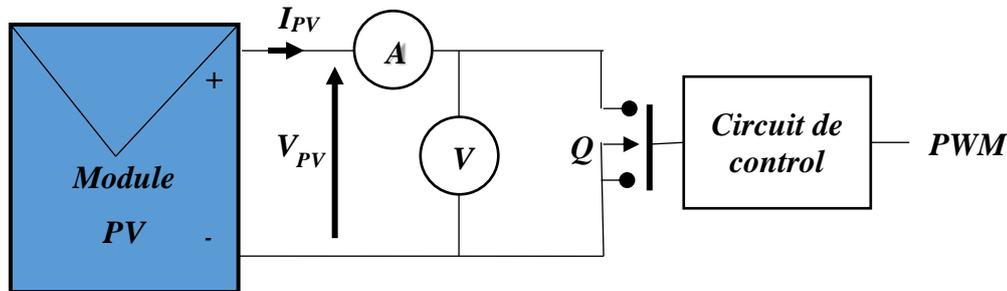


Figure III.1 : Traceur de courbe I-V à base d'une charge électronique MOSFET.

III.3.1.1. Fonctionnement d'un MOSFET

Un MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) est un composant électronique, très utilisé dans l'industrie des micro-processeurs (portes logiques). Il se présente sous deux formes ; le MOSFET « canal n » ou NFET et le MOSFET « canal p » ou PFET. Le NFET possède trois « régimes » différents. En exploitant l'un ou l'autre, il nous sera possible de construire des circuits variés [25].

- Régime de coupure : Le MOSFET se comporte comme un interrupteur ouvert lorsque $V_{GS} \leq V_{th}$ ($I_{DS} = 0A$). La tension de seuil, notée V_{th} , est caractéristique du composant mais dépend aussi de facteurs extérieurs, en particulier la température. En effet : $V_{th} = \frac{aKT}{q}$, où k est la constante de Boltzmann, T la température en Kelvin et q la charge élémentaire.
- Régime linéaire (ohmique) : Dans certaines conditions, le MOSFET se comporte comme une résistance, dont la valeur dépend de V_{GS} . Ce régime porte ce nom de « régime linéaire » en référence à son comportement qui est similaire à une résistance. Il ne constitue pas un intérêt pratique dans le cadre de cette leçon. Ce régime a lieu lorsque : $V_{GS} > V_{th}$ $V_{DS} < (V_{GS} - V_{th})$ On peut exprimer le courant I_D circulant dans le drain pour ce régime de fonctionnement :

$$I_D = K[2(V_{GS} - V_{th})V_{DS} - V_{DS}^2] \quad III.1$$

Où K est une caractéristique du transistor.

- Régime de saturation : Dans certaines conditions, le courant traversant le MOSFET ne dépend plus de la tension V_{DS} , mais uniquement de la tension entre la grille et la source V_{GS} . Il est donné par l'équation suivante :

$$I_{DS} = \frac{K}{2} (V_{GS} - V_{th})^2 \quad III.2$$

Il se comporte ainsi comme un générateur de courant commandé en tension. Cela permet par exemple d'amplifier un signal faible, comme nous le verrons dans un exemple. Cependant, la relation entre le courant et la tension n'est pas linéaire, ce qui a tendance à déformer le signal. Nous verrons comment corriger.

D'un autre côté, l'absence de courant entre la grille et la source permet un interfaçage direct entre un système de puissance (alimentation électrique, éclairage...) et un système de contrôle numérique (ordinateur...). La constante K est caractéristique du composant. Ce régime a lieu lorsque : $V_{GS} > V_{th}$; $V_{DS} > (V_{GS} - V_{th})$

En petits signaux, on peut alors remplacer le transistor par un modèle équivalent composé d'un générateur de courant commandé en tension, en parallèle avec une résistance r_0 . Les valeurs du courant et de la résistance sont donnés par : $I_D = g_m V_{GS}$ et $r_0 = \frac{|U_x|}{I_D}$ où la transductance est $g_m = 2\sqrt{K \cdot I_D} = \frac{2I_D}{V_{GS}}$, et U_x est la tension d'Early.

La résistance émulée par le MOSFET pour différents tension V_{GS} est représenté par la **figure II.2**.

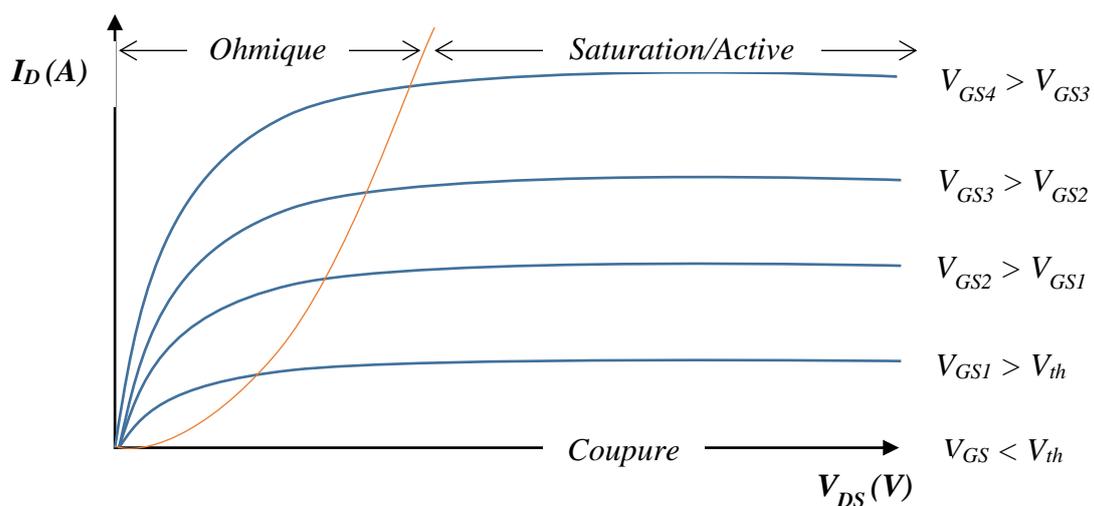


Figure III.2 : Caractéristique I(V) d'un MOSFET pour différents tension V_{GS} [26].

III.3.1.2. MOSFET et module PV

Le **figure III.3** est un modèle d'un traceur I-V à base d'une charge électronique MOSFET et commander par un signal PWM (variation de rapport cyclique a une fréquence de 500 Hz), employer par [26].

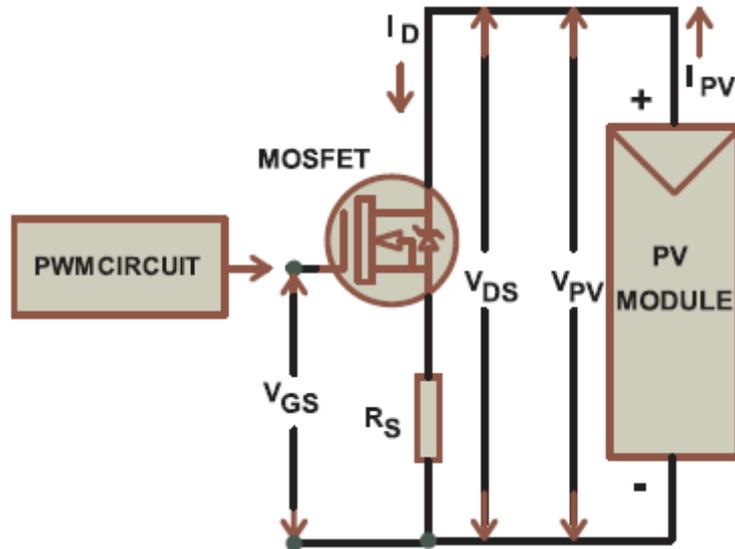


Figure III.3 : Un model basic d'un traceur I-V à base d'un MOSFET come une charge électronique [26].

Le point de fonctionnement de module testé et le transistor MOSFET est obtenue par l'intersection des deux caractéristiques des deux dispositifs. Avec la variation de la tension V_{GS} , la caractéristique de transistor MOSFET varie selon la **figure III.2**. Ainsi, les points de fonctionnement de module sont obtenus. La **figure III.4** suivante représente la caractéristique I-V d'un module obtenu par l'intersections des points de fonctionnement MOSFET et module.

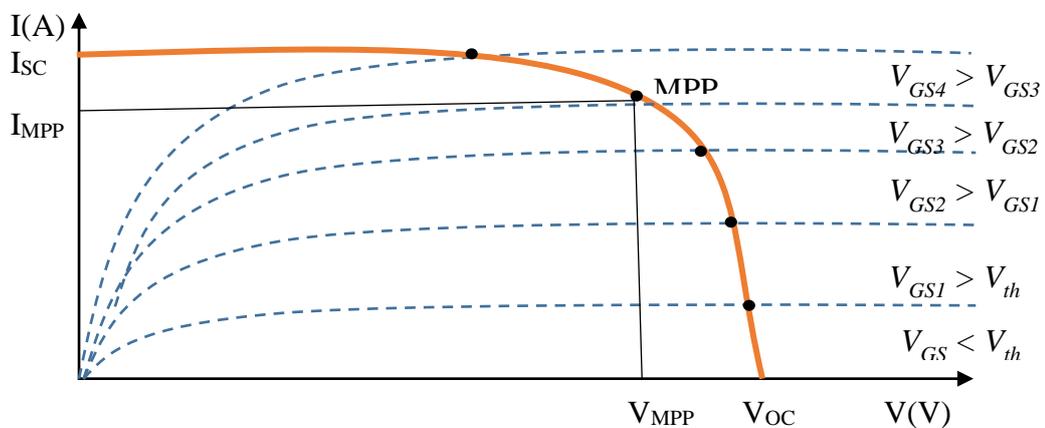


Figure III.4 : Extraction de la courbe I-V d'un module PV par un traceur à base d'un MOSFET [26].

III.3.2. Traceurs à base de charge capacitive

Cette méthode consiste sur la polarisation d'un module PV par un condensateur de large capacité qui se charge durant le passage du point court-circuit au point de circuit ouvert. Le schéma de traceur est donné à la **figure III.5**.

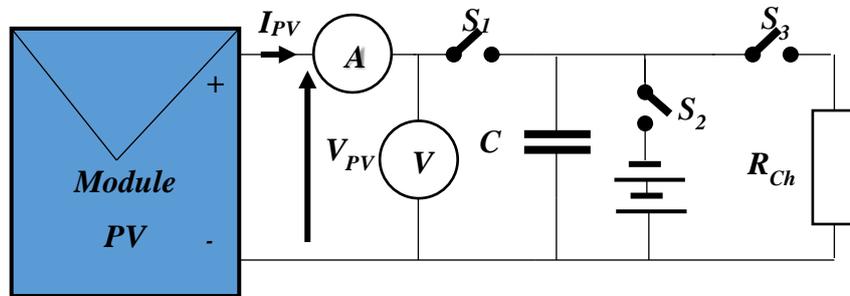


Figure III.5: Module PV chargé par un condensateur.

Au début de la mesure, le condensateur est court-circuité, et lorsque le commutateur S_3 est ouvert et S_1 est fermé, le chargement des condensateurs commence. Comme la charge du condensateur augmente, le courant est en baisse et la tension augmente.

Lorsque la charge est terminée, le courant fourni par le module devient égal à zéro et la condition de circuit ouvert est réalisée. Au lieu de commencer en court-circuit, nous pourrions commencer par S_2 fermé, de sorte que le condensateur serait initialement chargé à tension négative, et la courbe I-V coupe l'axe du courant, afin d'obtenir le courant de court-circuit ISC.

Pour obtenir une courbe I-V fiable avec la méthode de condensateur, les trois commutateurs (S_1 , S_2 et S_3) doivent être activés avec la séquence appropriée, et la décharge du condensateur avant est nécessaire pour démarrer une nouvelle mesure [24, 20, 9, 17].

III.3.2.1. Dimensionnement de la capacité de condensateur

La **figure III.6** représente un schéma utiliser par [27] ou un condensateur est employer comme une charge variable avec un modèle d'une diode d'un module PV.

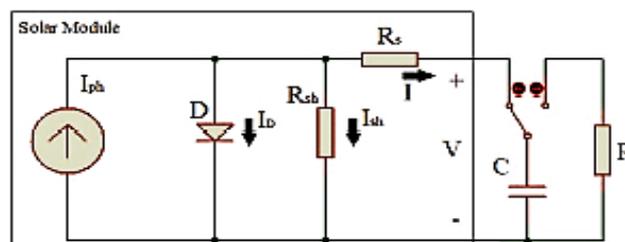


Figure III.6 : Model a une diode d'un module PV alimente une charge capacitive [27].

D'après l'approche employer [27, 28] et le schéma sur la **figure III.6** le courant $I(V)$ fournie par le module est donne par la formule III.3.

$$I(V) = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad III.3$$

Quand l'interrupteur est fermé, le courant $I(V)$ est égal à celui de court-circuit et ceci valide dans l'intervalle $0 < t < t_0$.

Au début de la transition, le condensateur émule un court-circuit, et la tension augmente jusqu'à la fin de la transition a ($t=t_0$), sous l'expression suivante [27, 28] :

$$v(t) = \frac{1}{C} \int_0^{t_2} I_{SC} dt = \frac{I_{SC}}{C} \cdot t, \quad 0 < t < t_0 \quad III.4$$

La transition termine à ($t = t_0$) quand le condensateur est chargé par le voltage V_0 , qui est calculé comme suit [27, 28] :

$$v(t = t_0) = V_0 = \frac{I_{SC} \cdot t_0}{C} \cong V_{MPP} \quad III.5$$

Où ; V_{MPP} est le voltage au point de puissance maximal MPP.

Après l'instant t_0 , le module fonctionne comme une source de tension. L'équation différentielle de deuxième ordre suivante décrire le comportement de circuit [27, 28] :

$$\frac{dv(t)}{dt} + \frac{v(t)}{R_{eq} \cdot C} = \frac{V_{OC}}{R_{eq} \cdot C} \quad III.6$$

D'après la condition initiale a l'équation (III.5), le voltage en fonction de temps est obtenu après la résolution de l'équation comme suit [27, 28] :

$$v(t) = V_{OC} + \left(\frac{I_{SC} \cdot t_0}{C} - V_{OC} \right) e^{-\frac{(t-t_0)}{R_{eq} \cdot C}}, \quad t_0 < t < +\infty \quad III.7$$

Le courant instantané qui circule à travers le condensateur est donne par l'équation (III.8) [27, 28].

$$i(t) = C \cdot \frac{dv(t)}{dt} = \left(\frac{V_{OC}}{R_{eq}} - \frac{I_{SC} \cdot t_0}{C} \right) e^{-\frac{(t-t_0)}{R_{eq} \cdot C}}, \quad t_0 < t < +\infty \quad III.8$$

L'expression qui représente la capacité C correspondante au temps du l'intervalle de transition $[0, t_0]$, est donne par l'équation suivante [27, 28] ;

$$C = \frac{I_{SC}}{V_{OC} - R_{eq} \cdot I_{SC}} \cdot t_0 \quad III.9$$

Le temps de scan total t_f est calculé par l'équation (III.10) [27, 28] ;

$$t_f = t_0 + 5\tau = t_0 + 5 \cdot R_{eq} \cdot C \quad III.10$$

Ainsi, la capacité demandée par le traceur est calculée par l'équation (III.11) :

$$C = \frac{t_f \cdot I_{SC}}{V_{OC} + 4 \cdot R_{eq} \cdot I_{SC}} \quad III.11$$

D'après l'équation (III.11), premièrement il faut déterminer la résistance Req, donnée par l'équation suivante [27, 28] :

$$R_{eq} = \frac{V_{OC} - V_{MPP}}{I_{SC}} \quad III.12$$

III.3.3. Traceurs à base de résistance variable

C'est une méthode qui utilise une résistance variable, un ampèremètre et un voltmètre. La variation de la résistance entraîne le changement de valeurs de courant I et de la tension V mesurer. Ainsi, ces valeurs sont représentées sur une courbe afin de tracer la caractéristique I-V d'un module ou d'un générateur PV [24, 20, 9]. Le principe de fonctionnement de cette méthode est montré à la **figure III.7**.

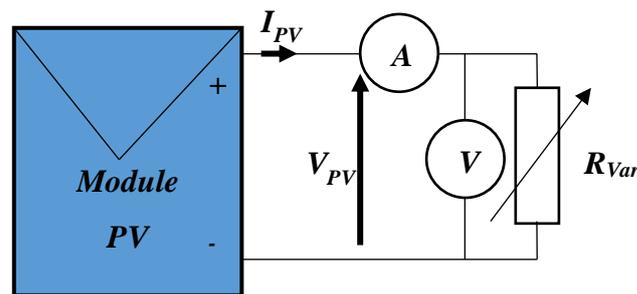


Figure III.7 : Traceur de courbe I-V à base d'une résistance variable.

La résistance de charge est augmentée manuellement par étapes ce qui rend le processus très lent, ainsi le rayonnement solaire et les conditions thermiques pourraient être changés pendant la mesure. Ainsi, une nouvelle approche utilise un ensemble de résistances comme charge (choisies pour obtenir une bonne diffusion des points autour du de la courbe) et une rangée de relais, commandée par une unité de contrôle, qui sélectionne des combinaisons des résistances pour réaliser une charge résistive variable automatiquement afin réduire le temps de processus [24, 20, 9].

Cette méthode est la manière la plus simple et la moins couteuse pour la mesure de la courbe I-V d'un module de façon proche a sa représentation réelle. En revanche, elle s'applique seulement aux modules de basse puissance puisque les résistances pour une puissance plus élevée sont difficiles à retrouver et à peine disponibles. Ainsi, elle n'est pas recommandée pour

la caractérisation d'un module photovoltaïque parce que I_{SC} n'est jamais exactement atteint et les caractéristiques de polarisation et d'inversion ne peuvent pas être déterminées.

III.3.4. Traceurs à base d'amplificateur de puissance bipolaire

Cette méthode implique un circuit simple qui permet aux courants et tension dans le module d'être renversés, et donc il est possible de mesurer les courbes $I(V)$ du module. Son plan est basé sur un amplificateur de puissance traditionnel de classe-b.

Il utilise deux transistors IGBT comme charge, pour le courant en avant et en inverse respectivement. Les transistors bipolaires doivent fonctionner dans ces trois modes de fonctionnement (coupure, active et saturation). En conséquence, la majeure partie de la puissance fournie par le module doit être absorbée par ces dispositifs, qui limitent son application à la puissance moyenne [24, 20, 9]. La **figure III.8** décrit le schéma de fonctionnement.

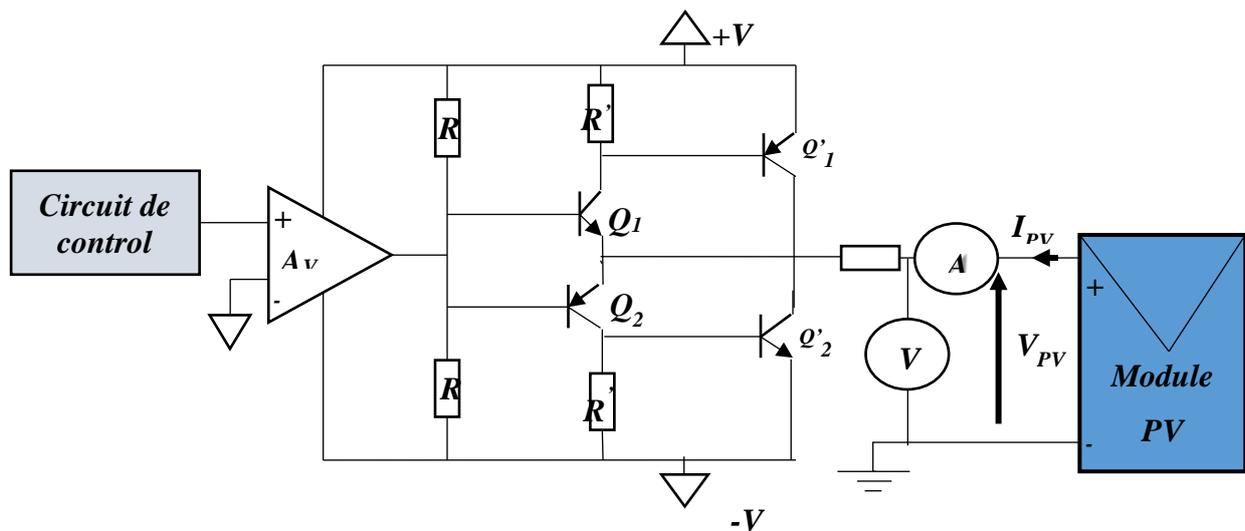


Figure III.8 : Traceur à base d'amplificateur de puissance bipolaire.

III.3.5. Traceurs à base d'amplificateur de puissance à quatre quadrants

Est un système d'alimentation capable de fournir que d'absorber la puissance (augmente où descendre le courant avec la tension positive ou négative respectivement). Utilisable comme charge réglable pour d'autres alimentations d'énergie ou tout autre équipement.

Pour un module photovoltaïque l'intérêt principal est d'obtenir la courbe $I-V$ dans le premier quart du cercle. Mais, l'exploration des points se situe dans le deuxième et le quatrième quart du cercle. Une alimentation à quatre quadrants peut être considérée comme une source

d'alimentation $V(t)$. Dont la sortie peut être modifiée par un signal d'entrée de référence ou programmée pour balayer une gamme de valeurs. Le circuit montré dans la **figure III.9** est une vue fonctionnelle de l'alimentation à quatre quadrants [24, 20, 9].

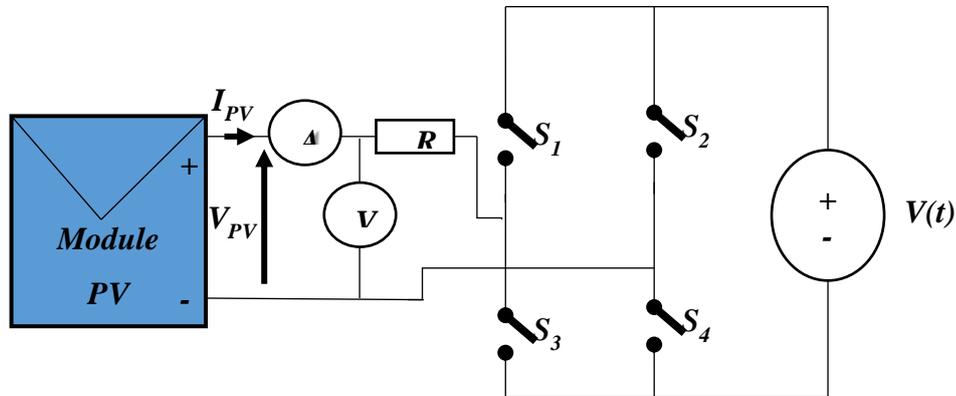


Figure III.9 : Schéma du traceur quatre quadrants.

- S_1 et S_4 fermés et $V(t)$ supérieure à la tension en circuit ouvert du module photovoltaïque sous test, le point de fonctionnement du PV est décalé dans le quatrième quadrant.
- S_1 et S_4 fermées et $V(t)$ mineur de V_{oc} , le point de fonctionnement du PV est décalé dans le premier quadrant.
- S_2 et S_3 fermés, la tension V du module PV est forcée à $-V(t)$ et le point de fonctionnement du PV est décalé dans le deuxième quadrant.

En effet, ce type de charge est intrinsèquement coûteux. Ainsi, Les quatre quadrants d'alimentations qui travaillent avec plus de 1 kW et sont à peine disponibles. En plus, cette méthode n'est pas applicable pour mesurer un générateur photovoltaïque entier.

III.3.6. Traceurs à base d'Hacheurs

Un hacheur ou convertisseurs continu-continu (DC-DC) peuvent augmenter ou diminuer l'amplitude de la tension continue et/ou inverser sa polarité. Ceci est réalisé par la technique de modulation par largeur d'impulsions (PWM), habituellement par une fréquence constante. Le rapport cyclique (D) est le rapport entre le temps de conduction (T_{ON}) et la période de commutation (T_s).

Les trois configurations de base de convertisseurs (Buck, Boost et Buck-Boost-Dérivé) sont similaires à un transformateur DC qui fonctionne à la fois en mode de conduction continue

et discontinue (CCM et DCM) [24, 20, 9]. La **figure III.10** présente le schéma fonctionnel de traceur à base d'un convertisseur continu-continu (Hacheur).

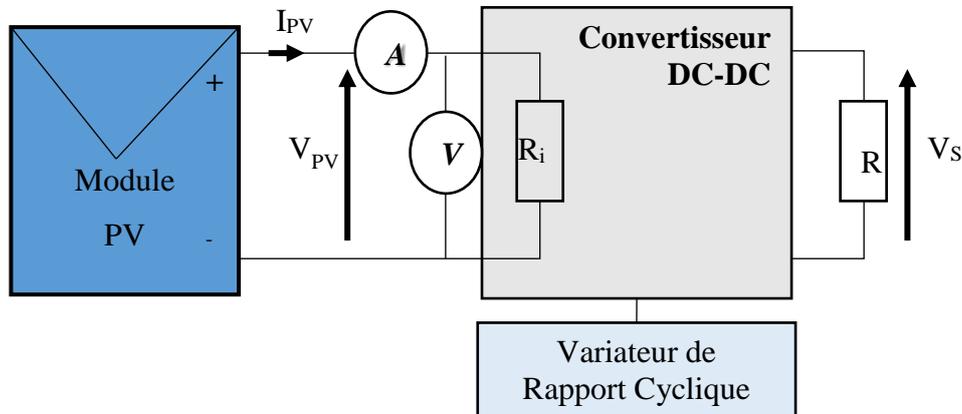


Figure III.10 : Traceur à base de convertisseur DC/DC.

III.4. Indices de performance d'un traceur

La fidélité du traceur I-V est difficile à évaluer, les indices de performance peuvent aider à évaluer et comparer les topologies des méthodes des traceurs. Les indices peuvent être classés en :

III.4.1. Facteur de performance

Le facteur de performance est utilisé pour évaluer l'écart entre le modèle PV et les valeurs mesurées. Si P_{MAX} mesurés et P_{MAX} prédits sont en accord, le facteur de performance est 100%. Un traceur I-V de haute qualité doit avoir une valeur de facteur de performance proche de 100% lors de la mesure d'une chaîne PV nouvellement construite [23].

$$FP = \frac{P_{MAX} (mesuree)}{P_{MAX} (predite)} \quad III.13$$

III.4.2. Écart sur les points critiques et courbe complète

La déviation de point critique concerne le point de court-circuit et le circuit-ouvert, les indices de déviation du courant de court-circuit et la tension de circuit-ouvert D_{SC} et D_{OC} respectivement, indiquant combien précisément la sortie du traceur représente le terminal [23].

$$D_{OC} = \sqrt{\left(\frac{\check{V}_{OC}}{V_{OC}} - 1\right)^2} \quad III.14$$

Ou, \check{V}_{OC} et V_{OC} représentent les valeurs de tension en circuit ouvert de la mesure du traceur I-V et celle de la fiche technique du produit, respectivement [23].

$$D_{SC} = \sqrt{\left(\frac{\check{I}_{SC}}{I_{SC}} - 1\right)^2} \quad III.15$$

Où, \check{I}_{SC} et I_{SC} représentent les valeurs de courant en court-circuit de la mesure du traceur I-V et celle de la fiche technique du produit, respectivement.

Les indices sur les points critiques mesurent la précision du traceur I-V depuis ces valeurs mesurées et celle de la fiche technique du produit. Cependant, les performances complètes de la courbe I-V ne peuvent pas être évaluées. Une approche qui définit la courbe I-V complète comme un indicateur de performance pour un modèle de simulation et un système réel. Le même indicateur peut être utilisé pour estimer les performances du traceur I-V. L'écart du courant PV entre la mesure du traceur I-V et la fiche technique du produit peut être calculée par l'écart moyen quadratique (RMSD) en utilisant la tension comme référence. Le RMSD est exprimée par l'équation (III.16) [23] :

$$RMSD(I) = \sqrt{\sum_{j=1}^N \frac{(I_j - \check{I}_j)^2}{N}}. \quad III.16$$

où \check{I}_j représente le courant du traceur I-V et I_j représente le courant de la fiche technique.

Ainsi une recommandation d'utilisation d'un NRMSD pour uniformiser l'indicateur de performance pour différentes tailles et matériaux des cellules PV. Le NRMSD est exprimé par la relation (III.17) [23]:

$$NRMSD = \frac{RMSD}{I_{SC}}. \quad III.17$$

III.4.3. Facteur de remplissage

Le facteur de remplissage est un indicateur de l'équerrage de la courbe I-V, il est exprimé par la relation (III.18) [23]:

$$FF = \frac{I_{MPP} \times V_{MPP}}{I_{SC} \times V_{OC}}. \quad III.18$$

Où I_{MPP} et V_{MPP} représentent respectivement les valeurs de courant et de tension du point MPP.

La cellule photovoltaïque idéale a une courbe I-V de forme rectangulaire de $FF = 1$. Plus la courbe converge vers une forme rectangulaire, plus la puissance de sortie est élevée et l'efficacité de module augmente avec. Les modules doivent avoir un facteur de forme identique sous les mêmes conditions de fonctionnement environnemental. Si le facteur de remplissage diffère des paramètres de fabrication, le rapport de tension et du courant doit être testé pour identifier le problème [23].

III.4.4. Rapport du courant et de la tension

Le rapport de tension et de courant sont intégrés dans l'équation de facteur de remplissage. Les valeurs de rapport sont une approximation des pentes des parties horizontales et verticales de la courbe I – V. Le rapport de tension et de courants sont exprimés par les équations (III.19) et (III.20) [23] :

$$R_V = \frac{V_{MPP}}{I_{OC}} \quad III.19$$

$$R_I = \frac{I_{MPP}}{I_{SC}} \quad III.20$$

Des données inexactes peuvent être causées par l'irradiance ou les changements de température de manière significative pendant la mesure. Pour éviter cela, le traceur de la courbe I-V doit être capable de capturer toutes les données de la courbe en 1 s [23].

III.4.5. Déviation de la pente

Par rapport aux méthodes susmentionnées, les points de mesure ne sont pas uniformément situés sur la courbe I-V. Ainsi, pour une performance supplémentaire un indicateur doit être calculé l'efficacité de la distribution des points de mesure. L'indicateur utilise le modèle PV comme référence. La différence entre la pente du point de mesure actuel (k), la pente du point de mesure précédent (k1) et le point de la mesure suivante (k2) calculé par l'écart quadratique moyen, RMSD(k) exprimé mathématiquement par l'équation (III.21) [23] :

$$RMSD(k) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (k_{1i} - k_i)^2 + \sum_{i=1}^N (k_{2i} - k_i)^2}{N}} \quad III.21$$

Si le RMSD (k) est égal à zéro, la courbe mesurée est idéalement lissée.

III.5. Conclusion

Ce chapitre a présenté les différents traceurs de courbe I-V qui se réfèrent généralement par le type de charge variable qui utilisent pour faire varier les points de fonctionnement d'un dispositif PV. À la fin de ce chapitre, nous avons étudié les indices qui évaluent la qualité de ses traceurs ainsi l'évaluation de la procédure de caractérisation pour garantir les résultats.

Chapitre IV

Simulation et réalisation

IV.1. Introduction

Après avoir acquis les principales bases théoriques sur le monde photovoltaïque comme ; son principe de fonctionnement, ses caractéristiques électriques et les méthodes employer dans le dessine de la courbe I-V.

Dans ce chapitre nous simulerons trois types de traceur ; à base d'une résistance variable, charge électrique et une charge capacitive, avec un modèle d'une diode d'un module PV. Enfin, nous allons réaliser un traceur à base d'une charge capacitive afin de caractériser trois types de module monocristallin de 10, 85 et 170 Wc dans le but de valider notre traceur.

IV.2. Simulation

Dans cette partie nous avons premièrement créé un sub-circuit d'un module PV sous le logiciel Proteus Isis qui n'offre aucune bibliothèque spécifique pour ce matériel, mais une variété des composants électroniques de base, un modèle d'une diode est exploité pour modéliser ce dernier. Ensuite, nous avons tracé la courbe I-V et P-V en utilisant l'option de DC Sweep de Proteus avec une tension variable comme une charge afin de vérifier et valider ses caractéristiques. Finalement, des traceurs à base d'une charge résistive, capacitive et une charge électronique sont implémentés sur un microcontrôleur PIC18F45K22 dont le but de ça caractérisation.

IV.2.1. Etapes de la modélisation

Afin de pouvoir essayer les techniques de caractérisation par la courbe I-V avant la mise en œuvre de ses traceurs en réalité, une modélisation d'un module PV (Model d'une diode) sous l'environnement Proteus est conçu afin de valider ses traceurs par simulation.

IV.2.1.1. Spécification du module modéliser

Le **tableau IV.1** donne les différentes caractéristiques de module obtenues par son datasheet.

Tableau IV.1 : Spécifications de module PV Solerex MSX-60 at STC [29].

Caractéristiques	MSX-60
Puissance maximal, P_{MAX}	60 W
Tension a P_{MAX} , V_{MPP}	17.1 V
Courant à P_{MAX} , I_{MPP}	3.5 A
Courant de court-circuit, I_{SC}	3.8 A
Tension de circuit ouvert, V_{OC}	21.1 V
Coefficient de température au V_{OC} , K_v	-80 mV/C°
Coefficient de température au I_{SC} , K_i	2.4 mA/C°
Nombre des cellules	36
Courant photonique I_{PH}	3.8128 A
Courant de saturation de la diode I_0	2.5245 E-10 A
Facteur d'idéalité	0.9784
Résistance shunt	153.5644 Ω
Résistance série	0.38572 Ω

IV.2.1.2. Modélisation de module sous Proteus

Les caractéristiques présenter au **Tableau IV.1** de module Solerex MSX-60 sont employer pour sa modélisation (modèle d'une diode). La **figure IV.1** donne le schéma de modélisation final sous le logiciel Proteus Isis.

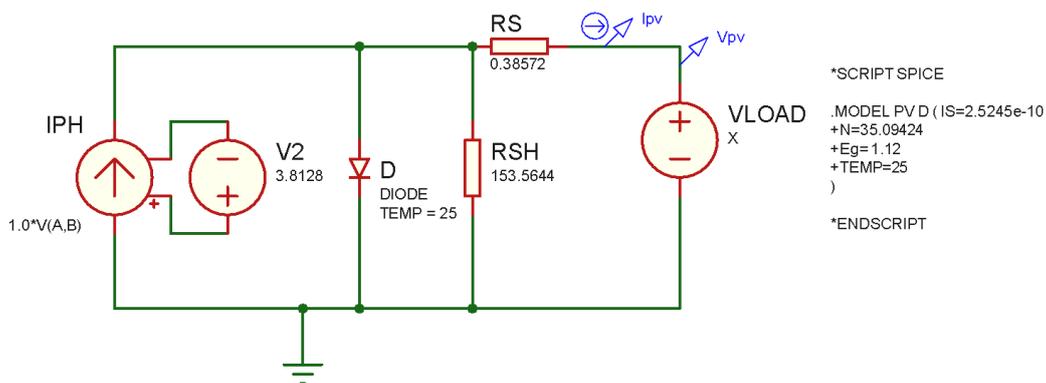


Figure IV.1 : Modélisation a une diode d'un module PV Solerex MSX-60 sous Proteus.

IV.2.1.3. Courbe I-V et P-V avec Graphs de Proteus

Le modèle présenter à la **figure IV.1** et tester par une option qui s'appelle Graphs sous Proteus et qui consiste à faire varier automatiquement une variable donne et de dessiner les valeurs obtenues des autres paramètres (tension, courant, puissance) en fonction de la variable

employer dans un schéma. La **figure IV.2** représente les courbes obtenues par la variation de la tension par rapport au courant (A) et par rapport à la puissance (B).

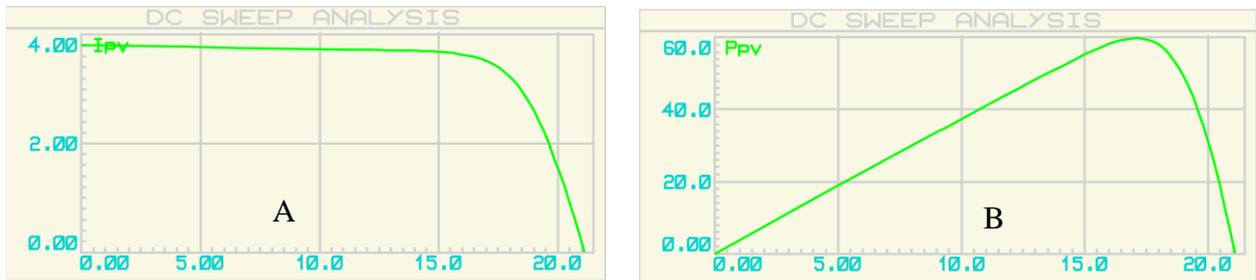


Figure IV.2 : Caractéristiques I-V (A) et P-V (B) de module sous les condition STC

IV.2.1.4. Sub-circuit de module modélisé

Le modèle d'une diode de module est embarqué dans un sub-circuit pour des simulations ultérieures et pour bien organiser les parties simuler (puissance, commande, visualisation et stockage). Le sub-circuit obtenue est donne par la **figure IV.3**.

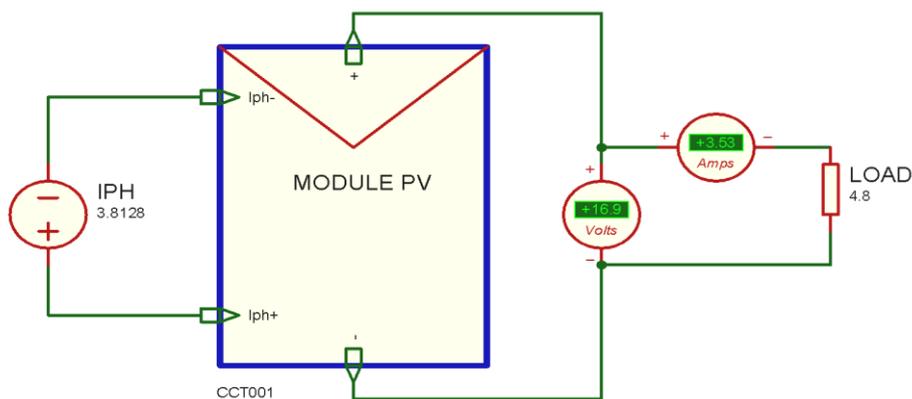


Figure IV.3 : Sub-circuit de module PV avec ça charge optimal sous Proteus.

IV.2.2. Implémentation des traceurs

Après la modélisation de module à caractérisé, trois traceurs sont testés afin d'extraire les caractéristiques gouvernent le fonctionnement de module simulé. Pour cela, nous avons implémenté les algorithmes sur un microcontrôleur PIC18F45K22 (partie commande), et une visualisation de la courbe I-V suivie d'un affichage d'une liste des caractéristiques de module sur un graphique LCD (GLCD) de 128x64 pixel. Ainsi, une carte SD MMC est employé pour sauvegarder les données obtenues sur un fichier texte pour une exploitation ultérieure.

IV.2.2.1. Configuration de la partie commande et visualisation

La figure IV.4 illustre configuration des différentes partie visualisation (GLCD), stockage (MMC/SD) et les tensions de capteur de courant et tension par rapport à la partie commande (PIC18F45K22).

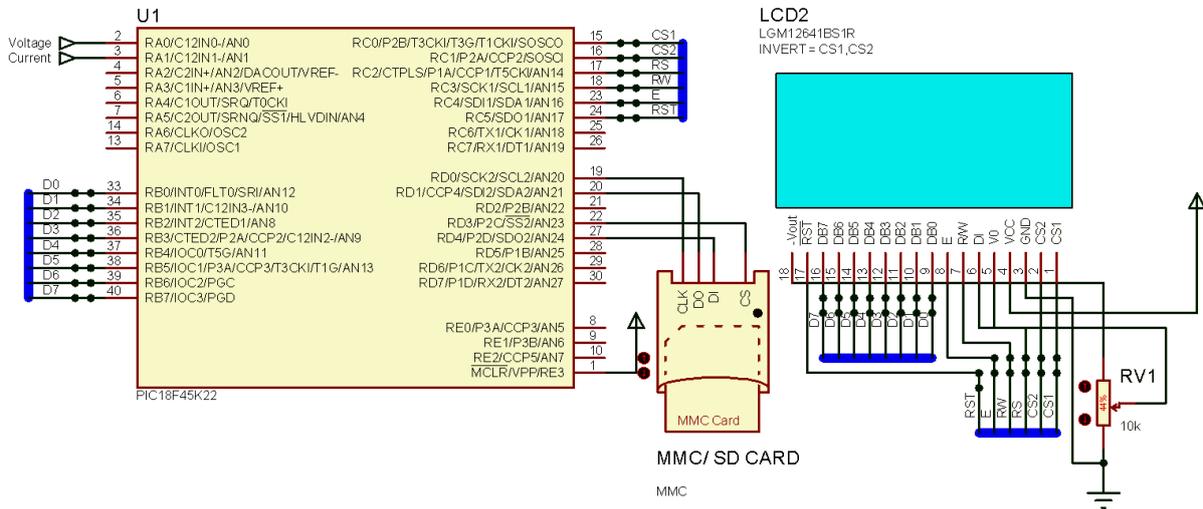


Figure IV.4 : Configuration de la partie commande, visualisation et sauvegarde sous Proteus.

IV.2.2.2. Capteur de tension et de courant

Pour le capteur de courant, nous avons employé une faible résistance shunt coupler à un amplificateur en mode soustracteur, les valeurs sont choisies pour que la tension de la sortie de l’amplificateur n’excède pas 5V (Figure IV.5). Un diviseur de tension est utilisé pour capturer la valeur de la tension réduite à des tensions acceptables pour le microcontrôleur (Figure IV.6).

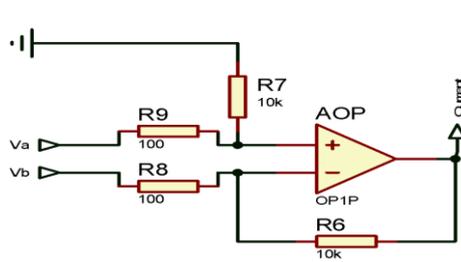


Figure IV.5 : Capteur de courant.

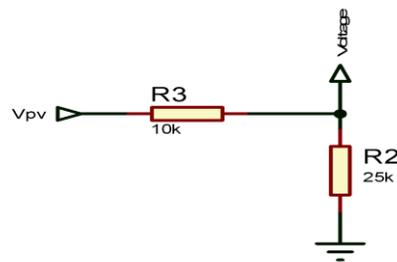


Figure IV.6 : Capteur de tension.

IV.2.3. Traceur à base d'une résistance variable

Le choix de l'étendue de la résistance variable est importante pour pouvoir couvrir toute la courbe I-V avec un lissage acceptable, et de rapprocher le plus possible à la valeur de la puissance maximale, ainsi nous avons choisi la valeur 150Ω pour répondre à ses critères.

La **figure IV.7** montre l'interfaçage de la résistance variable avec le sub-circuit du module.

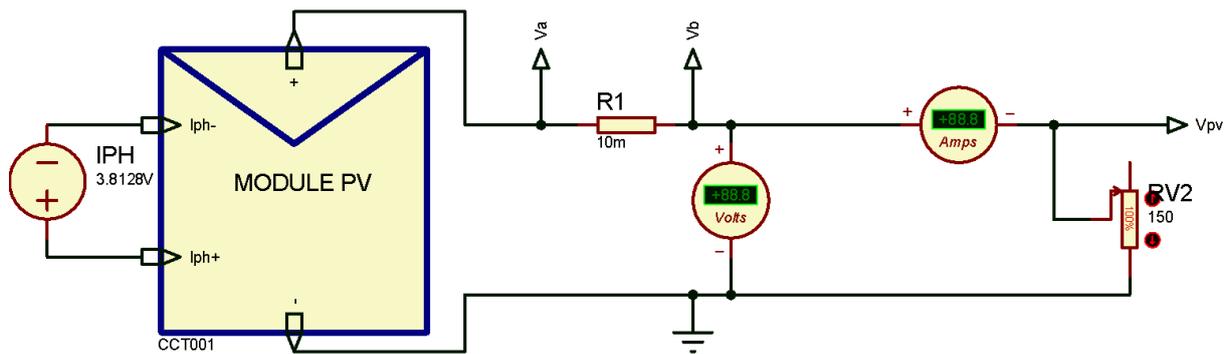


Figure IV.7 : Traceur I-V à base d'une résistance variable.

IV.2.3.1. Algorithme de traceur

Les différentes parties utilisées par le programme implémenté sur le microcontrôleur PIC18F45K22, pour l'acquisition des points de fonctionnement courant-tension de traceur à base d'une résistance variable sont illustrées dans la **figure IV.8**.

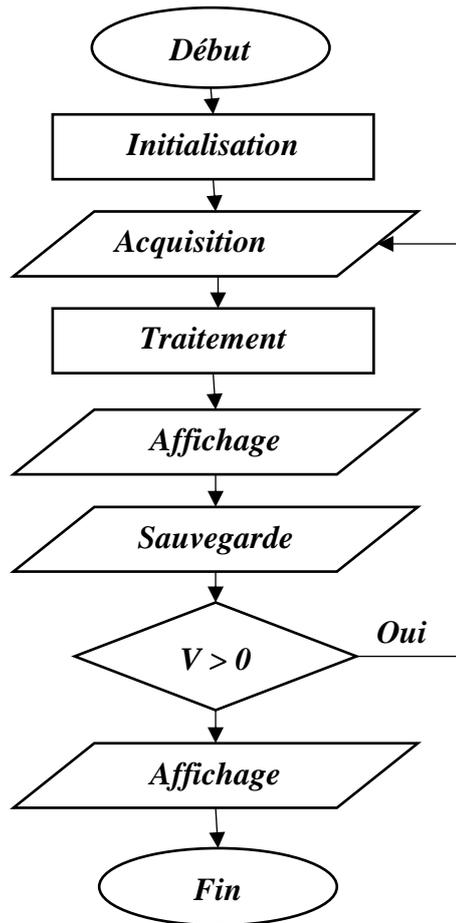


Figure IV.8 : Algorithme d'un traceur à base d'une charge résistive.

IV.2.3.2. Courbe et caractéristiques obtenus

Les résultats de la simulation de traceur à base d'une résistance variable sont donnés par la **figure IV.9** (courbe I-V et caractéristique calculer par le PIC).

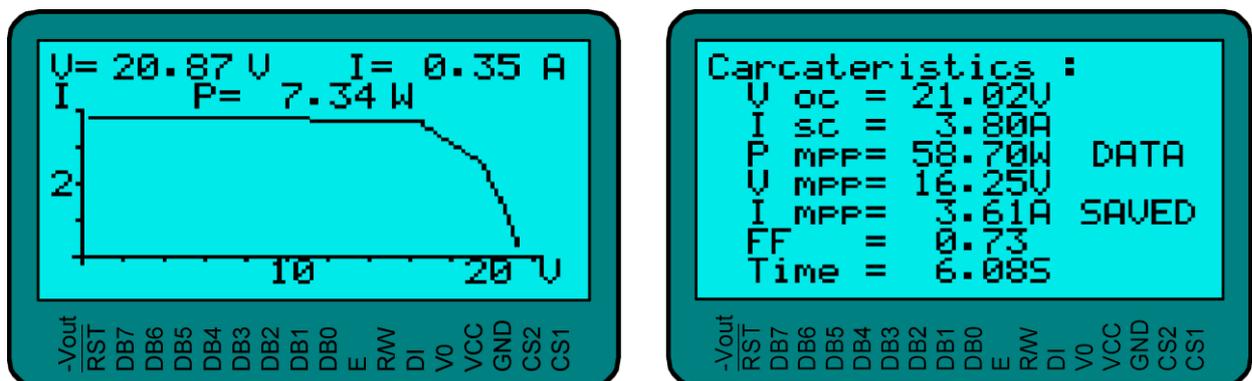


Figure IV.9 : Courbe et caractéristiques de simulation d'un traceur à base d'une résistance variable aux conditions STC.

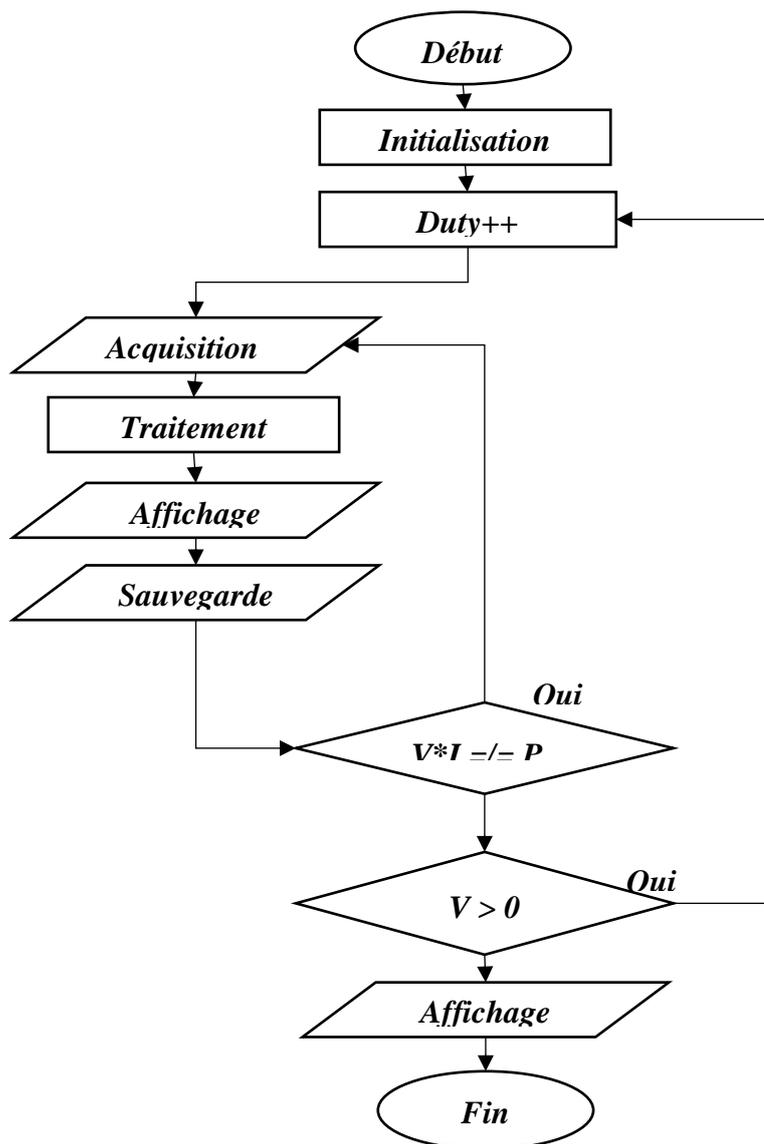


Figure IV.12 : Algorithme d'un traceur à base d'une charge électronique (MOSFET).

IV.2.4.2. Courbe et caractéristiques obtenus

Les résultats de la simulation de traceur à base d'une charge électronique variable (MOSFET) sont donnés par la **figure IV.13** (courbe I-V et caractéristique calculer par le PIC).

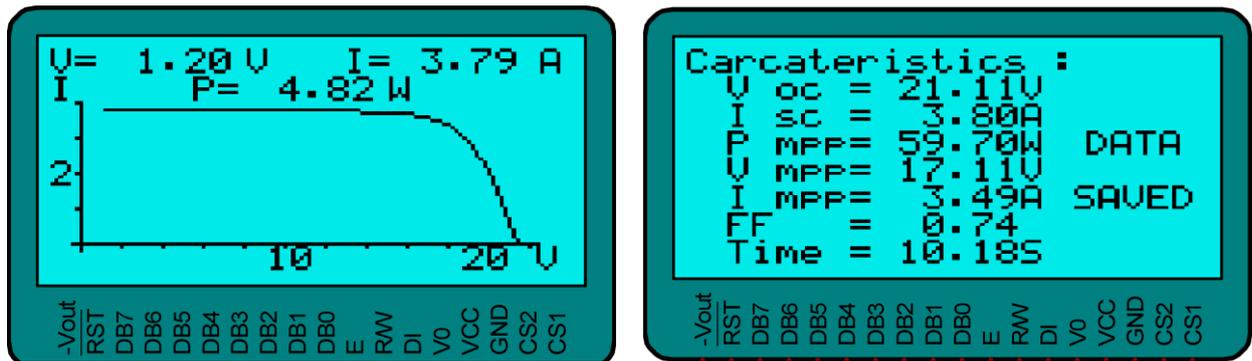


Figure IV.13 : Courbe et caractéristiques de simulation d'un traceur à base d'un MOSFET.

IV.2.5. Traceur à base d'une charge capacitive

Nous avons choisi ici une très large capacité pour quelle nous offre plus de temps pour dessiner la courbe sur le GLCD, et de sauvegarder les données sur une carte MMC. La valeur de la capacité est fixée sur 600mF puisqu'elle donne une meilleure convergence vers la puissance maximale. La **figure IV.14** représente le schéma d'interfaçage de traceur avec le module PV, ainsi le commutateur (Relay a 5VDC) avec le condensateur et la résistance de décharge.

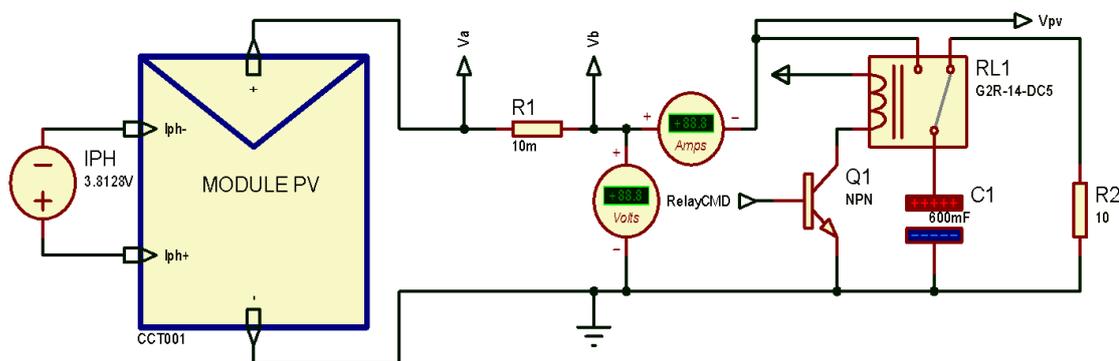


Figure IV.14 : Traceur I-V à base d'une charge capacitive.

IV.2.5.1. Algorithme de traceur

Les différentes parties utiliser par le programme implémenter sur le microcontrôleur PIC18F45K22, pour l'acquisition des points de fonctionnement courant-tension de traceur a base d'une charge capacitive sont illustré dans la **figure IV.15**.

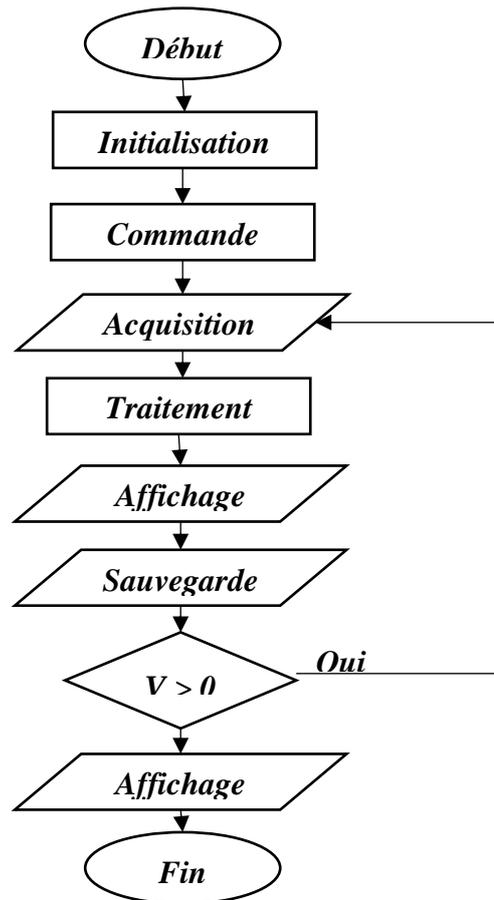


Figure IV.15 : Algorithme de traceur à base d'une charge capacitive.

IV.2.5.2. Courbe et caractéristiques obtenus

Les résultats de la simulation de traceur à base d'une charge capacitive sont donnés par la figure IV.16 (courbe I-V et caractéristique calculer par le PIC).

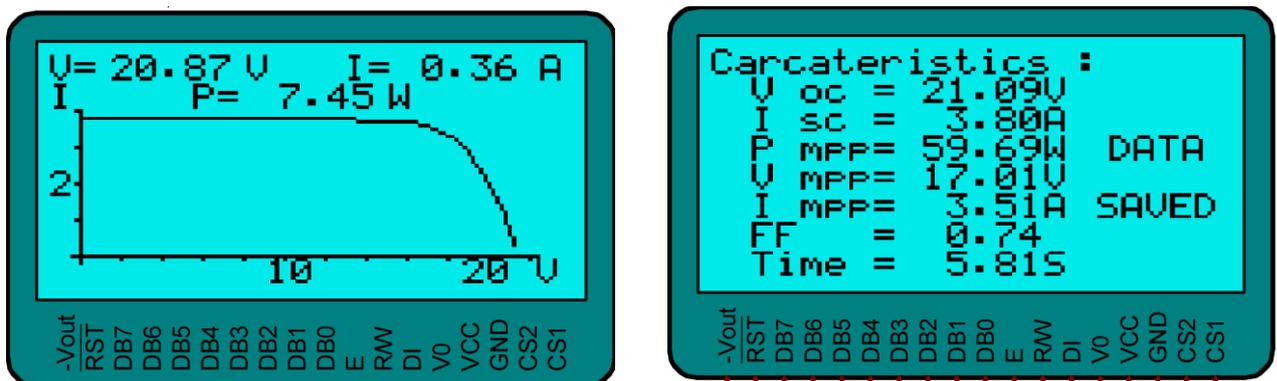


Figure IV.16 : Courbe et caractéristiques de simulation d'un traceur à base d'une capacité.

IV.2.6. Résultats de la simulation

L'évaluation des traceurs simuler par rapport à quelques cratères comme le facteur de forme, facteur de performance, la déviation par rapport à la tension de circuit ouvert et la courant de court-circuit et finalement le rapport de tension et de courant sont calculer dans le **tableau IV.2.**

Tableau IV.2 : Evaluation de traceur simuler.

Paramètre	Traceur à base d'une charge		
	Résistive	Capacitive	Charge électronique
FF	0.73	0.74	0.74
FP	0.97	0.98	0.99
D _{OC}	0.003	0.0004	0.0004
D _{SC}	0	0	0
R _V	0.77	0.8	0.91
R _I	0.95	0.92	0.91

IV.3. Réalisations

Dans cette partie nous avons exploité les bases théoriques développer dans les chapitres précédent pour réaliser un traceur à base d'une charge capacitive, dans le but de caractériser un module PV dans les conditions réelles de fonctionnement. On a choisi cette méthode pour ses critères de précision, rapidité de monitoring, simplicité de mise en œuvre et aussi pour son cout.

Une carte de développement EasyPIC V7 est employer pour faciliter l'implémentation de traceur sur un PIC18F45K22 et la visualisation des résultats sur un GLCD.

IV.3.1. Carte de développement EasyPIC V7

C'est la 7eme version des cartes électronique EasyPIC, développé par les ingénieurs de MikroElektronika. Connus généralement par ces offres de facilitation de développement et de productivité d'application a base des microcontrôleurs PIC, destiner pour les professionnels et les débutants. Equiper d'un microcontrôleur PIC18F45K22 par défaut, qui est connu par ses hautes performances (Horloge max 64MIPS, ROM 32KO, RAM 1.5KO, 36PIN E/S dont 30 canaux sont analogiques ADC, communication SPI et I2C, timer 8bit et 10bit, ...) [30].

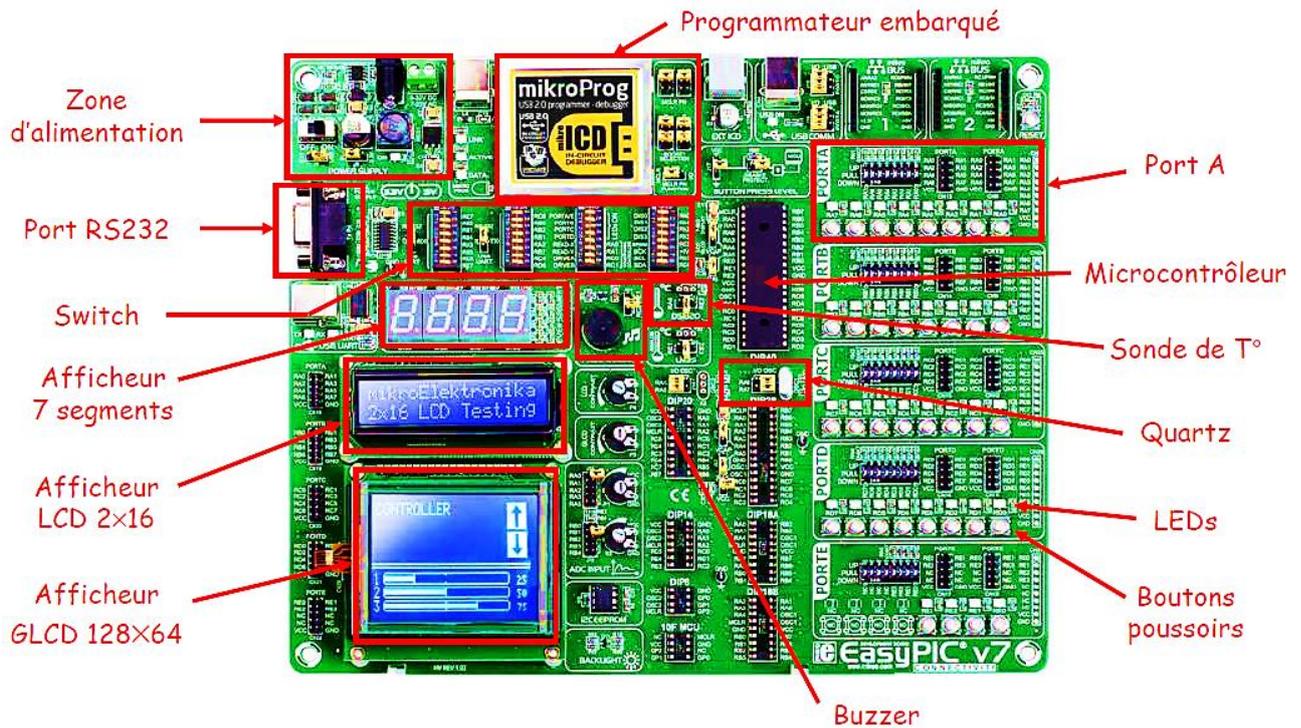


Figure IV.17 : EasyPIC V7 et ses différents constituants [31].

IV.3.2. Capteur de courant

Est un capteur basé sur l'effet de hall, qui offre un moyen économique et de précision pour mesurer l'intensité de courant dans un circuit AC ou DC sans perturber la mesure. Le principe est que quand un conducteur de courant est placé dans un champ magnétique déposé, une tension est générée sur ses bords perpendiculaires à la direction à la fois du courant et du champ magnétique. La **figure IV.18** dans sa forme commercialiser et le **tableau IV.3** mentionne certain de ses caractéristiques principales.

Tableau IV.3 : Caractéristique principale de capteur.



Figure IV.18 : Capteur de courant ACS712ELECTR-30A-T.

Sensibilité	[63, 69] (mV/A)
Temps de repense T_R	3.5 μ s
Tension d'alimentation V_{CC}	[4.5, 5.5] (V)
Etendu de mesure I_P	[-30, 30] (A)
Tension d'offset V_{Offset}	0.5*VCC

IV.3.3. Capteur de tension

Ce module est basé sur un diviseur de tension pour la calibration de la tension mesurée en tension admissible par un dispositif d'acquisition (Microcontrôleur), 5V au maximum. L'étendue admissible de mesure est entre 0 à 25V, la sortie de ce module est toujours multipliée par 5 pour pouvoir récupérer la tension mesurée. Les résistances employées sont relativement large pour minimiser la circulation de courant (sans perturber le fonctionnement de circuit). La **figure IV.19** donne sa forme commercialisée (sur la gauche) et son schéma fonctionnel et représenté sur la droite.

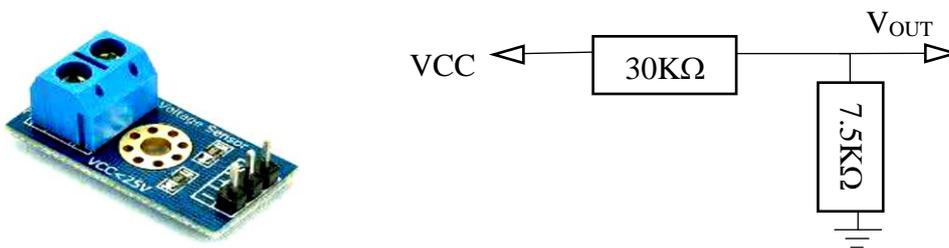


Figure IV.19 : Capteur de tension basé sur le principe d'un diviseur de tension.

IV.3.4. Partie puissance de la réalisation

La partie puissance de cette réalisation est un assemblage parallèle de quatre condensateurs de 220 μ F, et deux autres de 4.7 mF montés sur une plaque d'essai afin de pouvoir compenser entre le courant fourni par le module (variable par rapport à l'ensoleillement) et le temps de scan (fréquence d'échantillonnage) fixé par le PIC. La figure IV.20 représente sa photo réelle.

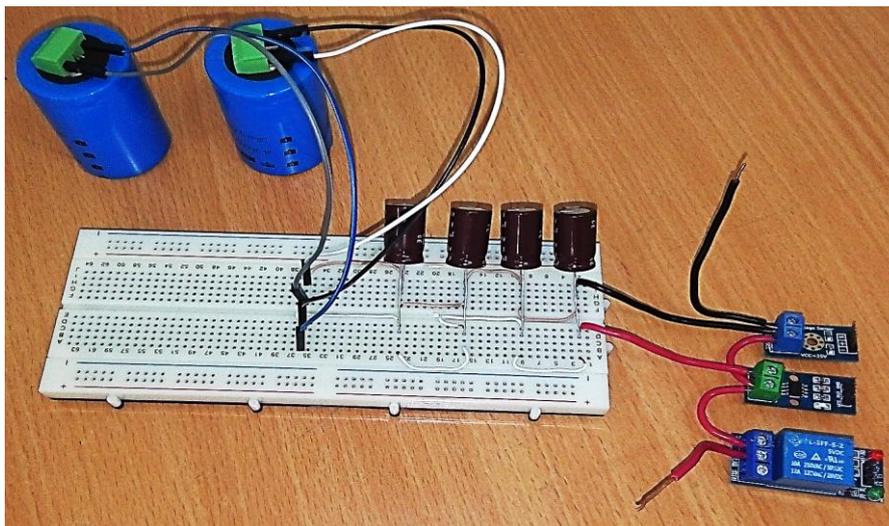


Figure IV.20 : photo de la partie puissance de la réalisation.

IV.3.5. Partie puissance et commande de la réalisation.

L'assemblage de la partie puissance présenter sur la **figure IV.20** et la partie commande et visualisation (EasyPIC) sont illustre par la **figure IV.21**, sur la gauche le schéma synoptique de la réalisation et sur la droite la photo réelle.

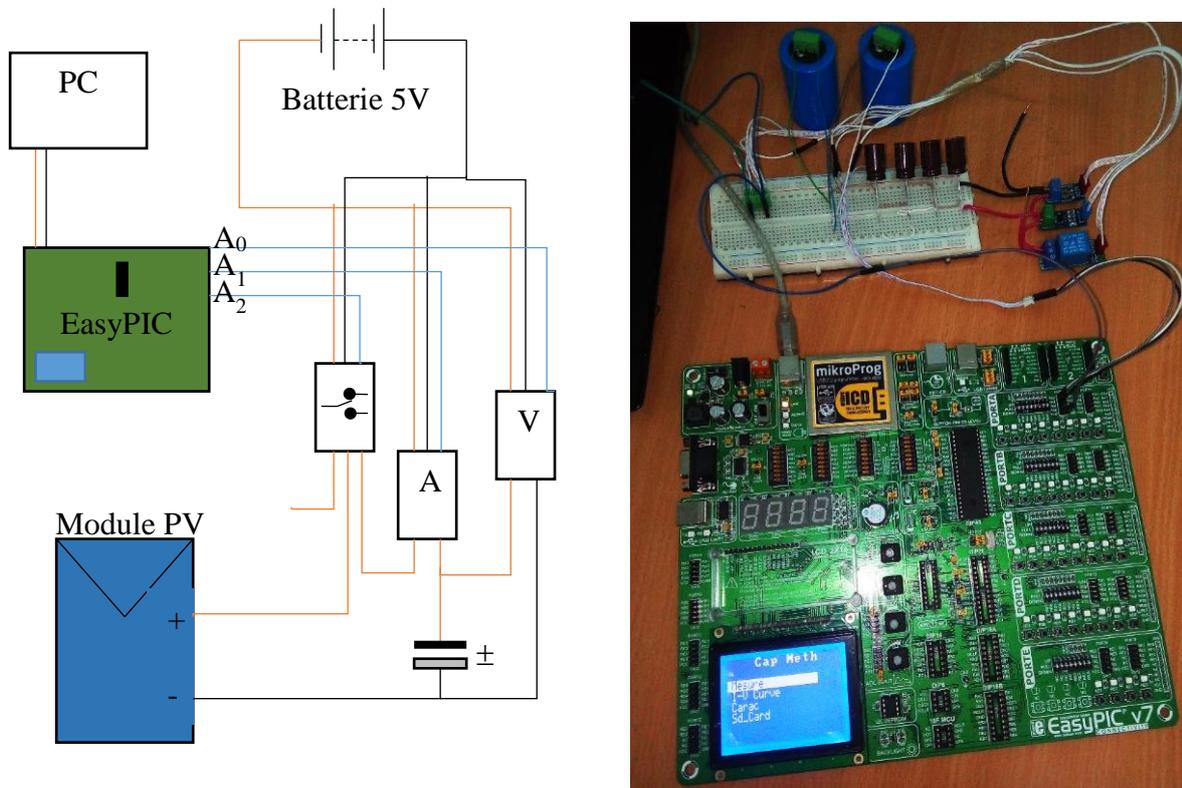


Figure IV.21 : Schéma et photo de traceur réalisé.

IV.3.6. Caractéristiques des panneaux de teste

Notre traceur est tester sur trois modules PV de la technologie monocristalline qui ont les caractéristiques suivantes :

IV.3.6.1. Module Semtoni modèle SR05-10

Les caractéristiques essentielles de module Semtoni tester sont résumer sur le **tableau IV.4**, ainsi sa photo réelle qui est donne par la **figure IV.22**.

Tableau IV.4 : Caractéristiques de module Semtoni modèle SR05-10 au condition STC.

P_{MPP}	10W
V_{MPP}	17V
I_{MPP}	0.59A
V_{OC}	21.5V
I_{SC}	0.64A
FF	0.72



Figure IV.22 : Module Semtoni SR05-10.

IV.3.6.2. Module KPV-170 modèle STP085B-12/BEA

Les caractéristiques essentielles de module KPV-170 tester sont résumer sur le **tableau IV.5**, ainsi sa photo réelle qui est donne par la **figure IV.23**.

Tableau IV.5 : Caractéristiques de module KPV-170 modèle STP085B-12/BEA au condition STC.

P_{MPP}	85W
V_{MPP}	17.8V
I_{MPP}	4.8A
V_{OC}	22.2V
I_{SC}	5.15A
FF	0.74



Figure IV.23 : Module KPV-170.

IV.3.7. Résultats de la réalisation

Le traceur réalisé à tracé la courbe I-V en excellence et avec une précision acceptable, malgré les variations des conditions climatiques (Ensoleillement et température) observer les jours de tests (mois de décembre) ; ce qu'il veut dire variation de courant de charge de condensateur choisi, ainsi variation de temps de charge attendue par le PIC pour l'acquisition des 250 points de fonctionnement (tension-courant) répartie uniformément sur la courbe.

Ainsi, les différentes limites imposées par : la conversion ADC et la mémoire RAM de PIC, la sensibilité et le temps de réponse des capteurs (courant et tension) et le taux de dégradation des modules teste.

IV.3.7.1. Test sur le module KPV-170 (170W)

La courbe I-V et les caractéristiques calculer par le traceur réaliser lors d'un test avec un module KPV-170 (assemblage parallèle des deux modules a 85W) sont données par la **figure IV.24**.

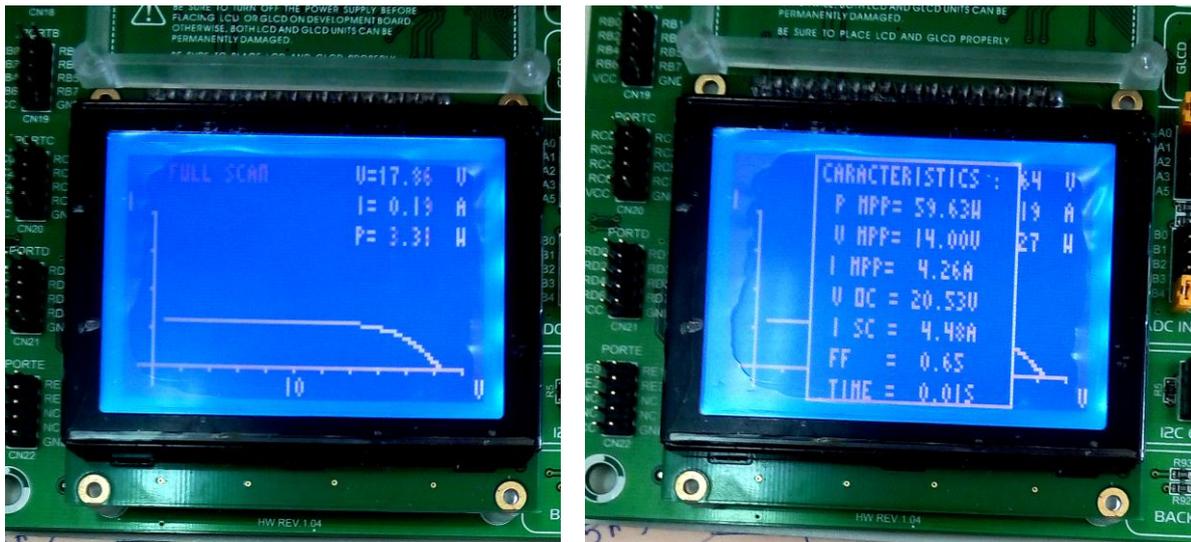


Figure IV.24 : Courbe I-V et caractéristiques de module KPV-170 (170 Wc) avec $C = 4.7\text{mF}$ et aux condition $E = 861\text{ W/m}^2$, $T = 18.4\text{ }^\circ\text{C}$.

IV.3.7.2. Test sur le module KPV-170 (85W)

Les caractéristiques calculer par le traceur réaliser lors d'un test avec un module KPV-170 (un seul module de 85W) sont données par la **figure IV.25**.

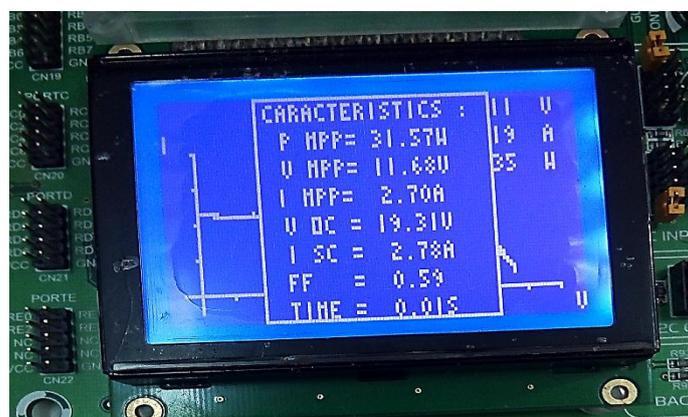


Figure IV.25 : Caractéristiques de module KPV-170 (85 Wc) avec $C = 5.58\text{mF}$ et aux conditions $E = 700\text{ W/m}^2$, $T = 22.4\text{ }^\circ\text{C}$.

Les caractéristiques calculer par le traceur réaliser lors d'un test avec un module Semtoni (module de 10W) sont données par la **figure IV.26**.

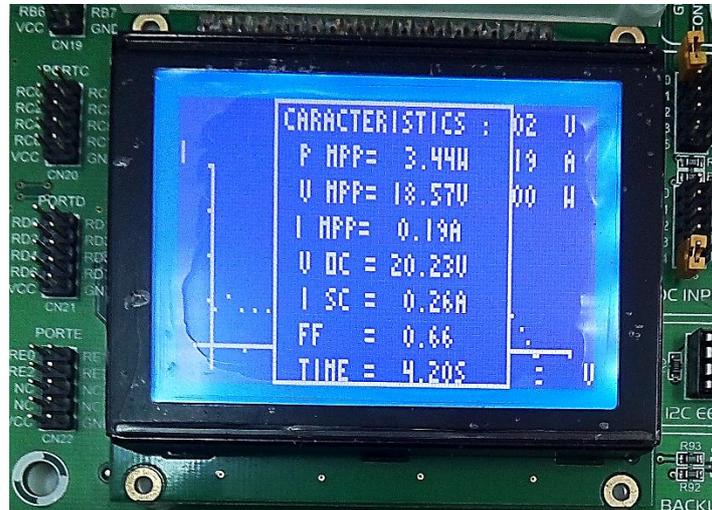


Figure IV.26 : Caractéristiques de module Semtoni (10 Wc) avec $C = 0.88mF$ et aux conditions $E = 861 W/m^2$, $T = 18.4^{\circ}C$.

L'évaluation de traceur a été effectuer seulement selon le paramètres facteur de forme (qui se résume sur la qualité de la cellule PV) et ceci reviens à la variabilité et le non contrôle des conditions de test. Le taux de convergence de traceur au facteur de forme réelle est calculé pour chaque module dans le **tableau IV.6**.

Tableau IV.6 : Evaluation de traceur avec le paramètre FF.

Module	Semtoni (10 Wc)	KPV-170 (85 Wc)	KPV-170 (170 Wc)
FF	0,66	0,59	0,65
100 (FF/FF_{STC}) (%)	91.67	79.73	87.84

IV.3.8. Test d'ombrage partiel

Un test d'ombrage partiel est effectué pour le module KPV-170 (170W) et ceci par un ombrage d'une cellule PV, les résultats de traceur réaliser sont données par la courbe I-V tracer sur la **figure IV.27** et les caractéristiques calculer par le traceur sont données par la **figure IV.28**.



Figure IV.27 : Courbe I-V de traceur après une injection d'un défaut type ombrage partiel.

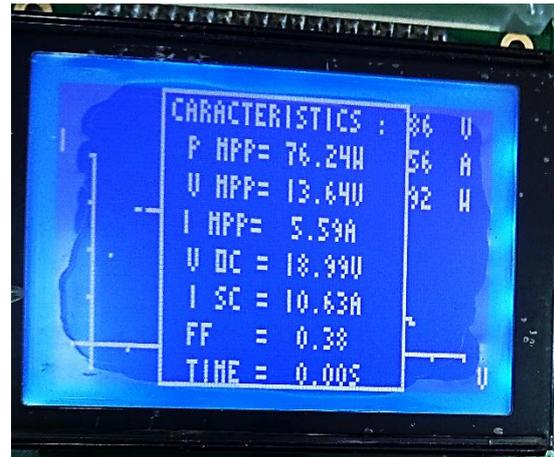


Figure IV.28 : Caractéristiques calculer par le traceur lors de l'apparition d'un défaut type ombrage partiel.

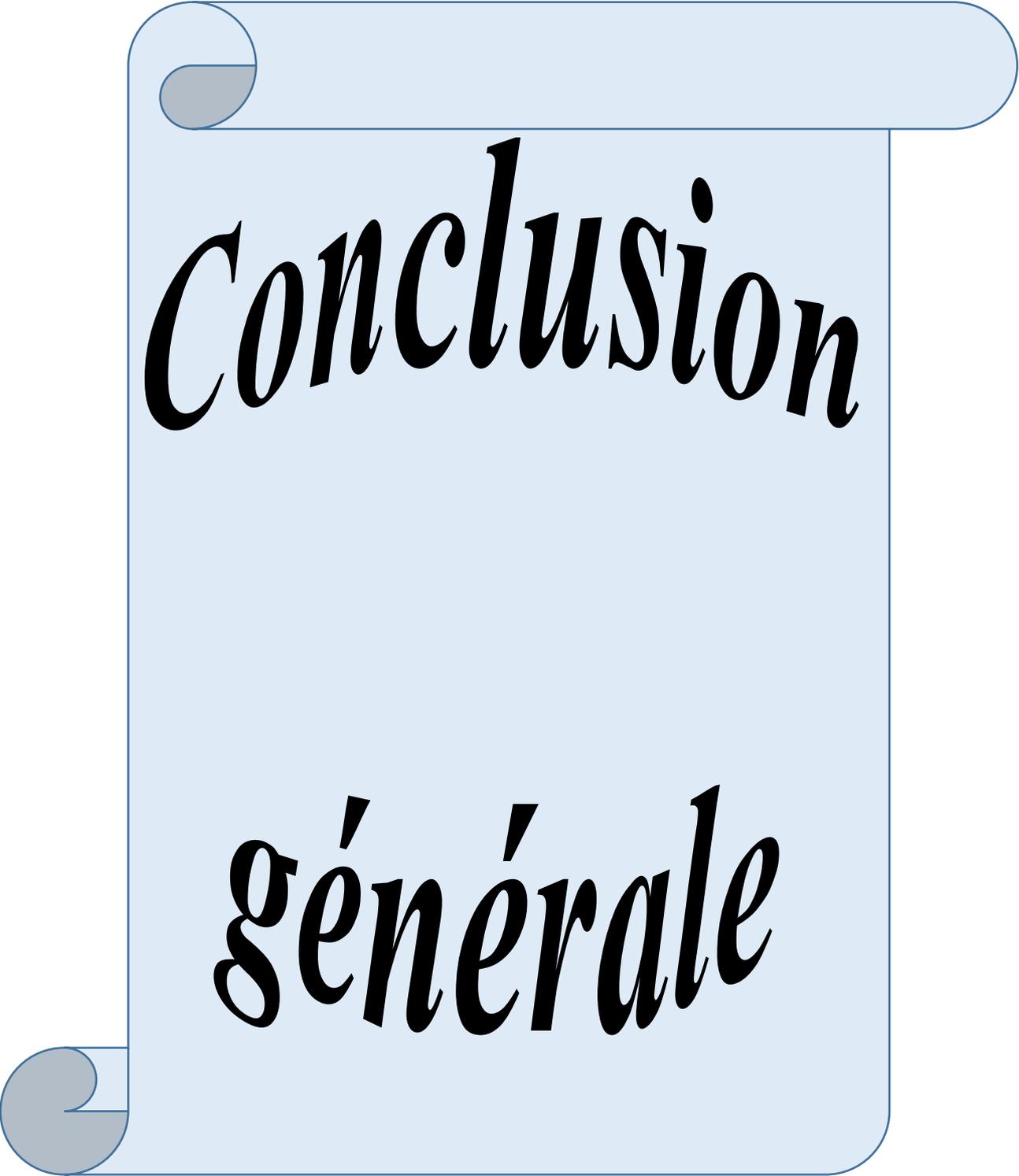
IV.4. Interprétation des résultats

Les traceurs simulés sont beaucoup plus performants en terme de la convergence au facteur FF, qui est un facteur qui assemble généralement la majorité des caractéristiques de module PV (P_{MPP} , V_{OC} , I_{SC}), ceci pour 100% au traceur capacitive et avec une charge électronique, et de 99.99% pour le traceur à base d'une résistance variable.

Alors que, le traceur à base d'une charge capacitive réalisé a montré une convergence maximale 91.67% pour un panneau de faible puissance (10 Wc), et une convergence de 79.37% pour un module de moyenne puissance (85 et 170 Wc). Ce qui veut dire une précision moyenne de 86.41%, qui est une valeur admissible pour révéler les caractéristiques principales d'un module PV.

IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons simulé et réalisé des traceurs de la courbe I-V afin de caractériser des modules PV, où on a programmé un PIC18F45K22 pour l'acquisition des paires tension-courant afin de tracé la courbe I-V sur un graphique LCD. La simulation a porté sur plusieurs charge (résistive, capacitive et MOSFET) pour faire varier les points de fonctionnement, alors que dans la réalisation nous avons valide notre traceur qui montre un temps de scan rapide, un fiable cout de réalisation et une précision qui arrive jusqu'à 91.67%



Conclusion

générale

Conclusion générale

Dans le cadre du projet de fin étude, nous avons étudié un caractérisateur de module photovoltaïque, qui permet de tracer la courbe I-V dans les conditions de fonctionnement réel. Ainsi, l'extraction de ses caractéristiques électriques qui renseignent sur son état de fonctionnement (performance et dégradation pour un éventuel défaut).

Le présent mémoire est réparti en quatre chapitres dont la première on a expliqué le principe de conversion de la lumière en électricité ; par le biais d'une cellule PV qui exploite l'effet photovoltaïque par les propriétés des matériaux semi-conducteur qu'elle a composés. Ainsi que, les différents types et technologies de fabrication des modules PV, les modélisations utiliser pour décri son comportement. Également, les tests de caractérisation qu'il subit sous les conditions STC, afin d'extraire ses paramètres spécifique de fonctionnement.

Le deuxième chapitre était dans le but montrer l'intérêt de la caractérisation électrique et plus particulièrement la caractéristique I-V, dans l'analyse des performances et le diagnostic des générateurs photovoltaïques, qui sont l'élément de base d'un système PV.

Le troisième chapitre où on a présenté les charges employées pour faire varier les points de fonctionnement d'un module testé, de la tension de circuit ouvert au courant du court-circuit. Cette procédure corrélée avec l'acquisition des valeurs de courant et de tension pour tracé la courbe I-V, et l'extraction des paramètres caractérisent son fonctionnement réel.

Le derrièrè chapitre qui est consacré à la simulation de trois types de charge (résistive, charge électronique et capacitive), qui permettent de faire varier les points de fonctionnement d'un module PV, et l'obtention de sa courbe I-V suivie de ses caractéristiques de base comme ; P_{MPP} , V_{MPP} , I_{MPP} , V_{OC} , I_{SC} , FF et le temps de scan. Ensuite, pour tester notre caractérisateur, nous avons réalisé un traceur à base d'une charge capacitive ; qui montre des aptitudes de scan attirant et un cout de réalisation raisonnable, afin de caractériser trois modules de types monocristallin 10, 85 et 170 Wc.

En perspective de ce travail, plusieurs améliorations peuvent être envisagées :

- Embarquer la totalité des composants sur une carte électronique indépendante.
- Intégration d'une résistance pour la décharge automatique du condensateur.
- Utilisation des capteurs avec un large étendu de mesure et d'une sensibilité acceptable.
- Modularité et extensibilité de la capacité de condensateur à charger.

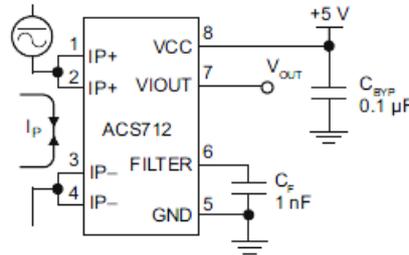
Bibliographie

- [1] https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_solaire_photovolta%C3%AFque#Monde_2. [Accessed 27 12 2020].
- [2] <https://www.statista.com/statistics/809796/global-solar-power-installation-cost-per-kilowatt/>. [Accessed 27 12 2020].
- [3] <https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=RenewGenBySource>. [Accessed 27 12 2020].
- [4] B. Ahlam and C. Imane, "Extraction des paramètres du module photovoltaïque," Memoire Master en Electronique, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2019.
- [5] H. KAMELIA, "Modélisation d'une cellule photovoltaïque : etude comparative," Memoire Magister en Electrotechnique, Universite Mouloud Mammeri - Tizi-Ouzou, 2012.
- [6] B. B. Mounir and K. Mahdi, "Etude et simulation d'une chaine de production photovoltaïque," Memoire Master en Electrotechnique , Univerité Badhi Mokhtar - Annaba, 2018.
- [7] N. Hamid, "Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque et de l'onduleur," Memoire Master en Electrotechnique, Universite Akli Mohand Oulhadj - bouira, 2016.
- [8] A. Ammar, "Etude et évaluation les performances de dégradation des modules photovoltaïques," Memoire Master en Physique, Université Ahmed Draïa - Adrar, 2018.
- [9] L. Turkiya and R. Sihem, "Conception d'un testeur intellegent de panneaux photovoltaïque," Memoire Master en Electronique , Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2019.
- [10] S. Mohammed, "Détermination des paramètres, performances et etude de la dégradation des modules photovoltaïques en milieu saharien," These doctorat en Sciences Physiques, Université Aboubakr Belkaid - Tlemcen, 2011.
- [11] http://photovoltaïque.guidenr.fr/II_1_constitution-module-photovoltaïque.php. [Accessed 27 10 2020].
- [12] B. BENDIB, "Une nouvelle approche de modélisation et de commande des systèmes photovoltaïques autonomes," These doctorat en Sciences, Univerité Ferhat Abbas - Setif, 2017.
- [13] A. Said and Z. Maci, "Identification et caractérisation d'un système photovoltaïque," Memoire Master en Genie Electrique, Université Abderrahmane Mira - Bejaia, 2012.
- [14] P. A. Lynn, "Electricity from sunlight: An introduction to photovoltaics", West Sussex, UK: John Wiley & Sons, 2010.
- [15] M. Zahra, "Modelisation de modules photovoltaïques," Memoire Magister en Microelectronique, Université De Batna, 2012.
- [16] T. Mambrini, "Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies," These doctorat en Physique, Université Paris Sud - Paris, 2014.
- [17] B. Ali, "Caractéristique courant-tension (I-V) d'un panneau photovoltaïque: Méthodes de mesure et influence des paramètres externes," Memoire Master en Electrotechnique, Ecole superieure en sciece appliquees - Tlemcen, 2019.
- [18] L. Bun, "Détection et localisation de défauts pour un système PV," These docotrat en Genie Electrique, Université de Grenoble - France, 2011.
- [19] D. Zahira, "Extractrion des parametres physiques d'une cellule solaire a deux exponentiels par la methodes des algorithmes genetiques," Memoire Magister enEnergétique et mécanique des fluides, Université Ferhat Abbas - Setif.

- [20] B. Hanane, "Conception et réalisation d'un traceur de caractéristiques électriques des panneaux pv à base d'Arduino," Memoire Master en Automatique, Université Kasdi Merbah - Ouargla, 2019.
- [21] I. Fairouz and M. Cherif, "Analyse des modes de défaillance des systèmes photovoltaïques installés dans le sud algérien," Memoire Master en Electrotechnique, Universite Abderamane Mira - Bejaia, 2012.
- [22] M. Bressan, "Développement d'un outil de supervision et de contrôle pour une installation solaire photovoltaïque," These doctorat en Science de l'ingénieur, Université de Perpignan - France, 2014.
- [23] Y. Zhu and W. Xiao, "A comprehensive review of topologies for photovoltaic I–V curve tracer," *Solar Energy*, vol. 196, pp. 346-357, 2020.
- [24] K. RIAD, "Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques," These doctorat en Automatique, Université Ferhat Abbas - Setif, 2015.
- [25] https://fr.wikiversity.org/w/index.php?title=Transistor/Transistor_MOSFET&oldid=811057. [Accessed 4 11 2020].
- [26] A. A. Willoughby and M. O. Osinowo, "Development of an electronic load I-V curve tracer to investigate the impact of Harmattan aerosol loading on PV module performance in southwest Nigeria," *Solar Energy*, vol. 166, pp. 171-180, 2018.
- [27] E. A. B. Junior, C. M. A. d. Luz, T. M. Oliveira, L. A. R. Rios, E. M. Vicente and F. L. Tofoli, "A curve tracer for photovoltaic modules based on the capacitive load method", *Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power*, Decembre 2019.
- [28] F. Spertino, J. Ahmad, A. Ciocia, P. D. Leo and A. F. Murtaza, "Capacitor charging method for I–V curve tracer and MPPT in photovoltaic systems," *Solar Energy*, vol. 119, pp. 461-473, 2015.
- [29] S. Motahhir, A. Chalh, A. E. Ghzizal and S. S. a. A. Derouich, "Modeling of photovoltaic panel by using Proteus," *Engineering Science and Technology Review*, vol. 10, no. 2, pp. 8-13, 2017.
- [30] <http://microchip.com/support>. [Accessed 15 11 2020].
- [31] T. Quiniou, "Cours, Informatique industrielle," cours en Licence SPI2, universite UNC, 2014.
- [32] D. Atsu, I. Seres, M. Aghaei and I. Farkas, "Analysis of long-term performance and reliability of PV modules under tropical climatic conditions in sub-Saharan," *Renewable Energy*, vol. 162, no. 2020, pp. 285-295, 2020.

Annexe A

Capteur de courant ACS712



Application 1. The ACS712 outputs an analog signal, V_{OUT} , that varies linearly with the uni- or bi-directional AC or DC primary sensed current, I_P , within the range specified. C_F is recommended for noise management, with values that depend on the application.

COMMON OPERATING CHARACTERISTICS¹ over full range of T_A , $C_F = 1$ nF, and $V_{CC} = 5$ V, unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
ELECTRICAL CHARACTERISTICS						
Supply Voltage	V_{CC}		4.5	5.0	5.5	V
Supply Current	I_{CC}	$V_{CC} = 5.0$ V, output open	–	10	13	mA
Output Capacitance Load	C_{LOAD}	VIOU to GND	–	–	10	nF
Output Resistive Load	R_{LOAD}	VIOU to GND	4.7	–	–	k Ω
Primary Conductor Resistance	$R_{PRIMARY}$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	–	1.2	–	m Ω
Rise Time	t_r	$I_P = I_P(\text{max})$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, $C_{OUT} = \text{open}$	–	5	–	μs
Frequency Bandwidth	f	–3 dB, $T_A = 25^\circ\text{C}$; I_P is 10 A peak-to-peak	–	80	–	kHz
Nonlinearity	E_{LIN}	Over full range of I_P	–	1.5	–	%
Symmetry	E_{SYM}	Over full range of I_P	98	100	102	%
Zero Current Output Voltage	$V_{IOUT(Q)}$	Bidirectional; $I_P = 0$ A, $T_A = 25^\circ\text{C}$	–	$V_{CC} \times 0.5$	–	V
Power-On Time	t_{PO}	Output reaches 90% of steady-state level, $T_J = 25^\circ\text{C}$, 20 A present on leadframe	–	35	–	μs
Magnetic Coupling ²			–	12	–	G/A
Internal Filter Resistance ³	$R_{F(INT)}$			1.7		k Ω

¹Device may be operated at higher primary current levels, I_P , and ambient, T_A , and internal leadframe temperatures, T_A , provided that the Maximum Junction Temperature, $T_J(\text{max})$, is not exceeded.

²1G = 0.1 mT.

³ $R_{F(INT)}$ forms an RC circuit via the FILTER pin.

x30A PERFORMANCE CHARACTERISTICS $T_A = -40^\circ\text{C}$ to 85°C ¹, $C_F = 1$ nF, and $V_{CC} = 5$ V, unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Optimized Accuracy Range	I_P		–30	–	30	A
Sensitivity	Sens	Over full range of I_P , $T_A = 25^\circ\text{C}$	64	66	68	mV/A
Noise	$V_{NOISE(PP)}$	Peak-to-peak, $T_A = 25^\circ\text{C}$, 66 mV/A programmed Sensitivity, $C_F = 47$ nF, $C_{OUT} = \text{open}$, 2 kHz bandwidth	–	7	–	mV
Zero Current Output Slope	$\Delta I_{OUT(Q)}$	$T_A = -40^\circ\text{C}$ to 25°C	–	–0.35	–	mV/ $^\circ\text{C}$
		$T_A = 25^\circ\text{C}$ to 150°C	–	–0.08	–	mV/ $^\circ\text{C}$
Sensitivity Slope	ΔSens	$T_A = -40^\circ\text{C}$ to 25°C	–	0.007	–	mV/A/ $^\circ\text{C}$
		$T_A = 25^\circ\text{C}$ to 150°C	–	–0.002	–	mV/A/ $^\circ\text{C}$
Total Output Error ²	E_{TOT}	$I_P = \pm 30$ A, $T_A = 25^\circ\text{C}$	–	± 1.5	–	%

¹Device may be operated at higher primary current levels, I_P , and ambient temperatures, T_A , provided that the Maximum Junction Temperature, $T_J(\text{max})$, is not exceeded.

²Percentage of I_P , with $I_P = 30$ A. Output filtered.

Annexe B

PIC 18F45K22

TABLE 1: PIC18(L)F2X/4XK22 FAMILY TYPES

Device	Program Memory		Data Memory		I/O ⁽¹⁾	10-bit A/D Channels ⁽²⁾	CCP	ECCP (Full-Bridge)	ECCP (Half-Bridge)	MSSP		EUSART	Comparator	CTMU	BOR/LVD	SR Latch	8-bit Timer	16-bit Timer
	Flash (Bytes)	# Single-Word Instructions	SRAM (Bytes)	EEPROM (Bytes)						SPI	I ² C							
PIC18(L)F23K22	8K	4096	512	256	25	19	2	1	2	2	2	2	2	Y	Y	Y	3	4
PIC18(L)F24K22	16K	8192	768	256	25	19	2	1	2	2	2	2	2	Y	Y	Y	3	4
PIC18(L)F25K22	32K	16384	1536	256	25	19	2	1	2	2	2	2	2	Y	Y	Y	3	4
PIC18(L)F26K22	64k	32768	3896	1024	25	19	2	1	2	2	2	2	2	Y	Y	Y	3	4
PIC18(L)F43K22	8K	4096	512	256	36	30	2	2	1	2	2	2	2	Y	Y	Y	3	4
PIC18(L)F44K22	16K	8192	768	256	36	30	2	2	1	2	2	2	2	Y	Y	Y	3	4
PIC18(L)F45K22	32K	16384	1536	256	36	30	2	2	1	2	2	2	2	Y	Y	Y	3	4
PIC18(L)F46K22	64k	32768	3896	1024	36	30	2	2	1	2	2	2	2	Y	Y	Y	3	4

Note 1: One pin is input only.

2: Channel count includes internal FVR and DAC channels.

ADC

TABLE 17-1: ADC CLOCK PERIOD (T_{AD}) Vs. DEVICE OPERATING FREQUENCIES

ADC Clock Period (T _{AD})		Device Frequency (F _{osc})			
ADC Clock Source	ADCS<2:0>	64 MHz	16 MHz	4 MHz	1 MHz
F _{osc} /2	000	31.25 ns ⁽²⁾	125 ns ⁽²⁾	500 ns ⁽²⁾	2.0 μs
F _{osc} /4	100	62.5 ns ⁽²⁾	250 ns ⁽²⁾	1.0 μs	4.0 μs ⁽³⁾
F _{osc} /8	001	400 ns ⁽²⁾	500 ns ⁽²⁾	2.0 μs	8.0 μs ⁽³⁾
F _{osc} /16	101	250 ns ⁽²⁾	1.0 μs	4.0 μs ⁽³⁾	16.0 μs ⁽³⁾
F _{osc} /32	010	500 ns ⁽²⁾	2.0 μs	8.0 μs ⁽³⁾	32.0 μs ⁽³⁾
F _{osc} /64	110	1.0 μs	4.0 μs ⁽³⁾	16.0 μs ⁽³⁾	64.0 μs ⁽³⁾
FRC	x11	1-4 μs ^(1,4)	1-4 μs ^(1,4)	1-4 μs ^(1,4)	1-4 μs ^(1,4)

Legend: Shaded cells are outside of recommended range.

Note 1: The FRC source has a typical T_{AD} time of 1.7 μs.

2: These values violate the minimum required T_{AD} time.

3: For faster conversion times, the selection of another clock source is recommended.

4: The ADC clock period (T_{AD}) and total ADC conversion time can be minimized when the ADC clock is derived from the system clock F_{osc}. However, the FRC oscillator source must be used when conversions are to be performed with the device in Sleep mode.