Étude de la fiabilité des structures silicium employées dans le domaine des énergies renouvelables suite à leur fonctionnement sous conditions extrêmes

Jean Gerges Zaraket

▶ **To cite this version:**

Jean Gerges Zaraket. Étude de la fiabilité des structures silicium employées dans le domaine des énergies renouvelables suite à leur fonctionnement sous conditions extrêmes. Optique [physics.optics]. Université de Lorraine; Université libanaise, 2017. Français. NNT : 2017LORR0244 . tel-01809977

HAL Id: tel-01809977

https://theses.hal.science/tel-01809977

Submitted on 7 Jun 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

Université Libanaise
Ecole Doctorale
Sciences et Technologie

THESE EN COTUTELLE
Entre
L'UNIVERSITE LIBANAISE
ET
L'UNIVERSITE DE LORRAINE
Pour l'obtention du diplôme de doctorat

Spécialité : Physique, Electronique

Présenté et soutenu par

JEAN GERGES ZARAKET

Soutenance prévue le 18 décembre 2017

ETUDE DE LA FIABILITE DES STRUCTURES SILICIUM EMPLOYEES DANS LE DOMAINE DES ENERGIES RENOUVELABLES SUITE A LEUR FONCTIONNEMENT SOUS CONDITIONS EXTREMES

Devant le jury composé de :

Ali Assi	Lebanese International University (LIU)	Rapporteur
Anne-Claire Salaun	Université de Rennes	Rapporteur
Alain Hoffmann	Université de Monpellier	Examinateur
Tilda Akiki	Holy Spirit University of Kaslik	Examinateur
Chafic Salame	Université Libanaise	Directeur de thèse
Michel Aillerie	Université de lorraine	Directeur de thèse

Université Libanaise

Résumé

Le travail de la thèse proposé consiste à étudier, caractériser et modéliser la performance et la fiabilité de composants semi-conducteurs sous conditions extrêmes c'est à dire pendant et après que ces composants ont subi un stress électrique, un stress thermique voire les deux stress en même temps. Les composants semi-conducteurs que nous avons étudiés sont des modules photovoltaïques en silicium monocristallin pour des applications dans les énergies renouvelables. Dans cette étude, ces composants ont été soumis à plusieurs types de dégradations générant des défauts localisés dans la structure des composants. Dans un premier temps, des études approfondies des caractéristiques I(V) et C(V) et des paramètres électriques des modules solaires photovoltaïques ont été réalisées en testant une série de modules sous différentes conditions environnementales afin de fournir des données pertinentes pouvant être utiles pour l'évaluation des performances, la modélisation du fonctionnement et pour la mise en œuvre correcte et complète des modules photovoltaïques. Ces caractérisations ont été complétées par l'étude des défauts créés à l'interface et dans les structures des modules photovoltaïques par les différents stress sur la base de mesures effectuées sur ces mêmes cellules par la technique Deep Level Transient Spectroscopy (DLTS). Grâce à cette technique, nous avons identifié et localisé ces défauts au sein du composant, en déterminant leur énergie d'activation et leur section efficace de capture. Les résultats de notre étude montrent ainsi l'importance des conditions de fonctionnement sur les performances instantanées et sur le long terme des systèmes photovoltaïques. Ils peuvent être exploitables directement dans la conception même des modules silicium voire transposable, en suivant la méthodologie de l'étude que nous proposons à de nouvelles technologies de modules.

Mots clés : Cellules photovoltaïques, Contrainte thermique et électrique, Caractéristique (I(V), C(V)), Défauts profonds, DLTS.

Abstract

The objective of this work aim to study the performance, reliability of semiconductor structures after their operation under extreme conditions, during and after electrical stress, thermal stress, and combined electro thermal stresses. The studied semiconductor structures are photovoltaic cells for applications in the field of renewable energies. These devices have been exposed to several types of degradation generating localized defects in the structures. The I (V) and C (V) characteristics and electrical parameters have been studied before and after each stress case. The Deep Level Transient Spectroscopy (DLTS) was used as advanced technique for tracking the defects created at the interface and in the bulk structures. The DLTS technique allows identifying and locating these defects within the devices, by determining their activation energy and their capture cross-Section.

Keywords: Photovoltaic cells, Thermal and electrical stress, Characteristic (I (V), C (V)), Defects, DLTS

Remerciements

Ce travail de thèse de doctorat a été réalisé dans le cadre d'une cotutelle entre le Laboratoire Matériaux Optiques Photoniques et Systèmes, LMOPS, de l'Université de Lorraine & Centrale-Supélec, dans le cadre de l'école doctorale Energie Mécanique et Matériaux (EMMA) France et le laboratoire d'Unité Composants, Electronique et Energies renouvelables CEER, Liban.

Au terme de ce travail, je souhaite adresser mes sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué à sa réalisation et ont permis par leur soutien et leurs conseils, de le mener à bien.

Je remercie tout d'abord Professeur Chafic Salame, qui a permis la mise en œuvre de cette thèse et a accepté d'être mon encadrant et pour m'avoir accueilli dans son laboratoire de (CEER) de l'Université Libanaise et de me suivre ainsi que pour son soutien, sa disponibilité, les nombreuses discussions que nous avons eues m'ont permis d'approfondir mes connaissances dans la physique des semi-conducteurs et des cellules photovoltaïques.

Je voudrais donner mes sincères remerciements à mon conseiller, le Professeur Michel Aillerie directeur de cette thèse, non seulement pour ses conseils éclairants et généreux soutien, mais aussi grâce à sa bonté et sa gentillesse. Je le remercie pour m'avoir accueilli au sein de la grande famille « LMOPS », pour son expérience et le temps précieux qu'il m'a consacré pour les discussions scientifiques tout au long de ce travail.

Je voudrais témoigner toute ma reconnaissance au Professeur Fawaz El Omar, Doyen de l'EDST de m'avoir accepté dans son école doctorale et d'avoir développé les études doctorales à l'Université Libanaise dans le cadre de son école.

J'aimerais aussi remercier la direction du laboratoire Monsieur Nicolas Fressengeas qui m'a accompagné pendant mes séjours au laboratoire.

Je tiens à remercier Docteur Etienne Losson qui a mis à notre disposition le spectromètre DLTS ce qui m'a permis d'approfondir les caractérisations des défauts et de mieux interpréter mes études précédentes.

Je tiens également à remercier Professeure Anne-Claire Salaun de l'Institut d'Électronique et de Télécommunications de Rennes-France et Professeur Ali Assi, de LIU (lebanese International University), pour avoir accepté d'être rapporteur de ma thèse. Je vous remercie

pour le temps que vous avez passé sur ce manuscrit et aussi pour les commentaires, les remarques constructives que vous avez portées à l'amélioration de celui-ci.

Je suis très heureux que Professeur Alain Hoffmann de l'Université de Monpellier ait accepté d'examiner mon travail de thèse. J'espère avoir l'occasion de travailler avec lui dans l'avenir. Je remercie Docteur Tilda Akiki de Holy Spirit University of Kaslik, d'avoir accepté d'examiner mon travail de thèse.

Je suis reconnaissant à mes amis des laboratoires CEER et LMOPS, du personnel administratif : Evelyne et Stéphanie, Zeinab des techniciens : Jean-Claude et Céline, des doctorants : Ines, Hassan, Ivan, Elise, Sara, Joris, Meriem, Cherifa, Rawda, Bachirou, Mohammadou, Touhami, Imed, Wahab, Thomas, Lorraine, Rita, Rony, Ramzy, Rami, Cynthia, Carl, Lionel, Oscar, Sophie, Stephan et étudiants de Master : Francois, Angelica, Christina pour leur hospitalité et l'ambiance conviviale.

Je remercie très chaleureusement mes parents pour m'avoir toujours permis de suivre le chemin des études. Merci pour leur soutien, leurs encouragements et surtout leur amour qui a toujours été une source motivante. Un merci particulier pour le plus beau frère et pour ma belle-sœur du monde. C'est avec beaucoup d'émotion que je dédie ce travail à mes parents et à mon frère et ma sœur.

Merci à tous et à toutes.

Dans la vie rien n’est à craindre tout est à comprendre

Marie CURIE

Sommaire

Remerciements 5
Sommaire 9
Liste des Abréviations 13
Introduction générale 15

Chapitre 1 : Technologie et fonctionnement des cellules solaires. Introduction à la notion de défauts 19

1.1 Introduction 21
1.2 Bref historique sur l'évolution des systèmes photovoltaïques 21
1.3 Structure des cellules PV 22
1.4 Comparaison des trois principales technologies à base Si 24
1.5 Utilisation des cellules photovoltaïques pour la production d'électricité d'origine renouvelable 27
1.6 La jonction PN 29
1.7 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque 32
1.8 Paramètres physiques et fonctionnels d'une cellule PV 35
1.9 Modèles électriques du fonctionnement d'une cellule 38
1.10 Influence des paramètres internes des cellules sur leur fonctionnement 42
1.11 Influence des paramètres extérieurs sur le fonctionnement des cellules photovoltaïques 47
1.12 Association des cellules dans un module photovoltaïque 48
1.13 Performance des modules photovoltaïques pour la production d'énergie électrique 51
1.14 Origine des stress électrique et thermique dans les modules photovoltaïques 52
1.15 Etude des défauts profonds dans les jonctions semi-conductrices 55
1.16 Conclusion 58

Chapitre 2 : Influence du stress électrique sur les caractéristiques et les paramètres des modules photovoltaïques 61

2.1 Introduction 63
2.2 Bases théoriques et expérimentales de l'étude 64
2.3 Méthodologie Expérimentale 66
2.4 Etudes post- stress électrique à l'obscurité-Branche SE1 69
2.5 Etudes post-stress électrique sous éclairement-Branche SE2 76
2.6 Le facteur d'idéalité des cellules vierges et stressées électriquement 84
2.7 Etude des caractéristiques C(V) des cellules vierges et stressées électriquement 85
2.8 Observations complémentaires de l'effet du stress électrique sur la structure des cellules 97
2.9 Conclusion 99

Chapitre 3 : Influence du stress thermique sur les caractéristiques et les paramètres des modules photovoltaïques..... 101

3.1 Introduction 103

3.2 Bases théoriques et expérimentales de l'étude 104

3.3 Méthodologie expérimentale 106

3.4 Etudes post-stress thermique à l'obscurité-Branche ST1 109

3.5 Etudes du post-stress thermique sous éclairement-Branche ST2 114

3.6 Le facteur d'idéalité des cellules stressées thermiquement 120

3.7 Les caractéristiques C(V) des cellules stressées thermiquement 121

3.8 Les capacités C_{Ph} et C_{L-D}. Etude comparée 123

3.9 Conclusion 125

Chapitre 4 : Influence de la température lors d'un stress électrique sur la performance des modules photovoltaïques..... …..127

4.1 Introduction 129

4.2 Méthodologie expérimentale 129

4.3 Etude des caractéristiques I(V) direct 130

4.4 Etude des caractéristiques I(V) inverse 138

4.5 Les résistances shunt et série post-stress électrique en fonction de la température……..…….143

4.6 Etude des caractéristiques C(V) mesurées à l'obscurité après un stress à l'obscurité et sous éclairement (SET1) 146

4.7 Les capacités C_{Ph} et C_{L-D}. Etude comparée 150

4.8 Conclusion 150

Chapitre 5 : Etude des défauts dans le matériau par la technique DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy) 153

5.1 Introduction 155

5.2 Caractérisation DLTS : mesure des spectres et analyses 156

5.3 Appareil de mesure DLTS 165

5.4 Méthode de mesure 168

5.5 Procédures expérimentales 170

5.6 Etude des défauts avant et après stress pour une diode 172

5.7 Etude des défauts avant et après stress pour un module photovoltaïque 177

5.8 Conclusion 183

Conclusion générale et perspectives 185

Bibliographie 189

Liste des Abréviations

Général

PV	Photovoltaïque
SE	Stress Electrique
ST	Stress Thermique
SET	Stress Electrique et Thermique
DLTS	Deep Level Transient Spectroscopy

Symboles

ZCE	Zone de Charge d'espace
I_L	Courant photonique
I_{01}	Courant inverse de saturation de la diode 1
I_{02}	Courant inverse de saturation de la diode 2
γ_1	A1 × (N_{CS}), le facteur de qualité de la diode 1
γ_2	A2 × (N_{CS}), le facteur de qualité de la diode 2
A1 et A2	Facteurs d'accomplissement des diodes 1 et 2
N_{CS}	Nombre des cellules en série.
R_S	Résistance série.
R_{sh}	Résistance shunt.
I_{max}	Courant à la sortie de puissance maximale
V_{max}	Tension à la sortie de puissance maximale
Icc (Isc)	Courant de court-circuit (short circuit)
Voc (Vco)	Tension de circuit ouvert (open circuit)
V_d	Tension de diffusion
P_{in}	Puissance incidente
A	Section de la cellule
FF	Facteur de forme
P_{max}	Puissance maximale
R	Rendement de conversion
EQE	Rendement quantique externe
ns	Nombres totaux de cellules en série
np	Nombres totaux de cellules en parallèle
Igcc	Courant de court-circuit du module résultant
Vgco	Tension du circuit ouvert du module résultant
n	Densité de porteurs de charges (positives et négatives)
e	Charge élémentaire
$e_{n,p}$	Taux d'émission
J_n	Densité du courant des électrons
J_p	Densité du courant des trous
μ	Mobilité des porteurs
μ_r	Mobilité relative
E	Champ électrique interne
S	Surface de la cellule
h	Constante de Planck

c	Vitesse de la lumière
λ	Longueur d'onde
N_a	Concentration relative aux impuretés « accepteurs »
N_d	Concentration relative aux impuretés « donneurs »
N_t	Concentration des centres profonds
F	Probabilité d'occupation
$\sigma_{n,p}$	Sections efficaces de capture
$v_{thn,p}$	Vitesse thermique des porteurs
T	Température
K	Constant de Boltzmann
KT	Energie thermique
$m^*_{n,p}$	Masse effective des électrons et des trous.
N_C	Densité effective d'état dans la bande de conduction
N_V	Densité effective d'état dans la bande de valence
h	Constante de Planck
E_g	Energie du gap
E_a	Energie d'activation
E_T	Energie du niveau de piège
E_F	Energie de Fermi
E_V	Energie de valence
E_C	Energie de conduction

Introduction générale

Mon travail de thèse est intitulé « études de la fiabilité des structures silicium employées dans le domaine des énergies renouvelables suite à leur fonctionnement sous conditions extrêmes ». Bien que formant un tout cohérant dans l'étude de la fiabilité des composants, ce travail peut être divisé en deux parties. La première partie est consacrée à la caractérisation et à la modélisation de la performance et la fiabilité des composants à base de semi-conducteurs de types Si-monocristallin utilisé comme modules photovoltaïques commerciaux. Nous avons étudié particulièrement leur comportement suite à un fonctionnement sous conditions extrêmes, en particulier lorsqu'ils sont soumis à un stress électrique, thermique et aux deux stress en même temps. La deuxième partie est quant à elle dédiée à l'étude des défauts générés par ces stress en utilisant la spectroscopie des niveaux profonds dans la jonction semi-conductrice. La technique utilisée est la spectroscopie des niveaux profonds ou Deep Level Transient Spectroscopy-DLTS.

Dans ce travail de thèse ayant pour objectif premier d'obtenir une meilleure compréhension des phénomènes induits par des stress, électrique puis thermique, une partie importante est consacrée à l'expérimentation. C'est ce que l'on retrouvera dans les premières parties de chaque chapitre de ce manuscrit consacré aux expérimentations avec une description des mesures, principalement I(V) et une modélisation et des premières analyses des résultats et discussions des phénomènes observés. Néanmoins, l'influence des stress sur la création de défauts dans les jonctions des cellules photovoltaïques constituant les modules seront approfondies dans les caractérisations C(V) et par l'étude des niveaux profonds par la technique DLTS en faisant le lien avec les résultats expérimentaux présentés dans ces premières parties. Nous tenons à faire remarquer ici que certains résultats obtenus dans les différentes séries de caractérisation des effets des stress ne pourront malheureusement pas être comparés entre eux. En effet, les possibilités d'approvisionnement des modules ont évolué au cours de ces trois années de thèse, et les trois séries de mesures ont été faites avec trois séries différentes de modules n'ayant pas les mêmes caractéristiques. Les caractéristiques des modules étudiés seront rappelées en début de chaque chapitre.

Ainsi, le manuscrit de cette thèse comprend cinq chapitres. Le premier chapitre est destiné à la description des technologies utilisées et du fonctionnement des cellules solaires. Nous

présenterons aussi dans ce chapitre de façon chronologique l'évolution de la technologie solaire photovoltaïque, les différentes structures des cellules solaires, quelques rappels sur les principes de la conversion photovoltaïques et du fonctionnement des cellules qui permettront ensuite de mieux analyser les résultats expérimentaux présentés dans les chapitres suivants. Nous abordons les différentes caractéristiques, les différents modèles et en particulier les différents paramètres contribuant aux performances d'une cellule solaire. Une rapide étude bibliographique va porter sur le phénomène des points chauds ou hot-spots pouvant apparaître dans les cellules suite à des ombrages partiels ou des défauts de structures. Naturellement, l'influence de l'éclairage et de la température sur les modules solaires sont étudiés.

Les chapitres II, III et IV présentent l'étude des effets résultants de contraintes électriques, thermiques et contraintes combinées électrothermiques sur les performances des modules silicium qui dominent actuellement le marché du photovoltaïque solaire. Ces contraintes dans les cellules ont été induites par des stress électriques et/ou thermiques appliqués dans l'obscurité et sous éclairement. Les mesures post-stress ont été effectuées, pour les deux types de stress réalisés dans l'obscurité et sous éclairement afin d'analyser les performances des cellules en fonctionnement normal ou ombragé. Les protocoles et les méthodes de mesure sont largement détaillées, en particulier sur les caractérisations I(V) et C(V). Ces analyses sont basées sur un travail expérimental important ayant permis la modalisation des différents paramètres des modules lorsqu'elles sont soumises à un stress électrique et/ou thermique pendant puis après la création de ces contraintes. Dans chacun de ces chapitres, après une présentation détaillée des mesures expérimentales, une interprétation des résultats est proposée et une comparaison des phénomènes induits dans l'obscurité et sous divers éclairements est discutée.

Le dernier chapitre est consacré à la caractérisation des défauts de la jonction PN des modules silicium. La technique de spectroscopie des niveaux profonds ou « Deep Level Transient Spectroscopy », DLTS, est alors utilisée. Cette technique permet de localiser les défauts présents dans les semi-conducteurs et donc dans notre cas, des modules solaires. En introduction de ce chapitre, une présentation détaillée sera faite des différents types de défauts présents dans une jonction PN et les grandeurs électroniques les caractérisant à savoir leur énergie d'activation et leur section efficace de capture que nous déterminerons par la DLTS. Ce chapitre se poursuivra par une description du principe de la DLTS, de la procédure

de mesure permettant de caractériser ces défauts et de la méthode de mesure que nous avons utilisée. En lien avec les mesures, résultats et discussions présentés dans les chapitres précédents, nous présentons notre étude DLTS sur les modules solaires avant et après stress et terminerons par une discussion sur les résultats obtenus.

Enfin, ce manuscrit se termine par une conclusion générale. Cette conclusion rappelle les différentes techniques et procédures utilisées, les différents verrous expérimentaux que nous avons levés et résume les résultats fondamentaux obtenus pendant ces années de thèse. La suite que peut donner ce travail est enfin envisagée dans cette dernière partie.

Chapitre 1 :

Technologie et fonctionnement des cellules solaires.

Introduction à la notion de défauts

1.1 Introduction

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui transforme directement l'énergie lumineuse portée par les photons en électricité portée par des électrons grâce à l'effet photovoltaïque. La cellule photovoltaïque fournit une tension continue. Les constituants de la plupart des cellules photovoltaïques sont des semi-conducteurs fonctionnant suivant le principe de la jonction PN, c'est à dire sur le principe de la diode. Actuellement elles sont majoritairement à base de silicium (Si) formant des plaques fines de quelques microns d'épaisseur et d'une dizaine de centimètres de côté. Le sujet de ce mémoire étant basé sur l'étude du module silicium, je privilégierai l'étude de ce type de module et de ses propriétés dès ce chapitre introductif.

Ce chapitre présente la structure d'une cellule photovoltaïque et son fonctionnement basé sur une bibliographie récente permettant d'aider à une meilleure compréhension des propriétés étudiées. Dans ce chapitre, nous présenterons également les caractéristiques électriques de chaque élément de la cellule afin de développer un circuit équivalent précis. Puis nous proposerons plusieurs modèles électriques représentant la cellule photovoltaïque. Ainsi plusieurs paramètres affectant le fonctionnement de la cellule solaire seront définis et leurs influences détaillées. Ce chapitre se terminera par une discussion la description des défauts profonds et l'étude des pièges.

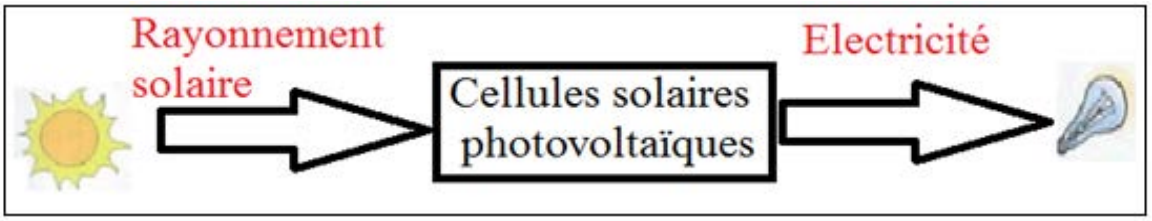


Figure 1 : Effet photovoltaïque

1.2 Bref historique sur l'évolution des systèmes photovoltaïques

Les systèmes photovoltaïques pour la production d'énergie électrique sont utilisés depuis environ un demi-siècle environ. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour assurer l'alimentation des satellites, et en particulier leurs systèmes de transmission

radio. Mais l'effet photovoltaïque a été découvert bien antérieurement. Voici donc quelques dates importantes de l'histoire de la cellule photovoltaïque :

- En 1839, Edmond Becquerel physicien français découvre l'effet photovoltaïque [1, 2]. Il produit pour la première fois du courant électrique dans un matériau solide à partir de l'utilisation de l'énergie lumineuse.
- En 1954, Chapin, Pearson et Prince, trois chercheurs américains, créent une cellule photovoltaïque au moment où l'industrie cherche pour alimenter ses satellites des nouvelles solutions. C'est alors que les chercheurs des laboratoires Bell (Aux Etats-Unis) développent la première cellule photovoltaïque (ou photopile), découvrant qu'il était possible d'augmenter la photosensibilité du silicium en ajoutant des "impuretés" ou "dopage", utilisé dans tous les semi-conducteurs pour l'électronique et la photonique [3].
- En 1958 la première cellule ayant un rendement de 9 % est obtenue.
- En 1973, à l'Université de Delaware est construite la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques [3].
- Enfin, en 1983, c'est en Australie qu'est réalisée l'alimentation de la première voiture par l'énergie photovoltaïque qui réussit à parcourir une distance de 4000 km [3]

Pendant toute cette période de nouvelles technologies sont apparues, basées sur des nouveaux semi-conducteurs comme par exemple les matériaux III-V, par de nouvelles structures de cellules, comme par exemple les multi-couches ou encore par de nouveaux concepts comme celui mis en œuvre dans les cellules solaires à concentration. Néanmoins, encore actuellement, les cellules à base de silicium dominent très largement le marché du photovoltaïque solaire dans la production d'énergie électrique.

1.3 Structure des cellules PV

Comme indiqué ci-dessus, les cellules photovoltaïques utilisent divers matériaux et technologies telles que le silicium mono- ou poly- cristallin (c-Si), celles à base de tellurure de cadmium (CdTe), d'arséniure de gallium (GaAs), de diséléniure de cuivre et d'indium ($CuInSe_2$, CIS) dopé au gallium (CIGS), de sulfure de cuivre-zinc-étain (CZTS) et sélénium (CZTSSe) et d'autres [2,4].

Le diagramme de la figure 2 montre que plus de 90% des industries photovoltaïques utilisent du silicium comme matériau de base malgré une efficacité quantique des cellules à base de silicium limitées à environ 25% [5]. L'importance de la technologie silicium est dû à au fait

qu'elle est bien maîtrisée par l'industrie des semi-conducteurs et dû fait également à son abondance sur terre [6]. En effet, ce semi-conducteur présente plusieurs avantages : il est extrait à partir du sable qui est abondant à la surface du globe, il n'est pas toxique comme certains semi-conducteurs III-V, il possède un oxyde naturel (SiO_2) présentant d'excellentes propriétés diélectriques et on peut facilement le doper avec du Phosphore ou du Bore. Ainsi, le Si présente d'excellentes qualités électroniques, et il bénéficie d'une implantation importante et durable dans l'industrie de la microélectronique. Néanmoins, son seul vrai inconvénient est son faible gap (1.1 eV) qui de plus est un gap indirect qui augmente les pertes et limite son absorption au domaine spectral couvrant le visible et le proche infra-rouge. Par exemple, pour absorber 90% du spectre solaire, on a besoin de 1µm de GaAs là ou 100µm de silicium seront nécessaires.

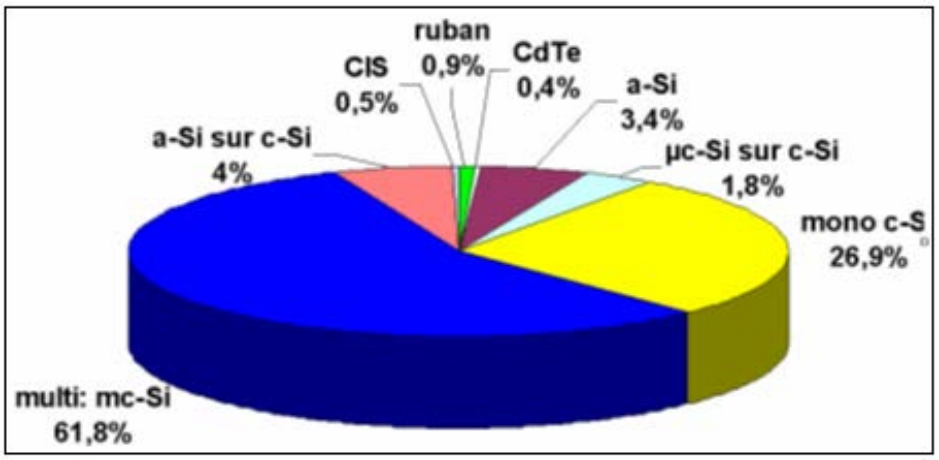


Figure 2 : Utilisation des matériaux photovoltaïques [7]

Les trois principales technologies silicium utilisées pour la réalisation des cellules photovoltaïques sont celles à base de Si monocristallin, silicium poly-cristallin et silicium amorphe [8].

Actuellement, la grande majorité des cellules solaires en silicium cristallin sont produites selon l'architecture « Passivated Emitter and Rear Cell » (PERC). Le schéma de principe de la structure des cellules photovoltaïques est représenté dans la figure 3 :

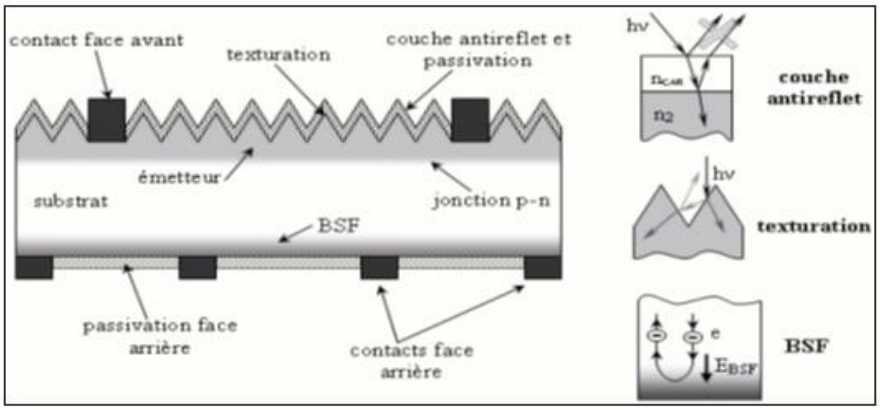


Figure 3 : Structure d'une cellule photovoltaïque [9]

On trouvera dans ces cellules, de la face avant à la face arrière :

- Pâte en argent sérigraphie pour former les contacts
- Couche avant passivée et dotée d'un traitement antireflet
- Wafer dopé avec du Bore (type P) pour former la jonction P-N
- Surface arrière – aluminium Back Surface Field (Al-BSF)
- Une couche arrière également passivée
- Pâte d'aluminium sérigraphie

La Passivation des faces avant et arrière a pour rôle d'améliorer les qualités électroniques de la surface et du volume du matériau en neutralisant les effets de ses défauts électriquement actifs. La couche antireflet (CAR) est utilisée pour minimiser la réflexion de la lumière [10]. La texturation de la surface à base du silicium est utilisée pour diminuer la réflectivité directe de la surface de la cellule. En effet, la texturisation provoque des réflexions multiples à la surface de la cellule et augmente le trajet parcouru par le faisceau optique avant de ressortir de la cellule en le déviant la couche dite « Back Surface Field (BSF) » crée une barrière de potentiel sur la face arrière de la cellule (jonction PN) limitant les recombinaisons sur cette face [10]. Les contacts face avant et arrière à l'émetteur et du substrat servent à collecter le courant de porteurs photo-générés.

1.4 Comparaison des trois principales technologies à base Si

Comme précédemment signalé, plusieurs matériaux semi-conducteurs, tels que le silicium cristallin, le silicium amorphe, l'arséniure de gallium et les ardoises de sulfure, sont utilisés dans la production de cellules solaires photovoltaïques [11-14] et de ces matériaux, le

silicium est le plus dominant dans la fabrication des modules PV. Je rappelle les trois technologies de cellule à base de silicium : monocristalline, poly-cristalline et amorphe.

1. Le silicium monocristallin : le silicium monocristallin est obtenu à partir de la silice de quartz ou de sable par transformation chimique métallurgique. Son coût de fabrication est légèrement élevé comparativement aux autres technologies silicium. Elles sont élaborées à partir de Si fondu en utilisant la technique de croissance de Czochralski dans les conditions de tirage spécifiques, permettant la formation d'un bloc monocristallin. [15] Leur durée de vie moyenne est de 30 ans. Ces cellules de couleur bleue uniforme possèdent, en standard, un bon rendement nominal de 14% à 20% pour les cellules commerciales, une densité de puissance variant entre 100 et 150 W_c/m^2 (7 m^2/k W_c). Néanmoins, le rendement de ces cellules se dégrade rapidement sous faible éclairement. Par ailleurs, ce rendement est également affecté d'une diminution importante avec l'élévation de la température.

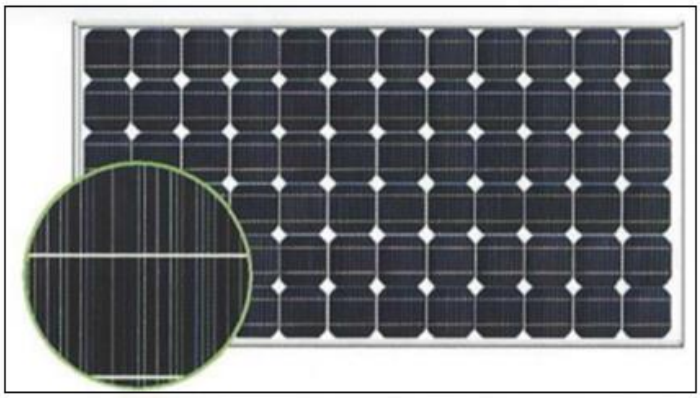


Figure 4 : Silicium monocristallin [15]

2. Le silicium poly-cristallin : Le silicium poly-cristallin est un matériau composé de nombreux cristaux de silicium monocristallin juxtaposés obtenus par moulage. Ce matériau est de ce fait moins coûteux à produire que le silicium monocristallin car permettant l'utilisation de chutes contrôlées de l'industrie électronique. Les cellules dans cette technologie possèdent la même durée de vie que les précédentes de 30 ans. [15] La couleur des cellules est bleue mais non uniforme, on distingue des motifs créés par des différents cristaux. Ces cellules présentent des rendements moins importants que celle monocristalline avec un rendement nominal de l'ordre de 11% à 15% et avec une densité de puissance de 100 W_c/m^2 (8 m^2/k W_c), un rendement faible sous un faible éclairement et une perte de rendement avec l'élévation de la température.

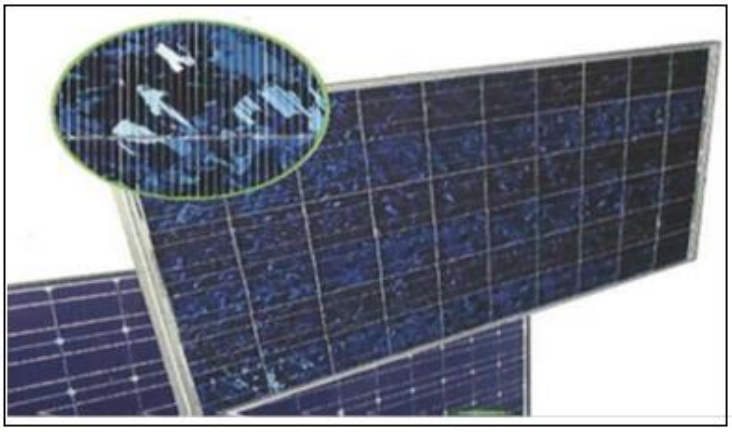


Figure 5 : Silicium poly cristallin [15]

3. Le silicium amorphe : Les cellules à base de silicium amorphe sont composées des couches très minces de silicium, déposées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide. De ce fait, cette structure est surtout utilisée, dans des panneaux souples, bien qu'elle se développe pour la réalisation de panneaux rigides actuellement.

Figure 6 : Cellule amorphe [15]

Les cellules à base de silicium amorphe sont plus chères que les autres technologies et la durée de vie moyenne est également diminuée par rapport aux deux autres technologies car égale à 20 ans. De même leur performance diminue plus fortement avec le temps et elles présentent un rendement faible variant entre 5% et 9%, avec une densité de puissance de 50

W_c/m^2 (16 m^2/k W_c). Néanmoins, cette cellule à une faible sensibilité avec l'élévation de la température. [15]

1.5 Utilisation des cellules photovoltaïques pour la production d'électricité d'origine renouvelable

L'utilisation principale des cellules photovoltaïques est la production d'électricité d'origine renouvelable. Dans ce cas, la source lumineuse est le soleil et les cellules sont alors implantées dans des modules formant le générateur photovoltaïque assurant la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Ces générateurs ont différentes topologies et intègrent des cellules de différentes technologies en fonction de leur implantation et leur destination. Nous trouvons ses générateurs dans des systèmes embarqués comme les satellites, pour des utilisations domestiques individuelles ou collectives (par exemple implantés sur des toitures) connectés ou pas au réseau ou pour la production d'électricité sur une plus large échelle avec la réalisation de centrale. Le principe de la conversion photoélectrique est vu dans le paragraphe suivant.

Le spectre du rayonnement solaire est composé de photons dont la longueur d'onde varie de l'ultraviolet, $\boldsymbol{\lambda}$ = 0.2 µm, à l'infrarouge lointain, $\boldsymbol{\lambda}$ = 2.5 µm en passant par le visible, entre $\boldsymbol{\lambda}$ = 0.4 µm pour la couleur bleue, et $\boldsymbol{\lambda}$ = 0.78 µm pour la longueur d'onde supérieure du rouge. [16]

L'énergie reçue par la terre varie en fonction de l'angle d'incidence et du temps et est largement affectée par la traversée de l'atmosphère qui absorbe une partie du spectre lumineux solaire de façon différente en fonction de la longueur d'onde due aux composants qui le composent. Pour évaluer l'intensité du rayonnement solaire reçu par la terre, la notion d'Air Mass a été introduite. Elle permet de tenir compte dans les calculs d'efficacité quantique des cellules solaire à partir du rayonnement solaire de l'angle θ formé par le soleil et la normale à la surface de la terre. La figure 7 illustre cette notion avec pour l'Air Mass, AM, l'équation :

$$AM = \frac{1}{\sin\theta} \qquad (1)$$

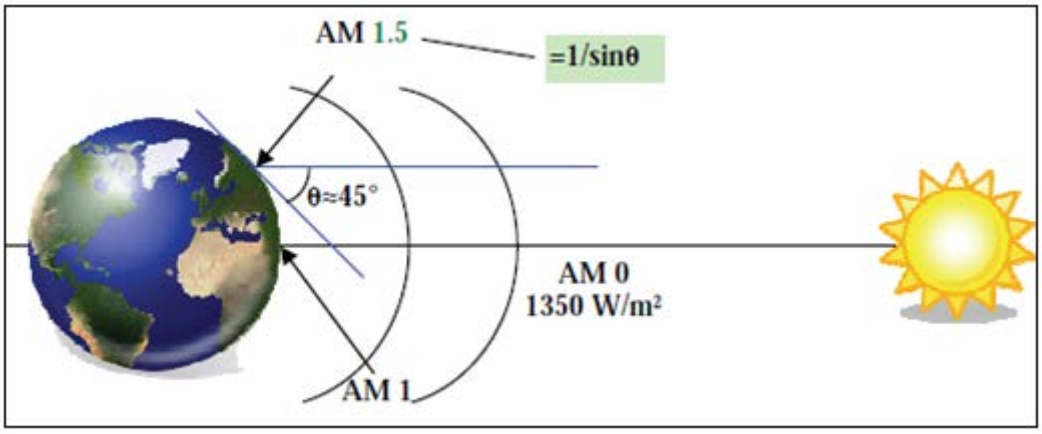


Figure 7 : Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM. [17]

Une masse d'air nulle, AM0 correspond à la constante solaire hors atmosphère directe, c'est à dire orthogonale à la surface de la terre et qui a pour valeur 1350 W/m². C'est cette valeur qui est utilisée pour caractériser l'énergie solaire reçue par les satellites. Par contre cette constante deviendra AM1 (Le chiffre 1 indique que le rayonnement a traversé une atmosphère) lorsqu'elle atteindra perpendiculairement la terre avec pour valeur 1000 W/m² du fait de l'absorption d'une partie de cette lumière par la couche d'ozone et du fait de la diffusion dans les gaz, l'eau et les poussières. [17] La masse d'air AM 1.5 dite globale (la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface) ou directe (rayonnement reçu directement du soleil) correspond au rayonnement solaire réel reçu par la terre à nos latitudes dans l'hémisphère nord avec une inclinaison de 45° par rapport à la normale. C'est en général avec ce coefficient AM 1.5 que les panneaux et installations photovoltaïques sont caractérisés et dimensionnées.

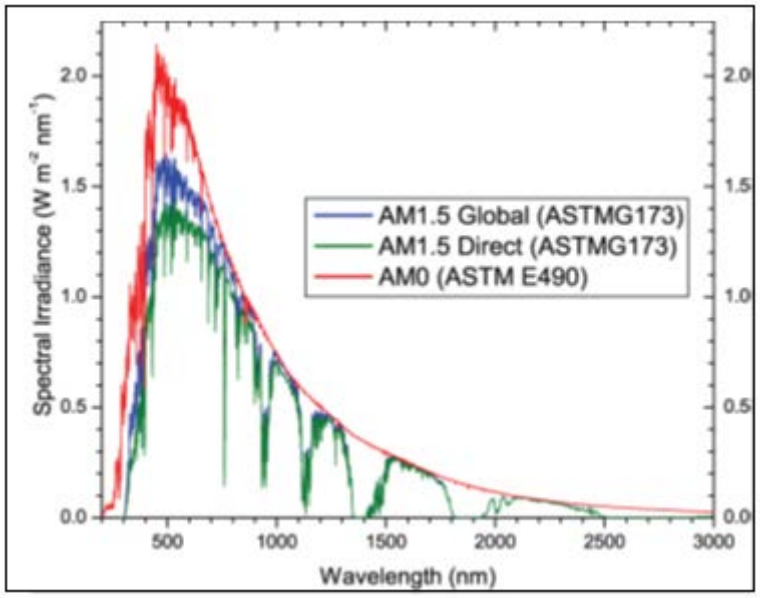


Figure 8 : Spectres Solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM. Source NREL solar spectrum. [17]

Dans la figure 8 sont représentés les spectres solaires enregistrés pour différentes valeurs d'Air Mass. Courbe rouge : AM0, courbe bleu : AM1.5 global et courbe verte : AM1.5 Direct qui en fait correspondra à l'énergie lumineuse solaire reçue sous nos latitudes. Nous observons clairement dans la courbe verte les bandes d'absorption de l'atmosphère qui absorbe le rayonnement dans certaines parties du spectre dû à ces différents éléments constitutifs. Par ailleurs, nous constatons également qu'une grande partie de l'énergie solaire se situe hors du spectre visible et particulièrement dans l'UV. Ceci explique le rendement maximum relativement faible qu'il est possible d'atteindre avec des cellules silicium dont nous avons déjà discuté précédemment et qui pour rappel n'absorbe que dans le visible et le proche infra-rouge.

1.6 La jonction PN

Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque est basé sur la jonction PN dont nous allons rappeler les principes de fonctionnement de base. La jonction PN est un dispositif semi-conducteur composé d'un cristal dont une partie a été dopée N localisant des électrons en excès et l'autre dopée P localisant des trous en excès. Les propriétés de conduction à travers la jonction vont dépendre de la concentration des porteurs de charges. Dans une jonction de

type PN classique, les dopages de type P et de type N sont faits avec des concentrations relativement proches.

Quel que soit la jonction considérée, elle peut être polarisée en directe ou en inverse. La polarisation directe, représentée dans la figure 9, correspond au cas où la tension de la borne côté région N est inférieure à celle de la région P créant ainsi une différence de potentiel négative. En conséquence, la barrière de potentiel pour les porteurs majoritaires diminue et la largeur de la ZCE (Zone de Charge d'Espace) diminue comme montré dans la figure 10. [18].

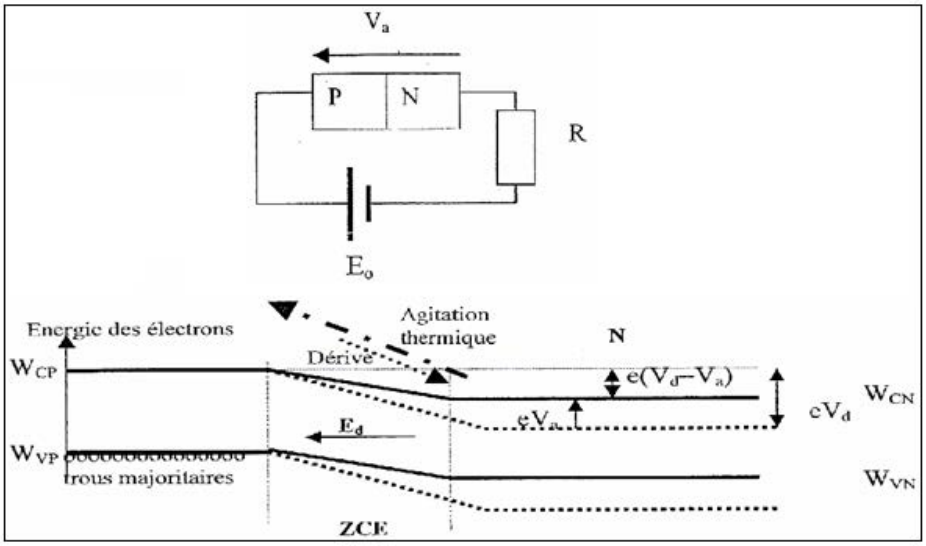


Figure 9 : Polarisation direct [18]

Dans le cas de la polarisation inverse, la région N est à un potentiel positif par rapport à la région P. La barrière de potentiel pour les porteurs majoritaires est plus haute, et empêche le passage de tous les trous majoritaires. Dans ce cas la largeur de la ZCE augmente comme indique la figure ci-dessous. [18]

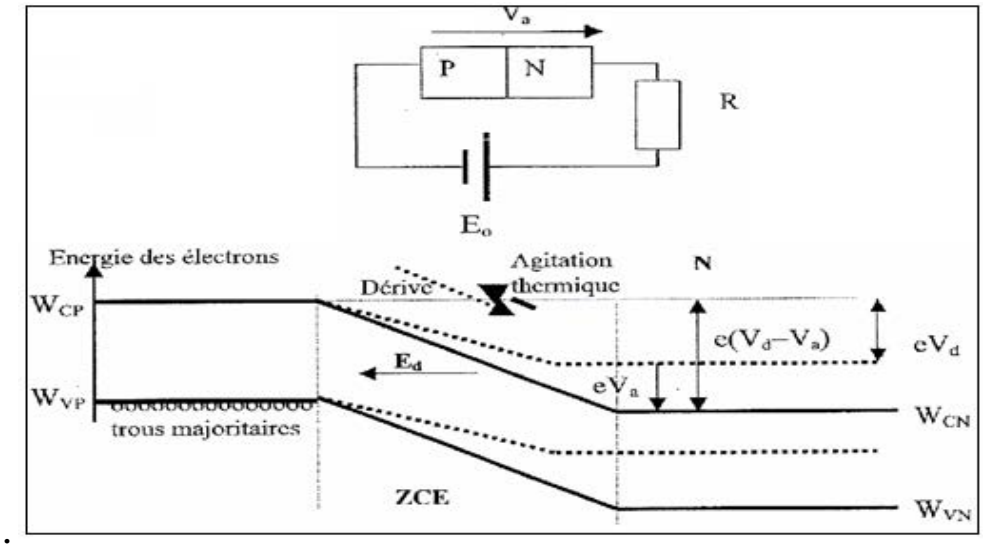


Figure 10 : Polarisation inverse [18]

La forme générale de la caractéristique I(V) d'une jonction PN est composée de quatre quadrants.

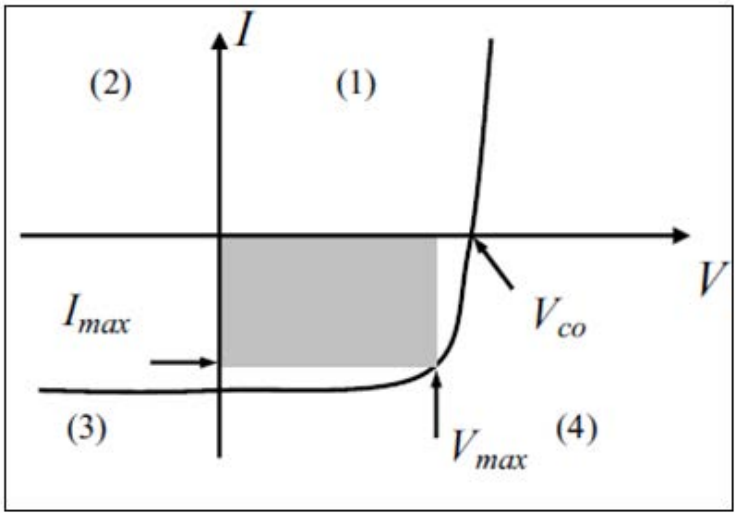


Figure 11 : Caractéristique courant-tension [19]

La description de la polarisation de la jonction dans le cas d'une cellule photovoltaïque décrite précédemment se traduit de deux manières dans la caractéristique : dans le 3ème quadrant, le système fonctionnera comme un récepteur dont la résistance, appelée photorésistance variera fortement avec l'éclairage; dans le 4ème quadrant, le système fonctionnera comme un générateur dont le courant de court-circuit est proportionnel à

l'éclairage et dont la tension à vide est celle de la diode en polarisation directe soit de 0.5 à 0.8 Volts pour les cellules silicium; c'est dans ce quadrant qu'une cellule photovoltaïque à jonction PN fonctionne pour produire de l'énergie électrique. [19]

1.7 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Dans les cellules solaires, l'effet photovoltaïque permet de transformer directement l'énergie lumineuse provenant des rayons solaires en énergie électrique. Cela correspond à une absorption de l'énergie des photons dans le matériau excitant des paires électron-trou générées au niveau de la jonction. 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. Ainsi les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes de la jonction, et font passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction. Un trou capable de se mouvoir apparait dans la bande de valence. Pour qu'un courant électrique circule, on place une charge aux bornes de la cellule, ce qui permet aux électrons de la zone n de rejoindre les trous de la zone p via la connexion extérieure. [20]

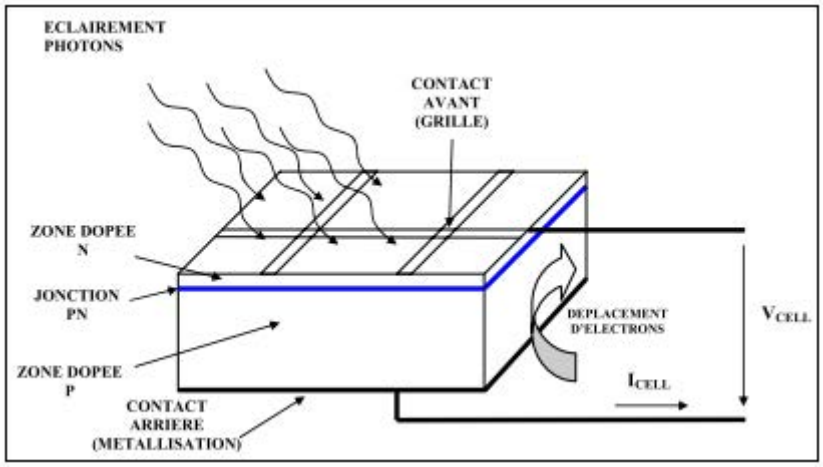


Figure 12 : Description de fonctionnement d'une cellule PV [20]

Le cadrant 4 de la caractéristique I(V) de la jonction PN correspondant au fonctionnement de la cellule photovoltaïque en production est considéré comme la caractéristique directe (nommée en général caractéristique sans plus de précision) de la cellule photovoltaïque. Nous le représentons dans la figure 13, comme exemple en prenant un éclairement de 1000 W/m²

et à une température de 25°C pour une cellule silicium de taille usuelle 10 x10 cm^2. Cette caractéristique est divisée en trois zones :

- La zone (I) : dans cette zone, quelle que soit la tension, le courant reste constant et le générateur photovoltaïque joue le rôle d'un générateur de courant.

- La zone (II) : c'est la zone intermédiaire dans laquelle le courant et la tension varient fortement, comprend le point optimal appelé point de puissance maximum (MPP). Pour un meilleur rendement d'une installation photovoltaïque, il est bien évidemment préférable que le générateur photovoltaïque fonctionne dans cette zone, au MPP.

- La zone (III) : dans cette zone, quel que soit le courant, la tension ne varie que très peu. Dans cet intervalle, le générateur photovoltaïque joue le rôle d'un générateur de tension [21].

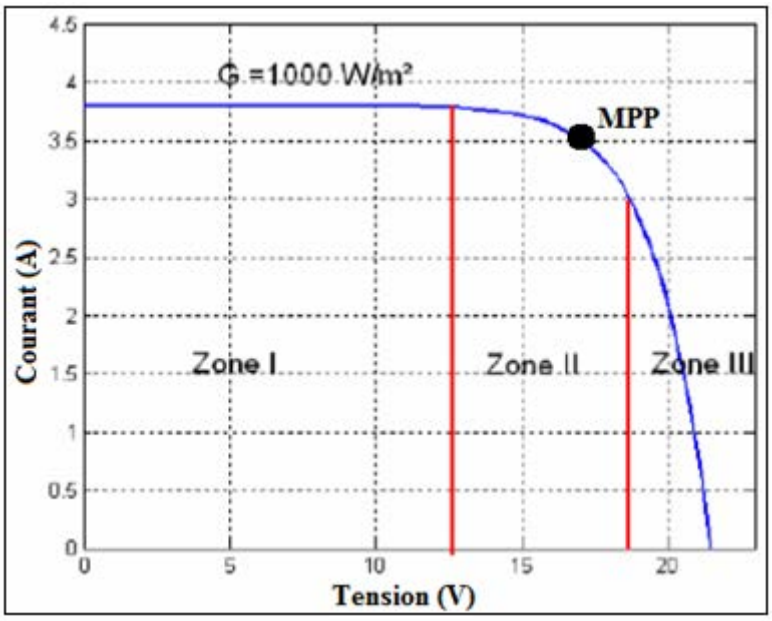


Figure 13 : Les différentes zones de la caractéristique I (V) [21]

Dans la figure ci-dessous, on représente la réponse d'une cellule PV soumise à une tension variable dans deux conditions différentes : dans l'obscurité, et sous éclairement.

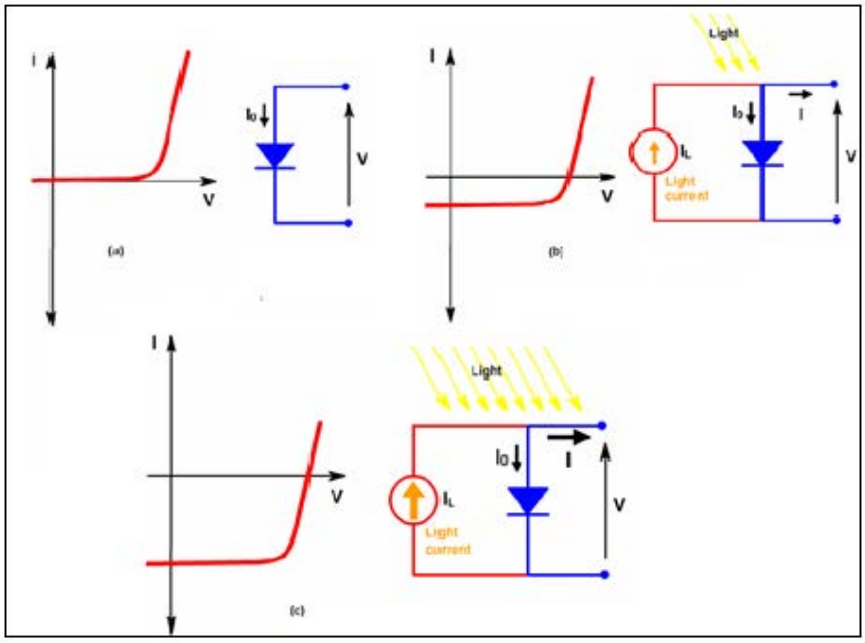


Figure 14 : Caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque (a) dans l'obscurité ; (b) avec un éclairement peu intense ; (c) avec un éclairement fort. [22]

La figure (14.a) représente la cellule soumise à une tension V dans l'obscurité. Les caractéristiques électriques sont les mêmes que celles d'une diode et le courant traversant la structure PN est appelé courant d'obscurité. Ce courant, noté I_{obs} est défini d'après la relation :

$$I_{obs} = I_s\left(exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1\right) \qquad (2)$$

Avec V la tension de polarisation aux bornes de la jonction, q la charge élémentaire ($q=1.6x10^{-19}$), T la température en Kelvin, K la constante de Boltzmann ($K=1.38x10^{-23}J.K^{-1}$), I_S le courant de saturation de la jonction en inverse et n le facteur d'idéalité de la jonction.
Sous éclairement, les porteurs minoritaires vont créer un photo-courant noté I_{ph} et qui résulte de la polarisation du composant. Le courant résultant généré, noté I s'écrit alors :

$$I = I_{ph} - I_{obs} \qquad (3)$$

La figure 14.b illustre la réponse d'une cellule PV soumise à un faible éclairement. La caractéristique I(V) montre un courant négatif pour des tensions inférieures à la tension de seuil. Cette valeur négative est expliquée par l'équation 3 qui montre dans ce cas la création d'un photo-courant. Finalement, la figure 14.c montre qu'en augmentant l'intensité lumineuse, l'intensité devient de plus en plus négative indiquant ainsi que la valeur du photo-courant augmente. La structure PV joue alors le rôle d'un générateur de courant.

1.8 Paramètres physiques et fonctionnels d'une cellule PV

La caractéristique courant-tension, permet de définir les paramètres d'une cellule solaire en se basant sur les valeurs de l'intensité maximale (I_{max}), de la tension maximale (V_{max}), c'est-à-dire de la puissance maximale (P_{max}) au point de puissance maximum, ainsi que de la tension à circuit ouvert (V_{cc}) et du courant de court-circuit (I_{cc}). [23]

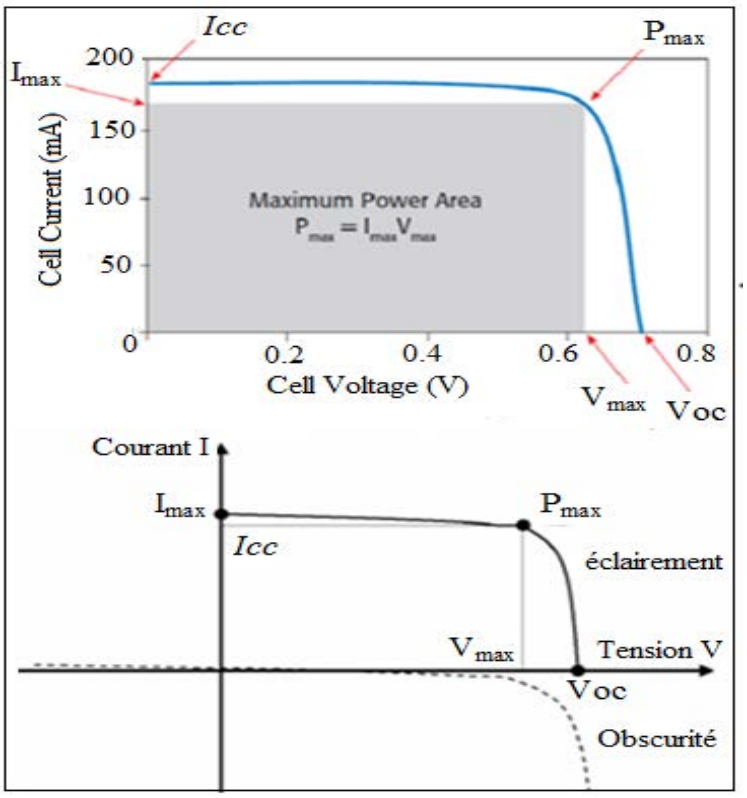


Figure 15 : Caractéristique courant-tension d'une cellule PV sous obscurité et sous éclairement [23]

Nous allons présenter maintenant dans ce qui suit ces différents paramètres. Ces derniers influent sur les caractéristiques I(V) des modules solaires, et dépend de la température et de l'éclairement. Cette influence est détaillée dans la partie suivante.

1. *Le facteur de forme (fill factor, FF)*

Le facteur de forme est le rapport entre la puissance maximale notée P_{max} (I_{max},V_{max}) et le produit Voc x Icc. La puissance maximale, correspond à la puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairement. Elle dépend de la résistance de charge. Ce point P_{max} correspond à l'aire du rectangle défini par les axes Ox, Oy et les droites x = I_{max} et y= V_{max} passe par un maximum. [23] Le facteur de forme s'écrit donc : [24]

$$ff = \frac{P_{max}}{V_{oc} \times I_{cc}} = \frac{V_m \times I_m}{V_{oc} \times I_{cc}} \qquad (4)$$

Où la puissance maximale est égale à :

$$P_{max} = V_m \times I_m \qquad (5)$$

2. *Le rendement de conversion (η) et le rendement quantique externe*

Le rendement de conversion en puissance, η des cellules PV correspond au rapport entre la puissance maximale et la puissance lumineuse incidente P_{in}.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{ff \times V_{oc} \times I_{cc}}{P_{in}} \qquad (6)$$

Ce rendement de conversion en puissance n'a de signification que pour une distribution spectrale et une intensité donnée.

La densité de puissance incidente est présentée par : $\frac{P_{in}}{A}$

Pour améliorer ce rendement il faudra donc augmenter le facteur de forme, et/ou la tension à circuit ouvert et/ou le courant de court-circuit. [23]

- Le rendement nous permet de définir un nouveau paramètre qui est le rendement quantique externe (EQE). C'est le rapport entre le nombre d'électrons dans le circuit externe sur le nombre de photons incidents. Il est donné par la formule :

$$EQE = \frac{Jcc}{e.Pin} X \frac{hc}{\lambda} \qquad (7)$$

3. *La résistance série et la résistance shunt*

La résistance série est la résistance interne de la cellule. Elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles. La résistance série est donnée par [25] :

$$R_S = \frac{V_{co}-V}{I} \qquad (8)$$

La résistance shunt est une résistance qui prend compte des fuites de courant qui interviennent entre les bornes opposées d'une photopile. [26]. La résistance de shunt est donnée par [27] :

$$R_{Sh} = \frac{V}{I_{SC}-I} \qquad (9)$$

Comme ces deux résistances agissent sur la pente de la caractéristique alors les valeurs du courant et de la tension maximale varient et donc influent directement sur les rendements de la cellule. Comme pour une grande part leurs valeurs sont liées à la structure et à la technologie de la cellule, nous entrevoyons ici l'importance d'utiliser des cellules avec de grandes qualités matériaux (les matériaux qui peuvent supporter la haute température et l'éclairement) et de fabrication et qui de plus pourront assurer une plus grande longévité à l'installation comme notre étude le montrera à travers les résultats présentés dans ce manuscrit.

4. *Le courant de court-circuit Icc (Isc)*

Le courant de court-circuit (Icc) est le courant le plus intense que l'on puisse obtenir à partir d'une cellule solaire. Sa valeur augmente avec l'augmentation de l'intensité lumineuse qui éclaire la cellule PV et dépend de la mobilité des porteurs, de la température, de la surface éclairée et de la longueur d'onde du rayonnement incident. Icc est la valeur du courant pour laquelle la tension V=0. [28]

5. *La tension à circuit-ouvert (Voc) :*

C'est la tension (Voc) pour laquelle le courant est nul. Elle dépend du type de cellule solaire, des matériaux de la couche active et de l'éclairement de la cellule. [29, 30]

6. *Le facteur d'idéalité(A)*

Le facteur d'idéalité peut être estimé directement à partir du calcul des pentes des caractéristiques I(V) dans les régions I et III en l'absence des effets de la résistance série et shunt. [31]

1.9 Modèles électriques du fonctionnement d'une cellule

Différents modèles physiques, en plus de modèles purement mathématiques, décrivent le fonctionnement d'une cellule. Je présente dans la suite de ce chapitre les principaux modèles utilisés. Ces modèles se regroupent dans deux familles, les modèles à une diode, pour les trois premiers présentés et les modèles à deux diodes pour les trois suivants.

1. *Equation générale du courant dans le module photovoltaïque*

L'équation générale des courants dans une cellule ou un module photovoltaïque s'écrit :

$$I = I_{ph} - I_{01} - I_{02} - I_{Rsh} \qquad (10)$$

Avec I_{ph}, le courant photovoltaïque induit par l'éclairement, I_{01}, courant de diffusion des porteurs et I_{02}, le coursant de recombinaison des porteurs. Cette équation des courants n'est valable que si la tension inverse reste inférieure à une valeur limite, la tension de claquage. Au-delà, la forte intensité du champ électrique interne sépare des paires électrons-trous. Les électrons ainsi libérés sont accélérés et vont créer de nouvelles ionisations par choc : il y a effet d'avalanche et le courant inverse croît extrêmement vite. La jonction est en général détruite par effet thermique.

2. *Le modèle à trois paramètres (modèle-3P) :*

Dans ce modèle, il est considéré que la résistance série est nulle.

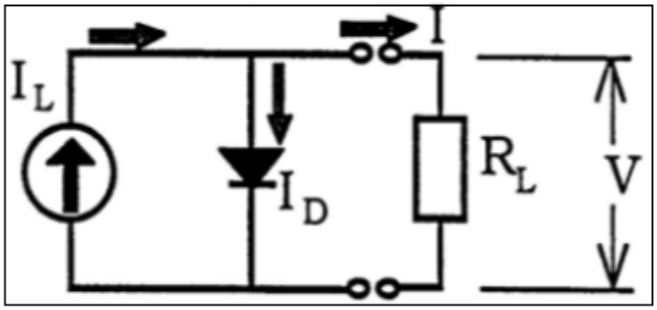


Figure 16 : Modèle à 3 paramètres [31]

Les paramètres sont :

I_L = courant photovoltaïque.

I_D = courant de diffusion.

$\gamma = A \times (NCS)$, le facteur de qualité de la diode.

A = le facteur d'accomplissement de la diode.

NCS = Nombre des cellules en série.

Les relations courant-tension de ce circuit sont [31] :

$$I = I_L - I_D \qquad (11)$$

$$I_D = I_0 \left(exp\left(\frac{qV}{\gamma k\, T_C}\right) - 1 \right) \qquad (12)$$

Si on remplace (13) dans (12) on obtient [38] :

$$I = \left[I_L - I_0 \left(exp\left(\frac{qV}{\gamma k\, T_C}\right) - 1 \right) \right] \qquad (13)$$

Dans ce modèle simple, les résistances shunt et série sont négligées et nous pouvons considérer ce circuit équivalent comme le circuit idéal d'une cellule photovoltaïque.

3. *Le modèle à quatre paramètres (modèle-4P) :*

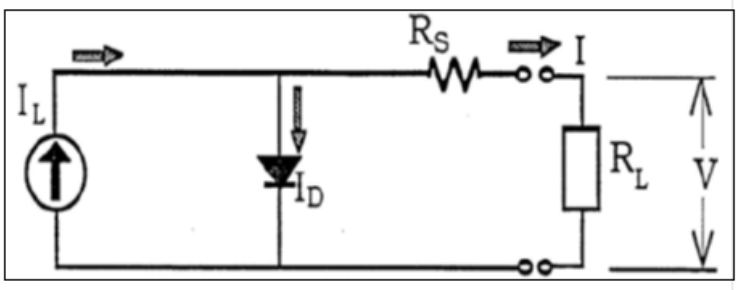


Figure 17 : Modèle a 4 paramètres [31]

Les différentes équations 11-13, décrivant ce modèle sont détaillées précédemment avec une chute de tension supplémentaire apparaissant aux bornes de Rs [31].

4. *Le modèle à cinq paramètres (modèle-5P) :*

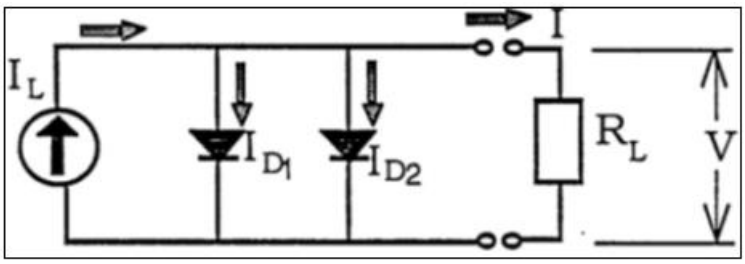


Figure 18 : Modèle à 5 paramètres [31]

Avec comme paramètre supplémentaires :

I_{01} = courant de saturation de la première diode due à la diffusion.

I_{02} = courant inverse de saturation due aux recombinaisons.

γ_1 = A1 × (NCS), le facteur de qualité de la diode 1.

γ_2 = A2 × (NCS), le facteur de qualité de la diode 2.

A1 et A2 : sont les facteurs d'accomplissement des diodes 1 et 2.

NCS = Nombre des cellules en série.

L'équation générale de ce modèle est [31] :

$$I = I_L - I_{D1} - I_{D2} \qquad (14)$$

$$I_{D1} = I_{01}\left(exp\left(\frac{qV}{\gamma_1 k\, T_C}\right) - 1\right) \qquad (15)$$

$$I_{D2} = I_{02}\left(exp\left(\frac{qV}{\gamma_2 k\, T_C}\right) - 1\right) \qquad (16)$$

Remplaçant (15) et (16) dans (14) nous obtenons [31] :

$$I = \left[I_L - I_{01}\left(exp\left(\frac{qV}{\gamma_1 k\, T_C}\right) - 1\right) - I_{02}\left(exp\left(\frac{qV}{\gamma_2 k\, T_C}\right) - 1\right)\right] \qquad (17)$$

5. *Le modèle à six paramètres (modèle-6P)* :

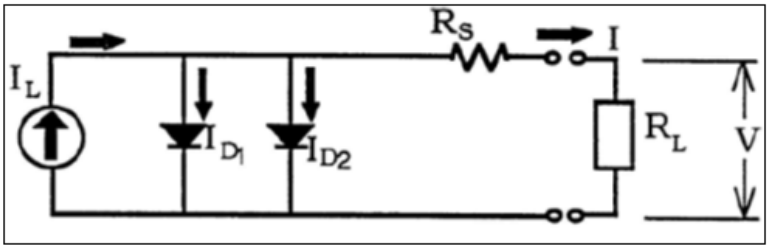


Figure 19 : Modèle a six paramètres [31]

Ce modèle intègre par rapport au précédent la résistance série, R_s. Les relations courant-tension précédentes peuvent alors se réécrire de la façon suivante pour ce circuit [31] :

$$I = I_L - I_{D1} - I_{D2} \quad (18)$$

$$I_{D1} = I_{01}\left(exp\left(\frac{q}{\gamma_1 k\, T_C} \times (V + IR_S)\right) - 1\right) \quad (19)$$

$$I_{D2} = I_{02}\left(exp\left(\frac{q}{\gamma_2 k\, T_C} \times (V + IR_S)\right) - 1\right) \quad (20)$$

Substituant (19) et (20) dans (18) nous obtenons [31] :

$$I = \left[I_L - I_{01}\left(exp\left(\frac{q(V+IR_S)}{\gamma_1 k\, T_C}\right) - 1\right) - I_{02}\left(exp\left(\frac{q(V+IR_S)}{\gamma_2 k\, T_C}\right) - 1\right)\right] \quad (21)$$

6. Le modèle à sept paramètres (modèle-7P) :

Pour la première fois dans ce modèle, la résistance shunt, R_{sh}, qui est fortement liée aux taux d'impuretés proches ou dans la jonction du fait que la jonction PN n'est pas idéale, est introduite.

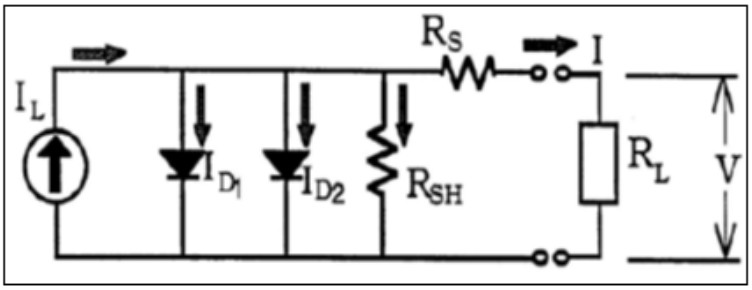


Figure 20 : Modèle à 7 paramètres [31]

Dans ce modèle, l'équation de la caractéristique courant-tension I (V) de ce circuit est [31] :

$$I = I_L - I_{D1} - I_{D2} - \frac{(V+IR_S)}{R_{SH}} \quad (22)$$

$$I_{D1} = I_{01}\left(exp\left(\frac{q}{\gamma_1 k\, T_C} \times (V + IR_S)\right) - 1\right) \quad (23)$$

$$I_{D2} = I_{02}\left(exp\left(\frac{q}{\gamma_2 k\, T_C} \times (V + IR_S)\right) - 1\right) \quad (24)$$

En remplaçant (23) et (24) dans (22) nous obtenons :

$$I = \left[I_L - I_{01}\left(exp\left(\frac{q(V+IR_S)}{\gamma_1 k\, T_C}\right) - 1\right) - I_{02}\left(exp\left(\frac{q(V+IR_S)}{\gamma_2 k\, T_C}\right) - 1\right) - \frac{V}{R_{SH}}\right] \times \left[\frac{R_{SH}}{R_S + R_{SH}}\right] \qquad (25)$$

7. Choix du modèle :

Pour savoir choisir le modèle convenable, nous obtenons une série des comparaisons suivantes :

La résistance shunt dans les modèles (7P), n'influe pas sur la caractéristique courant-tension I(V) au niveau des éclairements faibles et à des hautes températures.

Les modèles électriques qui incluent la résistance série (4P et 6P) sont de meilleurs modèles représentants des caractéristiques courant-tension I(V), pour des niveaux d'éclairement grandes, tandis que les modèles (3P et 5P) négligent cette résistance.

Les courbes courant-tension I(V) globales, obtenues par les modèles 4P et 6P sont plus précises. [31] Finalement, le modèle à deux diodes étant le plus complet, il permet une analyse plus précise des effets, même de faible amplitude, des stress électrique et thermique et des variations de paramètres environnementaux sur les caractéristiques et les paramètres de modules photovoltaïques. De ce fait, c'est ce modèle décrit avec ces sept paramètres par l'équation 25 que nous utiliserons afin d'analyser nos résultats dans ce travail.

1.10 Influence des paramètres internes des cellules sur leur fonctionnement

Dans une approche globale, les paramètres externes des modules photovoltaïques comme par exemple, l'ombrage, les variations de température et d'éclairement vont entraîner des stress électriques et thermiques, tels que ceux étudiés dans cette thèse, entrainant des variations des paramètres fonctionnels électriques intrinsèques des modules. Les principaux paramètres concernés sont les résistances shunt et série et les facteurs d'idéalité, γ_1 et γ_2 représentant les contributions des différents courants de diffusion et de recombinaison.

Le facteur d'idéalité de la diode de recombinaison varie beaucoup d'une cellule à une autre, ce qui témoigne d'une fréquence de recombinaison plus ou moins grande suivant le matériau et sa qualité. Comme vu ci-dessus, le modèle à une diode ne fait pas la distinction entre la diffusion et la recombinaison et inclut les deux dans une même diode.

Les résistances R_s et R_{sh} tiennent compte des phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule :

- La résistance série, R_s correspond principalement à la résistance en volume du semi-conducteur, aux contacts métalliques et interconnections, au transport des porteurs à travers la couche diffusante, aux résistances de contact avec les contacts métalliques des électrodes. Elle agit de manière peu prononcée sur le courant de court-circuit et peut être déterminée à partir de la courbe I(V) en calculant la dérivée de celle-ci aux alentours de V_{oc}. Plus R_s est faible et meilleure est la cellule et moins il y a de pertes résistives à l'interface entre le métal et le semi-conducteur ou à la surface du semi-conducteur. Plus R_s est petit, meilleur est le facteur de forme et plus le module est performant.

- La résistance parallèle, R_{sh} est due aux impuretés proches de la jonction et au fait que la jonction PN dans un module cristallin ne soit pas idéale induisant des courants de fuite dans la jonction. Elle peut être déterminée à partir de la courbe I(V) en calculant la dérivée de celle-ci aux alentours d'I_{sc}. Elle agit de manière peu prononcée sur V_{oc}. Plus R_{sh} est grande. Plus R_{sh} est grande, moins il y a de courants de fuite, meilleur est le facteur de forme et plus le module est performant.

La connaissance des valeurs de ces résistances parasites est importante dans l'étude de la qualité du matériau et la recherche de l'amélioration du rendement d'une cellule car ces résistances sont directement liées à la performance du module comme nous le verrons dans les paragraphes suivants. Ces performances sont qualifiées par le facteur de forme qui correspond au rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule et la puissance formée par le rectangle I_{sc} x V_{oc}. Plus le facteur de forme se rapproche de 1 et plus le module est performant. Malheureusement, la cellule PV en condition d'utilisation ne peut pas être considérée comme une diode idéale avec la présence des résistances parasites R_s et R_{sh} influençant la puissance délivrée par la cellule.

Les paramètres de ces circuits équivalents sont calculés expérimentalement à l'aide de la caractéristique courant-tension, de la cellule dans l'obscurité. La caractéristique I(V) modélisée par l'équation du modèle à deux diodes, par exemple, étant non linéaire, des programmes sont utilisés pour ajuster au mieux les paramètres afin que les courbes modélisées correspondent aux valeurs expérimentales. Dès lors que l'on a connaissance de ces paramètres, il est possible de reproduire, à l'aide du circuit équivalent, le comportement d'une cellule cristalline sous n'importe quel éclairement. Il suffit alors de superposer la source

lumineuse ($I_L = I_{ph}$ dans les modèles présentés ci-dessus) aux caractéristiques des diodes à l'obscurité.

1.10.1 Influence des capacités de la cellule

Enfin, comme nous le verrons dans la suite de notre étude, la caractéristique I(V) présente une certaine distorsion qui l'éloigne de la réponse idéale du modèle à deux diodes. Cette distorsion est due à la présence de capacitives dans la jonction qui elles aussi sont liées à la présence de défauts dans la structure. Ainsi, la capacité des modules dépendra de leur technologie et de l'éclairement. Elle varie beaucoup avec la capacité de diffusion qui est corrélée à la durée de vie des porteurs minoritaires. La capacité d'une cellule PV provient de trois contributions :

- La capacité de jonction qui représente la charge dans la zone de déplétion de la jonction ;

- La capacité de diffusion qui correspond à la charge des porteurs minoritaires dans les régions dépourvues de champ de la jonction ;

- La capacité de transition des charges qui peut être attribuée à l'existence de défauts.

Les deux dernières capacités varient de façon exponentielle avec la tension. La capacité de diffusion est la principale responsable de la distorsion de la courbe I(V). Cette dernière apparaît sous polarisation directe et est associée à la diffusion des porteurs majoritaires d'une zone (exemple : n pour les électrons) où ils sont majoritaires vers une zone où ils sont minoritaires (exemple : p pour les électrons) dans laquelle ils s'accumulent. Considérons, par exemple, la diffusion des électrons de la région n vers la région p. Après avoir franchi la zone de déplétion, les électrons s'accumulent dans la région p où ils sont minoritaires. Ils constituent alors une charge excédentaire, qui est distribuée sur plusieurs dizaines de microns et qui persiste jusqu'à ce que les électrons injectés subissent des recombinaisons avec les trous. Parallèlement, les trous ayant diffusé dans la région n constituent une charge excédentaire positive tant qu'ils ne subissent pas de recombinaison. La capacité de diffusion est une mesure de la variation de ces charges accumulées de part et d'autre de la jonction lorsque la tension directe varie.

Pour notre étude préliminaire des paramètres d'un panneau photovoltaïque, avec le module BP MSX62 pris comme exemple, nous avons utilisé le modèle à quatre paramètres (4P) car c'est un modèle simple qu'il est possible d'utiliser à des fortes luminosités et qui prend en compte les résistances shunt et série [31]. Par contre, ce modèle ne sera pas assez précis pour considérer l'influence des défauts induits par les stress électrique ou thermique des modules photovoltaïques que nous avons étudiés dans ce travail de thèse.

1.10.2 Influence de la résistance parallèle R_{sh}

La figure 21 représente les caractéristiques I(V) et P(V) pour une température et un éclairage fixe mais une résistance shunt variable.

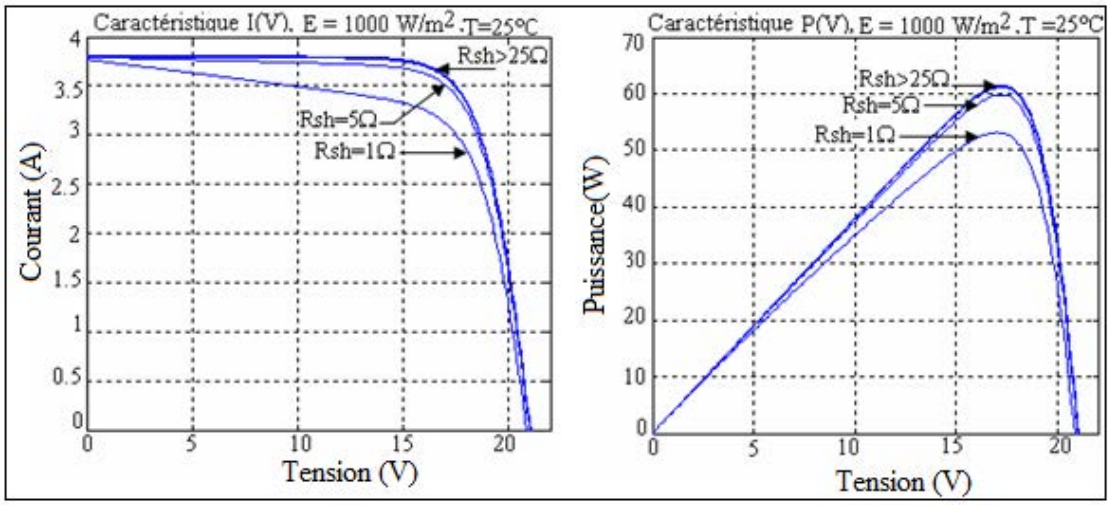


Figure 21 : Influence de la résistance shunt Rsh sur la caractéristique I(V) et P(V) [32]

Cette variation augmente de la valeur du point de fonctionnement sur la caractéristique I(V) avec un faible décalage positif dans la zone I où le module fonctionne comme une source de courant.

1.10.3 Influence de la résistance série

La figure 22 représente la variation des caractéristiques I(V) et P(V) dans le module (BP MSX62) pour une température et un éclairage fixe mais une résistance série variable.

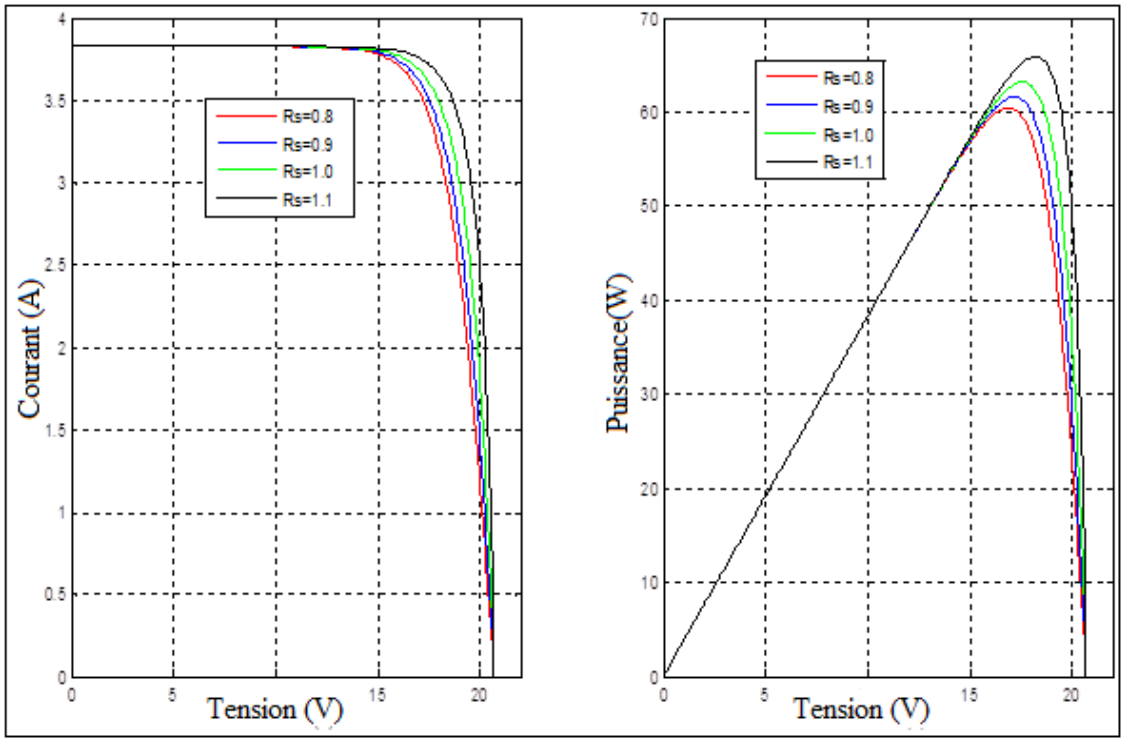


Figure 22 : Influence de la résistance série R_s sur les caractéristiques I(V) et P(V) [31]

Cette variation entraine une augmentation de la valeur du point de fonctionnement sur la caractéristique I(V) correspondant au point de puissance maximum avec un faible décalage positif dans la zone III où le module fonctionne alors comme une source de tension. [33,34]

1.10.4 Influence du facteur d'idéalité (A)

Comme le montre la figure 23, la courbure et la position des caractéristiques I(V) et P(V) au point de puissance maximum sont liés au facteur d'idéalité. Ce facteur est toujours supérieur à 1 et augmente lorsque le point de puissance maximum diminue. [31]

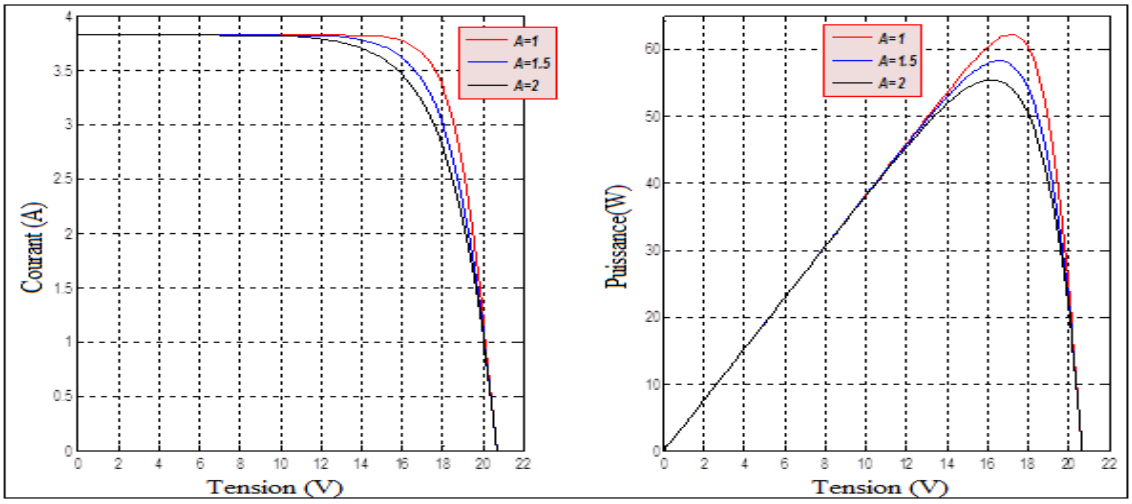


Figure 23 : Influence du facteur de d'idéalité (A) sur les caractéristiques I(V) et P(V) [32]

1.11 Influence des paramètres extérieurs sur le fonctionnement des cellules photovoltaïques

La figure 24 représente les caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque pour une intensité d'éclairement croissante et une température constante.

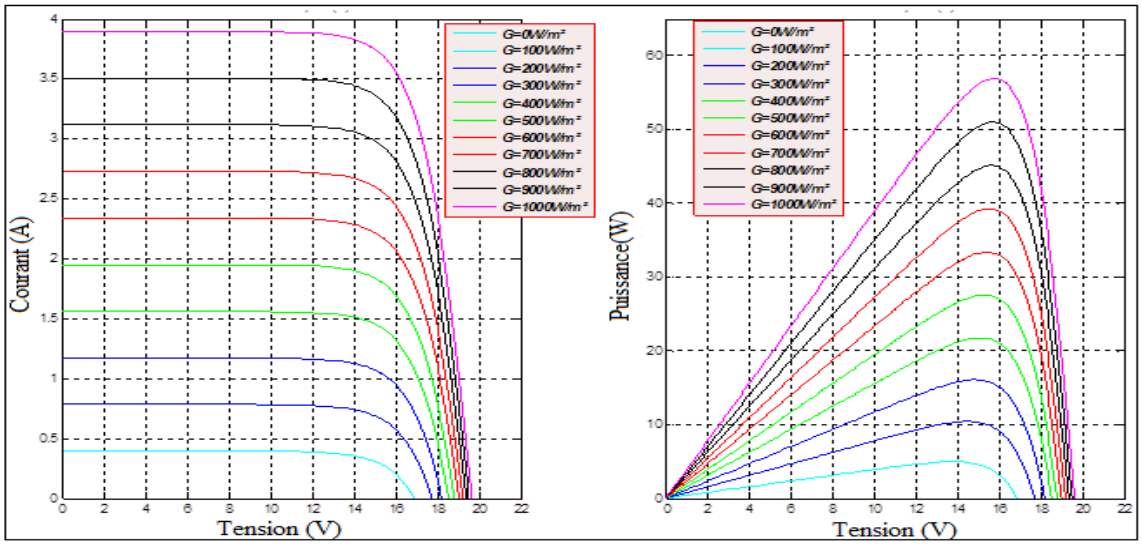


Figure 24 : Effet de l'éclairement sur les caractéristiques I(V) et P(V) d'un module [32]

Comme nous le voyons dans ces figures, une augmentation de l'intensité d'éclairement fait croitre directement le courant généré par la cellule. Lorsque la tension entre ses bornes est inférieure à la tension de seuil, la cellule fonctionne alors comme un générateur de courant. Ainsi, en augmentant l'éclairement, le courant de court-circuit I_{cc} augmente, ce qui permet

aux modules de produire une puissance électrique plus importante ce qui est montré par l'augmentation du point de puissance maximum comme montré avec les caractéristiques de la figure 24. [35]

Les propriétés électriques d'un semi-conducteur constituant les cellules photovoltaïques et les cellules elles-mêmes sont très sensibles à la température qui est un paramètre important dans la description du comportement des cellules. [36] Les caractéristiques I(V) et P(V) d'un module PV soumis à une température croissante et pour un éclairement fixe sont représentées dans la figure 25.

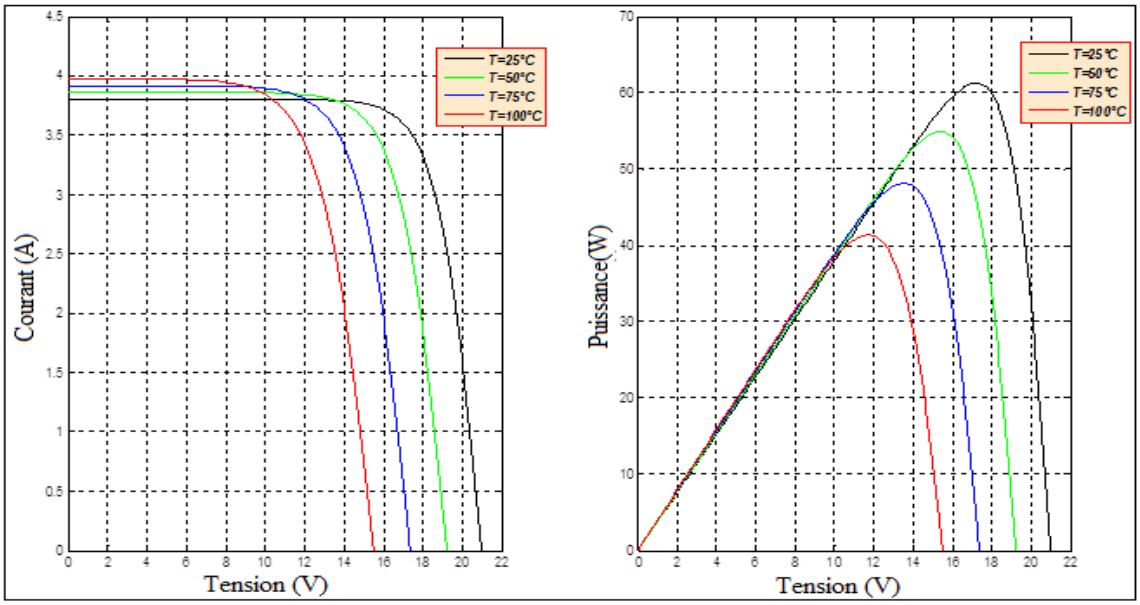


Figure 25 : Influence de la température sur les caractéristiques I(V) et P(V) [31]

L'augmentation de la température diminue la tension de circuit ouvert V_{oc} et n'affecte que très peu la valeur du courant de court-circuit I_{cc} ce qui induit une diminution de P_{max} et donc du rendement de la cellule. En effet, le gap optique diminue avec la haute température [37].

1.12 Association des cellules dans un module photovoltaïque

Afin d'augmenter soit la tension soit le courant, les cellules photovoltaïques vont être placées dans un panneau, voire une installation en série pour une augmentation de la tension, soit en parallèle pour une augmentation du courant soit, comme le plus souvent dans une association série-parallèle.

1.12.1 Association en série

Dans une association en série les cellules sont branchées les unes à la suite des autres et sont traversées par le même courant. La tension entre les bornes de l'ensemble est obtenue en ajoutant la tension des n_s cellules identiques parcourues par un même courant donné. [38] la figure 26 représente ce type de branchement et la caractéristique résultante obtenue.

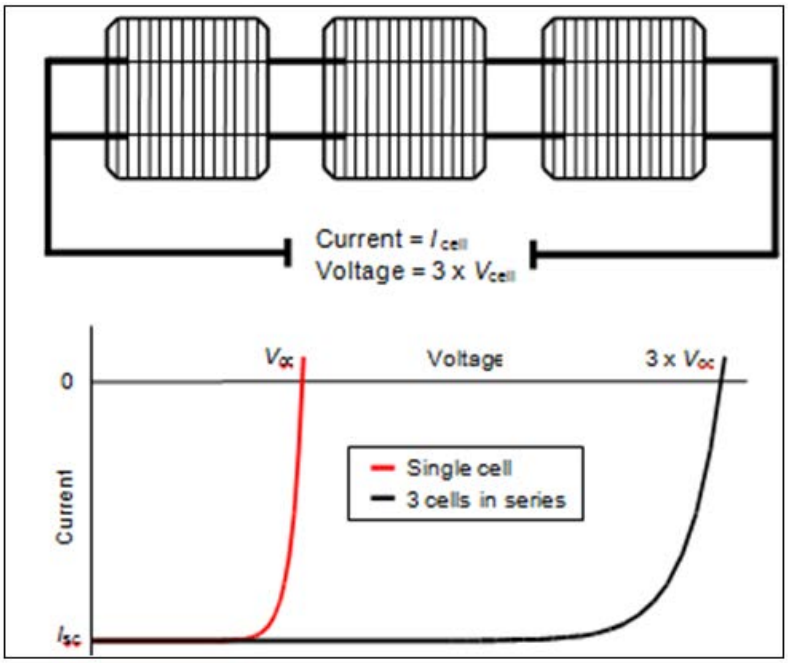


Figure 26 : Connexion en série de cellules, avec résultant caractéristique I(V). [38]

Nous constatons clairement dans la caractéristique I(V) représentée figure 26 que la tension V_{oc} du module composé de trois cellules en série a bien été multiplié par 3.

1.12.2 Association en parallèle

Dans une association en parallèle les cellules sont branchées en parallèle et sont soumises à la même tension. Le courant fournit à l'ensemble est la somme des courants traversant les n_p cellules identiques branchées en parallèle. [38] La figure 27 représente ce type de branchement et la caractéristique résultante.

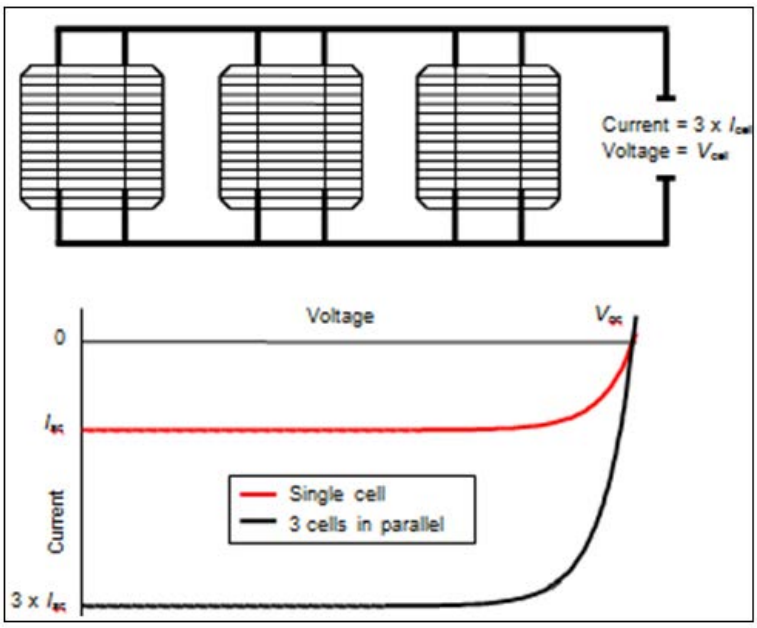


Figure 27 : Connexion en parallèle de cellules, avec résultant caractéristique I(V) [38]

Dans ce montage de 3 cellules en parallèle, la tension du module est restée constante correspondante à V_{oc} d'une cellule individuelle mais que le courant I_{cc} a bien été multiplié par 3.

1.12.3 Association hybride (en série et en parallèle)

L'association série/parallèle est utilisée dans de nombreux modules photovoltaïques regroupés par panneaux comme indique la figure 28 afin d'adapter les valeurs de courant traversant les cellules montées en série et les tensions choisies en général pour atteindre les tensions nominales optimales d'entrée des convertisseurs ou onduleurs placés en sortie du champ de panneaux. Les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à vide totale sont alors données par les relations [38] :

$$Igcc = np.Icc \qquad (26)$$

$$V_{gco} = n_s.V_{co} \qquad (27)$$

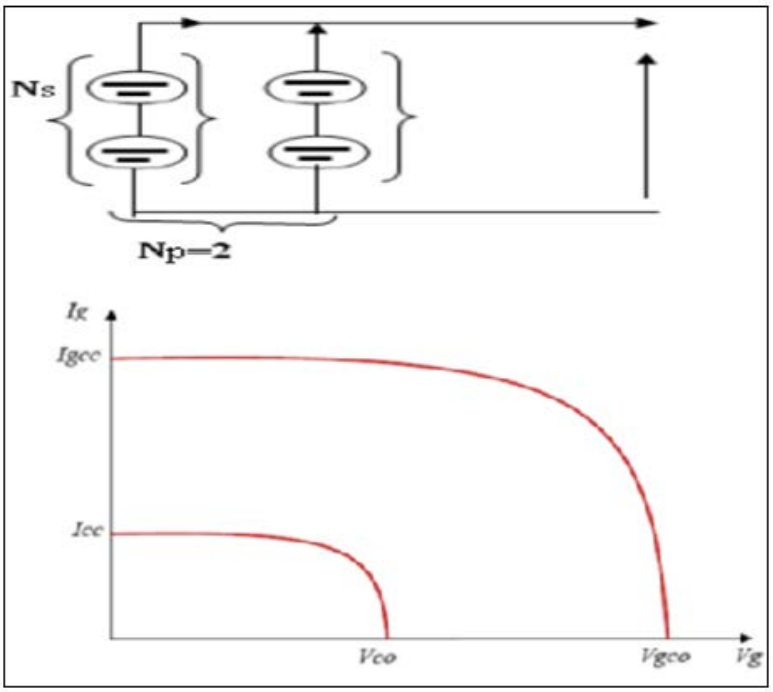


Figure 28 : Connexion série/parallèle de cellules, avec résultant caractéristique courant-tension [38]

Nous voyons donc que dans un groupement en série, la tension aux bornes de l'ensemble est maximisée alors que dans un groupement en parallèle c'est l'intensité qui est maximisée.
Pour obtenir un module PV (ou panneau PV) optimisé en tension et en intensité, le groupement hybride de cellules dans un panneau ou le groupement hybride de modules dans une installation complète est généralement considéré.

1.13 Performance des modules photovoltaïques pour la production d'énergie électrique

Du fait de leurs technologies particulières, les cellules PV représentent des avantages et des inconvénients qui leurs sont propres comparativement aux autres types de systèmes de productions d'énergie électrique renouvelables et conventionnels. Nous citerons :

Les avantages

1. Une haute fiabilité – elle ne comporte pas de pièces mobiles – qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. D'où son utilisation sur les engins spatiaux.

2. Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïque permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissance allant du milliwatt au Mégawatt.
3. Le coût de fonctionnement est faible vu les entretiens réduits et ils -ne nécessitent ni combustible, ni personnel hautement spécialisé.
4. La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions. On estime que l'énergie produite pour la fabrication puis le retraitement en fin de vie des modules photovoltaïques en technologie silicium correspond à 6 ans de production d'électricité par ce même module sachant que le temps moyen entre panne (MTBF) correspondant ici à sa durée de vie est estimée à 30 ans. [39].

Les inconvénients

1. La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
2. le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium est de 28%).
3. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.
4. Le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire ce qui accroit le coût du générateur photovoltaïque. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis [39].

1.14 Origine des stress électrique et thermique dans les modules photovoltaïques

Comme les cellules solaires sont des diodes, elles se détériorent quand elles sont parcourues par un courant supérieur à une valeur critique. Cela se produit lorsque leur mise en série n'est pas optimisée du fait d'un trop grand nombre de cellules ou modules dans le même bras série (string) ou lorsqu'elles sont totalement ou partiellement ombragées. Cette détérioration peut également être générée lorsque dans un panneau les cellules sont dépareillées électriquement

entrainant un sur-courant ou une surtension dans les cellules les plus faibles. Le cas d'un ombrage partiel est illustré dans la figure 29 qui représente des panneaux photovoltaïques exposés partiellement dû à une ombre induite par un obstacle ou une saleté. Dans le cas où une cellule est ombragée, elle se polarise en inverse et dissipe la puissance sous forme de chaleur. Si aucune précaution pratique n'est prise, une situation d'ombrage peut conduire à ce qu'on appelle des dommages de type hot-spot irréversibles dus à un courant concentré localement dans la cellule comme le montre la figure 30. Cette situation de point chaud existera lorsqu'une cellule solaire génèrera plus de courant que le courant de chaîne du module ou du générateur photovoltaïque. [40] Nous voyons ainsi clairement qu'il existe un lien étroit entre le stress électrique et le stress thermique Co-existants et interdépendants lors du fonctionnement dégradé d'une cellule photovoltaïque. Le courant photo-induit va créer localement à l'ombrage, une augmentation de la température de la cellule qui peut atteindre en fonctionnement normal pour un panneau photovoltaïque implanté sous nos latitudes en zone tempérée jusqu'à une température supérieure à 150°C. Cette valeur est supérieure à la température critique de l'encapsulation des modules commerciaux.

Figure 29 : Exemple d'ombrage [41,42]

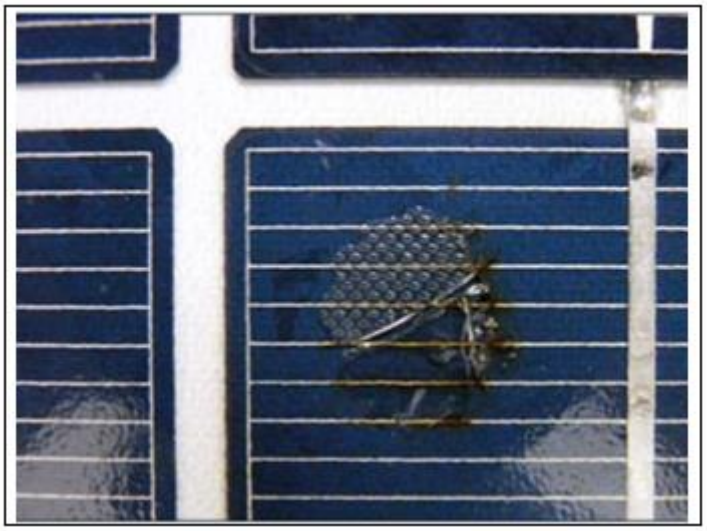


Figure 30 : Cellule brulée [43]

Ces phénomènes de hot-spot ou points chaud peuvent aller jusqu'à la destruction complète de la cellule et donc à la détérioration globale et définitive de l'installation photovoltaïque. La destruction définitive possible d'une cellule est la conséquence extrême du phénomène de point chaud. Avant cette phase ultime et irréversible, la cellule passera par des conditions de fonctionnement dégradées liées au stress électrique et thermique qu'elle va subir du fait de ces conditions non normales. C'est bien dans ce contexte et dans l'objectif de comprendre les phénomènes impliqués dans ce processus de destruction que les études effectuées dans le cadre de ce travail de thèse ont été effectuées et sont présentées dans ce manuscrit.

Dans le cas où le module n'est pas exposé de manière uniforme à la lumière suite à un ombrage partiel, un défaut de surface comme une tache due à un objet, il se produira un déséquilibre de conduction. C'est le cas par exemple lorsqu'il y a des discontinuités d'éclairement entre les cellules d'un même module à cause d'ombrages ou des cellules défaillantes à l'origine du stress électrique et comme nous l'avons vu ci-dessus, il peut en résulter des phénomènes de points chauds (hot spot) apportant en plus un stress thermique au stress électrique. C'est donc en ces points qu'un fort courant passera et par conséquent que le matériau chauffera. La chute de courant n'interviendra pas toujours à la même tension ni avec la même pente selon les modules :

- Soit I_{sc} de la cellule ombragée est supérieur à celui des diodes non ombragées et dans ce cas la puissance délivrée par le module est uniquement dictée par la cellule de plus faible puissance.

- Soit I_{sc} de la cellule ombragée est inférieure à celui des diodes non ombragées, alors la cellule ombragée deviendra réceptrice et devra dissiper l'énergie fournie par les autres cellules non ombragées. Dans ce cas, la cellule réceptrice se met à chauffer et si son point de fonctionnement atteint la tension de claquage, la jonction pouvant chauffer jusqu'à un endommagement irrémédiable, déformation de la couche d'encapsulation ou détérioration des contacts et soudures. A la manière d'une diode Zener, la cellule réceptrice atteignant sa tension de claquage voit ses électrons libérés fortement accélérés et ils vont créer de nouvelles ionisations par choc : il y a effet d'avalanche. Cet effet se produit lorsque les porteurs de charge, accélérés par le champ électrique, gagnent suffisamment d'énergie pour ioniser les atomes du réseau, en créant des paires de porteurs de charge secondaires. Ces paires électron-trou sont elles-mêmes accélérées à des énergies suffisantes pour causer d'autres ionisations. [44]

Les parties de la cellule ayant un courant de fuite élevé dû à R_{sh} plus faible seront alors les sièges d'une augmentation brutale de la température. C'est le phénomène de hot spot déjà mentionné. Dans le cas des cellules cristallines de technologie silicium et influencé par les courants inverses présents, une température de 150°C environ entrainera un endommagement irrémédiable du module. Ce phénomène sera largement constaté expérimentalement dans ce travail.

1.15 Etude des défauts profonds dans les jonctions semi-conductrices

On trouve plusieurs types de défauts profonds qui peuvent être générés dans le matériau semi-conducteur au moment du tirage du matériau pur, du dopage, de l'intégration et également du fonctionnement comme nous le montrons dans cette étude. Nous présentons une liste de ces défauts principaux et de leur origine [45] :

- Des défauts dans la structure lors de la croissance du matériau. Ce sont les défauts de fabrication. Ces défauts sont directement liés au dispositif utilisé lors de la croissance et à la technique même de croissance. Ces défauts peuvent ainsi venir de la contamination de la chambre de croissance, de la pureté non optimale des produits de base.
- Des défauts de réseau ou des défauts étendus comme les dislocations ou les défauts d'empilement.
- Des impuretés en site substitutionnel ou interstitiel. Ces défauts peuvent apparaître au moment du tirage avec la contamination de la structure par des métaux de transition : Fe,

Cr, Co, etc.,

- Des défauts électroniques ponctuels. Ces défauts apparaissent sous la forme de lacunes, d'atomes en position interstitielle, des antisites dans les semi-conducteurs dopés afin d'assurer la neutralité électronique.
- Des défauts pendant les processus de réalisation du composant induits lors des processus de gravures des couches ou de l'exposition au plasma,
- Des défauts apparaissant avec le vieillissement du composant altérant son fonctionnement et dégradant ses performances. [45]

Ces défauts ont un rôle fondamental dans le processus de conduction car ils peuvent y contribuer positivement ou négativement. Dans le cas où le courant inverse présent dans la structure semi-conductrice est faible, la mobilité des porteurs peut être considérée comme constante et les vitesses des trous et des électrons restent proportionnelles au champ électrique induit. Mais lorsque ce courant devient important, les porteurs acquièrent une certaine énergie cinétique corrélée à une élévation de température dans la jonction. C'est ce qui est appelé le phénomène de « porteurs chauds ». Afin de déterminer les paramètres des pièges, il faut en connaître leur nature, électrons ou trous, et en savoir son niveau d'énergie E_T (eV), et la section efficace de capture σ (cm^2).

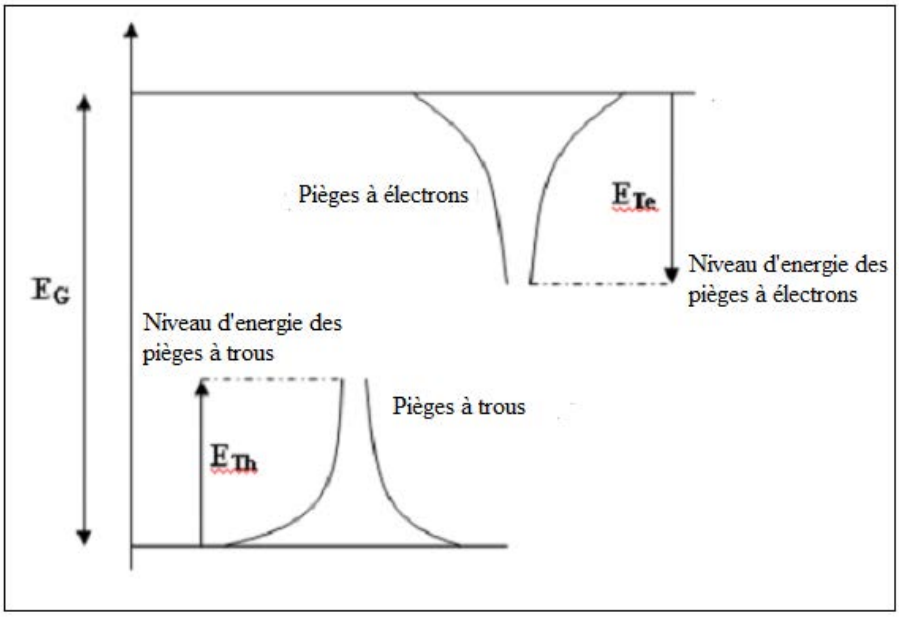


Figure 31 : Répartition des différents niveaux de pièges dans le gap du semi-conducteur

Le rôle du piégeage, lors de l'injection de charges, est lié à la ZCE. Cette dernière est généralement associée à l'espace occupé par des charges positives et des charges négatives.
La probabilité qu'un piège capte un électron est donnée par la loi suivante [46] :

$$f_n(E) = \frac{1}{1+exp\left[\frac{E-E_{Fn}}{KT}\right]} \qquad (28)$$

Tandis que la probabilité qu'un piège capte un trou est donné par la relation ci-dessous [46] :

$$f_n(E) = \frac{1}{1+exp\left[\frac{E_{Fp}-E}{KT}\right]} \qquad (29)$$

On distingue deux types de pièges "profonds" et "peu profonds", pour savoir si c'est l'une ou l'autre il faut comparer la valeur du niveau d'énergie des différents pièges.

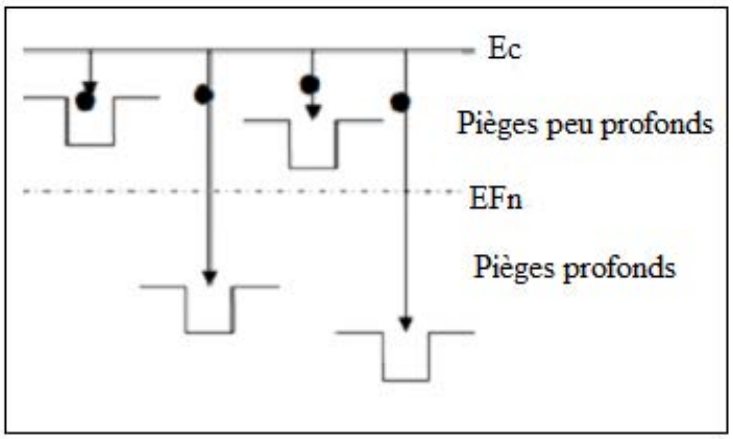


Figure 32 : Schéma d'injection des électrons dans un semi-conducteur en présence de pièges profonds et peu profonds

La figure 32, représente l'injection des électrons dans un semi-conducteur, alors les pièges profonds sont localisés au-dessous du niveau de Fermi E_{Fn} et celles localisés au-dessus sont les pièges peu profonds.

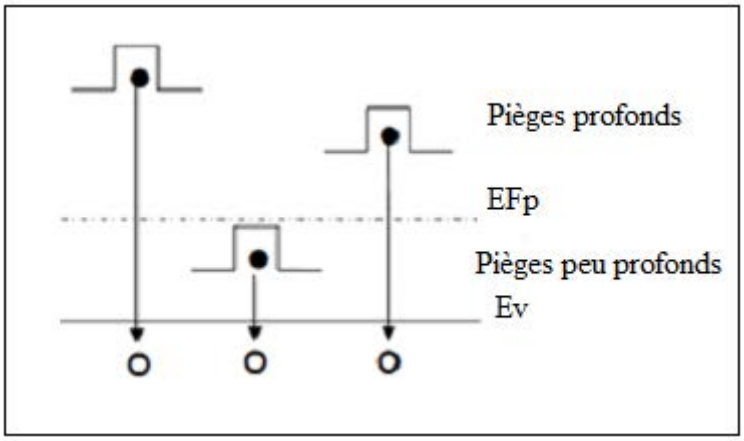


Figure 33 : Schéma d'injection des trous dans un semi-conducteur en présence de pièges profonds et peu profonds

La figure 33 représente l'injection des trous dans un semi-conducteur, alors les pièges profonds qui sont localisés au-dessus du niveau de Fermi E_{Fp} et celles au-dessous sont les pièges peu profonds. [46]

1.16 Conclusion

L'énergie solaire photovoltaïque produit de l'électricité à partir de l'énergie lumineuse (photon) en utilisant des matériaux bien particuliers tels que les semi-conducteurs comme le silicium, le Germanium, l'Arséniure de Galium, et d'autres alliages.

Dans ce chapitre nous avons rappelé l'origine de l'énergie photovoltaïque, présenté les trois technologies de cellules à base silicium puis nous avons focalisé notre présentation sur l'étude de la structure et du fonctionnement d'une cellule solaire

Nous avons ainsi rappelé les différents modèles électriques d'une cellule solaire et exposé leurs caractéristiques électriques et leurs différents paramètres électriques internes. Nous avons présenté l'influence dans les caractéristiques I(V) et P(V) et la performance des cellules, de leurs paramètres internes comme les résistances shunt et série Nous avons également étudié l'influence des paramètres externes, en particulier la température et l'éclairement, sur ces mêmes caractéristiques I(V) et P(V).

Sur la base de cette étude, nous avons décrit l'utilisation des cellules photovoltaïques, regroupées en modules, pour la production de l'énergie électrique à partir de l'énergie lumineuse solaire.

Nous avons montré l'importance des phénomènes de point chaud ou hot-spot qui induisent un stress électrique et thermique dans la cellule ou le module entrainant une baisse de rendement, partielle, temporelle voir définitive pouvant aller jusqu'à la destruction totale de la cellule, du module voire du générateur-photovoltaïque. Enfin, en conclusion de ce chapitre nous avons décrit les défauts et les études des pièges dans le semi-conducteur nous permettant d'introduire notre étude présentée dans les chapitres suivants.

Chapitre 2 :

Influence du stress électrique sur les caractéristiques et les paramètres des modules photovoltaïques

2.1 Introduction

Comme nous l'avons montré dans le chapitre précédent, les modules photovoltaïques peuvent se trouver en situation de stress électrique suite à l'apparition de points chauds avec des conséquences directes sur la dégradation de leurs performances. Afin d'étudier l'influence de ce stress électrique sur la performance des modules solaires, nous avons étudié le comportement de modules photovoltaïques individuels en technologie silicium et des modules subissant ou ayant subi un stress électrique induit en injectant un courant inverse. Pour cette étude basée sur de nombreuses et longues campagnes expérimentales nous avons déterminé les caractéristiques I(V), C(V) de ces cellules et modules PV [1]. Par ailleurs, les paramètres fondamentaux de la cellule R_{sh}, R_s, A, I_{01} et I_{02} ont été également définis. D'un point de vue méthodologique, nous avons considéré dans un premier temps lors de l'application du stress, deux situations expérimentales en étudiant le comportement des modules sous stress dans l'obscurité et sous éclairement, puis dans un deuxième temps, en phase post stress lors des mesures expérimentales nous avons également caractérisé les modules dans l'obscurité et sous éclairement. En effet, comme nous le montrons dans ce chapitre, du fait de la nature et des amplitudes différentes des courants mis en œuvre dans ces différentes situations, le stress électrique apparaissant dans l'obscurité ou sous éclairement n'entraînera pas la même amplitude des effets induits dans la cellule et par conséquent, le comportement des modules stressées sera différent lorsqu'il sera qualifié sous ces deux conditions d'éclairement différentes [2-4].

Plusieurs méthodes sont proposées pour mesurer les paramètres à partir les caractéristiques I(V) dans les conditions d'obscurité et d'éclairement : certains chercheurs utilisent des méthodes statiques [5-6], tandis que d'autres utilisent des méthodes dynamiques [7-8] avec ou sans procédures d'intégration. [9]

En outre, la détermination des caractéristiques C(V) de la cellule sont utiles pour la détermination de son comportement statique et dynamique. Selon le type de cellule photovoltaïque considéré, la capacité peut être utilisée pour dériver les paramètres tels que la concentration de dopage et la tension intégrée de la jonction [10].

L'effet de l'injection inverse sur les caractéristiques I(V), C(V) et les paramètres seront le sujet de base traité dans ce chapitre. Nous débuterons ce chapitre par une étude expérimentale, avec une partie plus fondamentale décrivant le circuit idéal de la cellule solaire. Nous poursuivrons dans ce chapitre par une description détaillée des méthodes de

mesure que nous avons utilisées. Les changements de comportement des modules stressés électriquement en fonction des conditions de stress (obscurité et puissance d'éclairement) et de caractérisations (également obscurité et puissance d'éclairement) feront l'objet de la discussion finale de ce chapitre.

2.2 Bases théoriques et expérimentales de l'étude

Ces bases sont communes aux mesures présentées dans ce chapitre concernant l'effet du stress électrique et à celles qui seront présentées dans le chapitre suivant concernant l'effet du stress thermique sur le comportement des modules photovoltaïques.

Comme présenté dans le chapitre précédent, la description générale des caractéristiques I(V) et C(V) pour une cellule photovoltaïque a été largement étudiée pendant les quatre dernières décennies et le circuit équivalent peut être présenté par un modèle général équivalent à deux diodes. Pour rappel, (voir Chapitre 1 pour une présentation plus détaillée) ce modèle se compose de deux diodes, une résistance parallèle (Rsh) représentant la variation du courant de fuite, et une résistance en série (Rs) décrivant une résistance interne pour la circulation du courant [11].

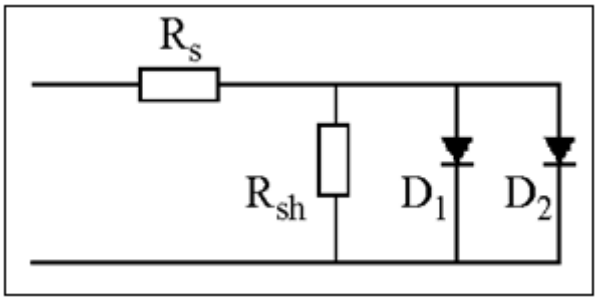


Figure 1 : Circuit équivalent du module photovoltaïque dans le modèle à deux diodes [12]

Ce modèle est décrit par l'équation à deux diodes d'une jonction PN [12] :

$$I = I01\left\{exp\left(\frac{V-R_S.I}{V_T}\right)-1\right\}+I02\left\{exp\left(\frac{V-R_S.I}{AV_T}\right)-1\right\}+\frac{V-R_S.I}{R_{sh}} \qquad (1)$$

Où: I: représente l'intensité totale de la cellule; I_{01} est le courant de saturation inverse correspondant à la diffusion des électrons (dans le côté p) et des trous (dans le côté n); I_{02} est le courant de saturation inverse correspondant à la recombinaison d'électrons et de trous dans la région d'appauvrissement; V est la tension appliquée, $V_T = KT / q$ est la tension thermique, avec q, la charge de l'électron primaire = $1,6 \times 10^{-19}$ C, K, la constante de Boltzmann = 1,38 ×

10^{-23} J / K. Enfin, A est le facteur d'idéalité, R_{sh} est la résistance de shunt et R_s est la résistance série [13].

A partir de l'équation 1, nous avons tracé la caractéristique I(V), figure 2, à l'aide d'un programme développé sous Matlab / Simulink réalisant les calculs numériques basés sur ce modèle des deux diodes.

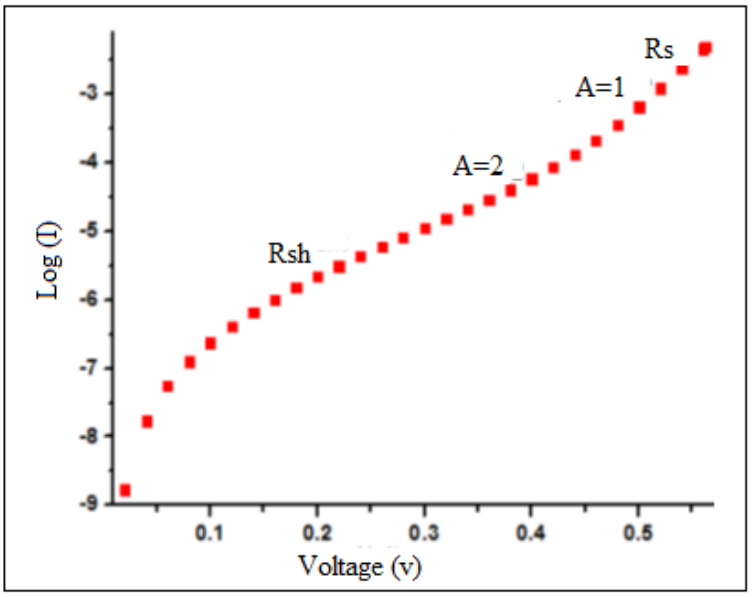


Figure 2 : log I = fct (V) d'une cellule photovoltaïque.
Indication des mécanismes liés aux différentes pertes. [13]

Nous pouvons voir dans la figure 2 que cette caractéristique est divisée en deux régions principales, correspondant aux deux termes principaux de l'équation 1 :

1) Pour des faibles tensions de polarisation, le courant injecté est faible et le courant de recombinaison domine dans la jonction dû à l'influence de la résistance shunt. Dans ce cas, la valeur du facteur d'idéalité (A) est supérieure à 2.

2) Pour des hautes tensions de polarisation, le premier terme de l'expression du courant total qui détermine les composantes du courant de diffusion sont dominés par les surfaces et les zones brutes. Dans ce cas, la valeur du facteur d'idéalité(A) est égale à 1 (cas idéal).

De sorte que, par la méthode d'ajustement de courbe, les valeurs de saturation du courant de diffusion et la valeur du facteur d'idéalité (A) peuvent être extraites.

Cependant, pour résoudre l'équation (1) il faut calculer les valeurs d'I_{01}, I_{02}, R_s, R_{sh}, et A. Ces derniers paramètres sont spécifiques aux modules utilisés et ils seront extraits expérimentalement des caractéristiques I(V) de chaque module.

2.3 Méthodologie Expérimentale

2.3.1 Organigramme général de la procédure expérimentale

Pour mettre en évidence l'effet d'un stress électrique sur les caractéristiques des modules solaires, nous présenterons une série de mesures expérimentales réalisées sur des modules photovoltaïques, 6x6 (36 cellules) 3,8 V, 0.3W et 85 mA à l'obscurité. Pour l'injection du courant inverse sous éclairement, les modules photovoltaïques commerciaux utilisés auront les caractéristiques suivantes : dimensions 80x60 mm, 4,8V ; 0,8W et 150 mA. Ces modules de faible puissance sont généralement utilisés pour alimenter les petits instruments de l'électronique embarquée. Lors de ces expériences, lors du stress et dans la phase post-stress, nous avons utilisé quatre valeurs d'éclairement : 0klux (correspondant ainsi aux caractérisations faites à l'obscurité), 10klux, 20klux et 30klux.

La figure 3 donne l'organigramme des différentes expérimentations et leur référencement. Nous voyons clairement dans cet organigramme que notre partie expérimentale est composée de deux branches principales correspondant à la création du stress électrique (SE) par injection du courant inverse. Dans la première branche, notée SE1, le courant est injecté lorsque la cellule est placée à l'obscurité et dans la deuxième branche, notée SE2, lorsque celle-ci est placée sous éclairement. Faisant suite à la création du stress électrique, dans chaque branche SE1 et SE2, les mesures des caractéristiques ont été réalisées à l'obscurité, SE1-1 et SE2-1, et sous un éclairement constant de 30klux, SE1-2 et SE2-2. Par la suite dans ce chapitre, je me référerai à cet organigramme et à la notation des différentes branches expérimentales.

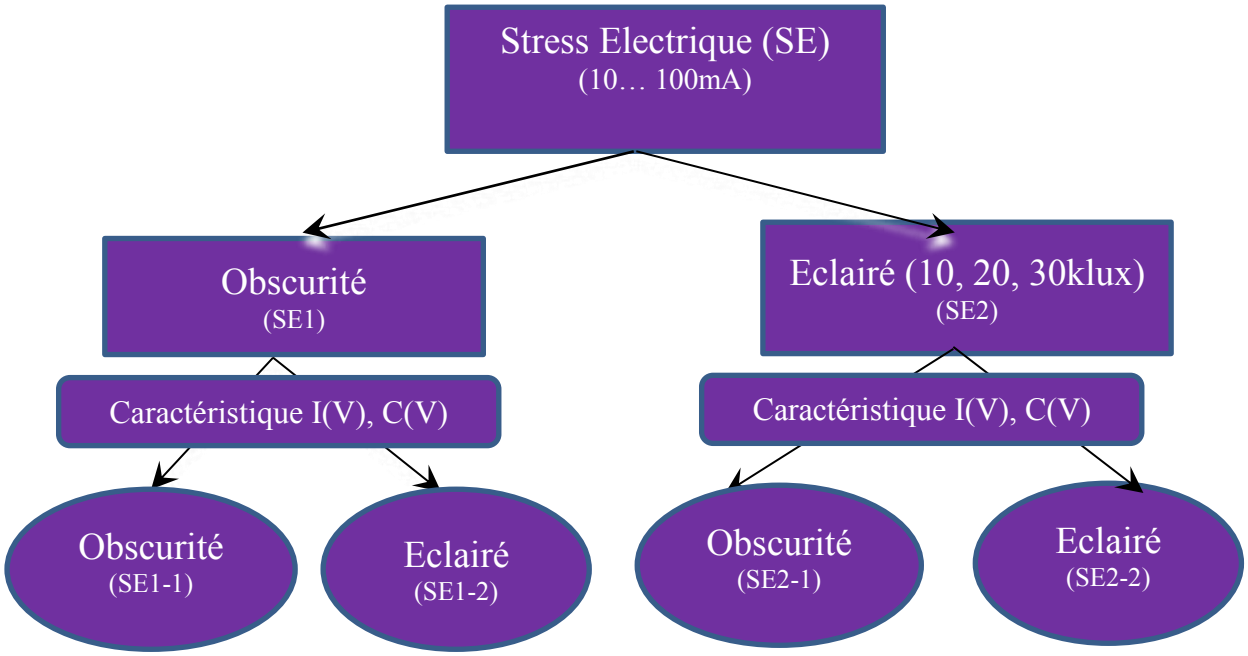


Figure 3 : Organigramme de la procédure expérimentale

Différents niveaux de courant inverse générant le stress électrique sont injectés dans la structure solaire à l'obscurité, branche SE1 et sous éclairement, branche SE2. Les valeurs du courant varient de 0 (sans stress) à 80 mA par un pas de 10mA, pour chaque injection en fixant l'intervalle de temps à 10 min. Les expérimentations sont faites à température ambiante. Les caractéristiques sont prélevées dans les deux cas avant et après stress et les résultats obtenus dans chaque branche de cet organigramme seront présentés et discutés puis comparés.

2.3.2 Méthode de mesure des paramètres et caractéristiques du module solaire

L'injection du courant inverse dans un module solaire peut se faire à partir d'une source de tension programmable [14]. Dans notre cas, nous avons utilisé une source Keithley 2400 interfacée à un ordinateur par une carte d'acquisition IEEE.

Pour les mesures sous éclairement présentées et discutées dans ce manuscrit, nous avons mis la cellule sous une source artificielle de lumière et la mesure de la luminosité a été faite à l'aide d'un luxmètre.

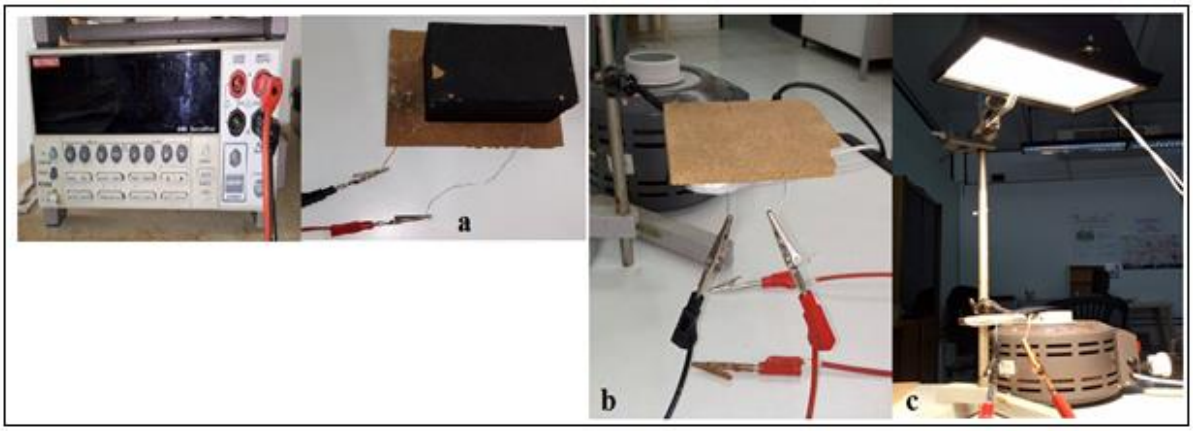


Figure 4: (a) stress à l'obscurité, caractéristique I(V) (b) à l'obscurité, (c) sous éclairage

L'extraction des paramètres des caractéristiques I(V) est effectuée dans une application logicielle que nous avons également développée sous Matlab assurant tous les calculs numériques et nous permettant le tracé des caractéristiques.

2.3.3 Précision des mesures

Cette thèse étant basée sur un travail expérimental conséquent, il est important de pouvoir considérer les erreurs faites lors des caractérisations électriques des modules. Pour rappel, nous savons que dans les mesures expérimentales, deux types d'erreurs sont possibles, les erreurs aléatoires et les erreurs systématiques. Concernant l'erreur aléatoire, nous avons essayé de l'évaluer, à défaut de la minimiser au maximum en répétant les premières mesures de ce travail de façon cyclique lors de l'injection du courant inverse de stress. Nous avons trouvé des écarts très faibles dans les caractéristiques expérimentales I(V) nous permettant d'estimer les erreurs aléatoires inférieures à 5% sur la valeur mesurée.

Concernant, le deuxième type d'erreur, les erreurs systématiques liées à la précision des instruments de mesures et de la technique utilisée, nous avons considéré les fiches des constructeurs et la précision possible dans la lecture des informations de mesure que nous avons faites afin de tenir compte également des erreurs de lecture de l'opérateur. Lors des caractérisations I(V) post stress électrique, les paramètres expérimentaux mesurés sont l'intensité lumineuse le courant et la tension utilisés lors du stress et lors de la mesure. La précision de mesure de l'intensité lumineuse faite avec le luxmètre est estimée égale à environ 2%, correspondant à une erreur assez élevée, car la mesure demande un positionnement manuel de la sonde. Toutes les mesures des courants et des tensions ont été

faites avec le SMU Keithley. Le constructeur donne une précision relative pour la source de courant, égale à 0.066% (calibre 100mA) et pour la mesure du courant égale à 0.055%. Pour la mesure de la tension, la précision relative est de 0.015% (calibre 20V). Ainsi, nous pouvons voir que la SMU est un appareil très précis, et que de ce fait, la méthodologie que nous avons développée apporte des résultats expérimentaux également très précis ; la précision liée aux erreurs systématiques dépend donc principalement de la mesure du flux d'éclairement. Finalement, dans notre étude, nous considèrerons la plus grande des deux erreurs entre l'aléatoire et la systématique et nous estimons que nos résultats sont donnés avec une erreur relative meilleure que 5%.

Après cette présentation générale de l'environnement expérimental et de la méthodologie, nous présentons dans les paragraphes suivants les résultats obtenus dans les différentes branches (voir l'organigramme figure 3).

2.4 Etudes post- stress électrique à l'obscurité-Branche SE1

Le courant inverse variant de 0 mA à 80 mA avec un pas de 10 mA a été injecté dans un module solaire à l'obscurité (SE1). L'intervalle de temps entre deux mesures a été choisi égal à 10 minutes pour chaque dose de stress. Cet intervalle de temps a été déterminé suite à plusieurs observations expérimentales pour une combinaison des mesures courant-inverse-temps. Nous avons constaté que la saturation de la réponse apparaît dans un intervalle de temps maximum de 10min pour l'ensemble des niveaux des courants inverses incrémentés par pas de 10mA dans l'intervalle de courant jusqu'à 80mA. Cette saturation est attribuée au fait que les centres de recombinaison et de piégeage dans la bande interdite de la jonction seront complètement occupés par les charges induites dans les 10 premières minutes du stress électrique généré par une incrémentation de 10mA du courant inverse. Au-delà de ce temps, il ne sera plus possible de détecter ou mesurer des défauts additionnels. Ainsi, pour atteindre les objectifs fixés dans notre étude, cet intervalle de 10 minutes pendant lequel le courant inverse est injecté peut être considéré comme une valeur optimale permettant la génération de tous les défauts induits.

Dans les études expérimentales présentées par la suite, les courbes notées « without stress » correspondent aux caractéristiques initiales (servant de référence) du module vierge et donc avant la création du stress électrique. On retrouvera ces caractéristiques références des modules vierges tout au long de ce travail.

2.4.1 Les caractéristiques I(V) post-stress électrique à l'obscurité-Branche SE1

Avant et après injection de courant pour les différentes valeurs de celui-ci, les réponses des modules ont été mesurées lorsque le module est placé dans l'obscurité, sous-branche SE1-1 et lorsque le module est illuminé, sous-branche SE1-2 permettant de tracer les caractéristiques log I = fct (V) représentées dans la figure 5 et 6, respectivement. De même, suivant la même procédure, mais avec une tension négative, les courants inverses ont été également mesurés et les caractéristiques logs I_{Inv} = fct (V) sont également représentées dans les figures 7 et 8.

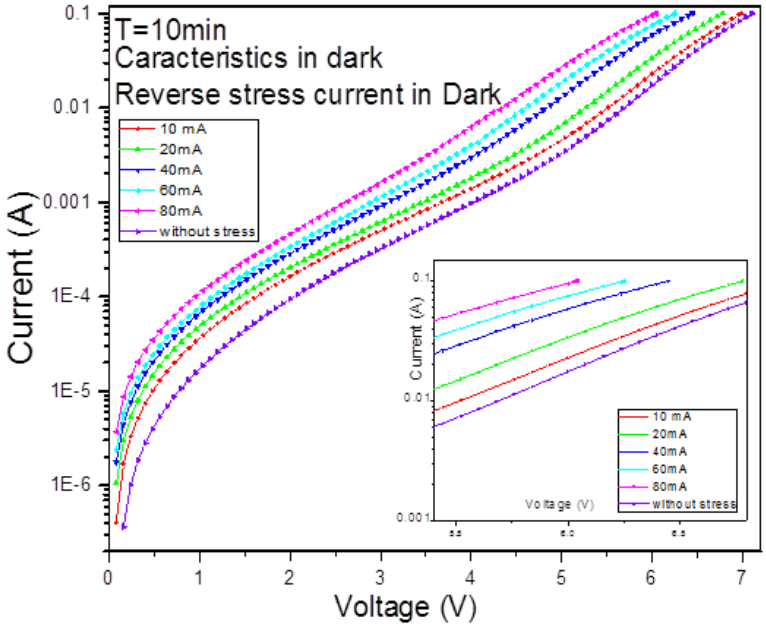


Figure 5: Log I= fct $(V)_{Dark}$ post-stress électrique à l'obscurité déterminée à l'obscurité (SE1-1). Insert : Log I= fct $(V)_{Dark}$ représenté avec la même échelle que I(V) mesurée sous éclairement (Figure 6)

Les limites supérieures critiques du courant injecté ont été définies par le niveau de défaillance complet des cellules constituant le module. Nous avons considéré ce niveau par observation de la surface des cellules lorsque celle-ci présente des tâches irréversibles du fait de la dégradation par brûlure de la couche superficielle supérieure enrobant la cellule. Ce phénomène sera observé par microscopie électronique et présenté en fin de ce chapitre. Les valeurs limites de ce courant ont été trouvées égale à 100 mA à l'obscurité (sous-branche SE1-1), et égale à 70 mA dans le cas éclairé (sous-branche SE1-2). Cette différence de 30mA entre les deux situations, est attribuée au photo-courant existant lorsque la cellule est éclairée. Ceci fait qu'un plus faible courant inverse injecté dans une cellule éclairée comparativement

à une cellule à l'obscurité permet d'atteindre la valeur critique supérieure d'endommagement irréversible.

Dans la figure 5, (SE1-1) toutes les caractéristiques I(V) post stress électrique induit par diverses valeurs de l'intensité du courant inverse à l'obscurité mesurées à l'obscurité suivent une évolution correspondant au modèle à deux diodes décrit par l'équation 1 et précédemment représentée de façon théorique dans la figure 2. Dans la première partie c.à.d. pour des tensions entre de 0V et 2V, la pente de variation du courant est très importante tandis que pour des hautes tensions (entre 2 V et 7 V), ces caractéristiques log I(V) deviennent quasi-linéaires avec une pente plus faible.

Néanmoins, les réponses I(V) varient de façon identique avec l'intensité du courant inverse injecté quel que soit la valeur de la tension appliquée. Ces réponses peuvent s'expliquer par le fait que le stress électrique, indépendamment de la tension appliquée, a pour conséquence la création de défauts dans la jonction en lien direct avec la valeur de l'intensité à l'origine de ce stress. Au-delà de 80mA, nous avons observé dans les modules sous tests l'apparition de zones brûlées à la surface des modules solaires comme nous le montrons lors de l'étude qualitative à l'aide du microscope électronique et de la technique MEB (SEM).

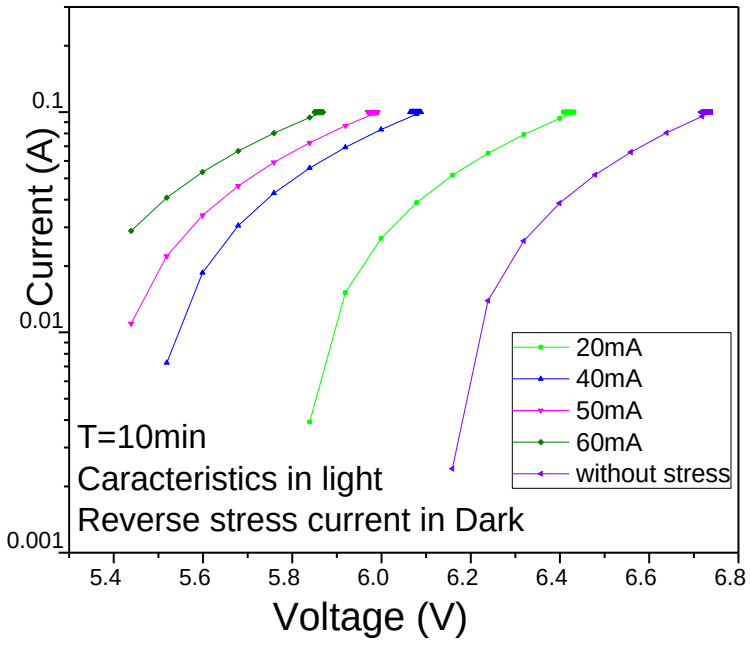


Figure 6: Log I= fct (V) $_{Light}$ post-stress électrique à l'obscurité déterminée sous éclairement (SE1-2)

Les résultats présentés dans la figure 6 montrent les caractéristiques I(V) des cellules enregistrées sous éclairement avec un flux lumineux de 30klux enregistrées avant et après la création des différents niveaux de stress à l'obscurité (SE1-2).

Comparativement aux caractéristiques I(V) enregistrées dans l'obscurité, nous observons un changement de la forme des caractéristiques. En particulier, les réponses I(V) commencent à des tensions supérieures à 5.4V par le fait que le module est maintenant dans un mode de production lié à l'éclairement. Par contre, si l'on compare ses résultats avec les précédents représentés avec la même échelle de la tension dans l'insert de la figure 5, nous constatons que la contribution supplémentaire du photo-courant induit par l'éclairement au moment de la mesure sur les caractéristiques des modules photovoltaïques n'influe pas sur l'amplitude de cette variation de courant dû au stress.

La caractéristique inverse I(V) du module est mesurée en appliquant une tension négative à la jonction permettant de vérifier le courant de fuite avant et après le stress électrique. Les figures 7 et 8 représentent les caractéristiques log I_{Inv} = fct (V_{Inv}) des modules, mesurés à l'obscurité et sous éclairement respectivement.

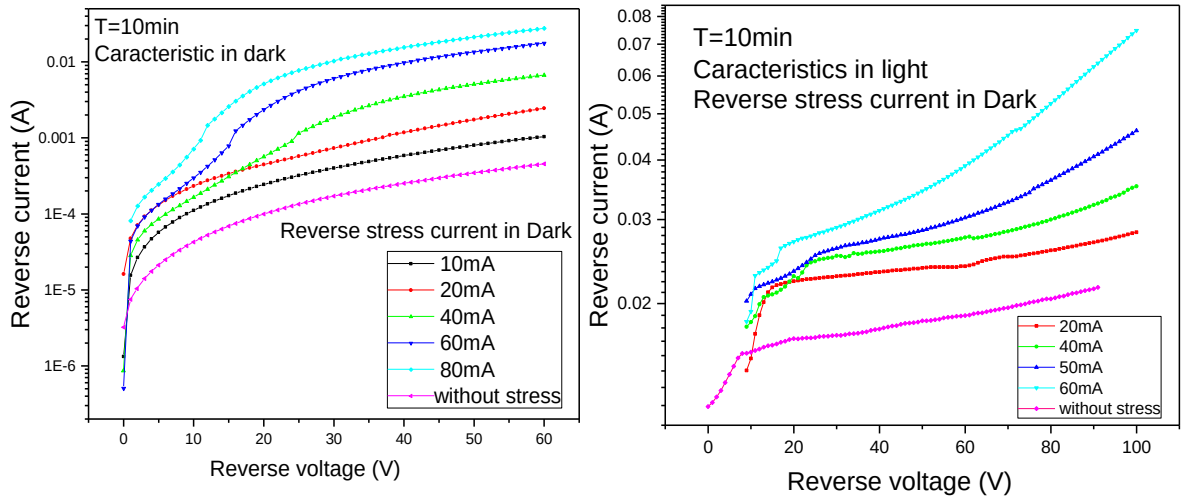


Figure 7: Log I_{Inv} = fct $(V_{Inv})_{Dark\ \&\ Light}$ post-stress électrique à l'obscurité (SE1)

(Remarque : les déformations des caractéristiques pour un courant inverse de 40mA, 60mA et 80mA sont dues à un défaut d'appareil)

Nous constatons que la valeur du courant inverse augmente après chaque dose de stress et, pour les grandes valeurs de la tension, de façon quasi-proportionnelle à l'amplitude du stress électrique. Bien que cette observation soit applicable à la fois lors des mesures à l'obscurité et sous éclairement, cette non-proportionnalité est nettement plus visible, c'est à dire pour des

mesures sous éclairement, où, particulièrement on observe des caractéristiques dont la pente augmente avec le stress induit. Cette augmentation du courant inverse est liée à l'augmentation du courant de fuite avec le stress induit. [15] L'analyse de ce comportement passe par la détermination des paramètres électriques du module et l'étude de leur influence dans le processus de conduction, ce qui sera abordé dans la suite de ce chapitre.

2.4.2 Les résistances shunt et séries en post-stress électrique à l'obscurité-Branche SE1

Les comportements des résistances shunt et série du module mesurés dans l'obscurité et sous éclairage, après l'injection de courant de stress dans l'obscurité sont représentées dans les figures 8 et 9, respectivement. Pour calculer ces valeurs, nous avons utilisé le modèle à deux diodes décrit précédemment (équation 1).

En particulier, la valeur de la résistance shunt reportée dans la figure 8 est obtenue à partir de la pente de la partie linéaire du caractéristique log I(V) à l'obscurité et sous éclairement, figures 5 et 6 respectivement de la polarisation inverse, soit [14] :

$$Rsh = \frac{\Delta VInv}{\Delta IInv} \qquad (2)$$

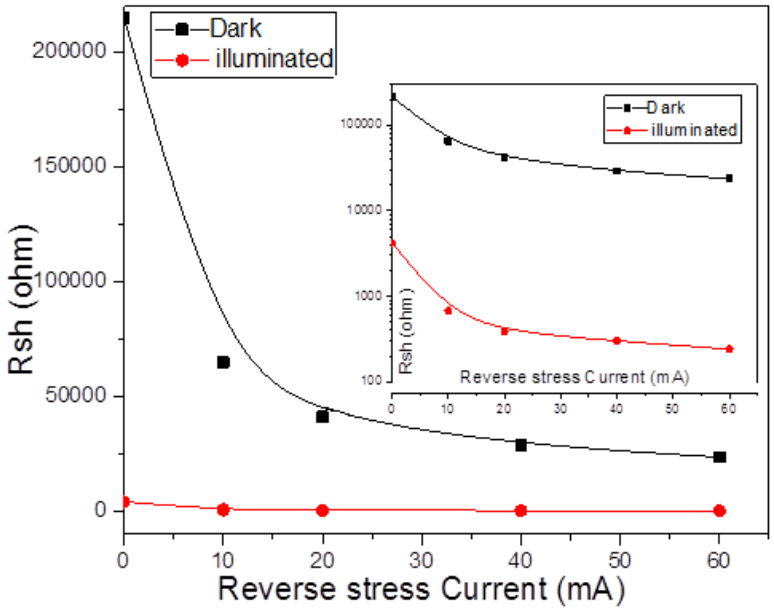


Figure 8: - R_{sh} = fct $(I)_{Dark\ et\ Light}$ post-stress électrique à l'obscurité (SE1)
Insert : Log R_{sh} = fct $(I)_{Dark\ et\ Light}$ post-stress électrique à l'obscurité (SE1)

La valeur de la résistance série, reportée dans la figure 9, est obtenue à partir de l'inverse de la pente aux fortes tensions des caractéristiques log I(V), des figures 5 et 6.

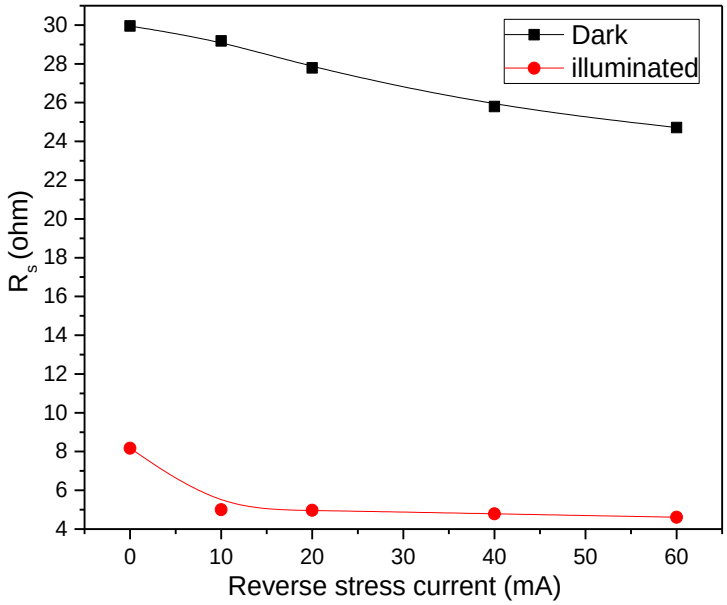


Figure 9: R_s = fct $(I)_{Dark\ et\ Light}$ post-stress électrique à l'obscurité (SE1)

Nous voyons clairement, dans la figure 8, qu'effectivement, à l'obscurité, R_{sh} tend vers une grande valeur dans le cas du module non-stressé mais que sa valeur diminue fortement en fonction du courant inverse injecté au moment du stress. Quantitativement, un courant inverse de stress égal à 60mA induira une variation relative de R_{sh} à l'obscurité de 89% atteint rapidement pour des valeurs de stress très faibles. Cette diminution de R_{sh} montre que le stress électrique, même de faible intensité comme celui crée par un courant inverse de 10mA, induit des défauts importants dans la structure ce qui provoquera une grande élévation du courant de fuite et donc une dégradation des performances du module. De même, et comme clairement observable dans la représentation en échelle logarithmique de R_{sh} = fct $(I)_{Dark\ et\ Light}$ dans l'insert de la figure 8, la dépendance de R_{sh} avec le stress mesuré sous éclairement est identique à celle enregistrée à l'obscurité. La variation relative de Rsh mesurée sous éclairement est du même ordre de grandeur que celle trouvée à l'obscurité (trouvée égale ici à 94%). Néanmoins, la différence entre R_{sh} mesurée à l'obscurité et sous éclairement correspond à une diminution de 98% par rapport à la valeur à l'obscurité dans le cas du module vierge et de 99.5% dans le cas du module stressé par un courant inverse de 60mA. Cette différence de 1.5% est liée directement à la contribution du stress et la diminution plus importante de Rsh dans une cellule stressée en présence d'un photo-courant correspond donc à la création de défauts supplémentaires et à l'augmentation du courant de fuite.

Contrairement à ce qui avait été observé dans le cas de la résistance shunt, les comportements de la résistance série post-stress électrique à l'obscurité enregistré à l'obscurité et sous éclairement ne présentent pas la même forme. Le comportement de Rs enregistré à l'obscurité semble proportionnel inverse au courant injecté lors du stress avec une variation relative de 17% de sa valeur entre le module vierge et stressé par un courant de 60mA alors que l'on trouve un changement important sous éclairement, 43%, suite à l'application du même stress. Nous constatons ainsi que le stress électrique aura une influence prépondérante sur la résistance série lorsque le module sera en fonctionnement normal de production. Ceci est confirmé par l'évolution de Rs mesurée à l'obscurité et sous éclairement qui correspond à une diminution de 72% pour le module vierge et de 81% pour le module stressé par un courant inverse de 60 mA. La différence entre ces deux pourcentages égale à 9% correspond directement à la contribution du stress.

2.4.3 Les courant de recombinaison et de diffusion post-stress électrique à l'obscurité mesuré à l'obscurité Branche SE1-1

Les deux autres paramètres électriques des cellules nécessaires d'estimer à partir de la caractéristique I(V) obtenue expérimentalement sont les courants de diffusion et de recombinaison, noté I_{01} et I_{02}, respectivement, dans l'équation 1. Le courant de diffusion est provoqué par la diffusion des porteurs à travers la jonction de la cellule photovoltaïque. Le courant de recombinaison correspond au courant de saturation inverse lié à la génération puis recombinaison d'électrons et de trous dans la région d'appauvrissement. Les comportements des courants de diffusion et de recombinaison mesurés à l'obscurité en fonction du courant inverse de stress, tels que résultant de la modélisation par notre application Matlab, sont représentés dans la figure 10.

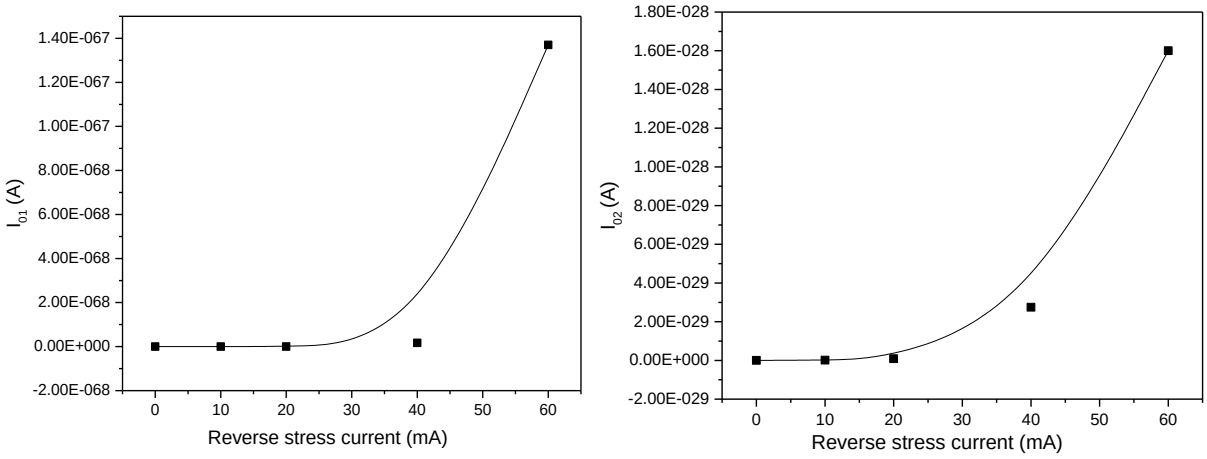


Figure 10 : I_{01} et I_{02} = fct $(I)_{Dark}$ post-stress électrique à l'obscurité mesuré à l'obscurité (SE1-1)

Nous observons que les courants de diffusion et de recombinaison démarrent à 0 pour le module vierge jusqu'à un stress électrique appliqué de 30mA puis suivent une forte augmentation de type exponentiel au-delà de cette valeur. Ceci traduit le fait que la diffusion des porteurs de charges à travers la jonction est plus active à des hauts niveaux de stress du fait de l'augmentation du champ électrique interne qui dissociera des paires électrons-trous. Les électrons ainsi libérés sont accélérés créant de nouvelles ionisations par choc entrainant par effet d'avalanche une forte augmentation du courant inverse. En présence d'un plus fort courant inverse, la jonction sera détruite par effet thermique.

2.5 Etudes post-stress électrique sous éclairement-Branche SE2

Les mêmes méthodes de mesure que précédemment ont été utilisées mais cette partie, le stress électrique, induit par un courant inverse est maintenant créé lorsque la cellule est éclairée. Pour rappel, les valeurs du courant inverse variant de 0 mA à 80 mA avec un pas de 10 mA ont été injectés dans cette branche notée SE2 dans un module solaire sous éclairement (SE2), en fixant l'intervalle de temps à 10 minutes pour chaque dose de stress. Des mesures en fonction de la valeur du flux lumineux reçu par le module au moment du stress électrique ont été réalisées. Nous avons fixé trois valeurs discrètes pour le flux lumineux, à savoir 10, 20 et 30 klux.

Pour les calculs numériques des paramètres, nous avons utilisé le même modèle basé sur un circuit équivalent du module photovoltaïque à deux diodes comme décrit dans la partie précédente.

2.5.1 Les caractéristiques I(V) post-stress électrique sous éclairement-Branche SE2

Les caractéristiques log I (V) obtenues expérimentalement sous éclairement avant et après injection du courant inverse générant le stress sont représentées en échelle logarithmique dans les figures 11 et 12, mesurées pour les différents niveaux de courant inverse injectés à l'obscurité (sous-branche SE2-1) et sous éclairement (sous-branche SE2-2), respectivement. Chaque figure se décompose en trois sous-figures, chacune correspondant à une des trois valeurs de l'intensité lumineuse utilisée pendant le stress.

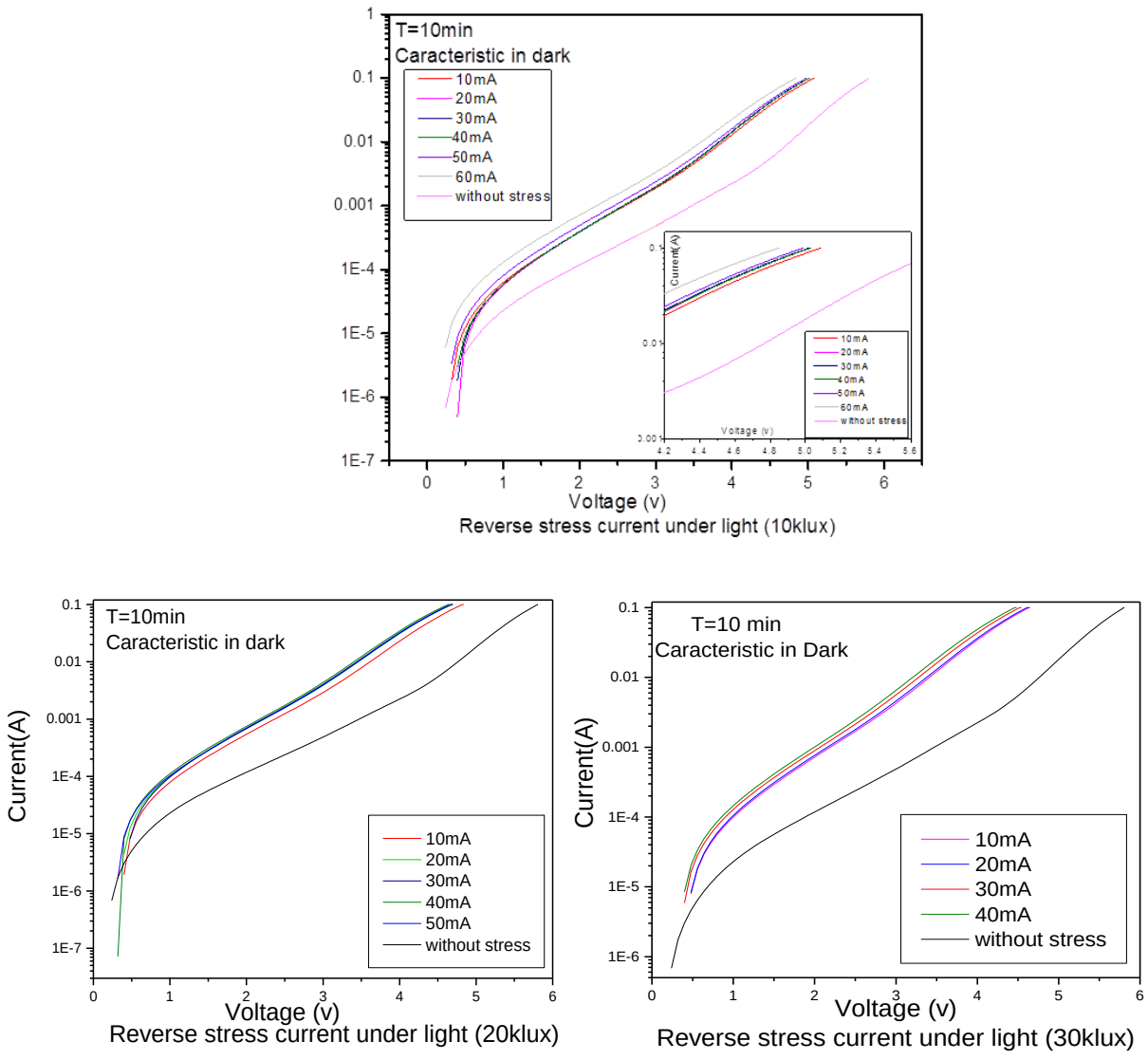


Figure 11: Log I= fct $(V)_{Dark}$ post-stress électrique sous éclairement déterminée à l'obscurité (SE2-1) Insert : Log I= fct $(V)_{Dark}$ représenté avec la même échelle que I(V) mesurée sous éclairement (Figure 12)

Les caractéristiques log I= fct $(V)_{Dark}$ post-stress électrique sous éclairement déterminée à l'obscurité (SE2-1), figure 11, montrent très nettement que les caractéristiques I(V) possèdent la même évolution que celles mesurées suite à un stress à l'obscurité, (Figure 5, Branche SE1-1) c'est à dire qu'elles peuvent être modélisées par le modèle à deux diodes. Par contre, le stress électrique créé sous éclairement influe fortement sur le fonctionnement d'un module photovoltaïque (dans la plage d'intensité lumineuse que nous avons choisie) quel que soit l'intensité du courant inverse injecté. En effet, toutes les caractéristiques I(V) post-stress électrique sous éclairement enregistrées dans les deux conditions expérimentales, obscurité (SE2-1) ou éclairée (SE2-2) montrent un grand changement dans tous les modules stressés comparativement au module vierge. Pour les mesures faites à l'obscurité (SE2-1), reportées dans la figure 10, nous remarquons que l'intensité du stress n'induit qu'un décalage relativement faible des caractéristiques I(V).

De même, nous représentons dans la figure 12 page suivante, les mesures post stress électrique enregistrées sous éclairement (SE2-2).

Dans ce cas des caractéristiques Log I= fct $(V)_{Light}$ post-stress électrique sous éclairement déterminée sous éclairement (SE2-2), nous observons un décalage des caractéristiques I(V), du même ordre de grandeur que celui observé à l'obscurité dans le cas du même type de stress *(attention aux effets d'échelle et comparer les résultats avec ceux présentés dans l'insert Figure 11)*. Comme déjà observé précédemment lorsque le stress avait été induit à l'obscurité (branche SE1), nous pouvons conclure de la même façon à savoir que le photo-courant induit par l'éclairement au moment de la mesure n'a pas d'influence significative sur l'amplitude de la variation des caractéristiques I(V) avec le stress. L'influence du photo-courant sur le fonctionnement de la cellule solaire.

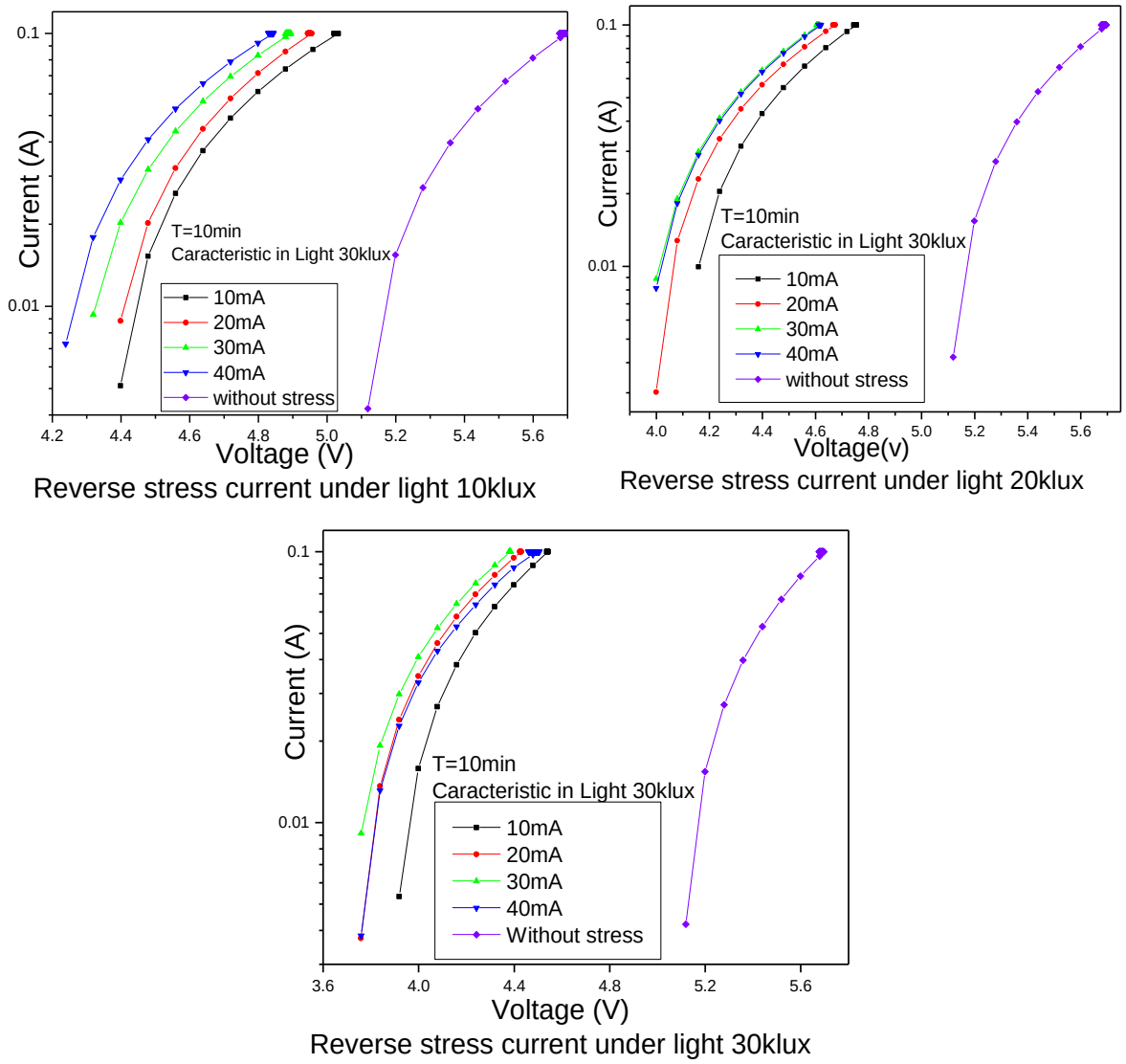


Figure 12: Log I= fct (V) $_{Light}$ post-stress électrique sous éclairement déterminée sous éclairement (SE2-2)

Les caractéristiques inverses des modules utilisés sont présentées dans les figures 13 et 14, page suivante, avant et après l'application du courant inverse de stress sous éclairement variant de 0 mA à 60 mA par un pas de 10mA, mesurées dans la phase post-stress électrique à l'obscurité (sous branche SE2-1) et sous éclairement (sous branche SE2-2) respectivement.

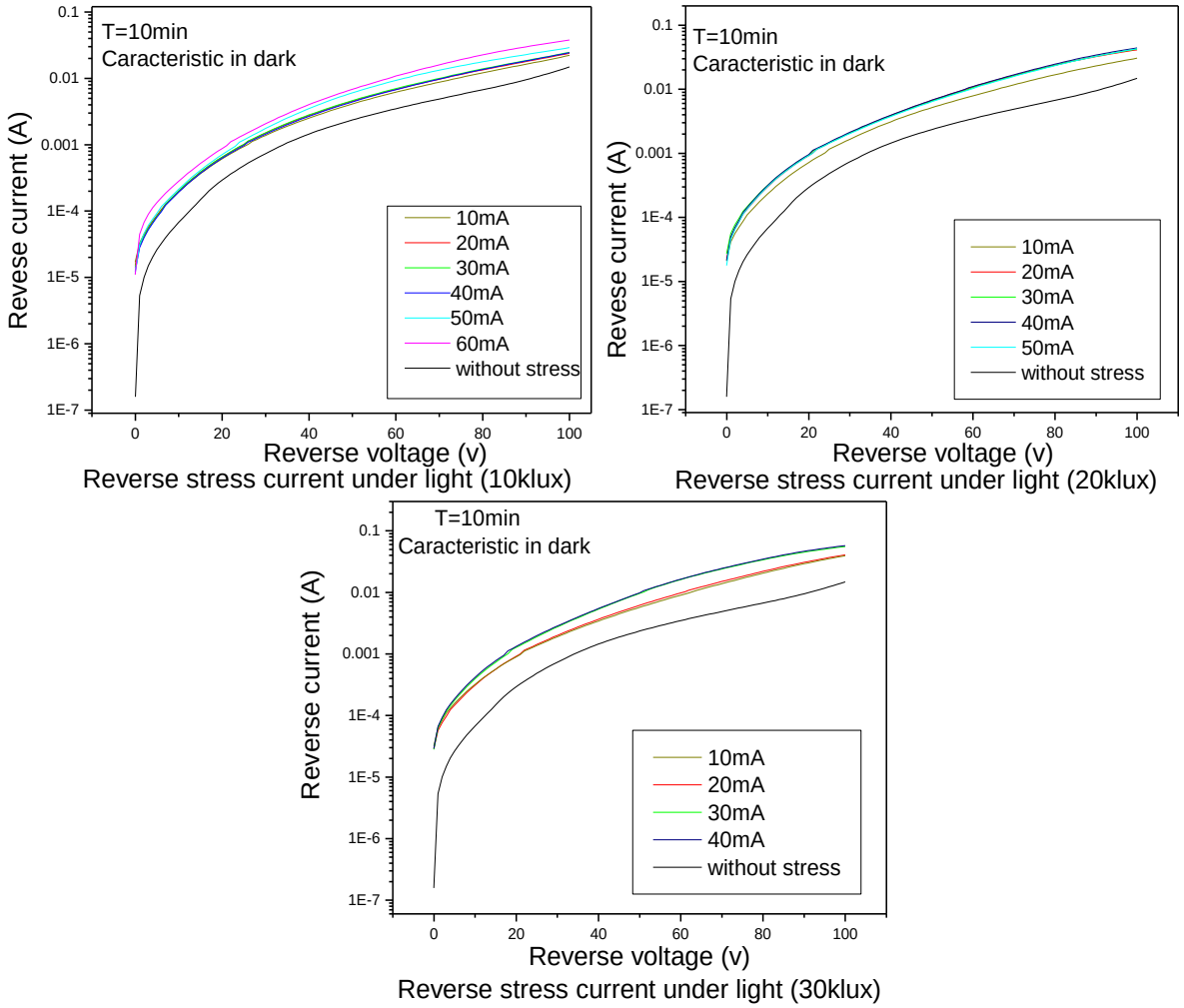


Figure 13: Log I_{inv} = fct $(V_{Inv})_{Dark}$ post-stress électrique sous éclairement déterminée à l'obscurité (SE2-1)

Dans la figure 13, après un stress de 10 mA, nous observons une faible variation des caractéristiques inverses des cellules stressées, lorsque ces caractéristiques sont enregistrées dans l'obscurité (SE2-1). Au-delà de la 10 mA et quelle que soit la valeur du stress électrique, les caractéristiques sont identiques présentant toutes approximativement le même gap par rapport à la caractéristique de la cellule vierge.

Nous pouvons noter que ce comportement des modules stressés sous illumination, mesuré à l'obscurité est très différent des comportements de ces modules obtenus après un stress électrique à l'obscurité tels que reportés dans la figure 7 dans la branche SE1-1. A l'obscurité, les valeurs du courant inverse mesurées évoluaient de façon quasi-proportionnelle à l'intensité du courant inverse de stress (voir figure 7) qui avait été injecté à l'obscurité. Or, lorsque ce courant est injecté dans des modules éclairés comme ici, nous constatons que ces

caractéristiques sont regroupées et que la valeur du courant inverse de stress n'a que peu d'influence sur leur valeur. Ceci démontre que la contribution dominante dans les phénomènes de conduction est le courant photo-induit par l'éclairement au moment du stress. D'après la figure 13, à l'obscurité, nous observons l'effet des porteurs chauds induits par le courant inverse atteint sa valeur maximale directement à partir de 10 mA et les caractéristiques inverses se saturent jusqu'à l'avalanche. C'est à dire que la caractéristique I(V) fait un saut après la première 10 min (entre 0 et 10mA) de stress puis elle se sature jusqu'à l'avalanche. L'effet de la saturation au niveau du défaut vient du fait que la valeur de stress 10 mA est capable de générer la totalité du défaut dans la structure.

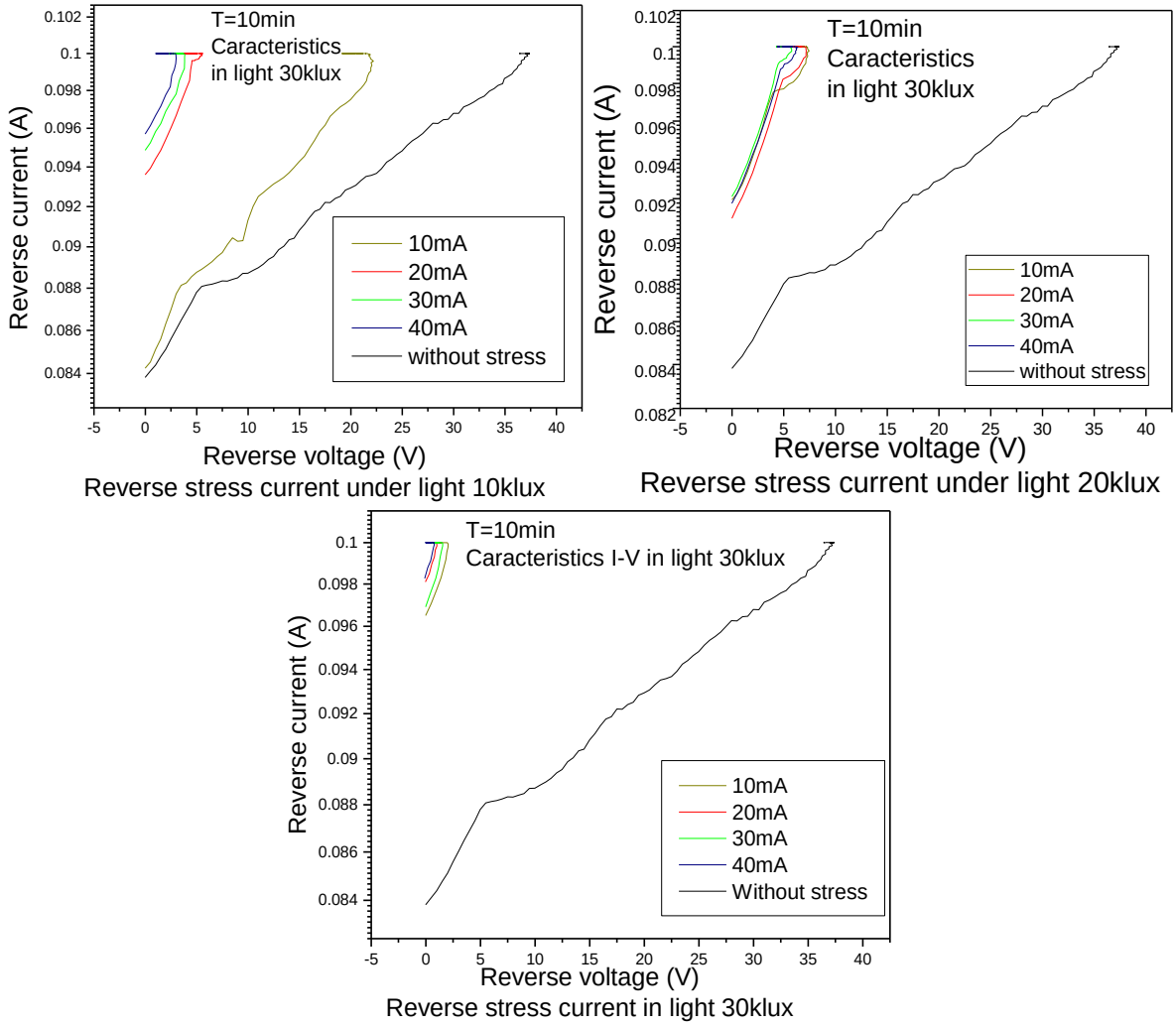


Figure 14: Log I_{inv} = fct (V_{Inv}) $_{Light}$ post-stress électrique sous éclairement déterminée sous éclairement (SE2-2) *(Remarque : les saturations observées sur ces courbes sont dues aux limites de l'appareil.)*

Contrairement à ce que l'on a observé lors des mesures à l'obscurité ci-dessus, (figure 13, SE2-1), lorsque ces caractéristiques sont enregistrées sous illumination (figure 14 SE2-2)

nous trouvons de très grandes variations dans les caractéristiques inverses des cellules stressées. En particulier, un décalage apparaît dans les courants inverses entre les caractéristiques inverses des modules vierges et stressés.

Par ailleurs, nous pouvons considérer l'existence d'une valeur seuil pour l'intensité inverse de stress au-delà de laquelle les cellules auront le même comportement sous éclairement. En effet, si l'on observe par exemple, la figure 14.a. pour une illumination de 10klux, nous voyons nettement que ce seuil se situe entre 10 et 20 mA puisqu'au-delà, toutes les caractéristiques des cellules stressées sont regroupées. Ces grandes différences en tension observées dans les caractéristiques des modules vierge et stressés au-delà du seuil d'endommagement peuvent être attribuées à l'augmentation du nombre de porteurs de charges excités avec la création des porteurs chauds induisant un échauffement de la jonction et une augmentation du courant de fuite. Nous rejoignons ainsi les justifications énoncées précédemment pour les mesures faites dans la branche SE1 [15].

2.5.2 Influence des conditions d'éclairement lors du stress électrique

Suite aux mesures post-stress électriques sous éclairement pour les différentes valeurs de flux lumineux, nous avons tracé l'évolution du courant inverse avec le flux lumineux : figure 15.a lorsque les mesures sont faites à l'obscurité et figure 15.b, lorsque les mesures sont faites sous éclairement.

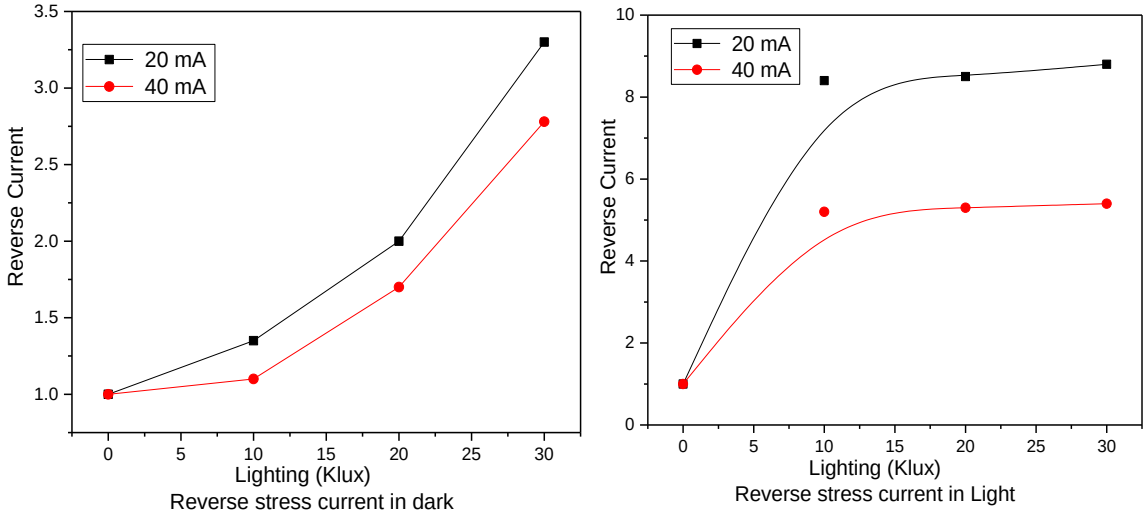


Figure 15 : $(I_{Inv})_{SE2\text{-}1}$ / $(I_{Inv})_{SE1\text{-}1}$ et $(I_{Inv})_{SE2\text{-}2}$ / $(I_{Inv})_{SE1\text{-}2}$ en fonction de l'éclairement lors du stress

Nous avons limité la valeur du courant inverse de stress à 40mA car, comme indiqué précédemment, en présence d'un flux lumineux, la détérioration par brûlure de cellules intervient sous un plus faible courant inverse qu'à l'obscurité. Les mesures ont été faites sans tension appliquée.

Les caractéristiques de la figure 15 montrent que lorsque les mesures sont faites à l'obscurité, figure 15.a. le courant inverse mesuré n'atteint pas sa valeur de saturation même lorsque le stress électrique a été induit sous un éclairement fort. Par contre, lorsque les mesures sont prises sous éclairement, figure 15.b. le courant inverse atteint la saturation dans les modules stressés même sous faible éclairement au moment du stress. La figure 15 montre également que la valeur du courant inverse en dehors et à saturation diminue avec l'intensité du stress électrique quel que soit les conditions de mesures.

2.5.3 Les résistances shunt et série en post-stress électrique sous éclairements-Branche SE2

Avant l'application du stress sur le module, donc vierge, nous avons trouvé une valeur de Rsh mesurée à l'obscurité égale à environ $2x10^5$ ohms. Nous allons maintenant analyser l'influence de l'éclairement et du courant inverse de stress sur les valeurs des résistances caractéristiques des modules. Les figures 16 et 17 représentent respectivement la résistance shunt et la résistance série en fonction du courant mesuré dans l'obscurité et sous éclairement calculée dans le modèle à deux diodes à partir de l'équation 1.

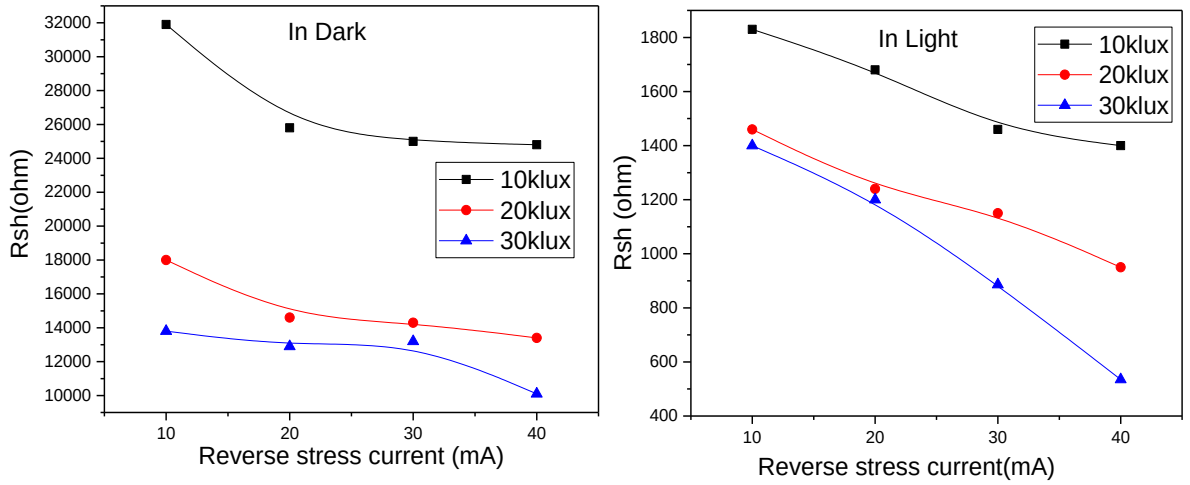


Figure 16: Rsh = fct (I)$_{Dark\ et\ Light}$ post-stress électrique sous éclairement (SE2)

Les valeurs de la résistance shunt diminuent continuellement avec l'intensité du courant utilisé pour induire le stress et cela d'autant plus que l'illumination est intense. Le rapport des résistances shunt, $\frac{\text{Rsh (obscurité)}}{\text{Rsh (éclairé)}}$ est égal à 9 dans le cas d'une cellule vierge et augmente jusqu'à 15 pour le module stressé sous éclairement avec un flux lumineux de 30klux. Nous voyons dans les figures 16 que la valeur de la résistance shunt est maintenant de l'ordre de 10^3 ohms dès que l'on a appliqué une illumination au module. Cette faible résistance de shunt, par rapport à celle mesurée dans les modules non stressés indique une augmentation significative du courant de fuite. [16]

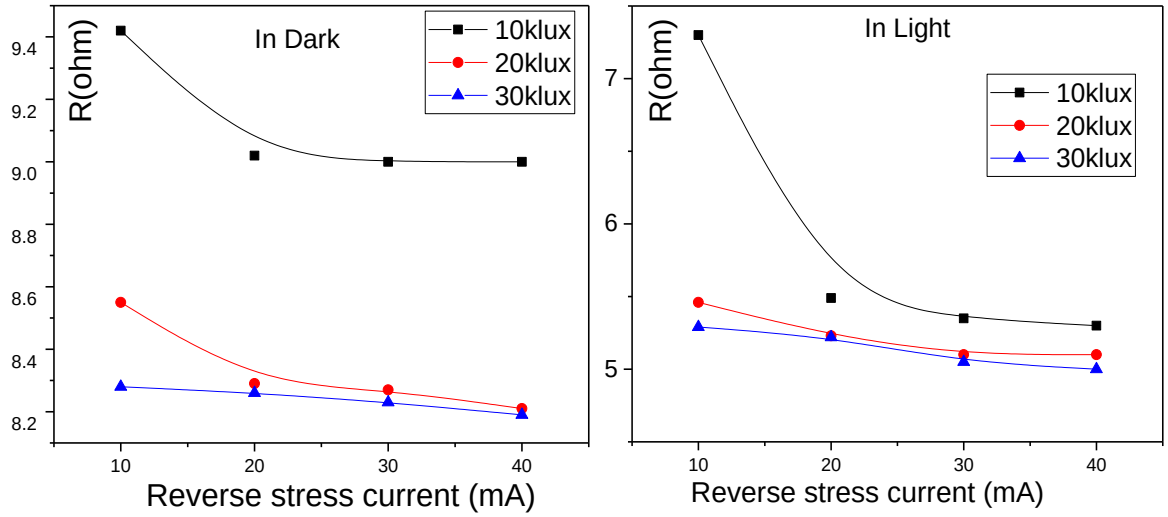


Figure 17: Rs = fct (I)$_{Dark\ et\ Light}$ post-stress électrique sous éclairements (SE2)

Dans ces résultats reportés figure 17, nous retrouvons le fait que la résistance série est plus fortement influencée lors de stress à l'obscurité voire sous de faibles éclairements (courbes 10klux) que sous forts éclairements, ce qui est mieux mis en évidence par des mesures sous éclairements qu'à l'obscurité. Le rapport de la résistance série $\frac{\text{Rs (obscurité)}}{\text{Rs (éclairé)}}$ varie légèrement de 1 à 2 pour le module vierge au module stressé par un courant inverse de 40mA.

2.6 Le facteur d'idéalité des cellules vierges et stressées électriquement

Dans les deux cas de stress électrique, à l'obscurité et sous éclairement, le facteur d'idéalité, A, mesuré à l'obscurité, peut être estimé directement à partir des valeurs expérimentales des courants et tensions en calculant la pente de la partie linéaire des caractéristiques log I(V), correspondant à la réponse en l'absence des effets directs des résistances série et shunt.

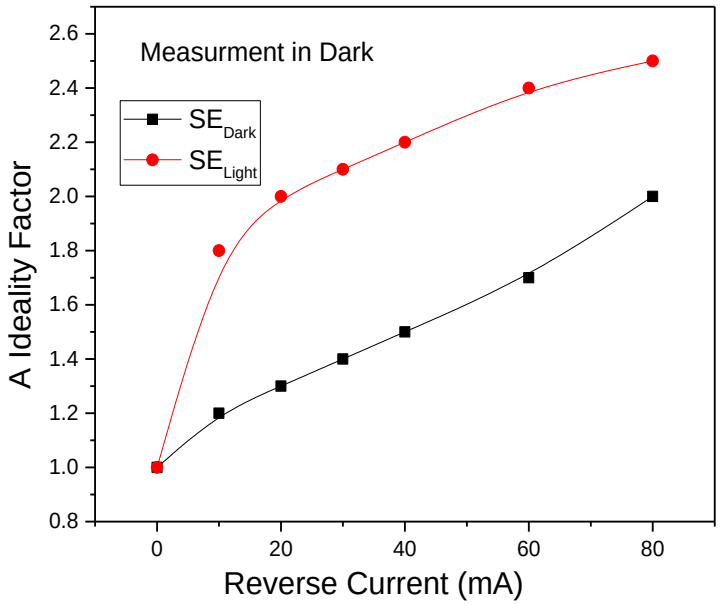


Figure 18: Facteur d'idéalité (A) = fct (I) $_{SE\ Dark\ \&\ Light}$ mesuré à l'obscurité

La figure 18 montre le tracé du facteur d'idéalité, mesuré à l'obscurité, en fonction du stress électrique à l'obscurité et sous éclairement. Nous observons que le facteur d'idéalité démarre à 1 pour le module vierge et augmente avec le stress électrique appliqué. Cette augmentation est quasi proportionnelle à la valeur du courant inverse injecté à l'obscurité mais lors du stress électrique sous éclairement, le facteur d'idéalité augmente de façon beaucoup plus importante dès le premier stress induit par 10mA et ne possède plus ce comportement proportionnel. Cette augmentation du facteur d'idéalité est donc directement liée à la présence du photo-courant facilitant l'apparition de défauts importants dans le module facilité par l'éclairement spécialement lorsqu'il atteint les hauts niveaux de stress électrique. Ce comportement du facteur d'idéalité valide l'analyse des caractéristiques I(V) que nous avons présentée précédemment dans laquelle nous avons montré que la pente des caractéristiques diminue avec le stress électrique de ce qui augmente le facteur d'idéalité en fonction du stress.

2.7 Etude des caractéristiques C(V) des cellules vierges et stressées électriquement

2.7.1 Principe de la méthode C(V)

La mesure C(V) est une technique mise au point dès le début des années 1960. Elle est très utilisée dans l'industrie de la microélectronique pour tester, comparer qualitativement et

ajuster les différentes technologies, notamment les procédés de dopage et d'oxydation, ainsi que pour qualifier de façon indirecte sur la base de modèles, les défauts dans les structures à semi-conducteurs. Cette technique consiste en premier lieu à mesurer expérimentalement la capacité différentielle de la structure étudiée en fonction de la tension de polarisation qui lui est appliquée. Elle consiste en second lieu à confronter les résultats expérimentaux à des modèles physiques, comme le modèle à deux diodes considéré dans ce travail afin d'extraire des paramètres électriques variés comme le potentiel de contact ou encore la distribution des charges piégées dans la structure [17, 18].

La méthode C(V), est une méthode simple, rapide et à priori non-destructive de mesures indirectes de la concentration des défauts dans une structure semi-conductrice permettant de faire un suivi de l'évolution des charges dans le temps ou un test statistique sur un même composant en variant des paramètres particuliers comme nous le faisons dans ce travail en variant l'intensité du stress des modules photovoltaïques étudiés. Elle permet d'obtenir des informations sur les différentes caractéristiques électriques telles que le niveau de dopage des impuretés et la tension seuil de la structure étudiée.

La variation de la tension appliquée aux bornes d'une jonction PN engendre une variation du champ électrique dans la zone de déplétion et par conséquent une variation de la longueur de cette zone.

Nous présentons dans les paragraphes suivants, la démarche à suivre pour obtenir la relation entre la largeur de la zone de charge d'espace (W) et la capacité.

La différence de potentiel aux bornes de la jonction est exprimée par la relation suivante [19] :

$$V_n - V_p = \frac{q}{2\varepsilon}(N_d\, W_n^2 + N_a\, W_p^2) \qquad (3)$$

Avec q la charge élémentaire, ε la permittivité relative du matériau, N_d, N_a les concentrations de dopage, W_n et W_p les largeurs de la zone de charge d'espace coté n et p respectivement. Si la jonction n'est pas polarisée, la tension au borne de la jonction, $V_d = V_n - V_p$. Si la jonction est polarisée par une tension V, nous avons $V_d - V = V_n - V_p$ avec V positive pour une polarisation directe et négative pour une polarisation inverse.

Considérons le cas d'une polarisation inverse de valeur absolue V_i. Dans ce cas l'équation 3 s'écrit :

$$V_d + V_i = \frac{q}{2\varepsilon}(N_d\, W_n^2 + N_a\, W_p^2) \qquad (4)$$

Dans le cas d'une jonction p^+n ($N_a >> N_d$), la largeur de la zone de charge d'espace se réduit à celle de la région la moins dopée ($W=W_n + W_p \sim W_n$) et la relation (4) devient :

$$V_d + V_i = \frac{qN_d}{2\varepsilon} W_n^2 (1 + \frac{N_a}{N_d}) \sim \frac{qN_d}{2\varepsilon} W_n^2 \qquad (5)$$

$$W_n = (\frac{2\varepsilon}{qN_d}(V_d + V_i))^{\frac{1}{2}} \qquad (6)$$

Cette relation montre qu'une variation dV_i de la polarisation V_i entraine une variation dW_n de la largeur de la zone de charge d'espace dans la région de type n,

$$dW_n = \frac{1}{2}(\frac{2\varepsilon}{qN_d})^{\frac{1}{2}} (V_d + V_i)^{-\frac{1}{2}} dV_i \qquad (7)$$

Et par suite une variation dQ de la charge développée dans cette région :

$$dQ = qN_d S dW_n \qquad (8)$$

Où S représente la section de la jonction. Compte tenu des relations (6) et (7), la relation (8) peut s'écrire :

$$dQ = \frac{\varepsilon S}{W_n}\, dV_i \qquad (9)$$

Ainsi une variation dV_i de la tension inverse produit une variation dQ de la charge d'espace proportionnelle à la variation de la tension. La jonction p^+n polarisée en inverse se comporte donc comme un condensateur de capacité dynamique. Cette capacité C_t est appelée capacité de transition de la jonction et s'écrit :

$$C_t = \frac{\varepsilon S}{W_n} \qquad (10)$$

Cette équation montre la dépendance inversement proportionnelle de Ct avec la largeur de la zone de déplétion W.
En explicitant W_n à partir de la relation (6), cette capacité s'écrira finalement :

$$C_t = S(\varepsilon\, q \frac{N_d}{2})^{1/2} / \sqrt{V_d + V_i} \qquad (11)$$

La relation (11) montre que la capacité de transition varie avec la tension inverse ($1/\sqrt{V_d + V_i}$).

A partir de l'équation 11, l'analyse de Mott-Schottky, montre la variation de $1/C_t^2$ en fonction de la tension de polarisation V_i, qui s'écrit :

$$\frac{1}{C_t^2} = (V_d + V_i)\frac{2}{S^2\,\varepsilon\,q\,N_d} \qquad (12)$$

La relation $(1/C^2)$ = fct (V) est l'équation d'une droite en fonction de V_i. Dans le cas d'une cellule, l'intersection de cette droite avec l'axe des abscisses donne la valeur du potentiel de diffusion, V_d et l'intersection avec l'axe des ordonnées permettront de calculer N_d. Dans le cas de nos caractérisations, nous avons tracé les caractéristiques $(1/C^2)$ = fct (V) pour les différentes valeurs de stress. Néanmoins, nous n'avons pas calculé les valeurs de N_d car nos modules étant constitués d'un assemblage de cellules en série et parallèle, ils ne sont pas constitués d'une jonction unique comme considérée dans le modèle de Mott-Schottky. De plus, les modules présentent des capacités parasites additionnelles dues aux connections entre les cellules ce qui apporte une contribution difficilement évaluable.

2.7.2. Méthode de mesure

Nous avons établi la caractéristique C(V) des cellules photovoltaïques en utilisant un pont d'impédance (appelé également LCR-meter) HP 4192A interfacé à un ordinateur sur lequel est implanté un programme Labview (Figure 19) gérant l'expérience. À partir de ce programme, l'intervalle requis de mesure, le nombre de points à mesurer et la limitation en tension seront définies.

Durant cette expérience, les courbes de C(V) ont été mesurées à une fréquence de 1MHz, pour une tension appliquée variant dans une plage allant de -35 V à 20 V, par pas de 3V (Figure 19). Le courant injecté varie entre 10 mA et 70 mA.

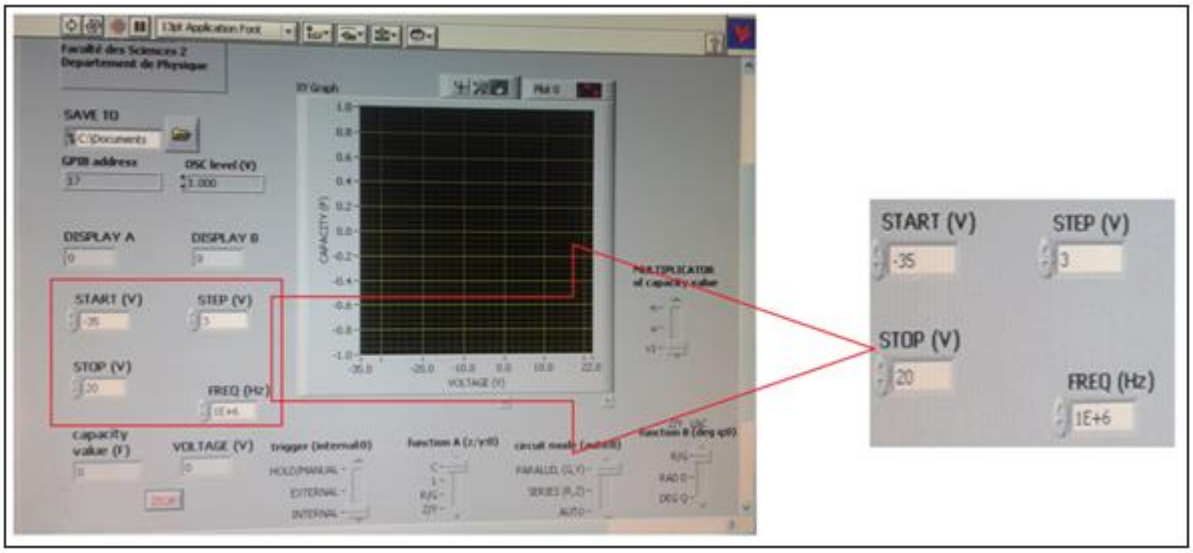


Figure 19: L'écran principal du programme de pilotage des mesures C(V) sous Labview

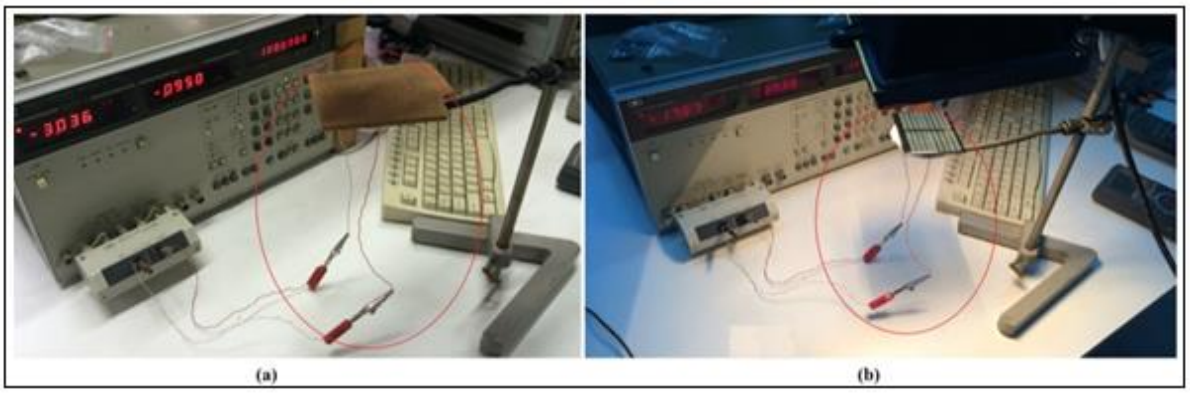


Figure 20 : Caractéristiques C(V) : (a) à l'obscurité (Branche SE1-1); (b) sous éclairements (Branche SE1-2)

2.7.3 Les caractéristiques C(V) post-stress électrique à l'obscurité-Branche SE1

- Branche SE1-1 : Mesurées à l'obscurité

Les caractéristiques C(V) post-stress électrique à l'obscurité et mesurée à l'obscurité (SE1-1) sont présentées dans la figure 21.

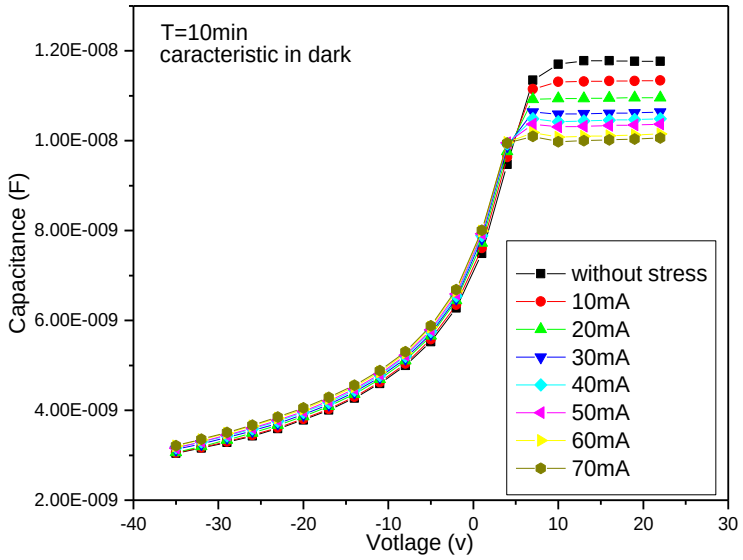


Figure 21 : C = fct(V) $_{Dark}$ post-stress électrique à l'obscurité déterminé à l'obscurité (SE1-1).

Nous pouvons voir dans la figure 21, que la capacité du module diminue avec l'augmentation de la tension inverse et que la capacité est faiblement influence par l'intensité du stress électrique. Néanmoins comme indiqué par la courbe C(I_{stress}) dans le mode direct, nous observons une forte dépendance avec le courant injecté au moment du stress entrainant une saturation de la valeur de la capacité.

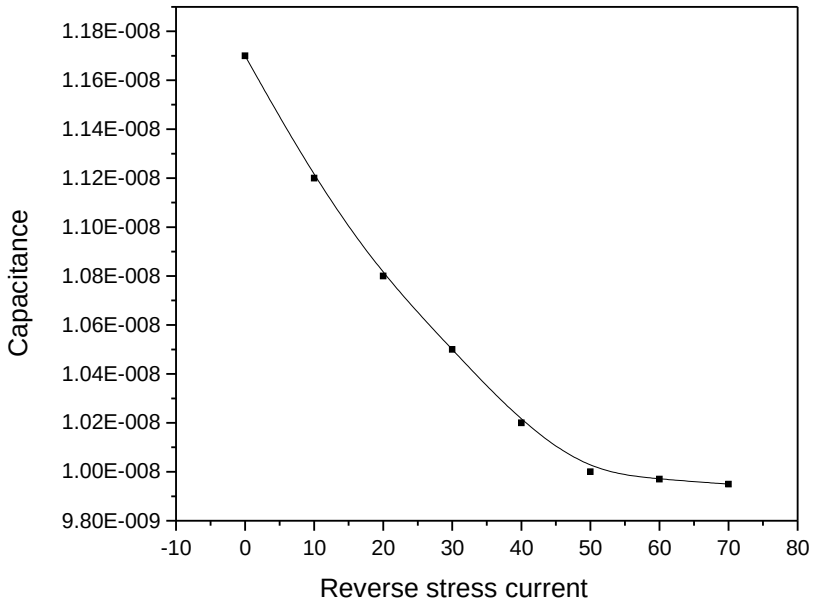


Figure 22: C = fct(V) $_{Dark}$ en mode direct post-stress à l'obscurité mesuré à l'obscurité (SE1-1).

Ce comportement de la capacité en mode direct confirme que l'effet du stress électrique influence dès qu'il est présent, même de faible intensité, le fonctionnement des modules.

En mode inverse, nous avons tracé les caractéristiques $1/C^2$ figure 23 comme proposé par le modèle de Mott-Schottky, équation 12.

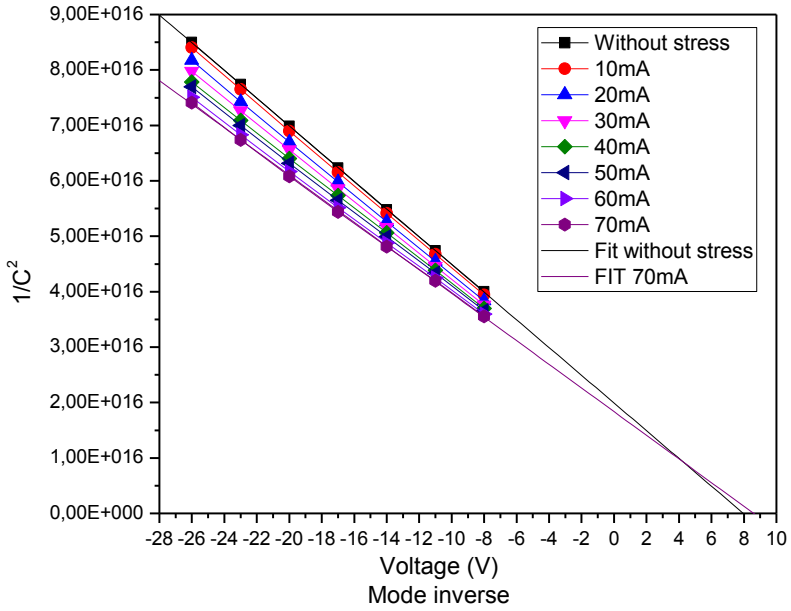


Figure 23 : $(1/C^2) = fct(V)_{Dark}$ post-stress à l'obscurité mesuré à l'obscurité (SE1-1).

Nous remarquons bien le comportement linéaire des caractéristiques, inversement proportionnelle à la tension de polarisation. Nous avons représenté la courbe d'ajustement linéaire des caractéristiques pour le cas de la cellule vierge puis stressée avec un courant de 70mA. Nous avons trouvé des valeurs de tension à l'intersection avec l'axe des abscisses très proches pour le module vierge et pour le module stressé égales à 8V et 8.3V, respectivement. Ces valeurs correspondent à la somme des potentiels de diffusion provenant des cellules en série mais en étant influencé par les cellules en parallèle dans la valeur de la capacité équivalente.

- Branche SE1-2 : Mesurées sous éclairement

Les caractéristiques C(V) post-stress électrique à l'obscurité mesurée sous éclairements (SE1-2) sont représentées dans la figure 24.

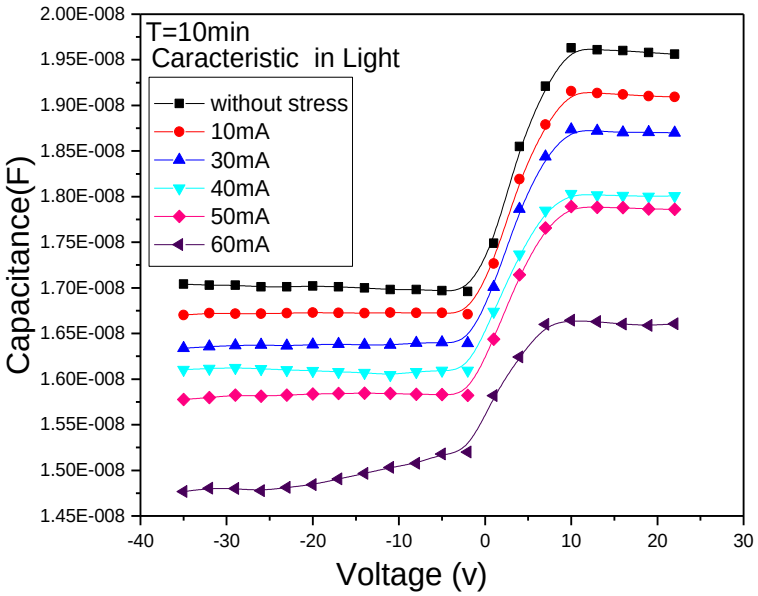


Figure 24 : C = fct(V) $_{Light}$ post-stress électrique à l'obscurité mesuré sous éclairement (SE1-2).

Dans les deux modes, direct et inverse, nous remarquons une diminution de la capacité en fonction de la valeur du courant inverse injecté au moment du stress. Cette diminution de la capacité avec le stress électrique est associée à la quantité de centres de recombinaisons et de piégeages qui augmentent avec le courant inverse injecté au moment du stress.

Lorsque nous comparons les résultats obtenus lors de mesures à l'obscurité, figure 21 et sous éclairement, figure 24, nous pouvons constater que les réponses sont nettement différentes en forme et intensité. Cela montre que le photo-courant induit par l'éclairement au moment des mesures influe directement sur les caractéristiques mesurées des modules PV en fonction du stress appliqué.

2.7.4 Les caractéristiques C(V) post-stress électrique sous éclairement-Branche SE2

Dans une deuxième série de mesures, les caractéristiques C(V) post-stress électrique sous éclairement (10, 20, 30klux) pour des courants inverses jusqu'à 30 mA ont été mesurées à une

fréquence de 1 MHz. Les caractéristiques C(V) déterminées à l'obscurité et sous éclairement sont représentées dans les figures 25 et 26 respectivement.

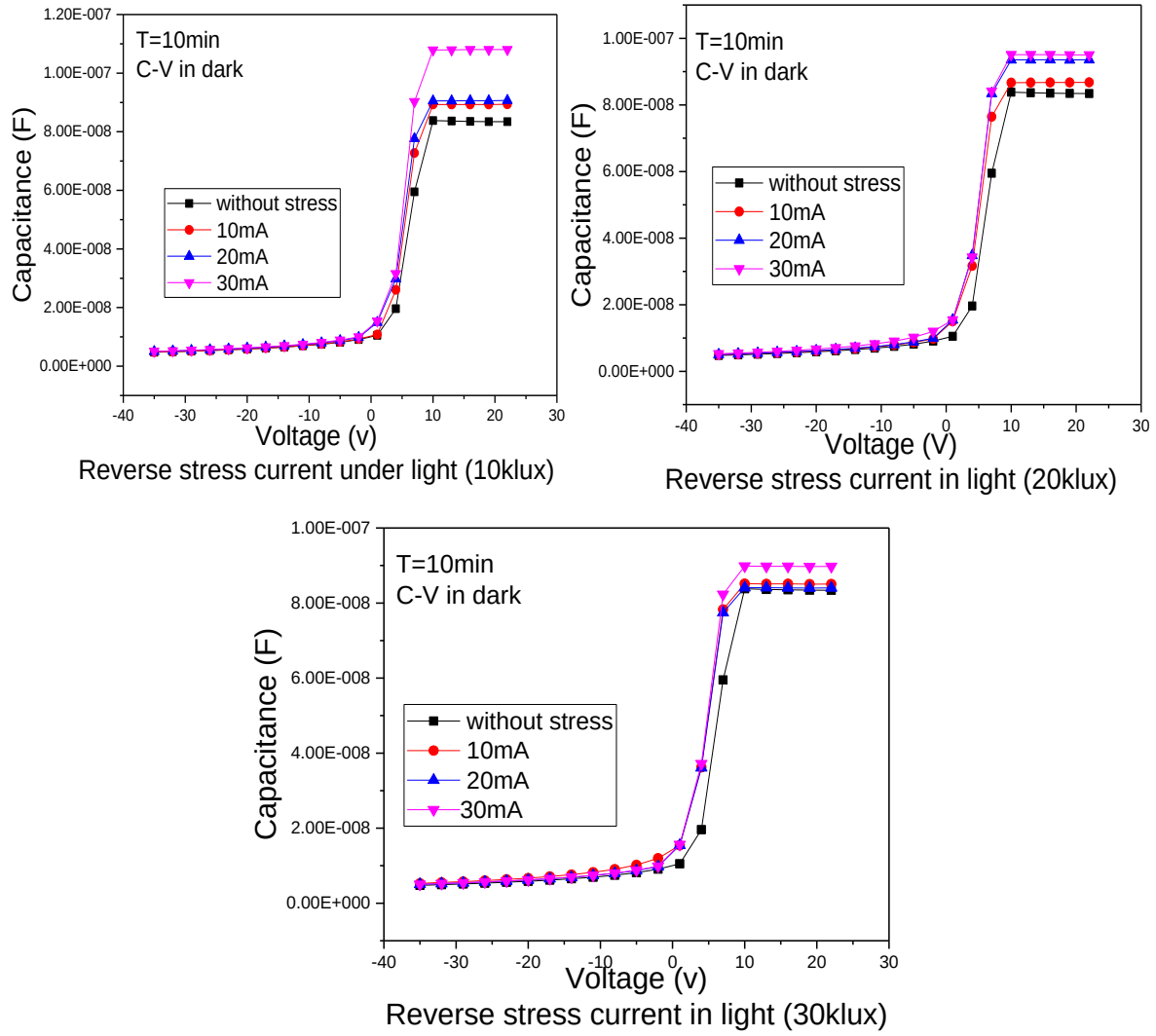


Figure 25 : C = fct(V) $_{Dark}$ post stress électrique sous éclairement déterminé à l'obscurité (SE2-1).

Les trois sous-figures 25 montrent le même comportement des caractéristiques C(V) particulièrement dans le mode inverse. Ce comportement dans le mode inverse avait déjà été observé, figure 21 lorsque le stress avait été appliqué à l'obscurité. Dans le mode direct, nous pouvons observer l'influence de l'illumination et donc de la présence d'un photo-courant au moment du stress. En effet, si l'on observe la différence entre les caractéristiques enregistrées pour des courants inverses de stress inférieurs à 20mA et celles pour 30mA, nous remarquons clairement que la contribution du stress électrique sur la capacité du module est nettement plus importante lorsqu'il est généré sous illumination à 10klux plutôt qu'à 30klux.

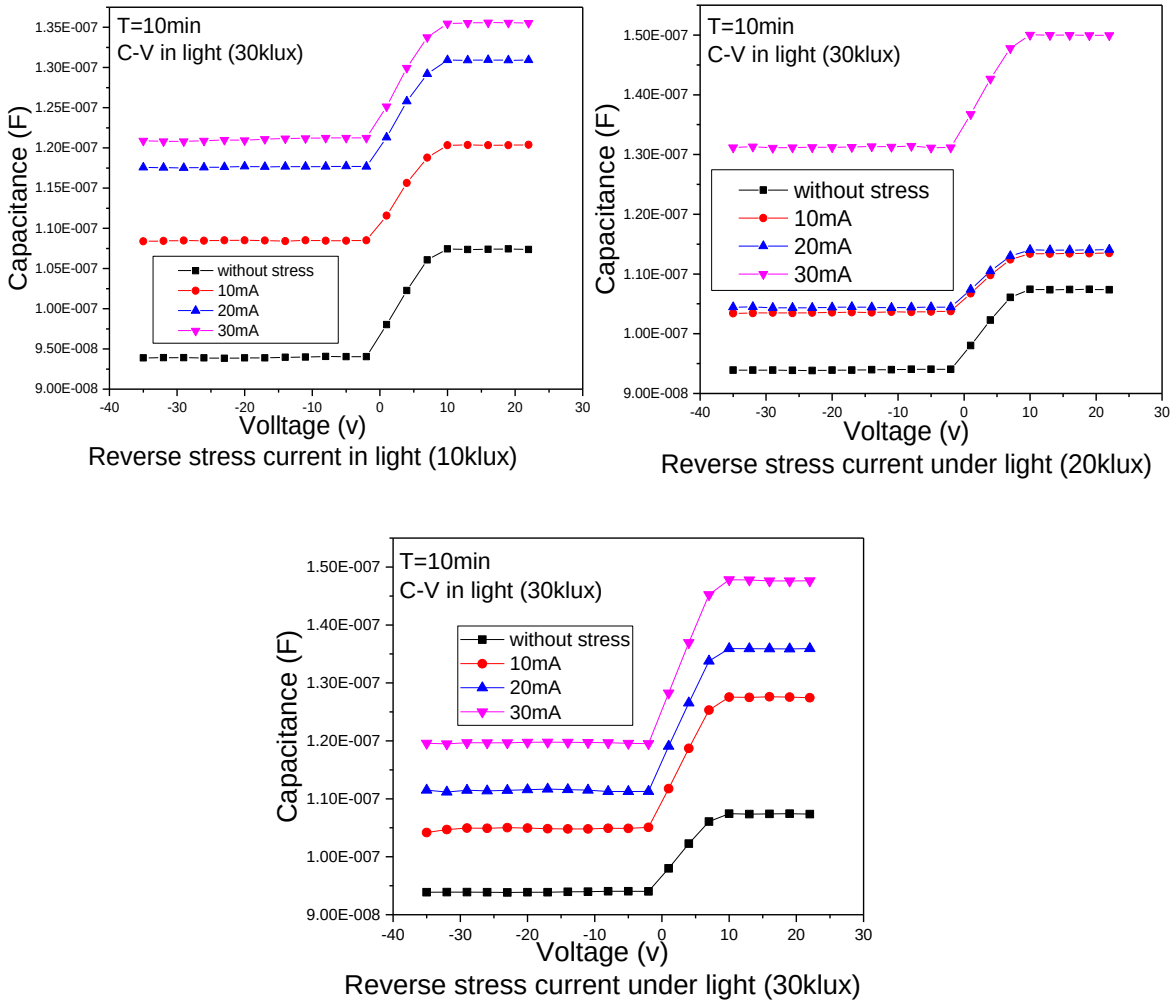


Figure 26: C = fct(V) $_{Light}$ post stress sous éclairement déterminé sous éclairement (SE2-2).

Que les mesures soient faites à l'obscurité, figures 25 (SE2-1) ou sous éclairement, figures 26 (SE2-2) il est bien clair que le stress électrique sous éclairement apporte des modifications importantes de la capacité du module. Les trois sous-figures 25 et les trois sous-figures 26 montrent un décalage des caractéristiques C(V) avec l'augmentation du stress électrique.

Néanmoins, sous éclairement, le photo-courant apporte une contribution supplémentaire amplifiant le nombre de charges en augmentant ainsi de façon significative la valeur de la capacité.

Nous remarquons que l'effet du stress électrique sur la capacité du module est nettement plus important lorsqu'il est placé sous éclairement à 10klux plutôt qu'à 30klux.

En mode inverse, nous avons tracé les caractéristiques $1/C^2$ figure 26 comme proposé par le modèle de Mott-Schottky, équation 12.

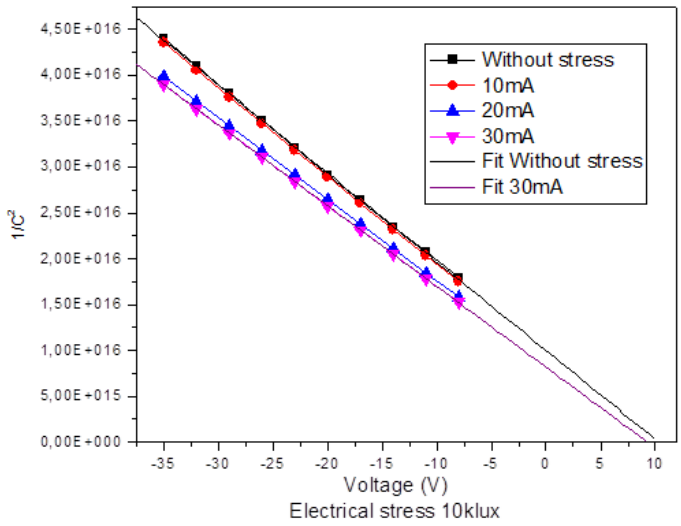


Figure 27: $(1/C^2) = fct(V)_{Dark}$ post-stress sous éclairement mesuré à l'obscurité (SE1-1).

Même sous éclairement, le modèle de Mott-Schottky est respecté et la dépendance en tension de $1/C^2$ est bien linéaire. De nouveau les valeurs des intersections de ces droites avec l'axe des abscisses sont du même ordre de grandeur avec le stress à l'obscurité et sous éclairement.

Dans ce qui suit, on modélise ces phénomènes par un modèle qui prend en considération l'ensemble de ces variations dues aux défauts induits directement et indirectement par une contrainte extérieure appliquée sur la cellule. Ce modèle tient compte de l'effet du photo-courant sur l'activation des centres de piégeages induits par la contrainte électrique.

2.7.5. Les capacités C_{Ph} et $C_{(L-D)}$ Définitions et études comparées

Pour comparer l'effet de l'injection du courant inverse à l'obscurité et sous éclairement, et pour différencier la contribution du photo-courant au moment du stress et l'effet du stress électrique seul et à partir des résultats expérimentaux, nous avons calculé, les capacités relatives à chacun de ces effets.

Nous avons calculé la capacité directement liée à l'éclairement au moment du stress par l'équation suivante :

$$C_{Ph}(V) = C_{Light}(V) - C_{Dark}(V) \qquad (13)$$

En utilisant les résultats expérimentaux mesurés à l'obscurité dans les branches $SE_{1,1}$ et $SE_{2,1}$. Afin de ne considérer qu'une valeur de stress nous avons considéré uniquement le cas expérimental ou les caractéristiques ont été enregistrées pour un courant de stress de 10mA. La caractéristique $C_{Ph}(V)$ a été ainsi déterminée pour les différentes valeurs d'éclairement et représentée figure 28.a.

Connaissant la capacité directement liée à l'éclairement, équation 11, il est maintenant possible de déduire, pour une valeur de courant injecté imposée, des caractéristiques C(V) dans la branche $SE_{2,1}$, la capacité uniquement liée au stress électrique, C_{SE} définie par :

$$C_{SE}(V) = C(V) - C_{Ph}(V) \qquad (14)$$

La caractéristique $C_{SE}(V)$ a été ainsi déterminée pour les différentes valeurs d'éclairement et représentée figure 28.b. et comme précédemment, nous avons considéré un courant inverse injecté de 10mA.

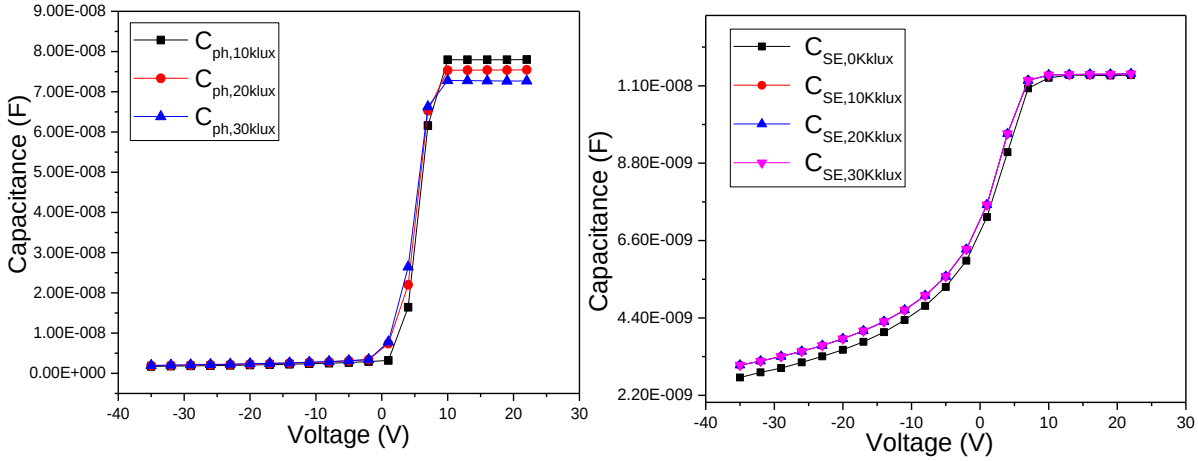


Figure 28 : (a) C_{Ph}= fct(V) et (b) C_{SE} = fct(V) pour un courant inverse injecté = 10mA.

Nous constatons que lorsque la caractéristique relative au stress électrique, figure 28.b. est calculée sous éclairement (branche SE2) par l'équation 13, nous obtenons la même caractéristique C(V), en amplitude et en forme que celle déterminée lors du stress électrique à l'obscurité (branche SE1), figure 21. Nous pouvons conclure de cette analyse que l'éclairement n'amplifie pas la création de défauts induits par le courant inverse lors du stress électrique. Cela signifie, qu'en mode de fonctionnement normal des modules éclairés, le stress électrique n'induira pas de défauts supplémentaires dans la structure que lorsque le

module est à l'obscurité. Ceci est confirmé par le fait que la contribution dans la valeur globale de la capacité due à l'éclairement de l'ordre de 80nF est prépondérante sur celle du stress électrique, de l'ordre de 12nF, (valeurs considérées pour une tension de 20 volts).

Par ailleurs, nous n'avons pas représenté dans ce mémoire le même traitement de nos caractéristiques C(V) lors des mesures sous éclairement (branches $SE_{1,2}$ et $SE_{2,2}$). En effet, ces résultats ne sont pas directement exploitables pour en extraire la contribution uniquement du stress électrique car l'éclairement apporte, comme au moment du stress, une contribution prépondérante lors des mesures. L'extraction de la caractéristique $C_{SE}(V)$ n'est alors pas significative lorsqu'elle est extraite de mesures sous éclairement.

Enfin, nous tenons à signaler que par cette dernière méthode, en supprimant la contribution photovoltaïque de la contribution totale lorsque le stress électrique est appliqué en présence d'un éclairement, la détermination de $C_{SE}(V)$ ayant été trouvé identique à la détermination directe de C(V) lorsque le stress est appliqué à l'obscurité valide les techniques et méthodes expérimentales utilisées dans ce travail.

2.8 Observations complémentaires de l'effet du stress électrique sur la structure des cellules

Afin d'analyser les modifications structurales liées aux défauts de fonctionnement que peut engendrer l'ombrage et donc le stress électrique, nous avons observé au microscope à balayage électronique, MEB ou SEM (scanning électron microscope) la cellule avant et après injection du courant inverse à l'origine du stress. Le SEM (Scanning Electron Microscopy ou la microscopie électronique à balayage (MEB)) est une technique de microscopie électronique capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon en utilisant le principe des interactions électrons-matière. Elle est utilisée dans notre étude pour comparer la surface détruite et non détruite après l'application du stress (100mA de stress).

Les clichés de la cellule sont reportés dans la figure 29. Ces clichés montrent l'interface entre la couche supérieure de la cellule (l'encapsulation) et le silicium qui correspond aux zones possible de rupture structurale.

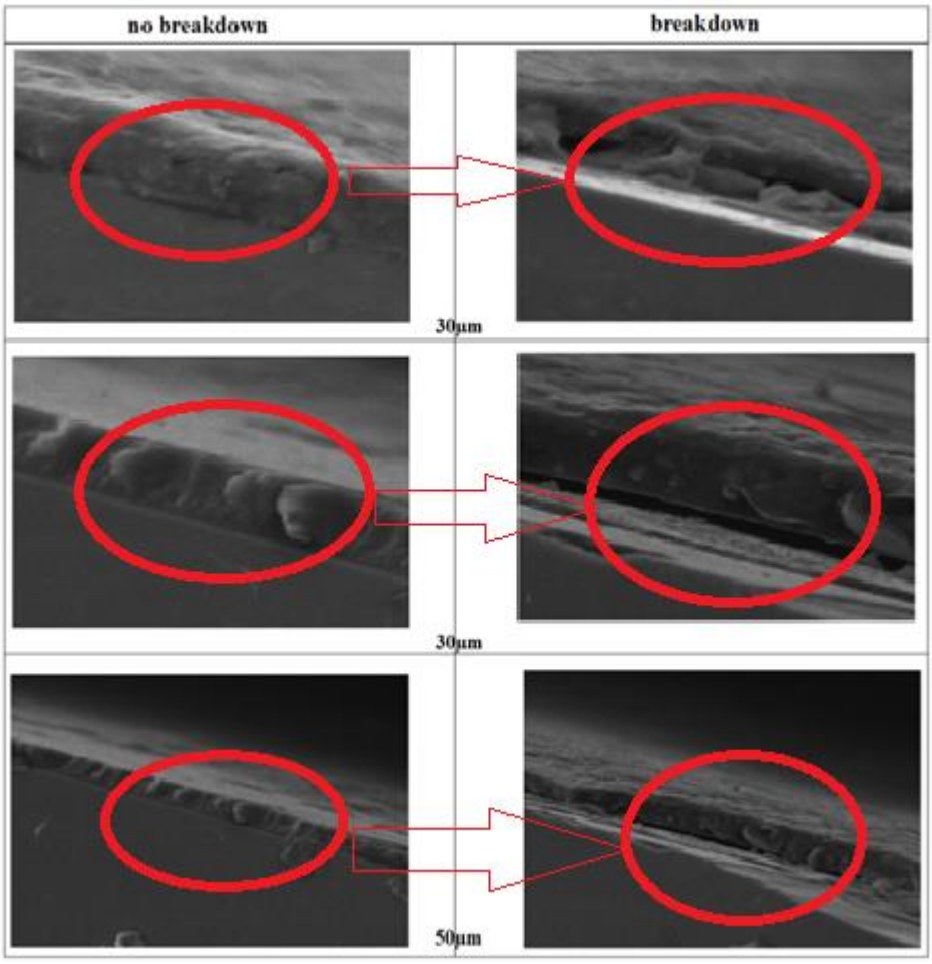


Figure 29: Scanning électron microscope (SEM) d'une zone détruite et non détruite

Sur les clichés SEM des cellules prises sur la tranche, pour les cellules stressées électriquement nous pouvons observer des taches brillantes sur les zones endommagées, ressemblant à de petites perles. Tel lié à montrer que ces boules correspondent à des oxydes concentrés [20]. Nous remarquons également dans les clichés SEM, des flocons ronds apparaissant sur la couche de surface des modules ayant subi un stress électrique traduisant ainsi la présence des dommages induit par le stress.

Les formes, la position et les superficies des endroits endommagés sont directement lié à la quantité du stress appliqué [20].

Les régions affectées sont observées clairement par l'étude SEM. En effet, nous observons des surfaces tachées correspondant aux régions ayant subies une transformation morphologique dû au passage du courant inverse. Le passage d'un courant inverse entraine une élévation globale de la température de la cellule et principalement à l'endroit où les

résistances sont les plus élevées et donc en surface. De ce fait, des points chauds vont apparaître en étant principalement localisés à l'interface des couches pouvant induire une délamination de la couche de surface comme montrée par les défauts visibles sur les clichés SEM. Ces photos enregistrées en SEM sont donc un bon indicateur qualitatif de l'endommagement de la cellule et en conséquence de la dégradation des performances.

Dans les zones endommagées, on observe que les couches silicium se détachent la couche oxyde de protection du module comme montré dans les clichés SEM de la figure 29. Nous remarquons que c'est un autre genre de défaut que les défauts électroniques considérés jusqu'à présent dans ce manuscrit. Ces défauts macroscopiques sont localisés à la surface des modules et peuvent être considérés comme des « défauts externes » indirectement créent par le stress électrique, induisant un stress thermique des modules. En effet, ces défauts sont dus au passage du courant inverse, ce dernier augmente la température des modules pouvant aller jusqu'à créer des tâches de surface par brulure. Ces défauts sont directement rattachés au type des matériaux utilisés dans la fabrication de l'encapsulation et donc à la qualité des modules utilisés. Ainsi, les études par microscopie à balayage peuvent être utilisées lors de tests destructifs des modules photovoltaïques pour différentes technologies mais ne permettent pas d'explications sur l'origine intrinsèque de ces défauts.

2.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié l'effet de l'injection d'un courant inverse induisant un stress électrique sur la performance d'un module photovoltaïque. Nous avons commencé ce chapitre par une présentation de la partie expérimentale de notre étude. Après avoir présenté les bases théoriques, en particulier le modèle à deux diodes et sept paramètres permettant d'apporter une grande précision dans l'analyse des résultats obtenus sous différentes conditions de stress et de mesure, les méthodes de caractérisation des paramètres I(V) et C(V) ont été décrites brièvement. Après l'injection de différentes valeurs du courant inverse générant le stress électrique, nous avons déterminé les caractéristiques I(V), C(V) lors de mesures effectuées à l'obscurité et sous éclairement. Les valeurs des résistances shunt et série ont été également données grâce à un programme que nous avons développé dans l'environnement Matlab. Les différents résultats et les paramètres électriques obtenus ont ensuite été analysés et discutés.

L’analyse présentée dans ce chapitre, qualifie l’influence du stress électrique sur les performances des modules photovoltaïques.

Nous avons montré que le photo-courant présent au moment du stress électrique sous éclairement et au moment des mesures post-stress électrique sous éclairement ne modifie pas de façon notable la contribution du stress que l’on peut déterminer dans la partie directe des caractéristiques I(V). Contrairement à cela, ce photo-courant modifie de façon significative l’influence du stress électrique sur les caractéristiques en inverse. L’analyse détaillée par le modèle à deux diodes a permis de montrer l’influence de l’éclairement au moment du stress et au moment des mesures dans la valeur des courants de diffusion et de recombinaison et dans les valeurs des résistances shunt et série. En effet, vérifié par la forte augmentation du facteur d'idéalité avec la valeur du stress, directement liée à la présence du photo-courant montre que l’éclairement favorise l’apparition de défauts importants dans les modules stressés. Cette augmentation de l’effet du stress électrique est visible dans nos différents résultats expérimentaux (I(V), C(V), A) dès l’injection d’un faible courant de stress inverse. Il s’en suit une saturation du nombre de défauts aux fortes valeurs de stress. Par contre il ne nous a pas été possible de déterminer la concentration de défauts de façon précise par les caractérisations C(V), en traçant par exemple la caractéristique de Mott-Schottky, car la structure du module associant un grand nombre de cellules en série et parallèle ne permet pas d’appliquer directement ce modèle. Cette problématique peut constituer une perspective importante à ce travail.

Chapitre 3 :

Influence du stress thermique sur les caractéristiques et les paramètres des modules photovoltaïques

3.1 Introduction

Les changements de la température dans un module PV peuvent être attribués à plusieurs facteurs externes tels que la température externe ambiante et due à l'ensoleillement, l'humidité et le vent, mais également, à des facteurs internes tels que les courants inverses et de nombreux autres facteurs comme nous avons pu le constater dans le chapitre précédent. Plusieurs tests standards sont mis en œuvre pour évaluer ces changements [1], tels que (liste non exhaustive): la mesure des coefficients de température, la mesure de la température nominale d'utilisation des cellules, l'évaluation des performances et rendements dans des conditions de test standard ou à faible irradiation, la détermination visuelle des points chauds (hot-spot), les mesures de l'exposition aux UV, du cycle thermique, et les méthodes classiques météorologiques de mesures de température, de vent et d'humidité. [2-3]

Les résultats des tests expérimentaux sont, pour une part, ceux que nous avons précédemment présentés, confirmés par la littérature [4-8] et la pratique a montré que les paramètres et l'efficacité des modules photovoltaïques sont fortement affectés par les écarts de température. Quand la température d'un module augmente, le courant de court-circuit I_{sc} augmente légèrement, tandis que la tension en circuit ouvert V_{oc} diminue de façon importante [9-10]. Les variations des caractéristiques I(V) et donc P(V) et des paramètres de la cellule PV sont présentées soit sous forme de valeur soit de pourcentage en fonction de la variation de température par rapport à la température référence [11-12]. Pour des températures plus élevées ces variations induites par la température entraînent une diminution de la puissance maximale P_{max} que le module peut délivrer.

Après l'étude dans le chapitre précédent du stress électrique à l'obscurité et sous éclairement obtenu par injection de courant inverse et de son influence sur les caractéristiques et paramètres des cellules, le but de ce chapitre est d'évaluer les caractéristiques et paramètres des modules PV en présence d'un stress thermique. Afin de mieux évaluer les différentes conséquences des stress électrique et thermique, les mêmes conditions expérimentales d'éclairement que dans le chapitre précédent sont reprises ici. Nous commençons ce chapitre par une étude expérimentale détaillée où nous présenterons la méthode d'évaluation du stress thermique à l'obscurité et sous éclairement que nous avons utilisée.

3.2 Bases théoriques et expérimentales de l'étude

Les bases théoriques générales et expérimentales de l'étude ont déjà été présentées dans le chapitre précédent au paragraphe 2.1. Néanmoins des précisions complémentaires doivent être apportées car nécessaires à l'étude en températures des modules photovoltaïques ou lorsqu'ils sont stressés thermiquement.

Dans un semi-conducteur, la tension de diffusion correspond à la différence de potentiel existant aux bornes de la ZCE. Cette tension permet un équilibre entre les forces de diffusion des deux zones p et n. Pour calculer cette tension, il est nécessaire de considérer les conditions d'équilibre définis par le fait que le courant de chaque type de porteurs est nul [13]. Ainsi, nous pouvons écrire la densité du courant de la manière suivante :

$$J_n = \mu_n \left(enE + KT \frac{dn}{dx} \right) = 0 \qquad (1)$$

$$J_p = \mu_p \left(epE - KT \frac{dp}{dx} \right) = 0 \qquad (2)$$

Avec J_n la densité du courant des électrons, J_p la densité du courant des trous, e est la charge élémentaire de l'électron. On peut écrire les équations (1) et (2) de la façon suivante :

$$\frac{dn}{dx} = -\frac{e}{KT} E\, dx = \frac{e}{KT}\, dV \qquad (3)$$

$$\frac{dp}{dx} = \frac{e}{KT} E\, dx = -\frac{e}{KT}\, dV \qquad (4)$$

L'intégration sur toute la ZCE nous donne :

$$Ln \frac{n(x_n)}{n(x_p)} = \frac{e}{KT} (V_n - V_p) = \frac{e}{KT} V_d \qquad (5)$$

D'où la différence de potentiel entre la région N et la région P, c'est à dire la tension de diffusion V_d donnée par :

$$V_d = \frac{KT}{e}\, Ln\, \frac{N_a\, N_d}{n_i^2} \;\; ou \;\; V_d = \frac{KT}{e} \left[Ln(N_a\, N_d) - 2Ln\,(n_i) \right] \qquad (6)$$

N_a et N_d sont deux concentrations relatives aux impuretés « accepteurs et donneurs » données respectivement par :

$$N_a = 2\left(\frac{2\pi m_n^* KT}{h^2}\right)^{3/2} \quad (7)$$

$$N_d = 2\left(\frac{2\pi m_p^* KT}{h^2}\right)^{3/2} \quad (8)$$

Sachant que l'expression de la concentration de porteurs intrinsèques (n_i) :

$$n_i = \sqrt{N_a\, N_d}\, exp\left(-\frac{E_g}{2KT}\right) \quad (9)$$

Et en combinant les trois dernières relations nous trouvons [14] :

$$n_i(T) = 2\left(\frac{2\pi KT}{h^2}\right)^{3/2}\left(m_n^* m_p^*\right)^{3/2} exp\left(\frac{-E_g}{2KT}\right) \quad (10)$$

L'évolution de la concentration des porteurs avec la température, équation 10 est montrée à la figure 1.

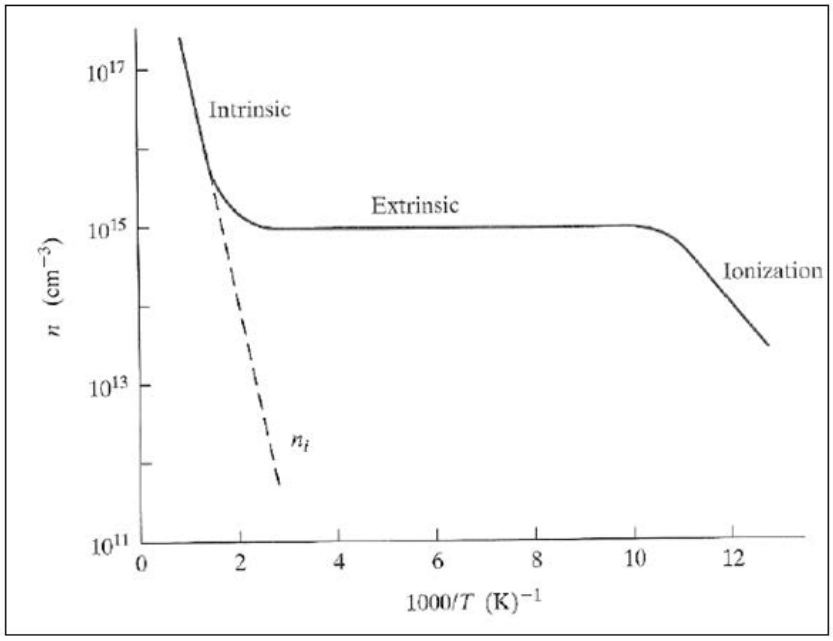


Figure 1 : Variation de la concentration des porteurs en fonction de 1000/T [14]

La courbe de la concentration des porteurs est divisée en trois régimes : Ionisation, extrinsèque et intrinsèque.

Aux basses températures, la concentration des porteurs est liée à celle des dopants ionisés. Ainsi en augmentant la température, cette concentration augmente par ionisation des dopants

(régime d'ionisation) jusqu'à ce que tous les dopants s'ionisent et le régime extrinsèque est atteint. En allant vers des températures plus élevées, la concentration des porteurs de charges devient plus grande que la quantité de dopants introduits. Ceci est obtenu par l'ionisation des porteurs intrinsèques (régime intrinsèque) qui est une conséquence indésirable dans les structures des modules solaires [15].

3.3 Méthodologie expérimentale

Les résultats en température ont été obtenus avec des modules photovoltaïques silicium monocristallin commerciaux de dimensions 80x60 mm, d'une puissance de 0.8W obtenue sous une tension de 4,8 V et un courant nominal égal à 150 mA. Pour cette étude en température, ces modules photovoltaïques ont été placés séparément sous un stress thermique à l'obscurité et sous divers éclairements égaux à 10klux et 20klux. Puis les variations post-stress thermique des caractéristiques et paramètres ont été mesurés à température ambiante à l'obscurité et sous un éclairement égal à 30klux. Les températures utilisées lors du stress ont variées de 25°C à 125°C, par palier de 25°C ; la durée de chaque palier a été fixée à 10 min. Le maxima des températures utilisé dans nos études a été fixé par le fait qu'au-delà de cette température et quel que soit les conditions d'application du stress appliqué, à l'obscurité ou sous éclairement, les modules sont physiquement fortement dégradés et ne peuvent plus fonctionner en générateurs photovoltaïques stables.

L'organigramme de mesure est présenté dans la figure 2 avec une présentation des notations utilisées pour nommer les différentes branches et sous-branches. Ainsi, la partie expérimentale est composée de deux branches principales correspondant à la création du stress thermique (ST). Dans la première branche, ST1, lorsque la cellule est placée à l'obscurité et dans la deuxième branche, ST2 lorsque celle-ci est placée sous éclairement. Faisant suite à la création du stress thermique, dans chaque branche ST1 et ST2, les mesures des caractéristiques ont été réalisées à l'obscurité, ST1-1 et ST2-1, et sous un éclairement constant de 30klux, ST1-2 et ST2-2.

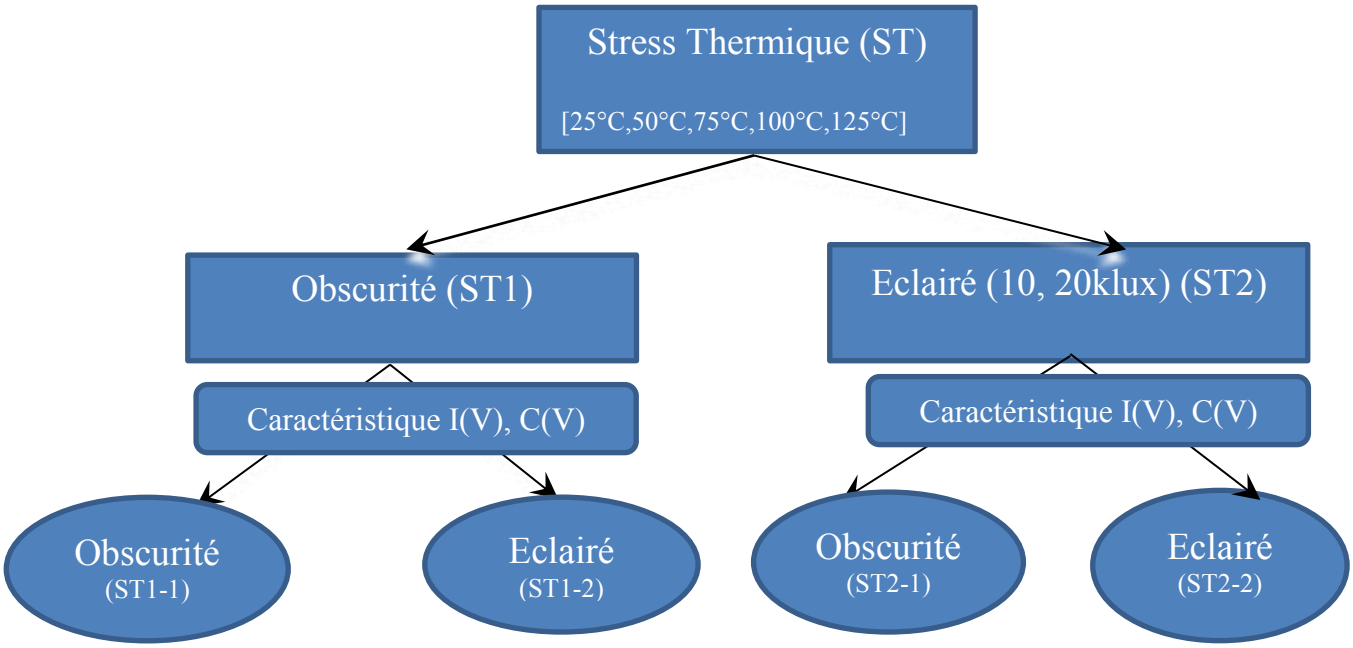


Figure 2 : Organigramme de la procédure expérimentale

Les mesures post-stress thermique nous ont permis de tracer les caractéristiques I(V) des modules vierges et stressés thermiquement. À partir de ces résultats de mesures et grâce à l'utilisation du programme développé sous Matlab/Simulink modélisant les modules par le modèle à deux diodes (voir chapitre précédent), nous avons obtenu les différents paramètres électriques des modules en fonctions de l'intensité du stress thermique appliqué. Ces paramètres sont la résistance shunt (R_{sh}), la résistance série (R_s), le courant de diffusion (I_{01}), le courant de recombinaison (I_{02}) et le facteur d'idéalité (A).

Pour que la création du stress thermique à l'obscurité (ST1) (figure 3.a), ou sous éclairement (figure 3.b), la cellule est mise dans un four clos en augmentant la température linéairement de 25°C à 125°C par pas de 25°C stabilisé par un régulateur de température (figure 4).

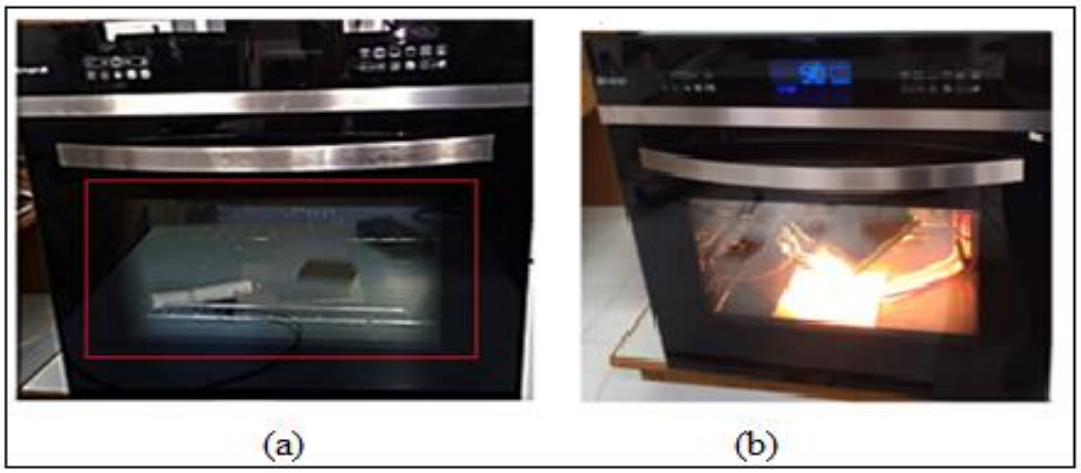


Figure 3 : Création du stress thermique (a) à l'obscurité et (b) sous éclairement

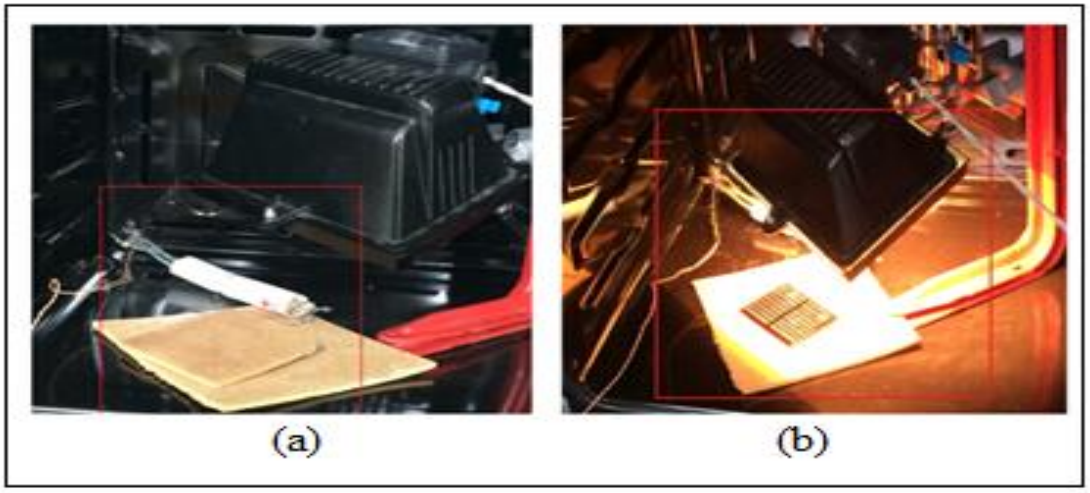


Figure 4 : Caractérisations électriques post-stress thermique des modules (a) à l'obscurité (b) sous éclairement

Figure 5 : Régulateur de température

Pour mesurer les caractéristiques et les paramètres à l'obscurité (ST1-1 et ST2-1) et sous éclairement (ST1-2et ST2-2) (figures 4), le même montage que celui présenté au chapitre 2

est utilisé avec sous éclairement, la cellule mise sous un projecteur halogène créant un flux lumineux mesuré de 30 klux.

Précision des mesures

Nous avons vu dans le chapitre précédent que la cause principale de l'augmentation de l'erreur systématique était liée à la mesure du flux lumineux et que les mesures électriques faites avec le Sourcemeter (SMU), n'apportent qu'une très faible contribution à cette erreur. Nous avons vu également que l'erreur systématique reste inférieure à l'erreur aléatoire. Dans le cas du stress thermique qui nous concerne ici, une contribution supplémentaire à l'erreur systématique est liée aux mesures de température. En fait, cette mesure de température de notre enceinte thermique est affichée au degré prêt. Ainsi, avec une incertitude égale à 0.5°C correspondant à la moitié du dernier chiffre significatif, nous obtenons une erreur relative, pour 50°C, égale à 1%. Cette contribution supplémentaire se rajoute aux autres erreurs systématiques dont la somme reste inférieure aux erreurs aléatoires. Si bien que dans cette étude de l'influence du stress thermique sur les propriétés des modules photovoltaïque, et comme précédemment dans le cas des études du stress électrique, nous considèrerons la plus grande des deux erreurs entre l'aléatoire et la systématique et nous estimons encore ici, que nos résultats sont donné avec une erreur relative meilleure que 5%.

3.4 Etudes post-stress thermique à l'obscurité-Branche ST1

La température variant de 25ºC à 125ºC a été appliquée à un module solaire, en fixant le temps à 10 min pour chaque dose de contrainte à l'obscurité ST1. Avant et après l'application du stress, les caractéristiques I(V) en fonction de la température ont été mesurées dans l'obscurité ST1-1 et ensuite sous éclairement ST1-2 (30klux) (cellule active) puis finalement tracées en échelle logarithmique.

3.4.1 Les caractéristiques I(V) post-stress thermique à l'obscurité-Branche ST1

Avant et après la contrainte thermique pour les différentes valeurs de celui-ci, les caractéristiques log I = fct (V) ont été mesurées lorsque le module est placé à l'obscurité, sous-branche ST1-1 et lorsque le module est illuminé avec un flux lumineux de 30klux, sous-branche ST1-2, tous deux représentés dans la figure 6.

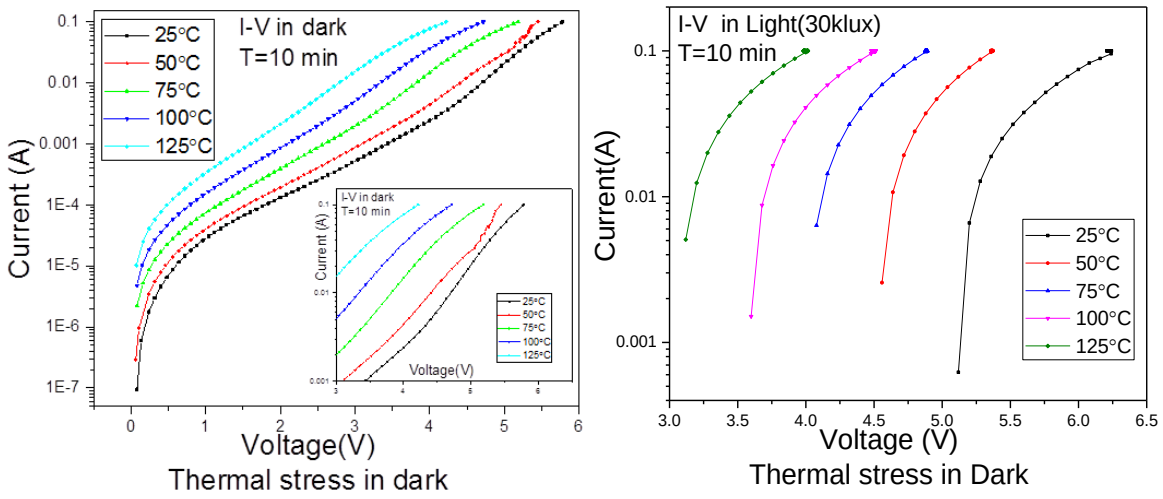


Figure 6: Log I = fct (V) $_{Dark\& Light}$ post-stress thermique à l'obscurité (ST1)
Insert : Log I= fct (V)$_{Dark}$ représenté avec la même échelle que I(V) mesurée sous éclairement

Dans la branche ST1-1, nous retrouvons la forme générale des caractéristiques I(V) précédemment observées pouvant être décrites par le modèle à deux diodes. L'évolution de ces caractéristiques avec l'amplitude du stress thermique est mise en évidence dans l'insert de la figure 6.a. tracé à la même échelle que les caractéristiques représentées dans la figure 6.b. Nous constatons que le décalage du courant dû à l'élévation de température par pas de 25°C pour une tension donnée, sont pour toutes les températures du même ordre de grandeur aux erreurs expérimentales près et l'on peut considérer une dépendance linéaire du courant avec la température de stress. Dans la branche ST1-2, nous observons ce même décalage en amplitude des caractéristiques que lors des mesures faites à l'obscurité. Ceci montre que le photo-courant induit par l'éclairement lors des mesures influe directement sur la valeur du courant mesuré mais n'amplifie pas les effets du stress thermique sur le courant de sortie du module PV.

À partir des caractéristiques I(V) expérimentales, nous avons relevé les valeurs de la tension de diffusion V_d et tracé dans la figure 7, son évolution en fonction de la température de stress.

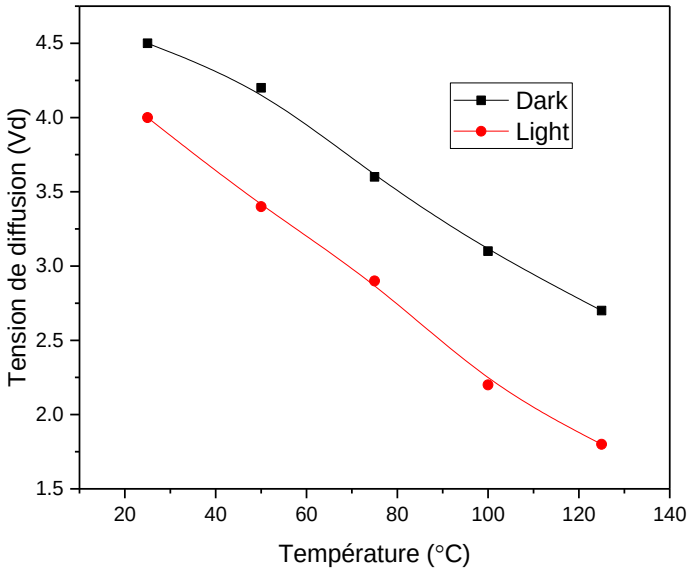


Figure 7 : Variation de la tension de diffusion en fonction de la température (ST1)

Lorsque la température de stress augmente de façon linéaire entre 25°C et 125°C, nous constatons une diminution monotone quasi-linéaire de V_d. L'équation 6, nous montre clairement que cette diminution de V_d est directement liée à l'augmentation de la concentration des défauts dans la jonction n_i avec la température.

Suivant la même démarche expérimentale mais en appliquant une tension inverse aux bornes du module, nous avons mesuré les courants traversant la jonction et tracé les caractéristiques log I_{Inv} = fct (V_{Inv}), représentées dans les figures 8 lors des mesures à l'obscurité et sous éclairement.

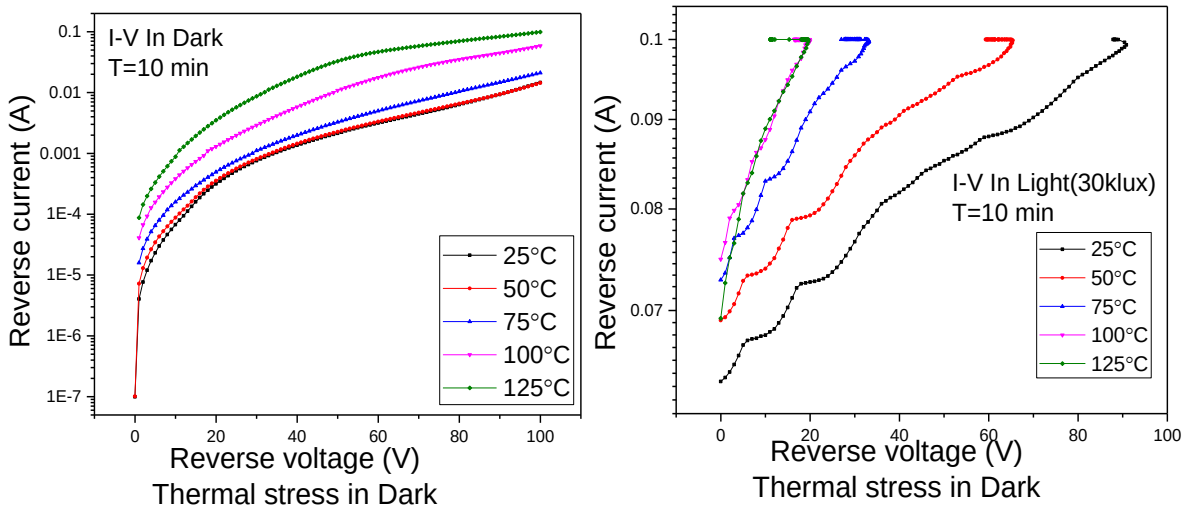


Figure 8 : log I_{Inv} = fct (V_{Inv}) $_{Dark\&\ Light}$ post-stress thermique à l'obscurité (ST1)

Nous observons dans la figure 8.a. que les caractéristiques log I_{Inv} = fct (V_{Inv}) enregistrées à l'obscurité présentent toutes le même comportement quel que soit la valeur de la température appliquée au moment du stress et que plus la température a été haute au moment du stress du module, plus le courant inverse est important. Néanmoins, la variation des caractéristiques est observable à l'obscurité que pour une température de stress supérieure à 75°C. Le comportement d'I_{Inv} (V) est lié à l'augmentation des défauts avec l'augmentation du stress thermique. Lorsque les mesures sont effectuées sous illumination, nous constatons dans la figure 8.b que l'intensité du courant inverse atteint les limites expérimentales de nos appareils avec la saturation de l'appareil SMU. Ce fait traduit néanmoins l'importance de la contribution du photo-courant dans la valeur globale du courant inverse. L'augmentation de ce courant inverse mesuré correspondant à l'augmentation du courant de fuite dans les cellules du module PV en fonctionnement c'est à dire sous éclairement et elle est la signature de l'augmentation de la concentration de défauts dans la structure silicium.

3.4.2 Les résistances shunt et séries post-stress thermique à l'obscurité-Branche ST1

La figure 9 présente la variation de la résistance de shunt et de la résistance série en fonction de la température déterminée à partir de nos résultats expérimentaux à l'obscurité et sous éclairement par le modèle à deux diodes.

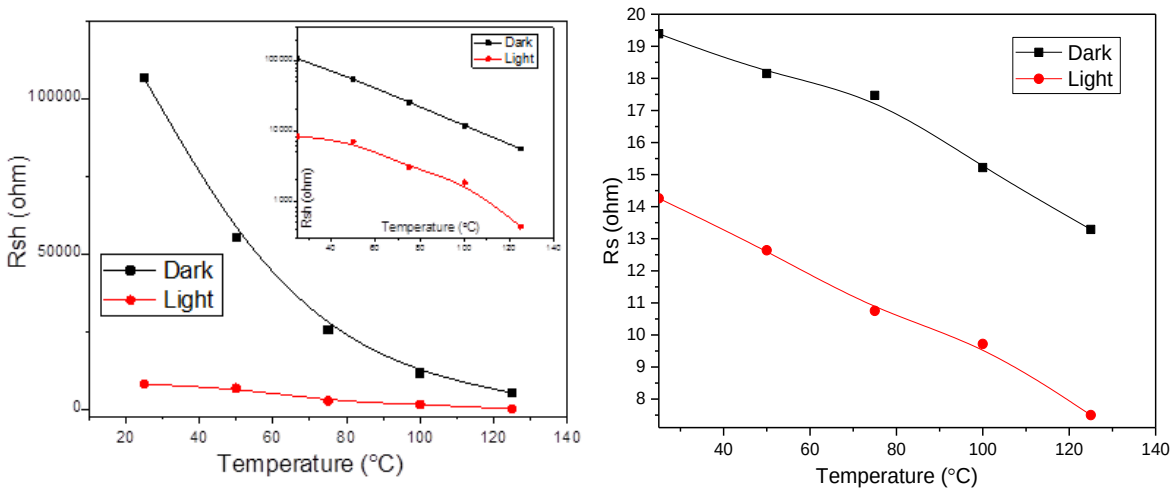


Figure 9: R_{sh} et R_s = fct (T) Dark & Light post-stress thermique à l'obscurité ST1
Insert : Log Rsh = fct (I)Dark et Light post-stress thermique à l'obscurité (ST1)

À température ambiante, les valeurs de la résistance shunt mesurée à l'obscurité sont de l'ordre de 10^5 ohms alors que sous éclairement, elle est inférieure à 10^4 (égale à 8400 ohms).

Après un stress de 125°C cette valeur diminue pour atteindre 5.5 kOhms à l'obscurité et 430 ohms sous éclairement. Ces changements représentent une variation relative de Rsh égale à 94% mesuré à l'obscurité et de 95% pour les mesures sous éclairement. Comme dans le cas des mesures post-stress électrique, nous constatons que les conditions d'éclairement lors des mesures n'affectent pas l'évolution de la valeur de Rsh post stress thermique. Par ailleurs, les conditions d'éclairement lors des mesures n'affectent pas non plus l'écart entre Rsh mesurée à l'obscurité et sous éclairement car la différence relative des deux valeurs de Rsh, par rapport à sa valeur à l'obscurité est égale à 92% aussi bien pour le module vierge que stressé, comme mieux représenté sur une échelle logarithmique dans l'insert de la figure 9.a.
La diminution de la résistance shunt, telle que représentée en figure 9 indique une augmentation du courant de fuite par la surface de la cellule ou en raison des défauts. L'augmentation du courant de fuite est ainsi liée à l'élévation de température qui entraîne une diminution de Rsh. Ce phénomène est confirmé de façon qualitative par l'apparition de dommages importants en surface du module lorsque celui-ci atteint des hautes températures suite à un stress thermique.

Nous voyons dans la figure 9.b. que Rs est également largement affecté par le stress thermique. Les variations relatives de Rs avec l'amplitude du stress thermique déterminées à l'obscurité et sous éclairement sont égales à 31% et 47%, respectivement. Mais contrairement à Rsh, nous observons une différence importante dans la valeur de Rs en fonction des conditions de mesures post-stress thermiques. La différence entre ces valeurs de Rs, par rapport à la valeur à l'obscurité est égale à 26% pour le module vierge et à 43% pour le module stressé (Température de stress de 125°C). Ces différences correspondent directement aux contributions du stress thermique sur Rs.

3.4.3 Les courants de diffusion et de recombinaison en post-stress thermique à l'obscurité-mesurés à l'obscurité Branche ST1-1

L'évaluation des courants de diffusion I_{01} et de recombinaison I_{02} par le modèle à deux diodes est basée sur les valeurs expérimentales I(V). Après un stress à l'obscurité, les variations de ces courants mesurés à l'obscurité en fonction de la température sont présentées dans la figure 10.

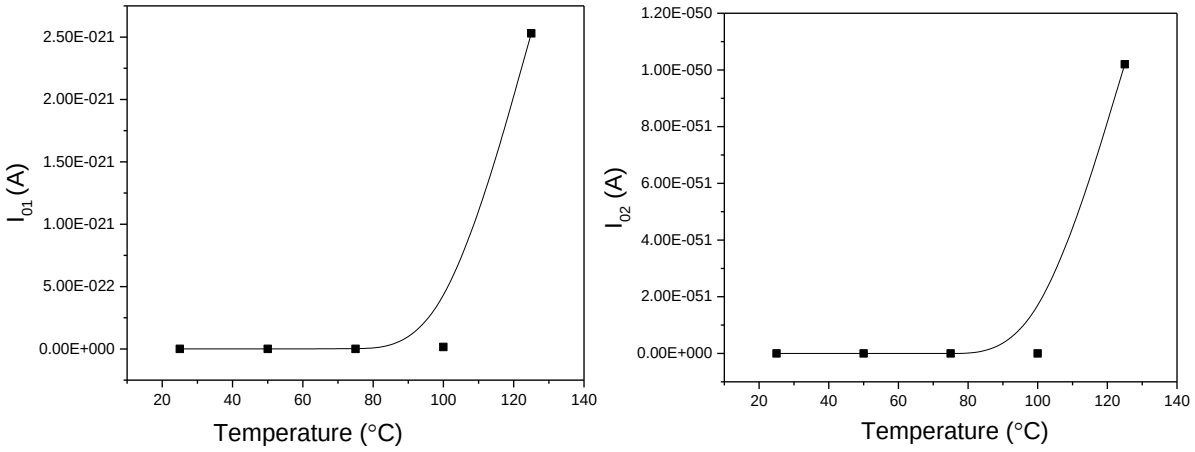


Figure 10 : I_{01} et I_{02} = fct (T) $_{Dark}$ post-stress thermique à l'obscurité et mesurés à l'obscurité ST1-1

Nous observons que les courants de diffusion et de recombinaison sont égaux à 0 pour le module vierge et que leurs augmentations sont perceptibles pour des modules ayant subi un stress thermique au-delà de 85°C. La forme générale des caractéristiques est de type exponentiel puis une forte augmentation presque exponentielle validant l'analyse que nous avons présentée précédemment dans le cas des modules stressés électriquement (chapitre 2) ou nous avons montré que la forte intensité du champ électrique interne induit par les stress, ici thermique sépare des paires électrons-trous. Les électrons ainsi libérés sont accélérés et vont créer de nouvelles ionisations par choc : il y a effet d'avalanche. Nous rappelons également qu'au-delà de la valeur limite haute de température que nous avons utilisée, i.e. 125°C, la jonction a été physiquement détruite due à l'effet thermique direct de la température du four et de l'effet indirect de la conduction générée par le stress.

3.5 Etudes du post-stress thermique sous éclairement-Branche ST2

Nous rappelons ici les conditions expérimentales : les caractéristiques I(V) mesurées à l'obscurité (ST2-1) et sous éclairement (30klux) (ST2-1), sont mesurées avant et après l'application du stress thermique sous un éclairement de 10klux et 20klux en variant la température entre 25°C et 75°C, par pas de 25°C pendant un palier d'une durée de 10 minutes. Il est à noter que nous n'avons pas induit de stress thermique sous éclairement avec des températures supérieures à 75°C, car cette température correspond expérimentalement à une température critique pour le module, pour les deux intensités du flux lumineux, une défaillance importante de celui-ci, directement observable qualitativement. Ce constat est un

résultat en soit, nous montrant l'importance dans les phénomènes induisant la dégradation des modules photovoltaïques dans des conditions normales d'éclairement, c'est à dire en mode normal de production d'électricité.

3.5.1 Caractéristiques I(V) post-stress thermique sous éclairement-Branche ST2

Les caractéristiques I(V) obtenues expérimentalement avant et après le stress thermique sous éclairement ST2, mesurées à l'obscurité (sous-branche ST2-1) et sous éclairement (sous-branche ST2-2), sont représentée en échelle logarithmique dans les figures 11 et 12, respectivement, pour les différents niveaux de stress.

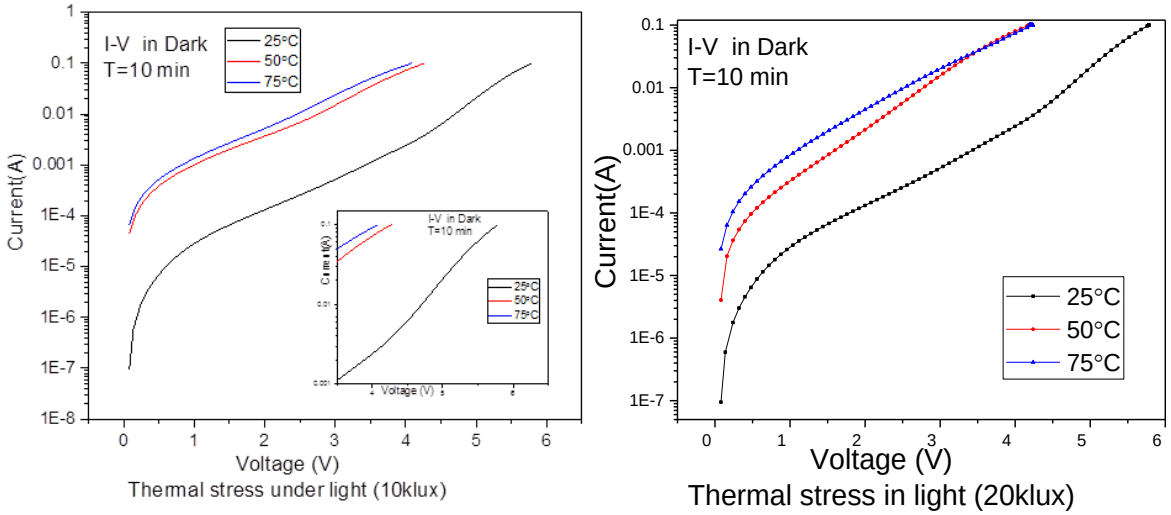


Figure 11 : Log I = fct (V)$_{Dark}$ post-stress thermique sous éclairement déterminée à l'obscurité (ST2-1) Insert : Log I= fct (V)$_{Dark}$ représenté avec la même échelle que I(V) mesurée sous éclairement (Figure 12)

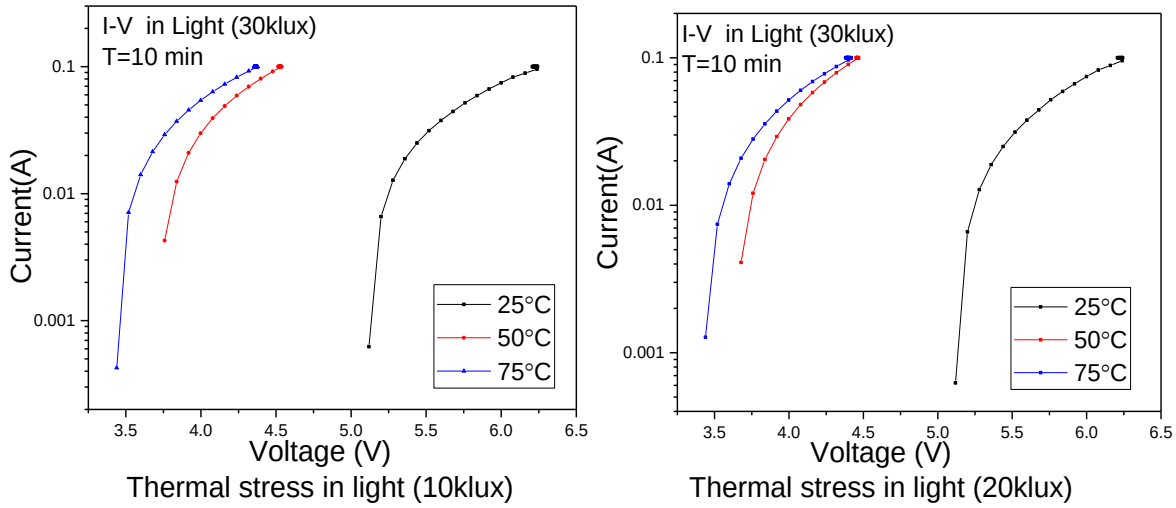


Figure 12 : log I = fct (V) $_{Light}$ post-stress thermique sous éclairement déterminée sous éclairement (ST2-2)

Ces caractérisations I(V) des cellules stressées sous éclairement confirme que le stress thermique perturbe affecte directement le comportement d'un module photovoltaïque en fonctionnement. En effet, dans les figures 11 et 12, nous constatons que les variations de la température immédiatement au-dessus de l'ambiante créent un stress important dans le module de même amplitude dans les deux conditions de mesures à savoir à l'obscurité (voir insert de la figure 11) et sous éclairement. Ensuite, à des températures de stress plus grand, le même saut de température (ici de 25°C) apporté au module éclairé n'apportera qu'une contribution minime à la caractéristique I(V). Il est à noter que ce comportement est différent de celui observé lors du stress thermique du module à l'obscurité. En effet, l'influence du stress thermique dans ce cas expérimental n'avait été observée à l'obscurité que pour des températures supérieures à 75°C. Il ainsi évide que le stress thermique a une influence plus grande avec un module éclairé, et donc dans des conditions de fonctionnement normales que lorsqu'il est à l'obscurité.

A partir de nos résultats expérimentaux nous avons pu obtenir la valeur de la tension de diffusion que nous avons tracée en fonction de la température dans la figure 13.

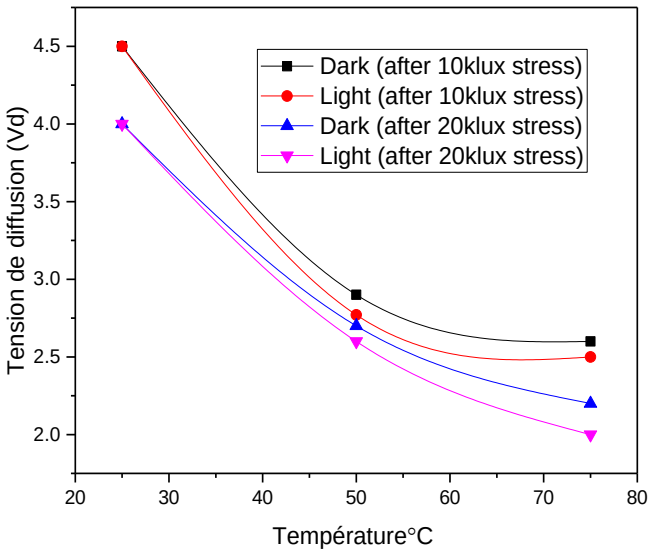


Figure 13 : Variation de la tension de diffusion en fonction de la température (ST2)

Nous remarquons dans un premier temps que la tension de diffusion obtenue pour le module non stressé à l'obscurité, à la somme des tensions de 8 cellules individuelles en séries qui le constitue ce qui donne un potentiel de diffusion individuel de 0.56V. Dès que la température de stress augmente de 25°C à 75°C, la tension de diffusion du module V_d diminue,

s'approchant ensuite d'une saturation. Nous constatons aussi que V_d diminue avec l'intensité d'éclairement au moment du stress thermique. Si nous considérons l'équation 6, ces deux constations confirment que la concentration des défauts (n_i) dans la jonction avec la température, augmentant de façon inversement proportionnel à V_d représenté figure 13.

Les figures 14 et 15 montrent les caractéristiques log I_{Inv} = fct (V_{Inv}), avant et après le stress thermique ST2 sous éclairement, mesurées à l'obscurité et sous éclairement respectivement.

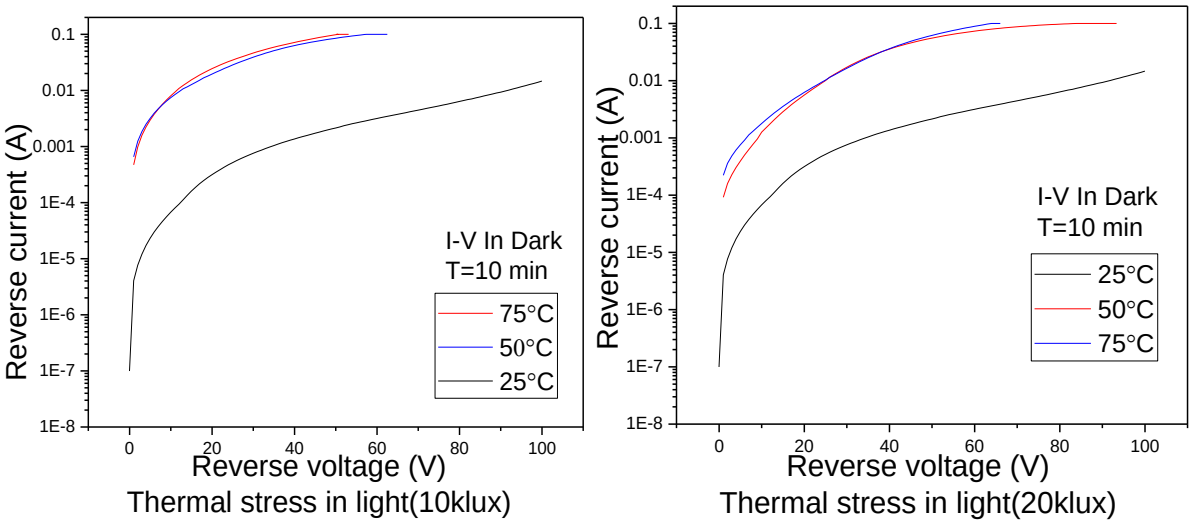


Figure 14 : Caractéristique log I_{Inv} = fct $(V_{Inv})_{Dark}$ post-stress thermique sous éclairement déterminée à l'obscurité (ST2-1)

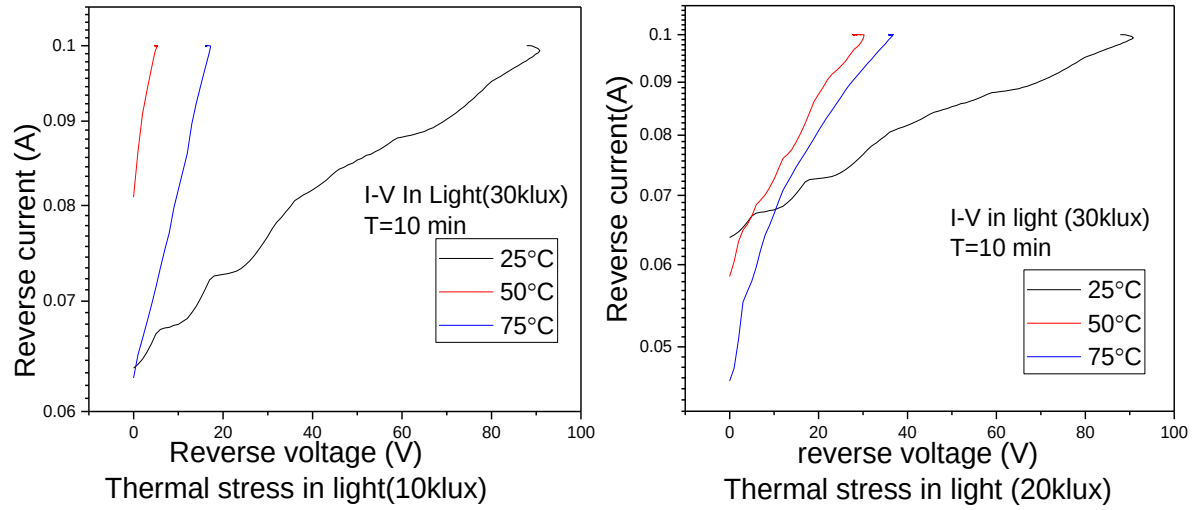


Figure 15 : Caractéristique log I_{Inv} = fct $(V_{Inv})_{Light}$ post-stress thermique sous éclairement déterminée sous éclairement (ST2-2)

Comme dans le cas du courant direct, observable lors des mesures à l'obscurité ST2-1 et sous éclairement ST2-2, le courant inverse augmente immédiatement après le premier changement de température induisant le stress.

Enfin, avec des modules ayant subi un stress thermique nous avons tracé dans la figure 16 les courants inverses mesurés à l'obscurité et sous éclairement en fonction de l'éclairement (0Klux, 10Klux, 20Klux) au moment du stress.

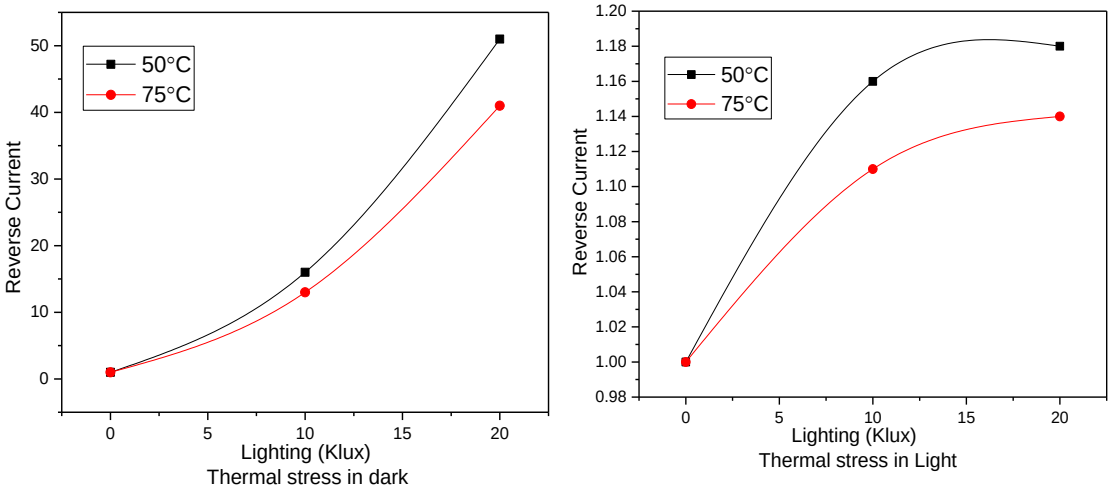


Figure 16 : (I_{Inv}) ST2-1 / (I_{Inv}) ST1-1 et (I_{Inv}) ST2-2 / (I_{Inv}) ST1-2 en fonction de l'éclairement lors du stress

Comme nous l'avions déjà observé dans le cas des cellules stressées électriquement, lorsque les mesures sont faites à l'obscurité, figure 16.a. le courant inverse mesuré n'atteint pas sa valeur de saturation même lorsque le stress, ici thermique a été induit sous un éclairement fort. Par contre, lorsque les mesures sont prises sous éclairement, figure 16.b. le courant inverse atteint la saturation dans les modules stressés même sous faible éclairement au moment du stress. L'augmentation des défauts dû à l'augmentation de la valeur du stress thermique montre également que la valeur du courant inverse en dehors et à saturation diminue avec l'intensité du stress électrique quel que soit les conditions de mesures.

3.5.2 Les résistances shunt et séries post-stress thermique sous éclairements-Branche ST2

Les figures 17 et 18 représentent respectivement la résistance shunt et la résistance série en fonction de la température mesurée dans l'obscurité et sous éclairement calculée avec le modèle à deux diodes à partir de l'équation 1.

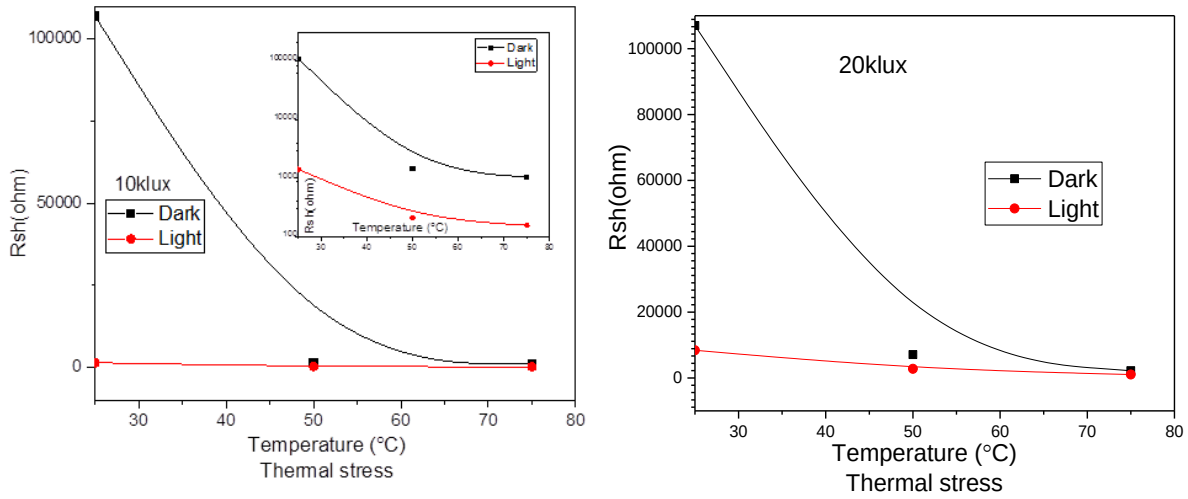


Figure 17 : Rsh = fct (T)$_{Dark\ et\ Light}$ post-stress thermique sous éclairements (ST2)
Insert : *Log Rsh = fct (I)$_{Dark\ et\ Light}$ post-stress thermique à l'obscurité (ST2)*

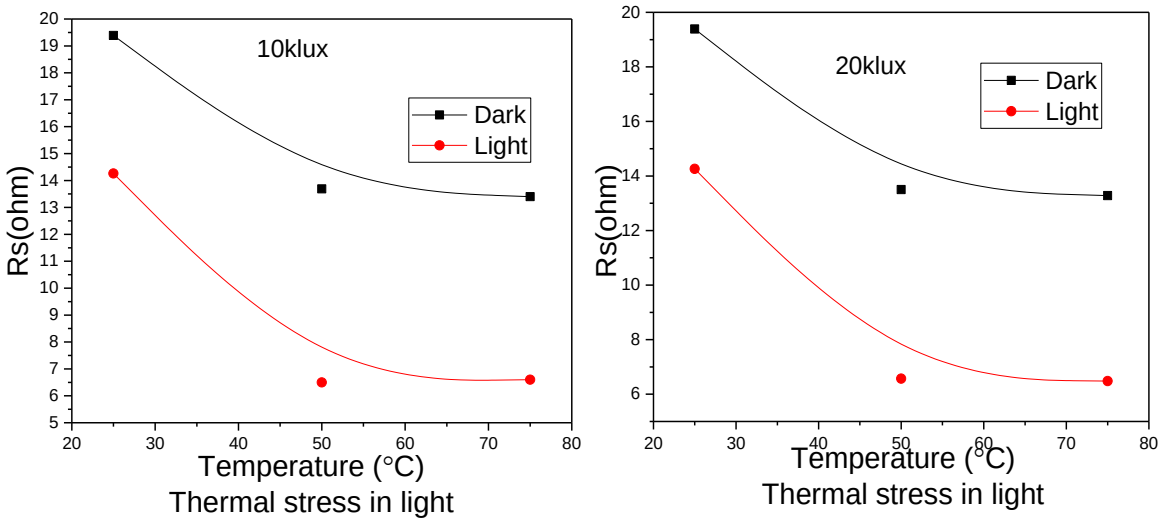


Figure 18 : Log (Rs) = fct (T) $_{Dark\ et\ Light}$ post-stress thermique sous éclairements (ST2)

Sous éclairement à 10klux du module pendant le stress thermique (ST2) celui-ci génère une variation relative de Rsh égale à 99% mesuré à l'obscurité et de 90% pour les mesures sous éclairement. Ce changement est atteint très rapidement dans la première partie des caractéristiques lorsque la température est appliquée au module confirmant l'installation des défauts dans la jonction et la dégradation des performances du module avec une augmentation importante du courant de fuite dès le début de l'élévation de température.

Dans ces résultats reportés figure 18, nous pouvons à nouveau constater que la résistance série est fortement influencée lors de stress thermique sous éclairements comme nous avions pu le constater lorsque le stress thermique avait été appliqué à l'obscurité. Les variations

relatives de Rs avec l'amplitude du stress thermique déterminées à l'obscurité et sous éclairement sont égales à 30% et 53%, respectivement. Nous observons une différence importante dans la valeur de Rs en fonction des conditions de mesures post-stress thermiques. La différence entre ces valeurs de Rs, par rapport à la valeur à l'obscurité est égale à 26% pour le module vierge et à 50% pour le module stressé (Température de stress de 75°C). Ces différences correspondent directement aux contributions du stress thermique sur Rs.

3.6 Le facteur d'idéalité des cellules stressées thermiquement

La figure 19 montre l'évolution du facteur d'idéalité post-stress thermique à l'obscurité et sous éclairement mesuré à l'obscurité en fonction de la température.

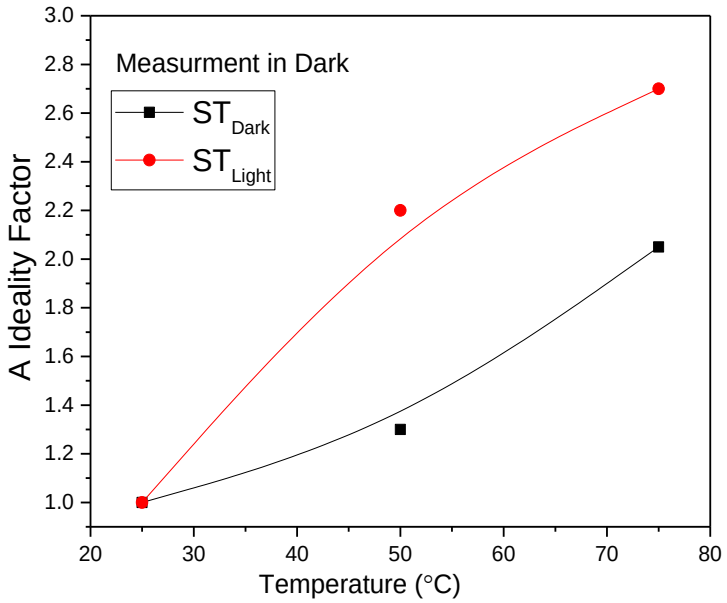


Figure 19 : Facteur d'idéalité (A) = fct (I) $_{SE\ Dark\ \&\ Light}$ mesuré à l'obscurité

Nous observons que le facteur d'idéalité démarre à 1 pour le module vierge, ce qui est le cas idéal, et augmente avec le stress thermique appliqué. Cette augmentation est quasi proportionnelle à la valeur de la température à l'obscurité dans cette gamme de température, mais lors du stress thermique sous éclairement, le facteur d'idéalité augmente de façon beaucoup plus importante dès le premier stress induit à 50°C correspondant à un pas de 25°C. Ces résultats valident également l'analyse que nous avons présentée précédemment dans laquelle nous avons montré que cette augmentation du facteur d'idéalité est directement liée à

la présence du photo-courant facilitant la création de défauts dans le module et induisant une diminution du potentiel de diffusion lorsque le stress augmente.

3.7 Les caractéristiques C(V) des cellules stressées thermiquement

La méthode de mesure utilisée est celle présentée au chapitre 2, mais en appliquant le stress thermique à la place de l'injection de courant inverse comme décrit dans la partie précédente.

Les caractéristiques C(V) ont été mesurées à une fréquence de 1 MHz, pour une tension variant de -35V à 20V. Comme pour la détermination des caractéristiques C(V), le stress thermique a été induit par des températures allant de l'ambiante (25°C) jusqu'à la température critique d'endommagement visible des cellules à savoir 125°C pour le stress à l'obscurité (branche ST1) et 75°C pour le stress sous éclairement (branche ST2).

Après un stress sous obscurité, les caractéristiques C(V) en fonction de la température à l'obscurité et sous éclairement sont représentées dans la figure 20. Les caractéristiques C(V) des modules stressés thermiquement sous éclairement (10klux, 20klux), ont été également mesurées à l'obscurité et sous éclairement. Elles sont représentées dans la figure 21 (Les sous figures de gauche correspondent aux mesures faites à l'obscurité, celles de droite sous éclairement).

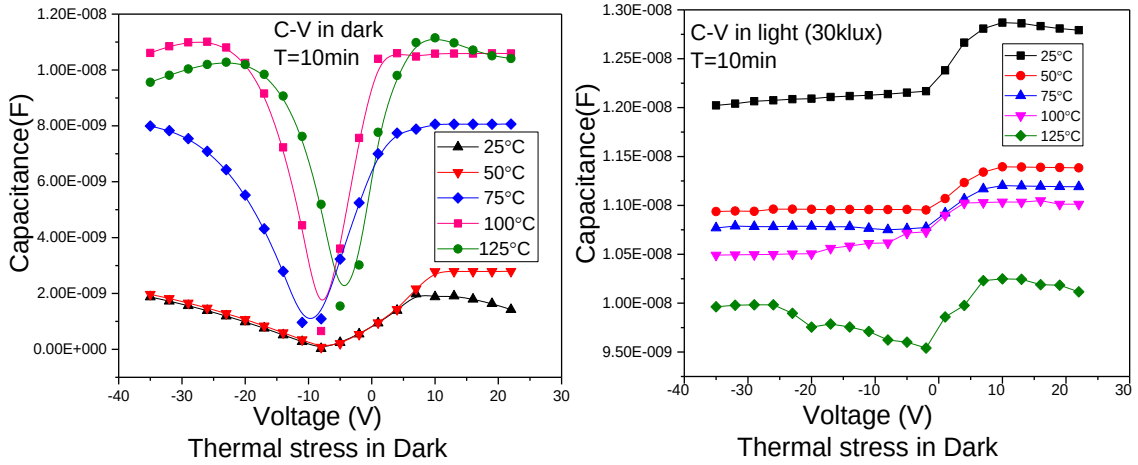
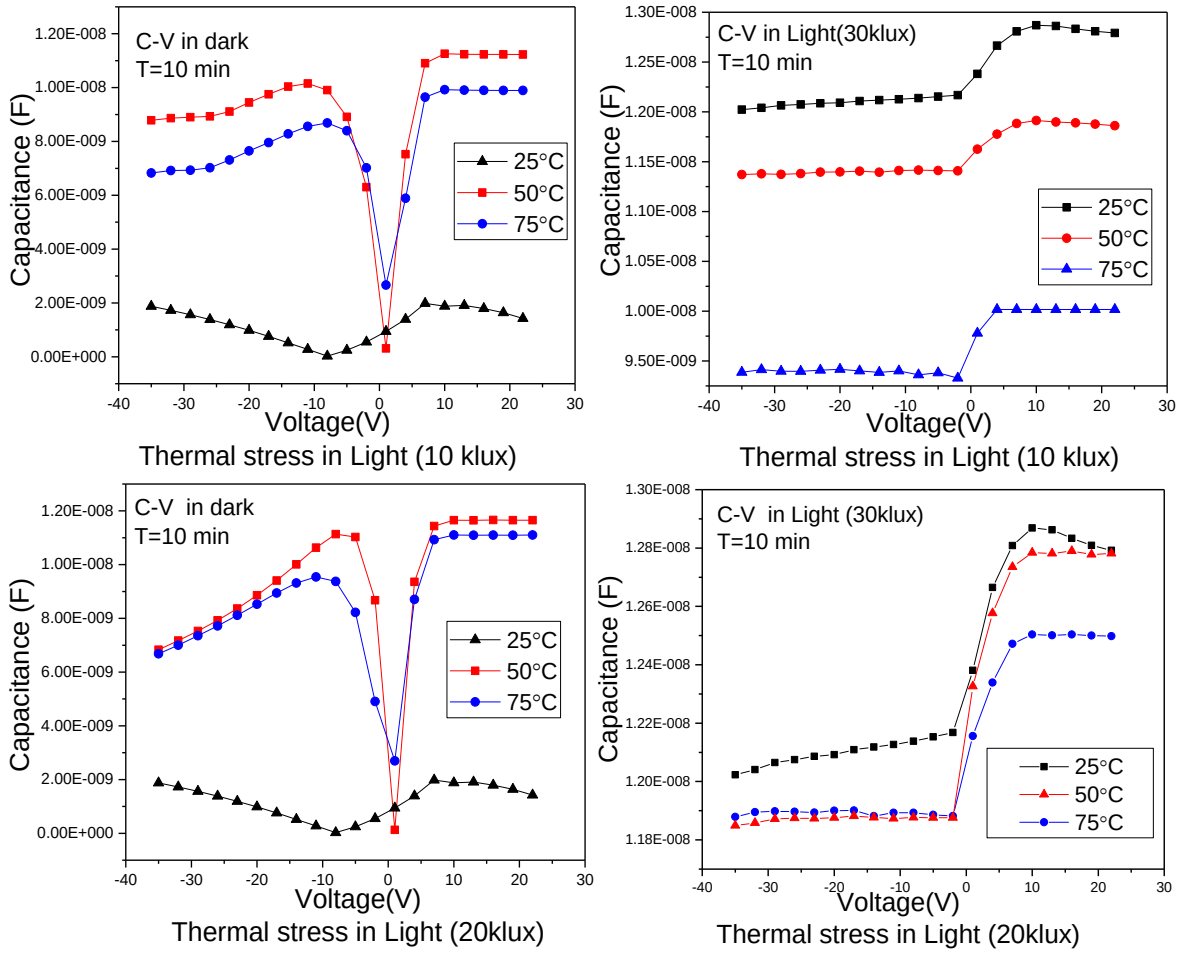


Figure 20 : C = fct (V) Dark & Light post-stress thermique à l'obscurité (ST1-1 et ST1-2)



Figue 21 : C=fct (V)$_{Dark\ \&\ Light}$ post-stress thermique sous éclairement déterminée à l'obscurité (ST2-1 et ST2-2)

Lors des mesures à l'obscurité, la capacité diminue pour des tensions de -35V jusqu'à -5V pour ensuite, de -5V à 10V augmenter jusqu'à sa valeur initiale et rester constante au-delà jusqu'à la tension maximale de 20V. Nous voyons également que, quel que soit les conditions d'éclairement au moment du stress, l'amplitude des variations de la capacité augmente fortement avec la température.

Le comportement de la capacité des modules stressé thermiquement à l'obscurité et sous éclairement change lorsque les mesures sont effectuées sous éclairement. En effet, nous observons une augmentation de la valeur de la capacitance qui reste, à une valeur quasi constante en inverse masquant ainsi l'effet du stress thermique. Il faut atteindre une température de stress de 125°C (voir figure 20.b.) pour retrouver une caractéristique C(V) comparable à celle déterminée à l'obscurité.

Nous constatons dans le cas du stress thermique sous illumination, figures 21, que les capacités ont le même comportement que lorsque le stress est appliqué à l'obscurité, figure 20, et les comportements observés confirment l'influence de la température dans la valeur de la capacité. Par ailleurs, nous retrouvons dans les caractérisations C(V), ici, ce qui avait été précédemment observé lors des caractérisations $I_{Inv}(V)$ à savoir que l'éclairement entraine dès les premiers changements de température (de 25°C à 50°C) une forte variation des caractéristiques, ce qui n'est pas le cas pour un stress à l'obscurité (voir figure 20.a.) ou il faut considérer une température supérieure à 75°C pour voir apparaître des changements notables dans les mesures faites à l'obscurité.

Afin d'évaluer cette influence, nous avons repris le modèle présenté précédemment pour le stress électrique qui prend en considération l'ensemble de ces variations dû aux défauts induits directement et indirectement par une contrainte thermique de la cellule. En particulier, ce modèle tient compte de l'effet du photo-courant sur l'activation des centres de piégeages induits par la contrainte thermique. Ce modèle est présenté dans les paragraphes suivants.

3.8 Les capacités C_{Ph} et C_{L-D}. Etude comparée

Pour comparer l'effet du stress thermique à l'obscurité et sous éclairement, et pour différencier la contribution du photo-courant au moment du stress et l'effet du stress thermique seul, nous avons calculé à partir des résultats expérimentaux, les capacités relatives à chaqu'un de ces effets.

Nous avons calculé la capacité directement liée à l'éclairement au moment du stress par l'équation 13 du chapitre précédent en utilisant les résultats expérimentaux mesurés à l'obscurité dans les branches ST1-1 et ST2-1. Afin de ne considérer qu'une valeur de stress nous avons considéré uniquement le cas expérimental ou les caractéristiques ont été enregistrées pour une température de 50°C. La caractéristique $C_{Ph}(V)$ a été ainsi déterminée pour les différentes valeurs d'éclairement et représentée figure 22.a.

Connaissant la capacité directement liée à l'éclairement, équation 13, il est maintenant possible de déduire, pour une valeur de la température, des caractéristiques C(V) dans la branche ST2-1, afin de déterminer uniquement la capacité C_{ST} définie par l'équation 14, liée au stress thermique induit sous éclairement.

La caractéristique $C_{ST}(V)$ a été ainsi déterminée pour les différentes valeurs d'éclairement et représentée figure 22.b. et comme précédemment, nous avons considéré une température de stress égale à 50°C.

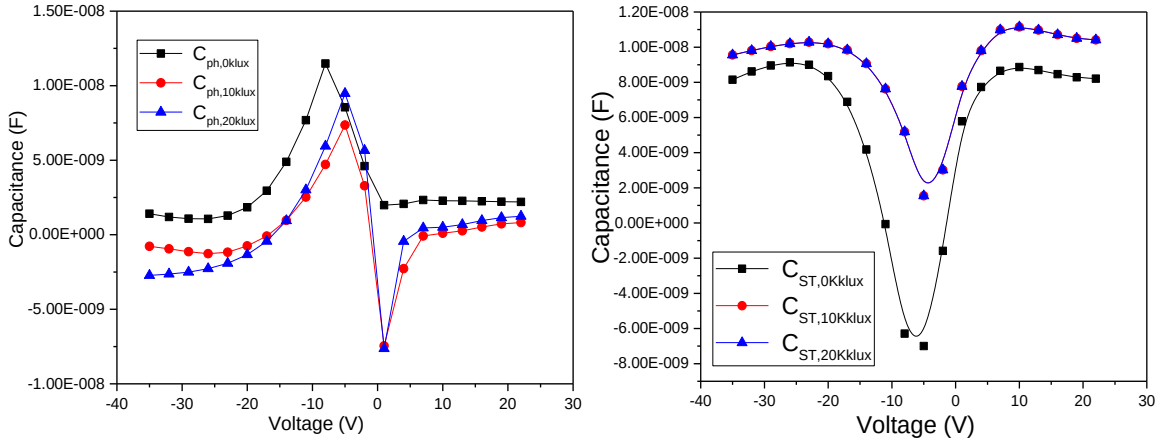


Figure 22 : (a) C_{Ph}= fct(V) et (b) C_{ST} = fct(V) pour une température du module = 50°C

Nous constatons que lorsque la caractéristique relative au stress thermique, figure 22.b. est calculée sous éclairement (branche ST2) par l'équation 13, nous obtenons la même caractéristique C(V), en amplitude et en forme que celle déterminée lors du stress thermique à l'obscurité (branche ST1), figure 20. Nous pouvons conclure de cette analyse que l'éclairement n'amplifie pas la création de défauts induits par la température lors du stress thermique. Cela signifie, qu'en mode de fonctionnement normal des modules éclairés, le stress thermique n'induira pas plus de défauts dans la structure qu'il en induit à l'obscurité.

Comme dans le chapitre précédent, les mesures faites sous éclairement (branches ST1-2 et ST2-2 ne sont pas directement exploitables pour en extraire la contribution uniquement du stress thermique car l'éclairement apporte, comme au moment du stress, une contribution prépondérante lors des mesures.

Pour déterminer les caractéristiques électriques et calculer les paramètres des défauts induits, aussi bien par le stress thermique que par le stress électrique, de même que pour considérer la contribution photovoltaïque, la technique la plus utilisée est la DLTS (spectroscopie des niveaux profonds, Deep Level Transient Spectroscopy) que nous verrons dans le chapitre cinq.

3.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'effet d'un stress thermique sur les performances des modules photovoltaïques. La contrainte thermique est assurée à l'aide d'un four programmable. Pour un module vierge et après l'application du stress thermique, plusieurs caractéristiques et paramètres électriques mesurés à l'obscurité et sous éclairement ont été évalués et étudiés. Les résultats expérimentaux montrent une augmentation de courant de fuite dès qu'une contrainte thermique a été appliquée ce qui crée des défauts dans le module solaire. Cela est mis en évidence en comparant les caractéristiques et les paramètres électriques dans les deux conditions d'application, obscurité et éclairement du stress thermique.

Nous avons également montré que les courants de diffusion et de recombinaison avec la valeur du stress thermique avaient le même comportement que celui observé dans des modules photovoltaïques subissant un stress électrique. Par ailleurs, l'évolution du facteur d'idéalité avec la température confirme nos résultats en particulier la diminution du potentiel de diffusion calculé à partir des caractéristiques I(V) montrant ainsi l'augmentation des défauts dans la structure avec la température.

Les mesures de capacités des modules stressés thermiquement et caractérisées à l'obscurité ont bien montré l'influence du stress sur les propriétés des modules. Néanmoins, les calculs de la fonction $(1/C^2)$ = fct (V) des modules caractérisés dans ce chapitre ne suivent pas la loi comportementale de Mott-Schottky (de ce fait non représentée dans ce chapitre). Ceci nous a amené à vérifier ce modèle rapidement lorsque les modules photovoltaïques ont été mis en présence simultanée des stress thermique et électrique dont les résultats sont représentés dans le chapitre suivant. Dans le cas présent, cela montre la difficulté d'évaluer les conséquences d'un stress thermique du fait de la structure des modules étudiés, du fait également des non-linéarités générées par la répartition non uniforme de la température dans le module stressé en mode de conduction sous illumination. Néanmoins, cela ne remet pas en cause les résultats que nous avons obtenus et discutés, particulièrement ceux attachés aux caractéristiques I(V).

Dans le chapitre suivant, pour se rapprocher des conditions réelles de fonctionnement des modules photovoltaïques comme par exemple ceux disposés sur une toiture et soumis à de

l’ombrage partiel et donc la présence de points chauds, nous étudierons le comportement et les caractéristiques d’un module photovoltaïque soumis à un stress électrique, c’est à dire traversé par un courant inverse en fonction de la température, à savoir en présence simultanée d’un stress thermique.

Chapitre 4 :

Influence de la température lors d'un stress électrique sur la performance des modules photovoltaïques.

4.1 Introduction

Les caractéristiques (I(V) et C(V)) et des paramètres électriques des modules PV ayant subis un stress électrique ou un stress thermique ont été étudiés dans les deux chapitres précédents. Dans ce chapitre, nous étudierons particulièrement les effets de stress combinés à savoir, l'influence de la température sur le fonctionnement des modules PV en présence d'un courant inverse provoqué par un ou des points chauds créant un courant inverse dans la structure.
La base de ce chapitre réside sur l'étude de l'effet sur la performance des modules photovoltaïques de l'injection inverse sous température, dans l'obscurité et sous éclairement.

4.2 Méthodologie expérimentale

Nous présentons une série de mesures expérimentales réalisées sur une série de modules photovoltaïques ayant comme dimensions (60x60 mm), 3,8 V et 0.3W. Durant cette étude, afin de comparer le comportement des composants étudiés suite à leurs fonctionnements sous conditions extrêmes, un courant inverse variant de 10 mA et 40 mA par pas de 10 mA induisant un stress électrique variable a été injecté dans les modules photovoltaïques à des températures variant de 25°C à 100°C, par pas de 25°C, dans l'obscurité et sous éclairement sous un flux de 10klux et de 20klux. Les caractéristiques (I(V) et C(V)) et les paramètres électriques ont été mesurés dans ces conditions en fixant l'intervalle de temps a été fixé à 10 minutes pour chaque dose de stress.
Cette étude expérimentale est composée de deux parties principales correspondant à la création du stress électrique sous température (SET). Dans la première partie, SET1, lorsque la cellule est placée dans l'obscurité et dans la deuxième partie, SET2 lorsque celle-ci est placée sous éclairement. Faisant suite à la création des deux contraintes combinées, dans chaque partie SET1 et SET2, les mesures des caractéristiques ont été réalisées à l'obscurité, SET1-1 et SET2-1 puis sous un éclairement constant de 30klux, SET1-2 et SET2-2.
Les données ont été enregistrées pour chaque procédure et présentées dans la suite de ce chapitre. L'organigramme de la procédure expérimentale est présenté dans la figure 1.

Pour les calculs numériques des paramètres, nous avons utilisé le même circuit équivalent du modèle deux diodes d'une jonction PN, discuté et décrit par l'équation (1) du chapitre 2. Par

ailleurs, les mêmes méthodes expérimentales que celles utilisées pour les mesures présentées dans les chapitres précédents ont été utilisées également ici.

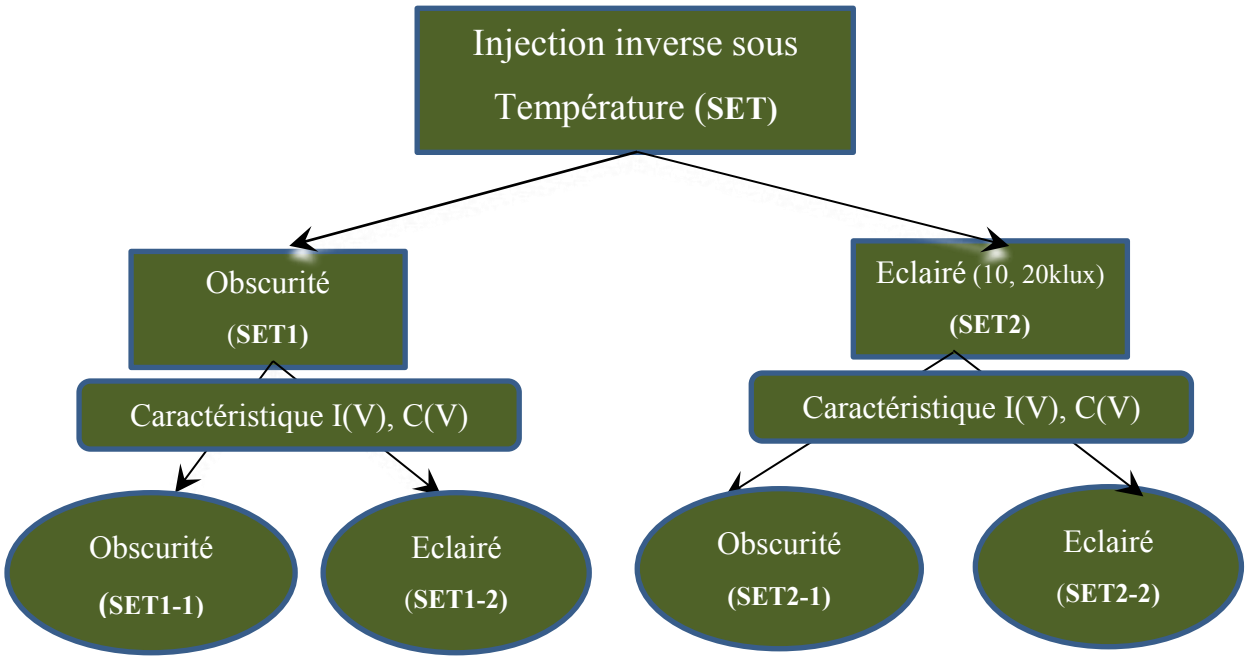


Figure 1 : Organigramme de la procédure expérimental

Dans toutes les figures suivantes, et afin de conserver une valeur de référence, nous avons également reporté les caractéristiques I(V) en direct et en inverse du module vierge, c'est à dire sans stress électrique et mesuré à la température ambiante de 25°C.

4.3 Etude des caractéristiques I(V) direct

Dans ce qui suit, nous reprenons les différentes branches de l'organigramme de la figure 1 sous la forme de trois séries de mesures électriques en température et les caractéristiques logI(V) seront donc présentées en trois paragraphes :

- Série 1 : Stress électrique et thermique des modules à l'obscurité (SET1),
- Série 2 : Stress électrique et thermique des modules sous un éclairement de 10klux (SET2),
- Série 3 : Stress électrique et thermique des modules sous un éclairement de 20klux (SET2).

Dans chacune de ces séries, les mesures post-stress ont été faites à l'obscurité et sous éclairement.

De façon absolue et séparée, c'est à dire en ne considérant que le stress électrique d'une part et le stress thermique, d'autre part, ces résultats ont déjà été analysés dans les deux chapitres précédents. Pour cette raison, les trois paragraphes suivant ne présenteront que les résultats expérimentaux servant de base à l'analyse de l'influence de la température sur le fonctionnement des cellules stressées électriquement, ce qui sera présenté à la suite dans un quatrième paragraphe.

Les limites expérimentales ont été fixées de la façon suivante : Nous avons expérimentalement constaté que les modules subissent une dégradation qualitativement visible (observée en particulier à l'aide du microscope électronique et de la technique MEB (SEM)) lorsque le courant inverse est supérieur à 40 mA à l'obscurité et à partir de 20 mA dans le cas d'un stress éclairé à 20 klux. Une autre dégradation est également vue à partir de 100°C sous obscurité, tandis que sous éclairement, elle est vue à partir de 75°C. Ces dégradations correspondent à l'apparition de taches en surface des modules. Pour ne pas que la contribution de l'encapsulation influe trop fortement sur nos mesures, nous avons ainsi considéré ces valeurs de flux, de courant inverse et de température comme valeurs maximales.

4.3.1 Série 1 : Stress électrique et thermique des modules à l'obscurité (SET1)

Les caractéristiques logI(V) des cellules vierges et stressées à l'obscurité par un courant inverse de 10 mA à 40 mA sous température de 25°C à 100°C ont été mesurées à l'obscurité (SET1-1) et sous éclairement (30klux) (SET1-2). Ces caractéristiques sont représentées respectivement dans les figures 2 et 3.

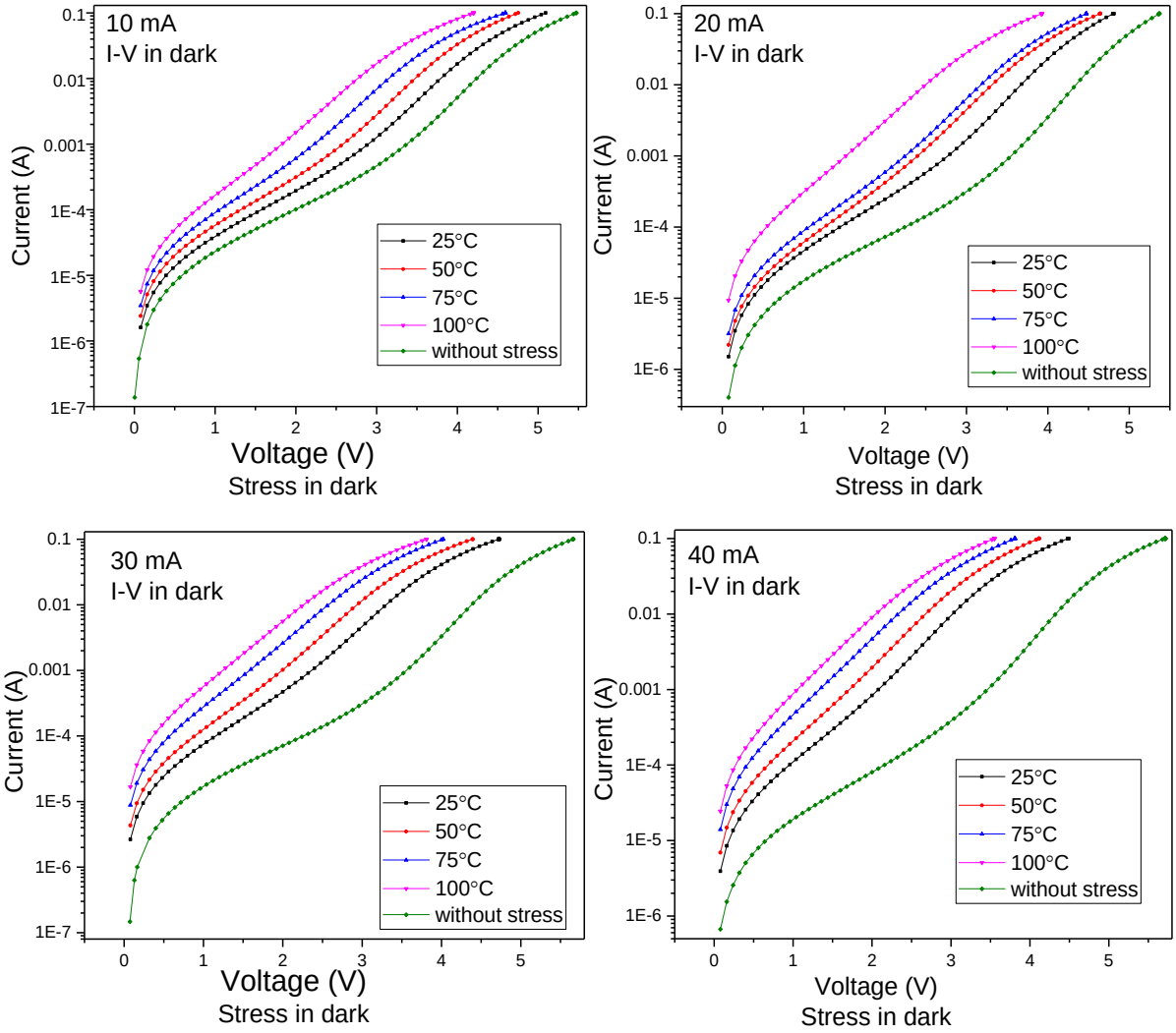


Figure 2 : Log I= fct (V)$_{Dark}$ post-stress à l'obscurité mesuré à l'obscurité (SET1-1)

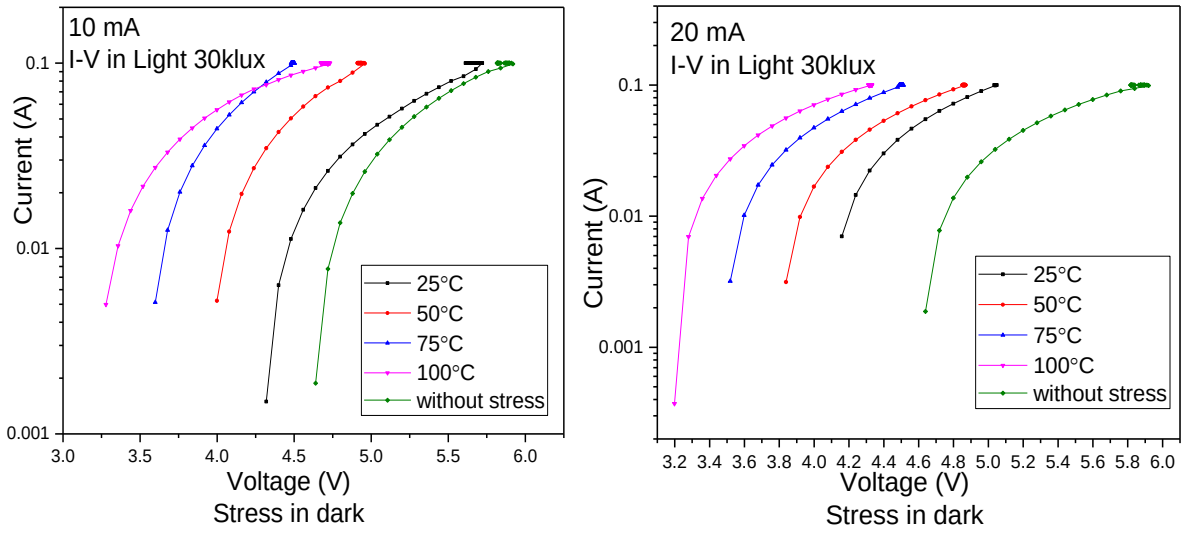


Figure 3.a : Log I= fct (V) $_{Light}$ post-stress à l'obscurité mesuré sous éclairement (SET1-2)

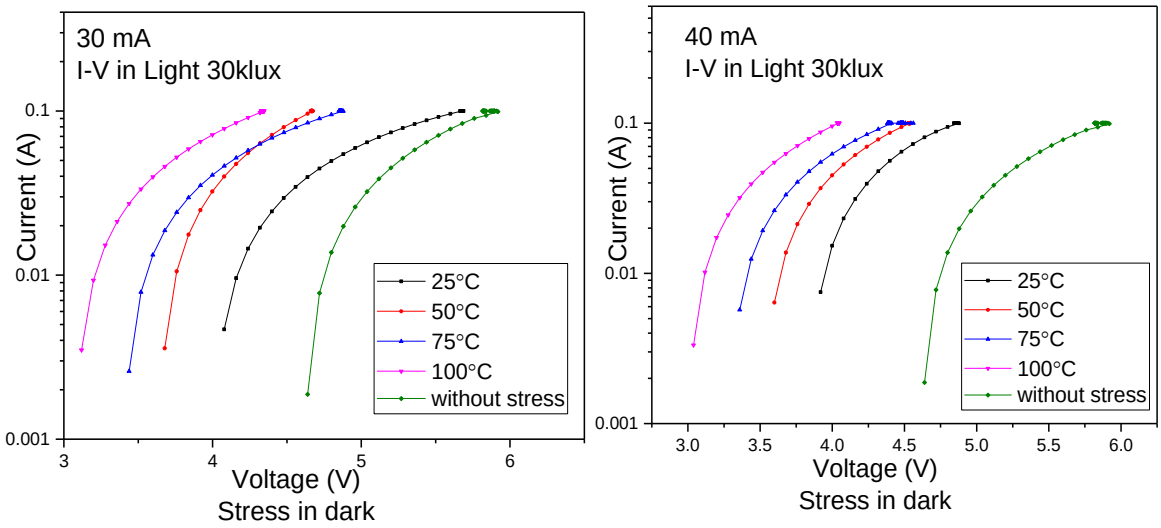


Figure 3.b : Log I= fct (V) $_{Light}$ post-stress à l'obscurité mesuré sous éclairement (SET1-2)

4.3.2 Série 2 : Stress électrique et thermique des modules sous un éclairement de 10klux (SET2)

Les caractéristiques logI(V) des cellules vierges et stressées sous un éclairement de 10klux par un courant inverse de 10 mA à 40 mA sous température de 25ºC à 75ºC ont été mesurées à l'obscurité (SET1-1) et sous éclairement (30klux) (SET1-2). Ces caractéristiques sont représentées respectivement dans les figures 4 et 5.

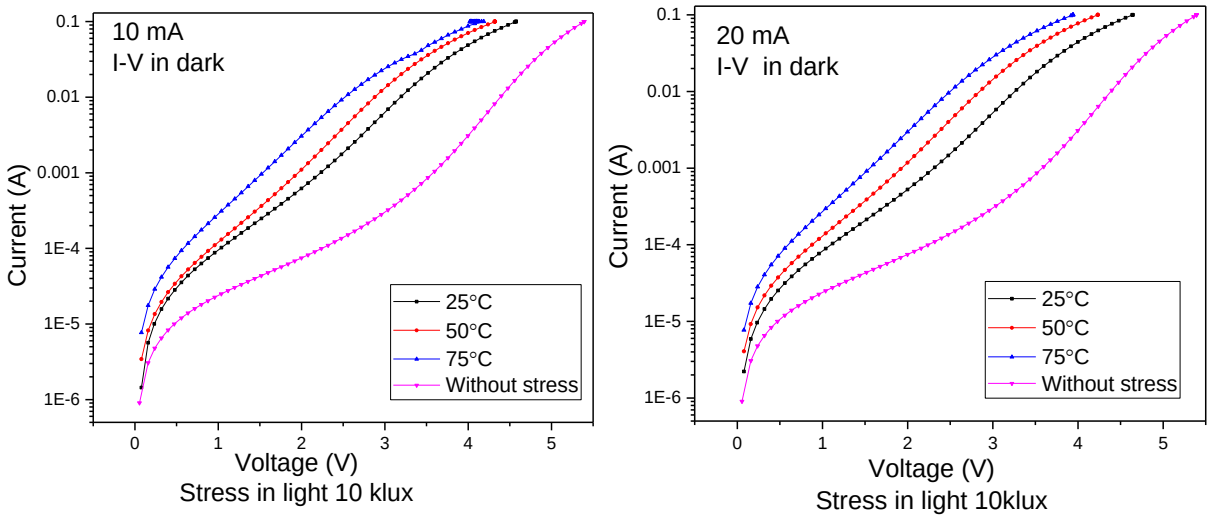


Figure 4.a : Log I= fct (V)$_{Dark}$ post-stress sous 10klux mesuré à l'obscurité (SET2-1)

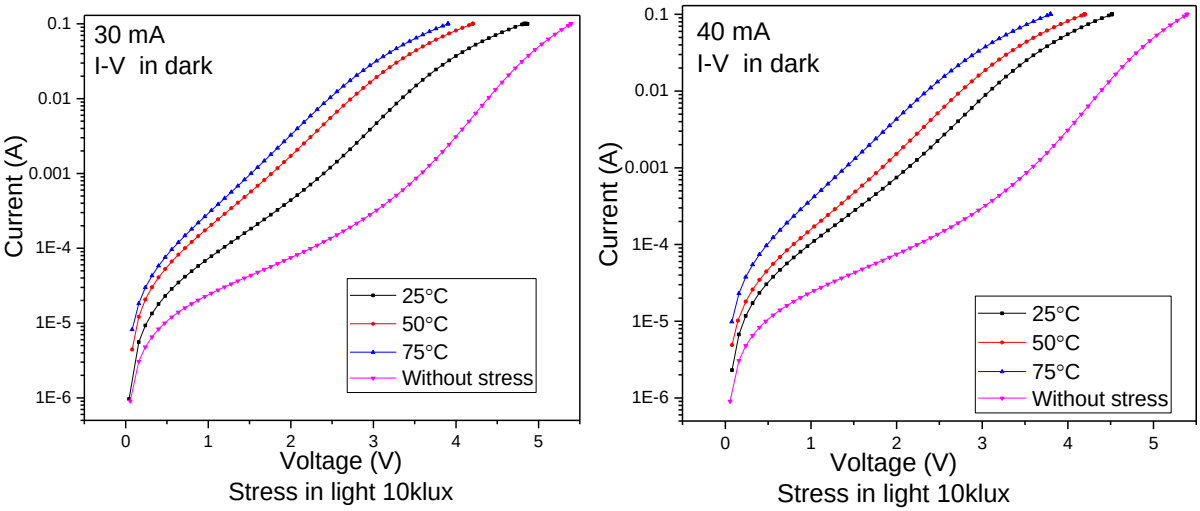


Figure 4.b : Log I= fct (V)$_{Dark}$ post-stress sous 10klux mesuré à l'obscurité (SET2-1)

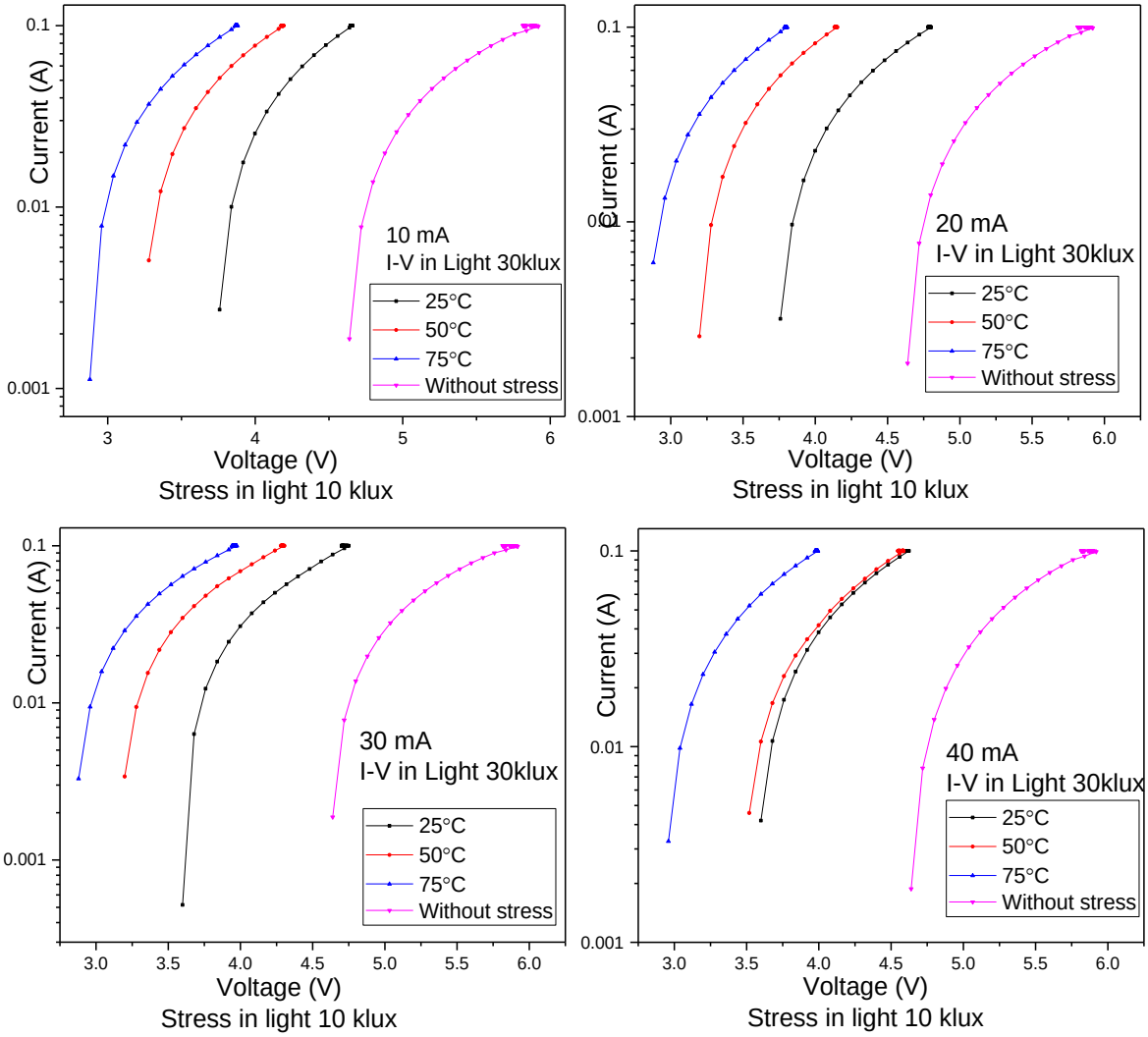


Figure 5 : Log I= fct (V) $_{Light}$ post-stress sous 10klux mesuré sous éclairement (SET2-2)

4.3.3 Série 3 : Stress électrique et thermique des modules sous un éclairement de 20klux (SET2)

Les caractéristiques logI(V) des cellules vierges et stressées sous un éclairement de 20klux par un courant inverse de 10 mA à 40 mA sous température de 25ºC à 75ºC ont été mesurées à l'obscurité (SET1-1) et sous éclairement (30klux) (SET1-2). Ces caractéristiques sont représentées respectivement dans les figures 6 et 7.

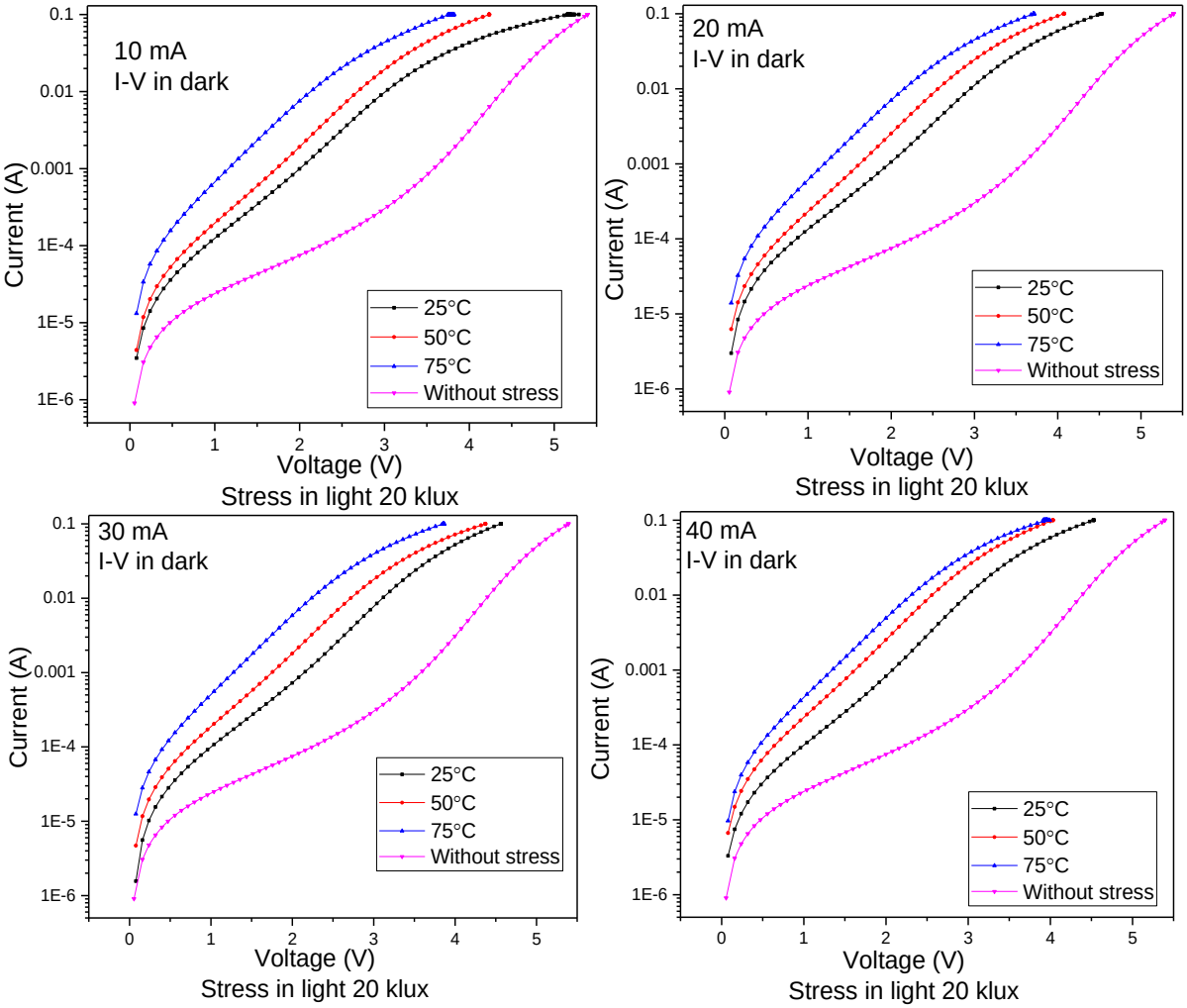


Figure 6 : Log I= fct (V) $_{Dark}$ post-stress sous 20klux mesurée à l'obscurité (SET2-1)

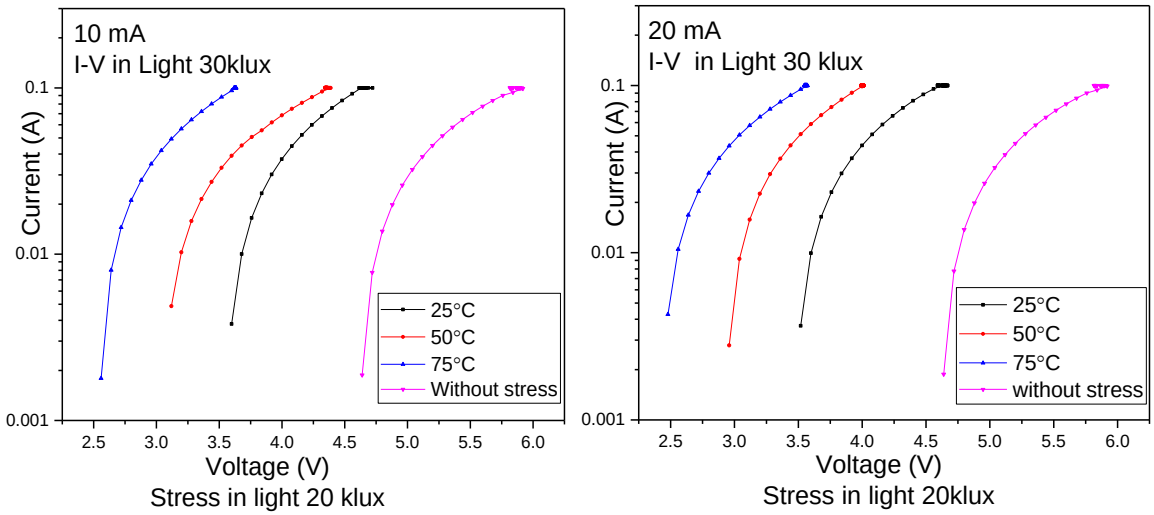


Figure 7 : Log I= fct (V) $_{Light}$ post-stress sous 20klux mesurée sous éclairement (SET2-2)

4.3.4 Influence de l'illumination et de la température sur les caractéristiques I(V)

Dans les trois séries de mesures, nous obtenons les mêmes formes de caractéristiques I(V) que ce soit pour les mesures faites à l'obscurité ou sous éclairement. Toutes ces caractéristiques peuvent être parfaitement décrites par le modèle à deux diodes présenté dans les chapitres précédents. Nous retrouvons en particulier, lorsque les mesures sont faites à une température de 25°C, les résultats obtenus lors de l'étude du stress électrique seul, chapitre 2, et lorsque le courant inverse est égal à zéro, les résultats obtenus chapitre 3 lors de l'étude du stress thermique seul.

Afin de comparer les contributions du stress électrique et du stress thermique, nous avons considéré les caractéristiques obtenues pour une valeur particulière de l'éclairement égale à 10klux dans la série 2, correspondant ainsi aux caractéristiques I(V) présentées en figure 4. Les écarts entre les caractéristiques I(V) dans une même sous-figure sont induits par la contribution du stress thermique. Les différences des caractéristiques représentées dans les quatre sous-figures sont induites par la contribution du stress électrique. Nous voyons très nettement que les différences entre les caractéristiques sont surtout notables à l'intérieur d'une même sous figure. Ainsi, nous constatons qu'une élévation de la température d'un module de 25°C (passant de 25°C à 50°C) générera un stress du module beaucoup plus important qu'un courant inverse égal à 40mA.

Dans des conditions normales de fonctionnement d'un module photovoltaïque, la température est généralement élevée et les effets d'un stress électrique devraient être fortement influencés par cette élévation de la température. C'est ce que nous avons voulu évaluer et pour ce faire, nous avons tracé dans la figure 8, la contribution sur I(V) d'un courant inverse de stress variant de 10mA à 40mA lorsque le module est à 25°C et lorsque le module est à 50°C. Ceci se traduit par les relations suivantes :

$$I_{SE,25}(V) = I_{10,25}(V) - I_{40,25}(V) \qquad (1.a)$$

$$I_{SE,50}(V) = I_{10,50}(V) - I_{40,50}(V) \qquad (1.b)$$

Avec le premier indice correspondant au courant et le deuxième correspondant à la température.

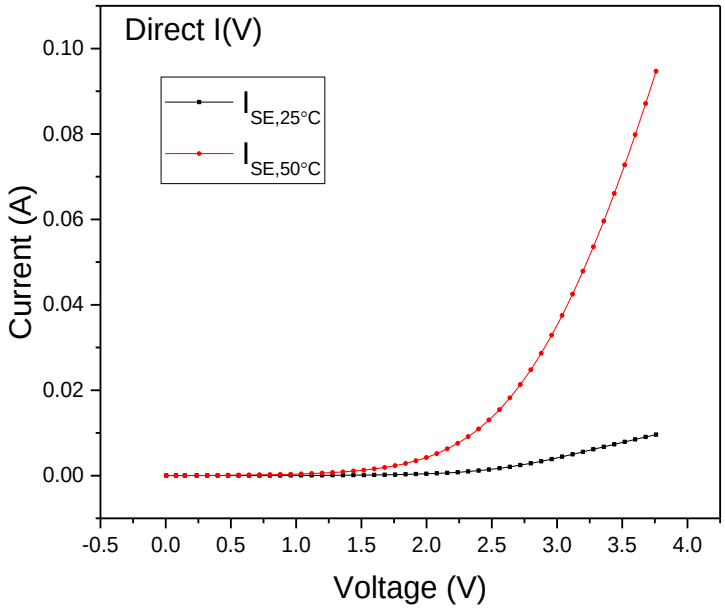


Figure 8 : $I_{SE,25}(V)$ et $I_{SE,50}(V)$ pour un stress électrique variant de 10mA à 40mA mesuré à l'obscurité.

Nous pouvons clairement constater que l'augmentation de la température amplifie l'effet du stress électrique, ce qui peut s'expliquer par une plus grande augmentation du nombre de défauts profonds dans la jonction à haute température.

4.4 Etude des caractéristiques I(V) inverse

La même méthodologie que précédemment pour I(V) est reprise dans cette partie avec la considération des trois séries de mesures.

4.4.1 Série 1 : Stress électrique et thermique des modules à l'obscurité (SET1)

Les caractéristiques log I(V) en inverse des cellules vierges et stressées à l'obscurité par un courant inverse de 10 mA à 40 mA sous température de 25°C à 100°C ont été mesurées à l'obscurité (SET1-1) et sous éclairement (30klux) (SET1-2). Ces caractéristiques sont représentées respectivement dans les figures 9 et 10.

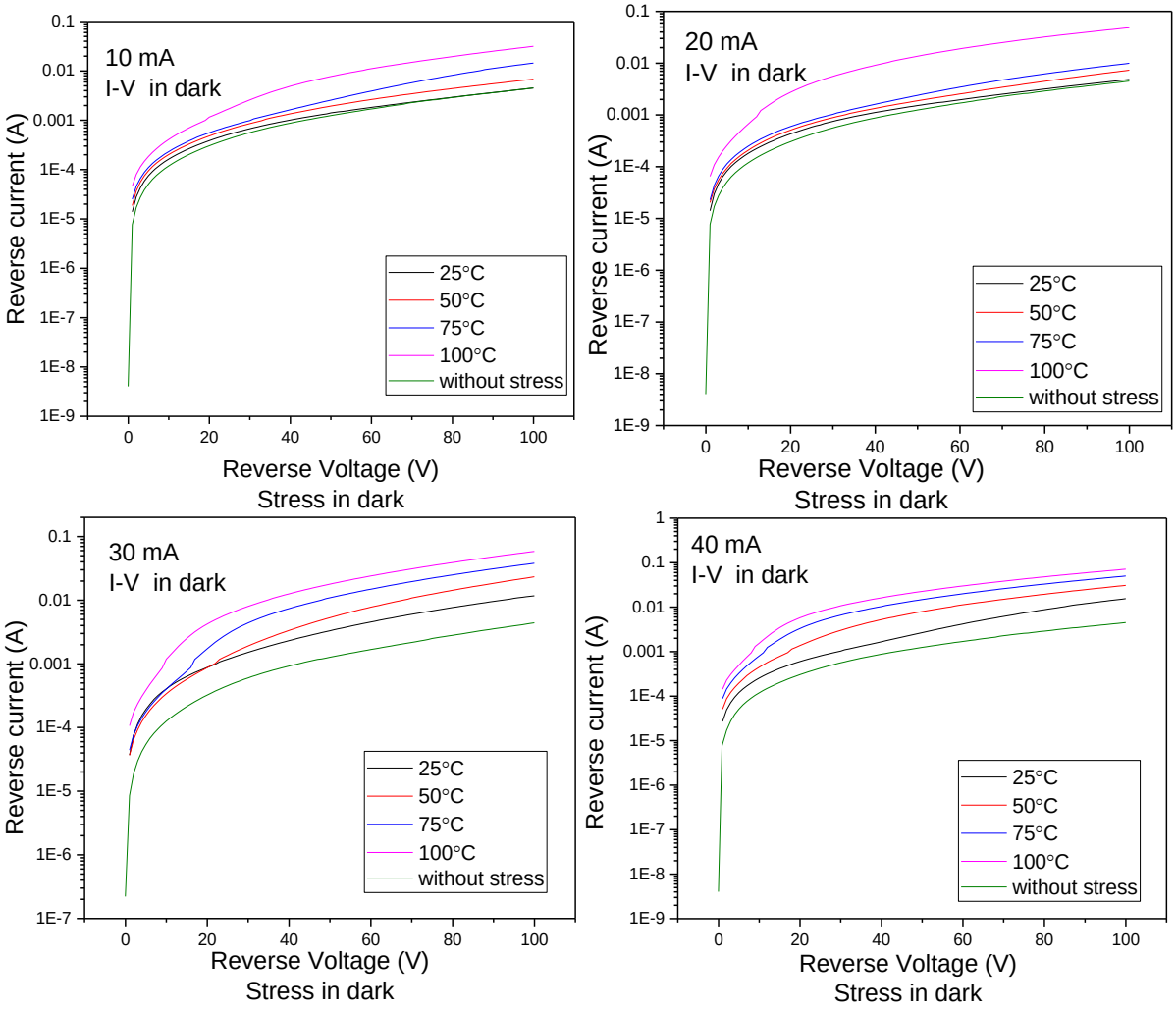


Figure 9 : Log I_{Inv} = fct $(V_{Inv})_{Dark}$ post-stress à l'obscurité mesurée à l'obscurité (SET1-1)

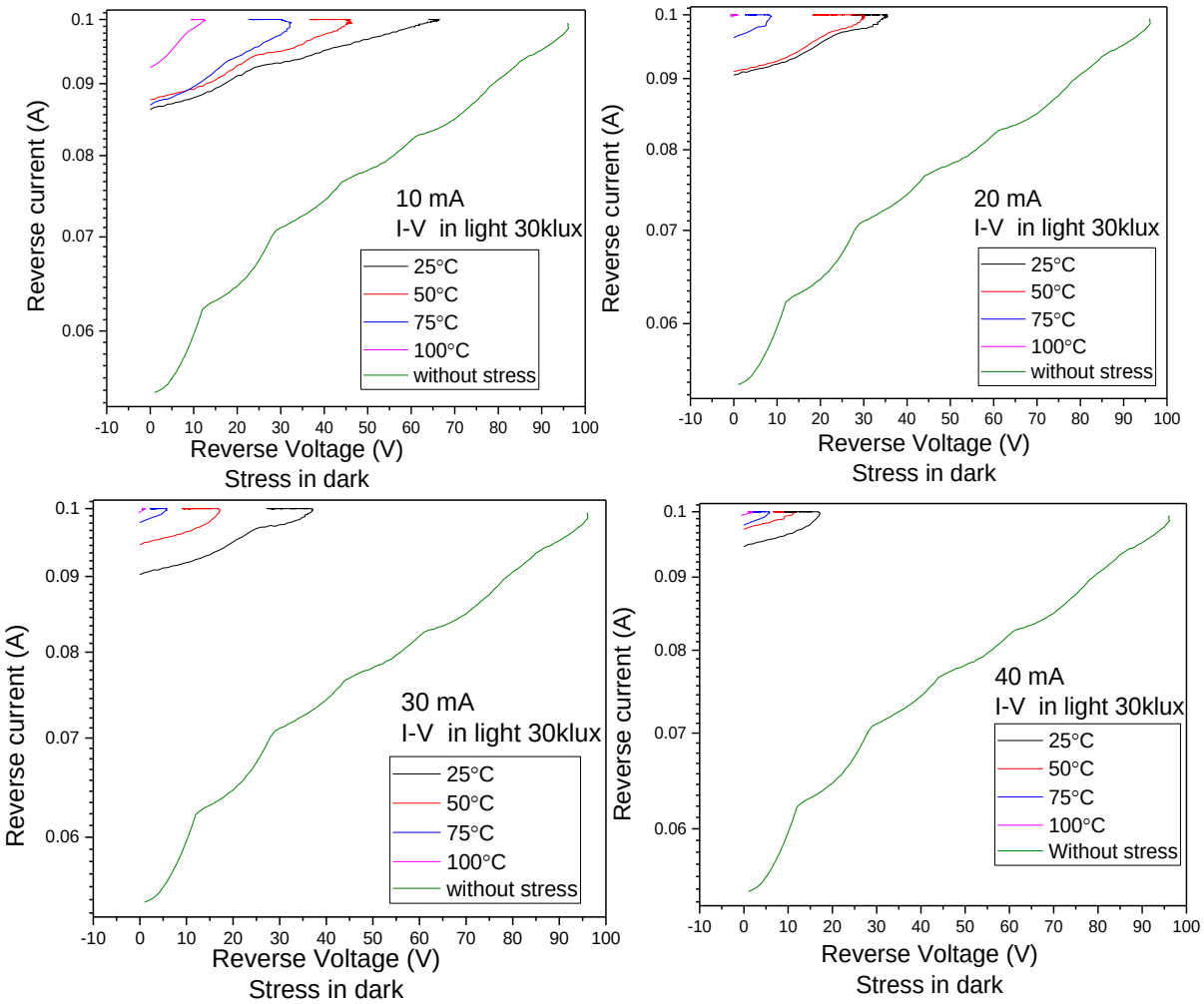


Figure 10 : Log I_{Inv} = fct $(VInv)_{Light}$ post-stress à l'obscurité mesurée sous éclairement (SET1-2)

4.4.2 Série 2 : Stress électrique et thermique des modules sous un éclairement de 10klux (SET2)

Les caractéristiques log I(V) en inverse des cellules vierges et stressées sous un éclairement de 10klux par un courant inverse de 10 mA à 40 mA sous température de 25°C à 75°C ont été mesurées à l'obscurité (SET1-1) et sous éclairement (30klux) (SET1-2). Ces caractéristiques sont représentées respectivement dans les figures 11 et 12.

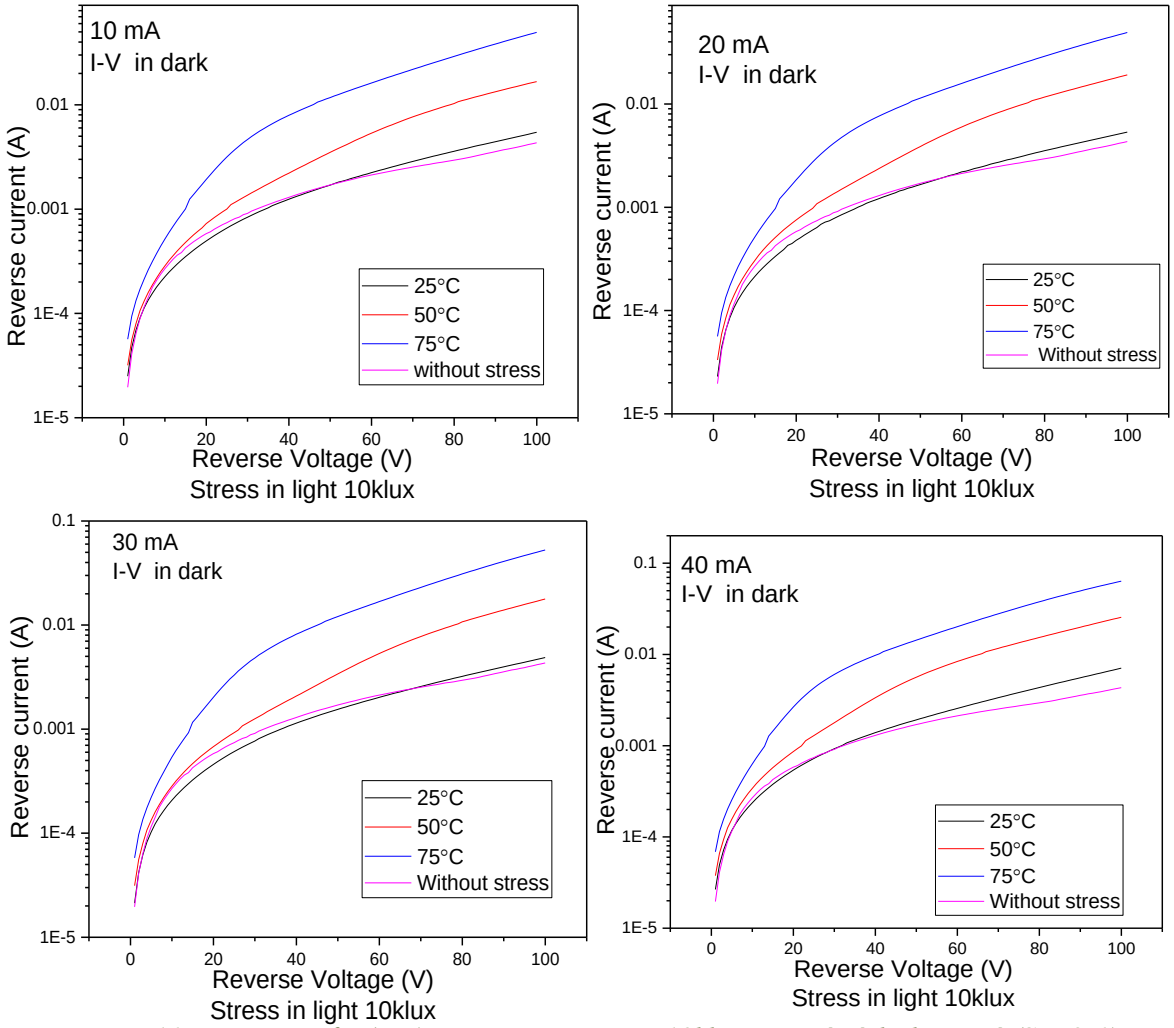


Figure 11 : Log I_{Inv} = fct $(V_{Inv})_{Dark}$ post-stress sous 10klux mesurée à l'obscurité (SET2-1)

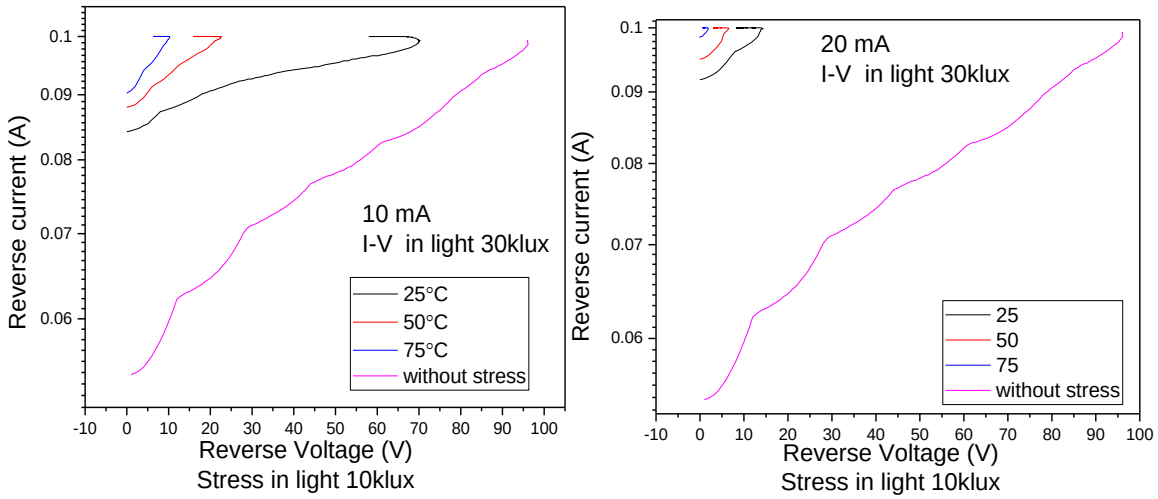


Figure 12.a : Log Iinv = fct $(V_{Inv})_{Light}$ post-stress sous 10klux mesurée sous éclairement (SET2-2)

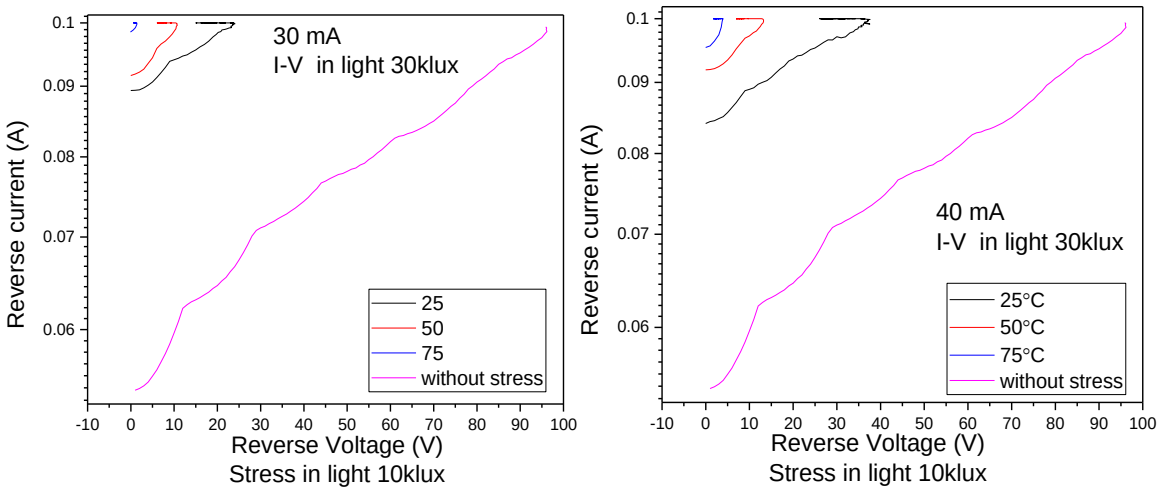


Figure 12.b : Log Iinv = fct (V_{Inv}) $_{Light}$ post-stress sous 10klux mesurée sous éclairement (SET2-2)

4.4.3 Série 3 : Stress électrique et thermique des modules sous un éclairement de 20klux (SET2)

Les caractéristiques logI(V) en inverse des cellules vierges et stressées sous un éclairement de 20klux par un courant inverse de 10 mA à 40 mA sous température de 25°C à 75°C ont été mesurées à l'obscurité (SET1-1) et sous éclairement (30klux) (SET1-2). Ces caractéristiques sont représentées respectivement dans les figures 13 et 14.

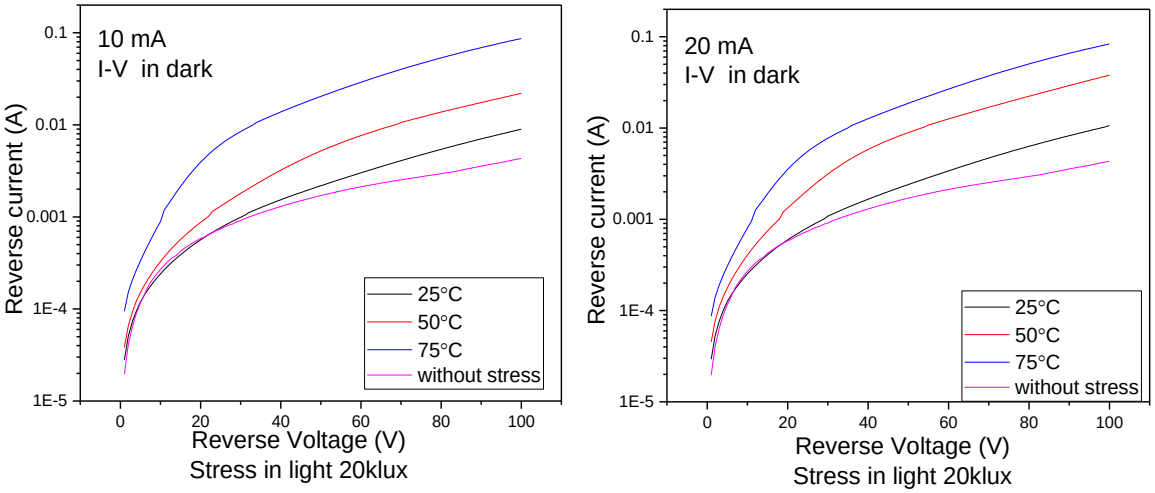


Figure 13.a : Log I_{inv} = fct (V_{Inv}) $_{Dark}$ post-stress sous 20klux mesurée à l'obscurité (SET2-1)

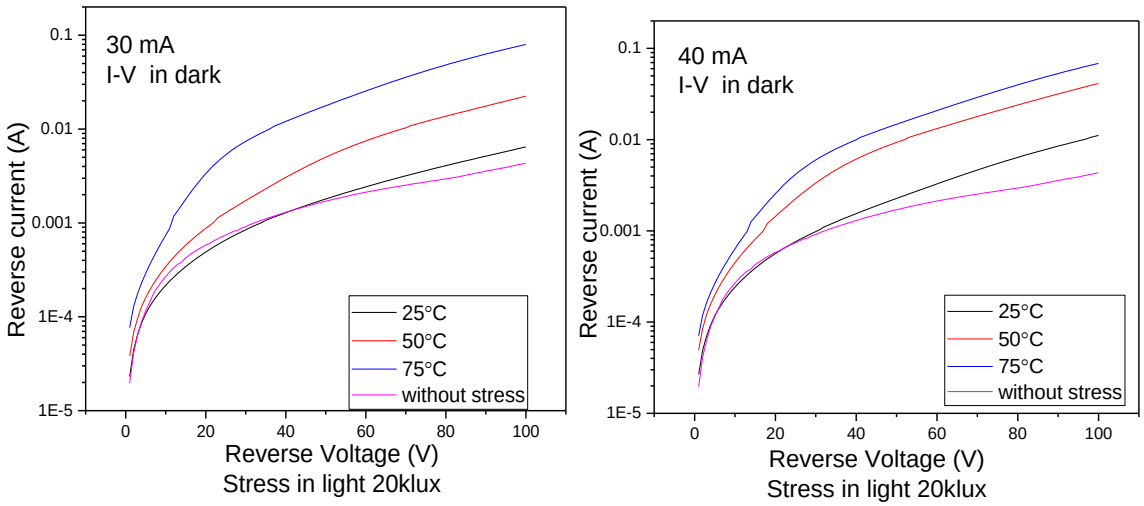


Figure 13.b : Log I_{inv} = fct (V_{Inv}) $_{Dark}$ post-stress sous 20klux mesurée à l'obscurité (SET2-1)

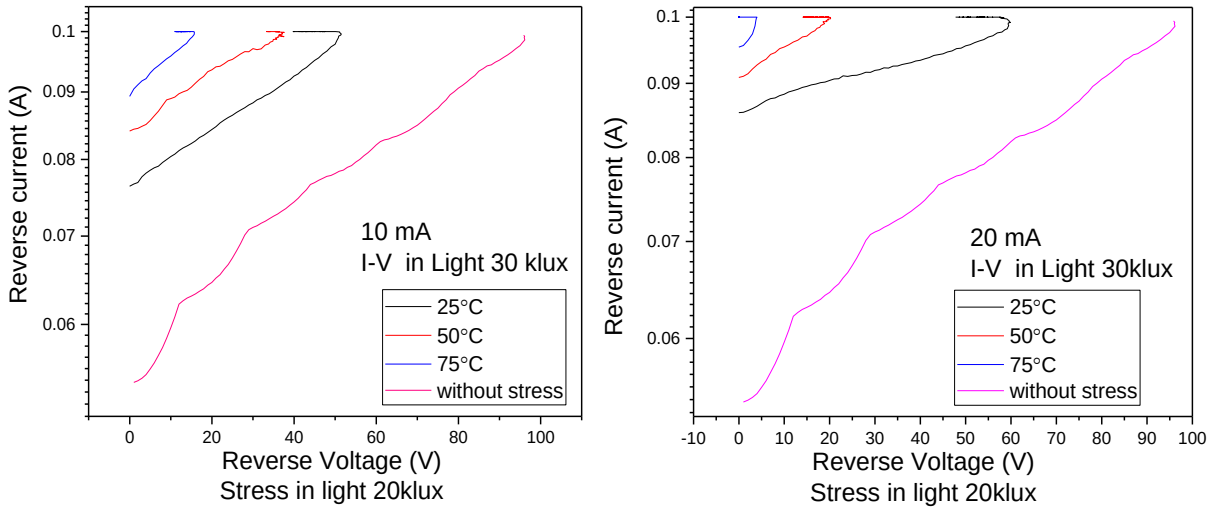


Figure 14 : Log I_{Inv} = fct (V_{Inv}) $_{Light}$ post-stress sous 20klux mesurée sous éclairement (SET2-2)

4.4.4 Influence de l'illumination et de la température sur les caractéristiques I(V) en inverse

Comme précédemment lors des mesures des courants directs, dans les trois séries de mesures, nous obtenons les mêmes formes de caractéristiques I(V) en inverse que ce soit pour les mesures faites à l'obscurité ou sous éclairement. De même, afin de comparer les contributions du stress électrique et du stress thermique, nous avons considéré les mêmes conditions expérimentales que précédemment (éclairement égal à 10klux dans la série 2, correspondant ainsi aux caractéristiques $I(V)_{Inv}$ présentées en figure 11. Nous constatons que les différences entre les caractéristiques sont surtout notables à l'intérieur d'une même sous

figure et qu'une élévation de la température d'un module de 25°C (passant de 25°C à 50°C) générera un stress du module beaucoup plus important qu'un courant inverse égal à 40mA.

Comme pour la caractéristique I(V) directe, nous avons représenté figure 15, la contribution sur I(V) en inverse d'un courant inverse de stress variant de 10mA à 40mA lorsque le module est à 25°C et lorsque le module est à 50°C.

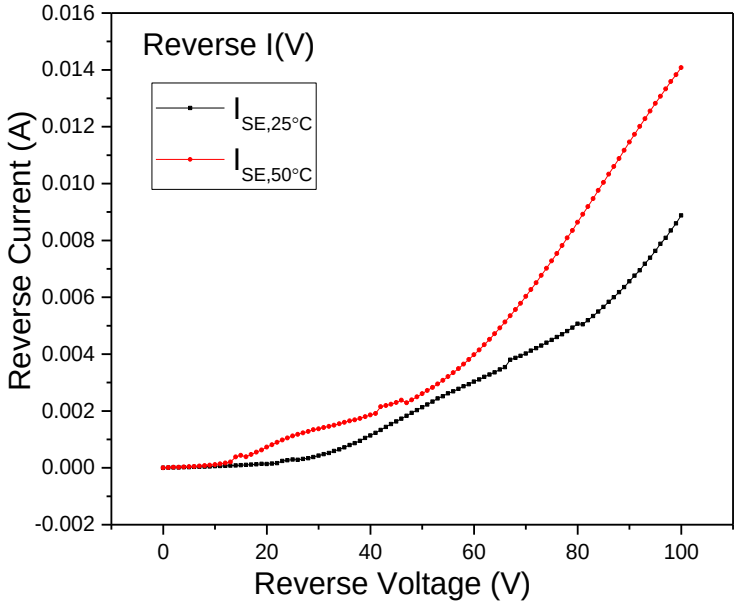


Figure 15 : $I_{SE,25}(V)_{Inv}$ et $I_{SE,50}(V)_{Inv}$ pour un stress électrique variant de 10mA à 40mA mesuré à l'obscurité.

L'influence de la température sur l'amplitude des variations observées dans la caractéristique $I(V)_{Inv}$ en présence d'un stress électrique sur les caractéristiques inverse d'un module photovoltaïque est clairement mise en évidence par les caractéristiques $I_{SE,25}(V)_{Inv}$ et $I_{SE,50}(V)_{Inv}$ avec une amplification de l'effet du courant inverse sur la réponse globale du module.

4.5 Les résistances shunt et série post-stress électrique en fonction de la température

Les valeurs des résistances ont été déterminées à partir des résultats expérimentaux I(V) puis extraites de l'équation représentant le modèle à deux diodes grâce au programme Matlab que nous avons développé. Nous avons calculé les valeurs de ces résistances pour différentes valeurs de température et de courant inverse de stress induit à l'obscurité et sous divers

éclairements. Dans les figures 16 et 17, pour Rsh et Rs respectivement nous n'avons conservé que les cas où les stress sont induits à l'obscurité et sous un éclairement de 10klux et reporté les mesures faites à l'obscurité et sous éclairement.

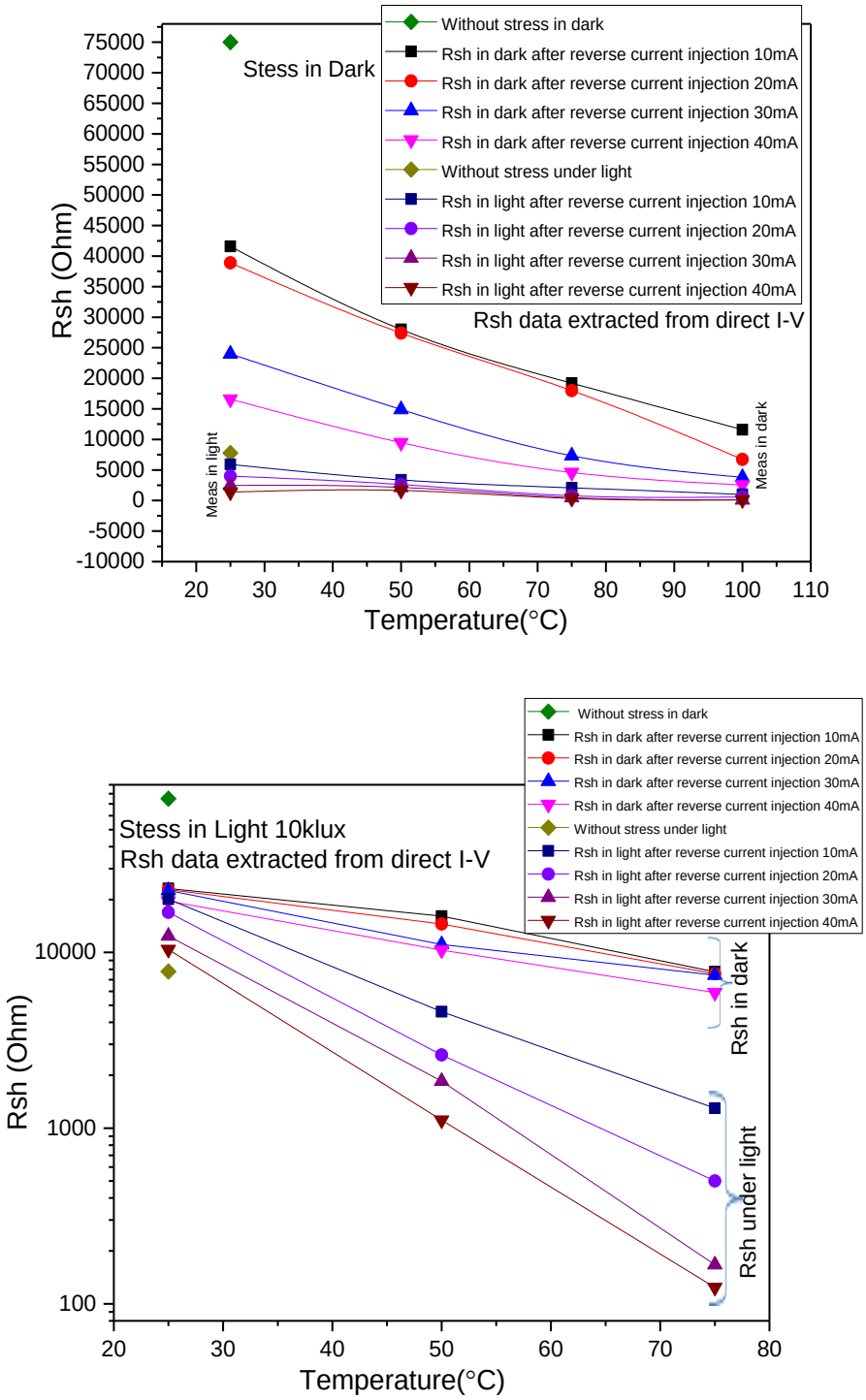


Figure 16: Rsh = fct (T) $_{Dark\ et\ Light}$ post-stress (SET1 & SET2)

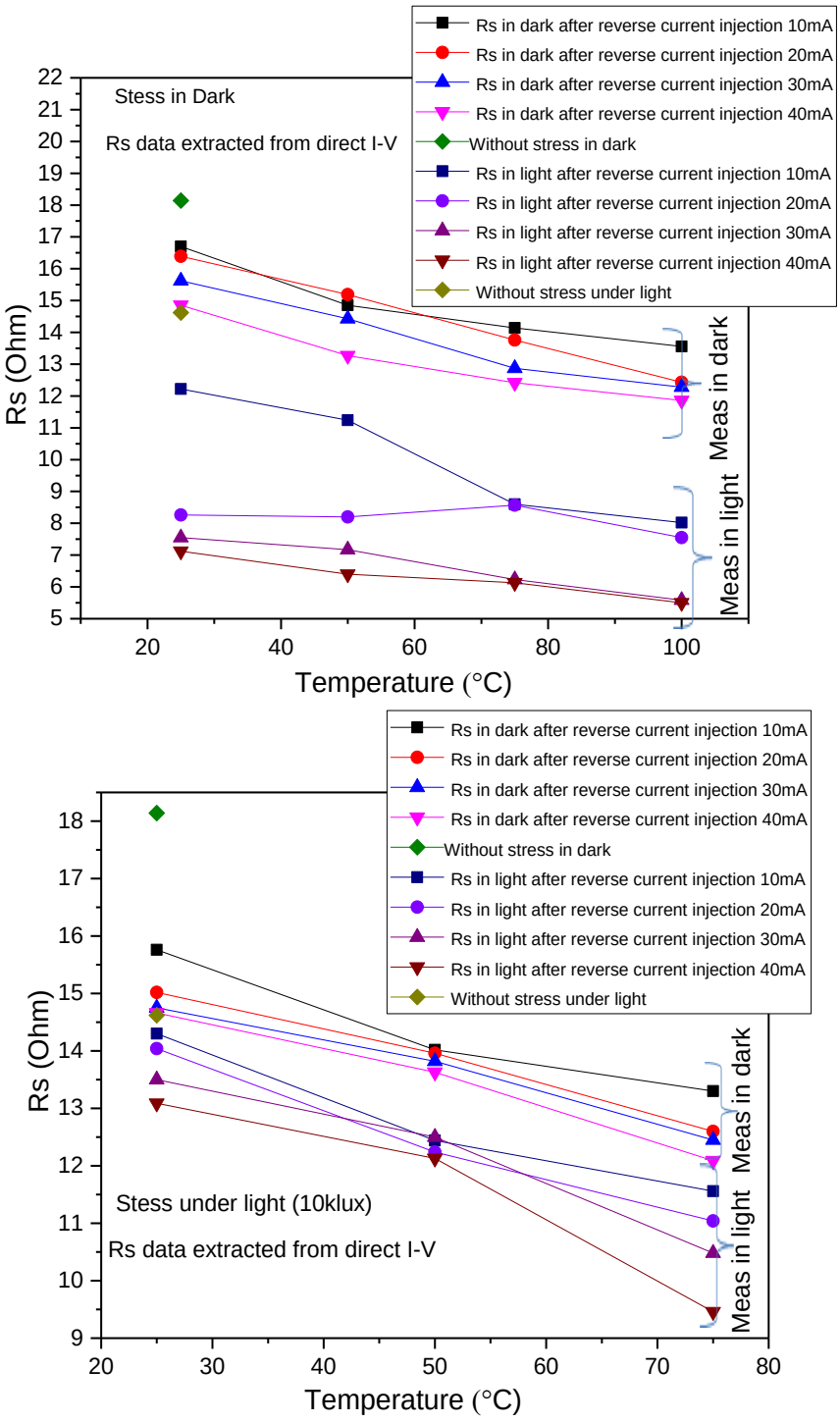


Figure 17: Rs = fct (T) $_{Dark\ et\ Light}$ post-stress (SET1 & SET2)

Après le stress à l'obscurité et sous éclairement, les résistances shunt et série diminuent lorsque la température augmente et continuent à diminuer pour chaque valeur du courant inverse. Ceci indique que l'augmentation de la contrainte diminue les valeurs de résistance

shunt indiquant une augmentation des défauts profonds dans la jonction et l'augmentation du courant de fuite avec la température. Néanmoins, lorsque le module passe de 25°C à 100°C, les variations relatives de R_{sh} sont plus importantes (égale à 83%) dans le cas des mesures sous éclairement que lors des mesures à l'obscurité (égale à 72%). Cette différence est directement liée à la contribution apportée par le photo-courant au moment de la mesure indiquant que les défauts créés sont plus actifs sous éclairement qu'à obscurité.

Dans ces résultats reportés figure 17, nous pouvons à nouveau constater que la résistance série est fortement influencée lors de stress avec ici, lorsque le module passe de 25°C à 100°C, des variations relatives de R_s de l'ordre de 15% pour les mesures faites à l'obscurité correspondant à une variation plus importante en température que celle induite par un courant inverse de stress électrique, même de 40mA.

4.6. Etude des caractéristiques C(V) mesurées à l'obscurité après un stress à l'obscurité et sous éclairement (SET1)

Les mesures de C(V) sont réalisées à une fréquence de 1 MHz, la tension varie entre -35V et 20V. Le courant inverse varie entre 10 mA à 40 mA par pas de 10 mA. La température varie par pas de 25°C entre 25°C et 100°C. L'intervalle du temps pour chaque niveau du stress est de 10 minutes. Les résultats expérimentaux représentant les caractéristiques C(V) mesuré à l'obscurité sont représentés dans les figures 18, 19, 20. La capacité augmente légèrement entre -35V et -10V, elle fait une chute à 0V et ensuite il augmente de nouveau pour devenir constante à partir de 10V.

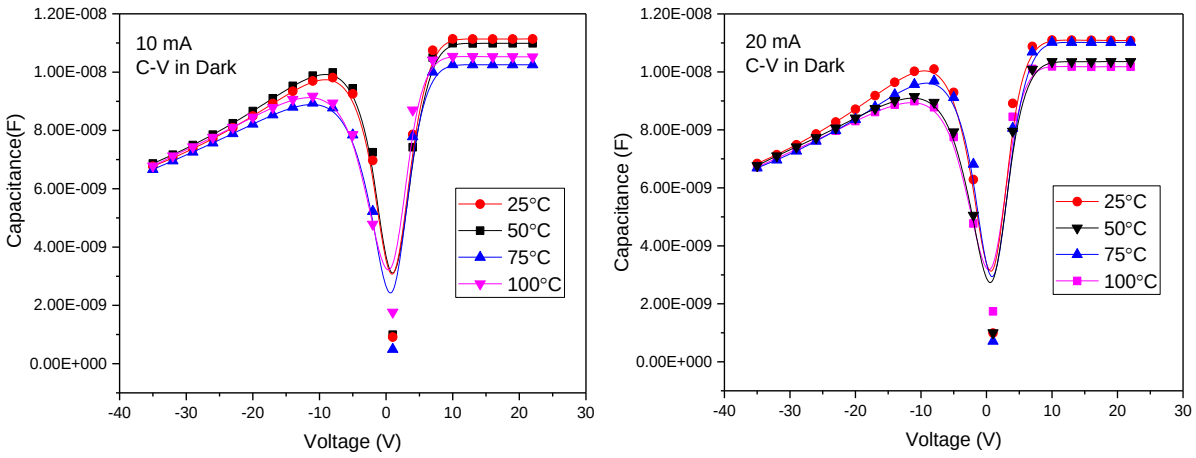


Figure 18.a : C = fct $(V)_{Dark}$ post-stress à l'obscurité mesurée à l'obscurité (SET1-1)

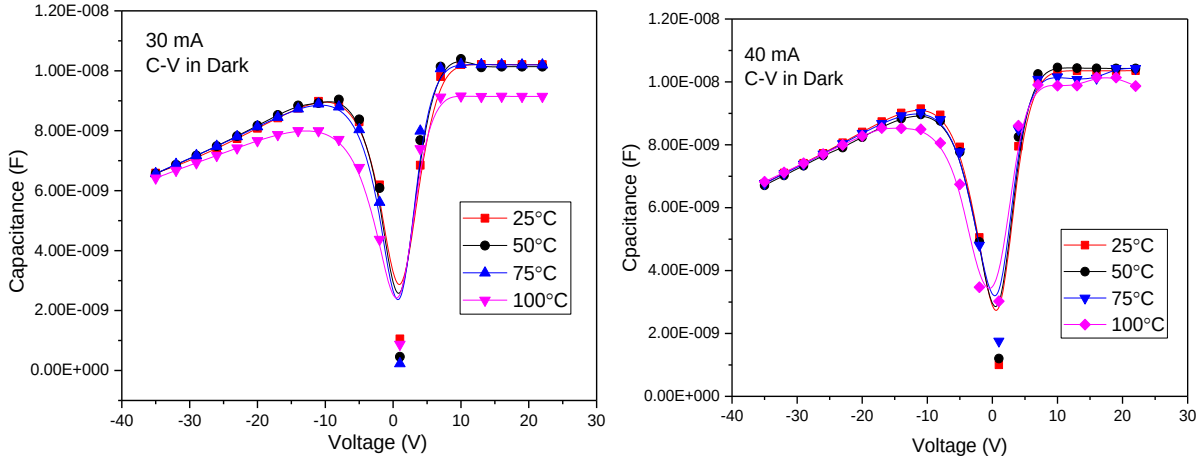


Figure 18.b : C = fct $(V)_{Dark}$ post-stress à l'obscurité mesurée à l'obscurité (SET1-1)

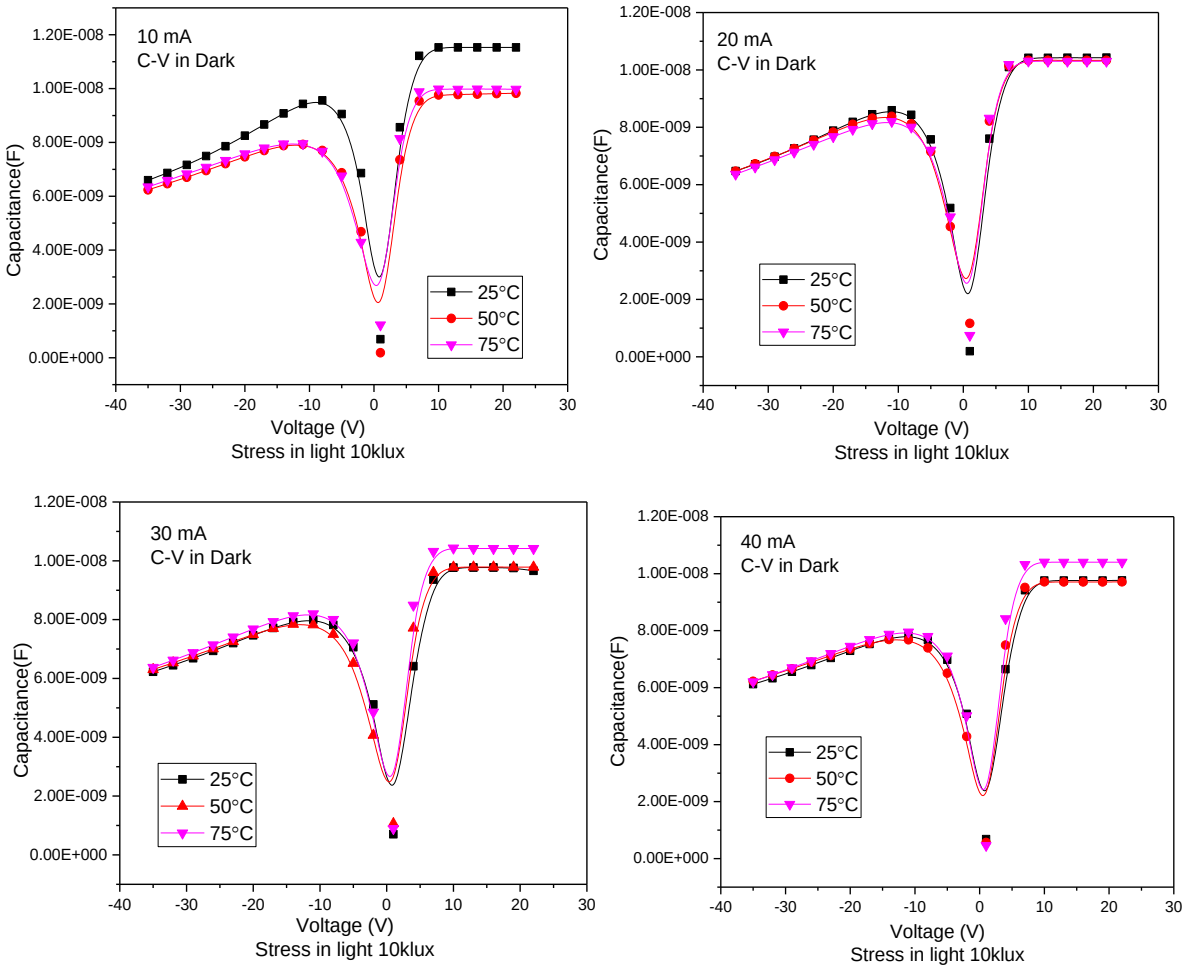


Figure 19 : C = fct $(V)_{Dark}$ post-stress sous 10klux mesurée à l'obscurité (SET2-1)

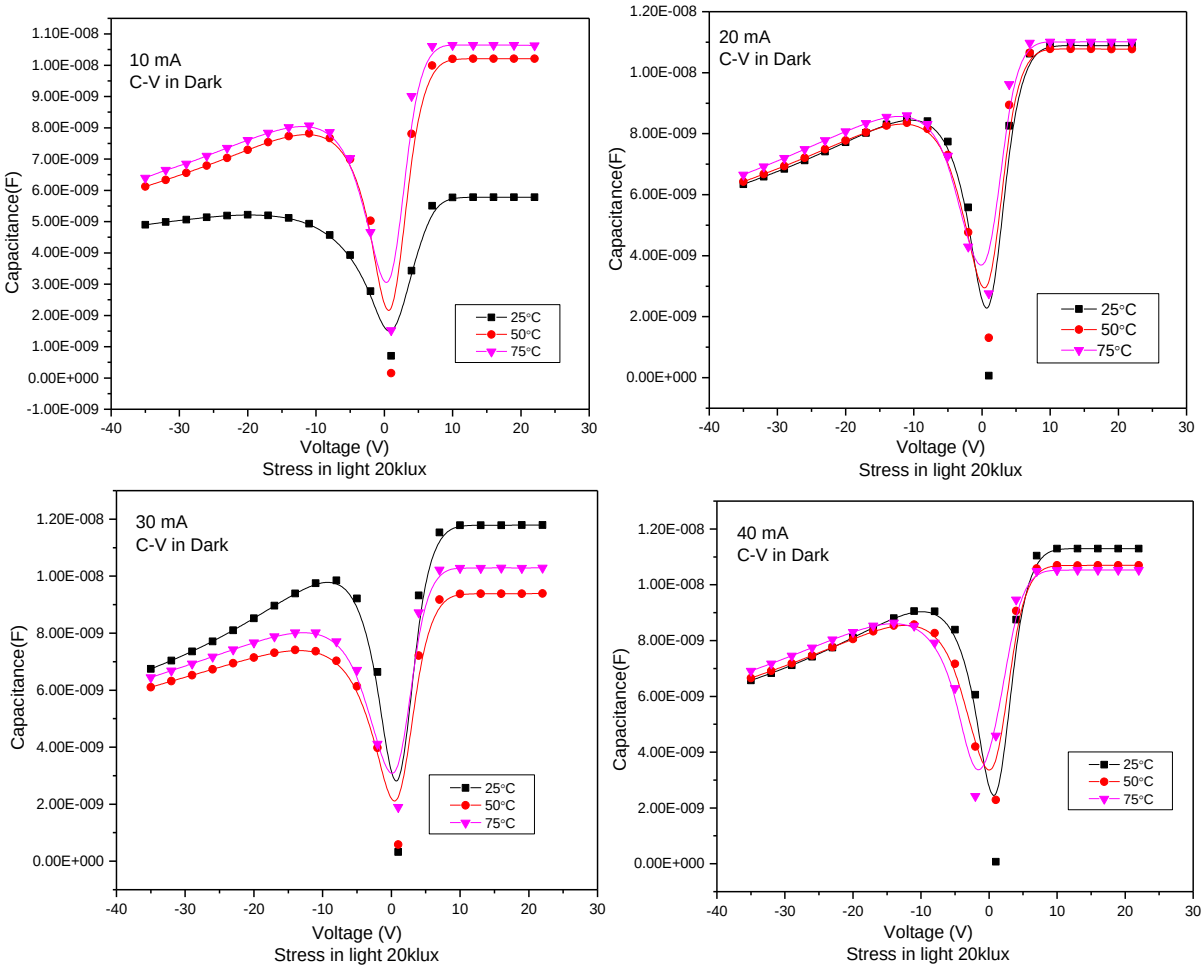


Figure 20 : C = fct (V)$_{Dark}$ post-stress sous 20klux mesurée à l'obscurité (SET2-1)

En mode inverse, figure 21 page suivante, après un stress induit par le courant inverse injecté à 10mA à l'obscurité et sous éclairement (10klux), nous avons tracé les caractéristiques 1/C2 mesuré à l'obscurité tel que proposé par le modèle de Mott-Schottky, équation 12 chapitre 2.

Nous remarquons un comportement quasi-linéaire des caractéristiques $1/C^2$, inversement proportionnel à la tension de polarisation pour des tensions inverses supérieures à 10V dans les deux figures 21. Nous avons représenté l'ajustement linéaire des caractéristiques pour le cas de la cellule vierge puis stressée à l'obscurité et sous éclairement à température ambiante et pour une haute température, mesurées à l'obscurité.

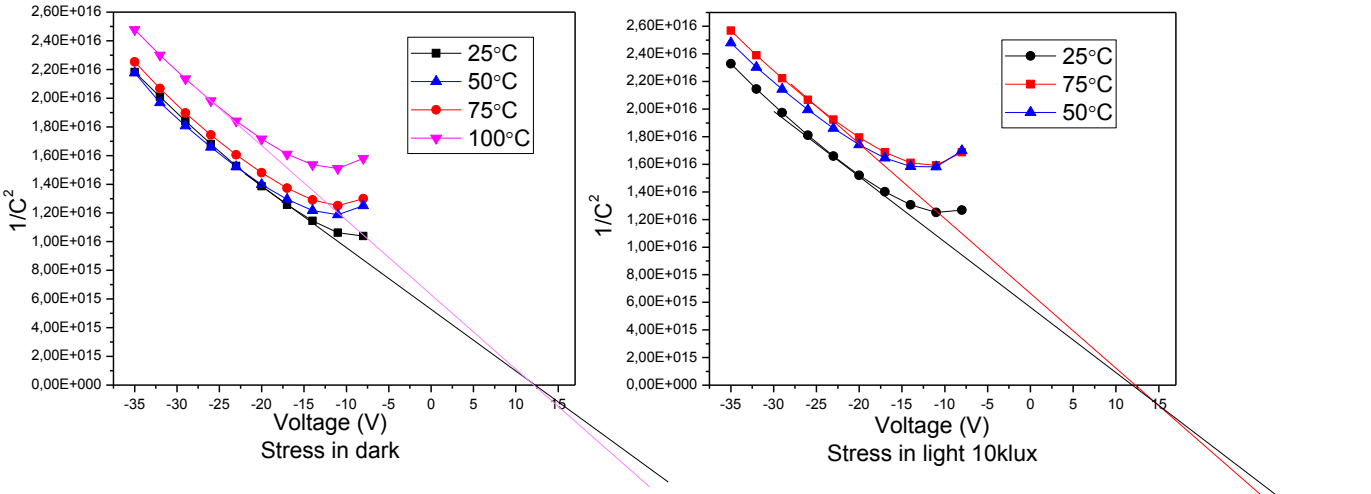


Figure 21 : $(1/C^2) = fct\ (V)_{Dark}$ post-stress à l'obscurité et sous éclairement mesurée à l'obscurité (SET1-1 & SET2-1)

Lorsque le stress électrique est appliqué à l'obscurité ou sous éclairement, les intersections avec l'axe des abscisses, de la droite d'ajustement produisent les mêmes valeurs de tension aux environs de 14V. Cette valeur correspond à la somme des potentiels de diffusion provenant des cellules en série en étant influencé par les cellules en parallèle dans la valeur de la capacité équivalente. Le fait que la tension de diffusion a été trouvée identique pour les modules stressés à l'obscurité et sous éclairement confirme ce que nous avions précédemment constaté et discuté que l'éclairement n'induit pas de défauts supplémentaires dans la jonction.

Le plateau observé pour les faibles tensions inverses est généralement associé à l'existence d'une capacité série provenant des différentes couches dans la structure [1-3]. Dans le cas des modules étudiés, la technologie silicium impose pour augmenter les rendements, la présence d'une couche de passivation arrière notée Back Surface Field (BSF) dopée plus fortement p^+ que la couche absorbante de type p. La capacité résultante est donc donnée par $1/C_{Tot} = 1/C_{jonction} + 1/C_{BSF}$. Néanmoins, il est difficile d'aller plus loin dans cette analyse car les données de la fiche technique des modules étudiés ne sont suffisamment détaillées pour déterminer les caractéristiques séparées des capacités intervenant dans la valeur de la capacité totale.

4.7 Les capacités C_{Ph} et $C_{L\text{-}D}$. Etude comparée

La capacité directement liée à l'éclairement au moment des stress mesurés à l'obscurité dans les branches SET1-1 et SET2-1 sont reportés dans les figures 22 pour deux températures, à l'ambiante et à 50°C au moment d'un stress électrique de 10mA à l'obscurité et sous éclairement de 10klux. Sachant que la capacité est directement liée à l'éclairement, nous avons ensuite déterminé la capacité C_{ST} liée au stress thermique induit sous éclairement.

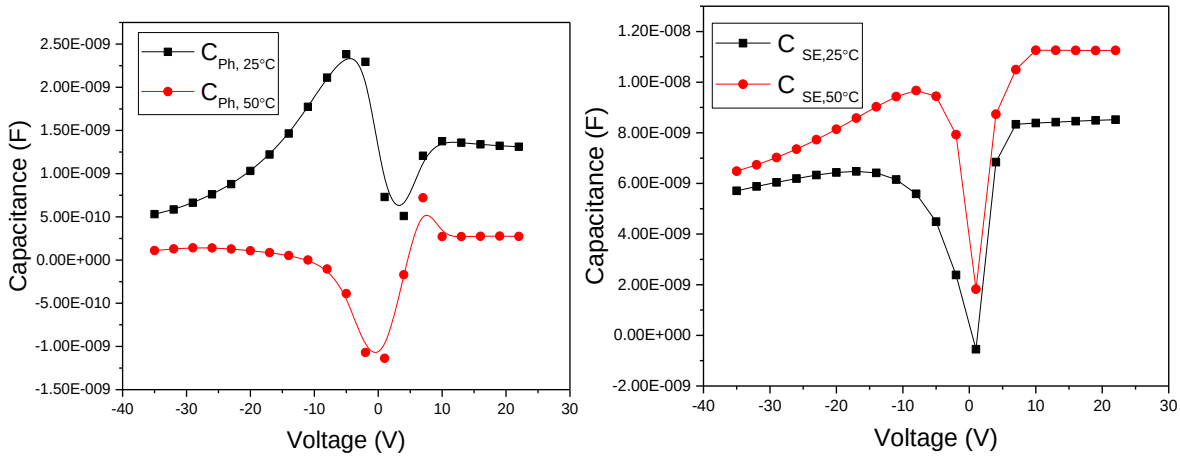


Figure 22 : C = fct (V)$_{Dark}$ post-stress sous 20klux mesurée à l'obscurité (SET2-1)

Nous constatons que lorsque la caractéristique relative au stress thermique, figure 22.b. est considérée sous éclairement (branche SET2), nous obtenons la même caractéristique C(V), en amplitude et en forme que celle déterminée lors du stress thermique à l'obscurité (branche SET1), figure 18. Ainsi, cette étude confirme que l'éclairement n'amplifie pas la création de défauts induits par la température lors du stress thermique. Cela signifie, qu'en mode de fonctionnement normal des modules éclairés, le stress thermique n'induira pas plus de défauts dans la structure qu'il en induit à l'obscurité.

4.8 Conclusion

Ce chapitre correspond à l'étude des modules en conditions réelles de fonctionnement à savoir à une température supérieure à l'ambiante, sous éclairement et en présence d'un stress électrique dans le cas où un ombrage apparaît sur le module avec la création potentielle de points chauds. Ainsi, les études présentées dans ce chapitre reprennent les bases bibliographiques des chapitres précédents et intègrent les analyses séparées des résultats obtenus en présence d'un stress électrique seul et d'un stress thermique seul.

Particulièrement, dans ce chapitre, nous avons étudié l'effet en fonction de la température de l'injection d'un courant électrique en inverse sur les performances des modules photovoltaïques. Pour un module vierge et en présence des stress thermique et électrique combinés à l'obscurité et sous éclairement, plusieurs caractéristiques et paramètres électriques ont été mesurés à l'obscurité et sous éclairement, puis évalués et discutés.

Les résultats expérimentaux des caractéristiques I(V) en direct et en inverse montrent une augmentation de courant de fuite, signature de l'augmentation des défauts, dès que le module subi une contrainte électrique, quel que soit sa température. Ils montrent également que la création de défauts induits par le stress n'est pas directement influencée par l'éclairement et donc la présence d'un photo-courant.

Les mesures de capacités des modules vierges et stressés caractérisées à l'obscurité ont bien montré l'influence du stress sur les propriétés des modules. Les calculs de la fonction $(1/C^2)$ = fct (V) des modules caractérisés dans ce chapitre suivent la loi comportementale de Mott-Schottky incluant la contribution des capacités séries liées à la présence des différentes couches de la structure.

Après l'étude de l'influence de la température sur le fonctionnement d'un module PV stressé électriquement, le chapitre suivant sera consacré à l'étude de la caractérisation DLTS afin d'approfondir l'étude quantitative et d'identifier les défauts activés et induits par les contraintes électriques et thermiques appliquées.

Chapitre 5 :

Etude des défauts dans le matériau par la technique DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy)

5.1 Introduction

Les cristaux semi-conducteurs contiennent des impuretés métalliques et des défauts cristallins. Le traitement des composants, la croissance des semi-conducteurs et les conditions de fonctionnement peuvent être considérés comme la principale source de défauts [1]. Ces impuretés et défauts induisent des niveaux d'énergie supplémentaires dans la bande interdite. Ces niveaux échangent des électrons avec la bande de valence et de conduction et sont appelés « centre de recombinaison ». La recombinaison des porteurs est vue non seulement dans le volume du semi-conducteur mais aussi à sa surface. La surface est en effet l'endroit où la périodicité du réseau cristallin est interrompue. Des effets nuisibles sont vus sur les performances des dispositifs basés sur ces semi-conducteurs par l'existence des défauts. Par conséquence, la performance et la qualité des dispositifs sont améliorées grâce au rôle crucial qui est joué par l'investigation de leurs propriétés et origines [2, 3]. Toute perturbation du réseau cristallin du semi-conducteur se manifeste par la présence d'états dont les niveaux d'énergies associés sont localisés dans la bande interdite. Quand ces niveaux sont proches de la BC ou de la BV, ils correspondent à des impuretés dopantes qui établissent une conductivité de type respectivement N ou P. Quand ils sont proches du centre de la bande interdite, ces niveaux sont appelés pièges profonds.

La technique spectroscopique d'étude des niveaux profonds des jonctions semi-conductrices, Deep Level Transient Spectroscopy (DLTS) a été développée en 1974 par DV Lang [4]. C'est un outil expérimental utilisé afin d'étudier les défauts électriques actifs (connus comme des pièges de porteurs de charge) dans les semi-conducteurs. La DLTS est une méthode directe puissante pour l'analyse des transitoires et la caractérisation des niveaux profonds en déterminant leurs énergies d'activation et leurs sections efficaces de capture [5,6].

Cette technique DLTS complète avantageusement les méthodes de mesures indirectes des défauts dans la jonction des semi-conducteurs comme par exemple la technique que nous avons utilisé dans les chapitres précédents basées sur les caractérisations I(V) et C(V). En effet, même si ces dernières sont simples à mettre en œuvre, rapides, peu coûteuses et non destructives ce sont des mesures indirectes qui nécessitent l'utilisation d'un modèle comportemental physique. Ceci a plusieurs conséquences avec en premier lieu, que leur précision dépendra de la précision des mesures expérimentales et du modèle utilisé. Par ailleurs, elles ne seront donc efficaces que pour le contrôle des matériaux connus mais ne

pourront pas être utilisées pour étudier de nouveaux matériaux ou des nouveaux phénomènes physiques dont on ne connait pas le modèle comportemental. Contrairement à cela, la technique DLTS est une technique directe ne nécessitant pas l'utilisation d'un modèle comportemental. L'analyse DLTS des modules solaires à base Si donne des informations intéressantes concernant les niveaux profonds du substrat. C'est une étape importante pour étudier les défauts causés par la fabrication ou par les contraintes appliquées.

La technique DLTS repose sur la mesure des transitoires de capacité résultant du processus de relaxation après une excitation électrique en fonction de la température. Les défauts seront remplis lors de l'impulsion appliquée à la cellule ou le module et leur vidage est assuré au retirement de l'impulsion. La différence entre deux points du transitoire en fonction de la température forme la réponse DLTS. L'analyse des signaux DLTS permet de tracer les diagrammes d'Arrhenius de laquelle on déduit, les énergies d'activation et les sections efficaces de capture des défauts.

Le travail présenté dans ce chapitre est ainsi consacré à la détermination par la technique DLTS puis la localisation et l'étude des défauts induits dans les cellules solaires par un stress. Ici, la technique proposée sera utilisée pour étudier et calculer les paramètres des défauts dans la structure des modules solaires induits par un stress électrique (injection d'un courant inverse) et stress thermique sous obscurité. Néanmoins, comme nous le montrerons par la suite dans ce chapitre, principalement en considérant, pour validation, les résultats DLTS obtenus sur une diode standard, les résultats obtenus sur les modules photovoltaïques, du fait même de leur structure complexe, seront principalement qualitatifs.

Nous commencerons ce chapitre par la présentation de la méthode classique d'analyse des transitoires, avec une description phénoménologique du principe de caractérisation que la DLTS permet. Ensuite la méthode de mesure et la procédure expérimentale seront détaillées. Nous terminerons ce chapitre par la présentation des résultats obtenus expérimentalement sur un ensemble de cellules stressées à l'obscurité.

5.2 Caractérisation DLTS : mesure des spectres et analyses

La technologie des semi-conducteurs, principalement la technologie silicium, est, encore actuellement, la base de la plupart des composants développés dans l'industrie électronique moderne. La miniaturisation, l'augmentation de la pureté des éléments chimiques utilisés et l'augmentation des gains des capteurs et systèmes optoélectroniques font que ces nouveaux

composants électroniques deviennent plus sensibles aux effets des défauts dans le matériau. Ces défauts apparaissent soit dès l'origine de la vie du composant, c'est à dire au moment de la croissance du cristal semi-conducteur, soit au cours des étapes de traitement ultérieures (la métallisation, l'implantation ionique et la gravure) ou soit encore pendant la vie du composant dus à des stress liés à des points de fonctionnement en déséquilibre. Néanmoins, dans certaines applications, on utilise les défauts pour améliorer la performance du dispositif, par exemple l'irradiation par électrons induit dans les diodes à base Si. Dans ce cas, les défauts se comportent comme des centres de recombinaison à la jonction PN qui réduisent la durée de vie des porteurs minoritaires et augmentent ainsi la vitesse de commutation de ces diodes [7].

Dans notre étude, nous considérons les défauts profonds qui sont générés par les conditions externes non-uniformes de fonctionnement engendrant des contraintes thermiques et électriques dans le fonctionnement d'un module et modifiant ses propriétés électriques et sa performance. Ces défauts peuvent capter les porteurs de charge générés par la conversion photovoltaïque en réduisant le courant de sortie, la tension en circuit ouvert et le rendement des cellules. La technique que nous avons privilégiée et qui est une des plus utilisées pour déterminer les paramètres de ces défauts est la DLTS. [8]

5.2.1 Principe de la DLTS

Dans l'étude des pièges des semi-conducteurs, la spectroscopie des pièges profonds (DLTS) [9] est fréquemment utilisée pour son efficacité, précision et performance. C'est une méthode directe qui fournit les paramètres des pièges avec une grande souplesse et précision permettant ainsi de caractériser les défauts dans des différentes configurations de dispositifs. Le principe de cette méthode est basé sur la libération des charges piégées après leur injection dans le semi-conducteur par l'application d'une tension. Le remplissage et le vidage des pièges produisent une variation de charge dans le semi-conducteur. Elle se traduit par une variation de la capacité de la diode dont la mesure fournit les paramètres des pièges. Elle est notamment adaptée à l'étude des pièges dans les dispositifs à jonction comme les diodes Schottky ou les diodes PN classiques et ces pièges sont généralement plus profonds que les niveaux donneurs ou accepteurs. [10]

La DLTS est basée sur les échanges de porteurs au sein d'un semi-conducteur entre les BV et BC et un niveau est introduit par la présence d'un piège (E_T).

Soit, n_T, la concentration de pièges remplis par les électrons. La variation de la concentration de pièges dn_T/dt remplis en fonction du temps est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{dn_T}{dt} = C_n n(N_T - n_T) - e_n n_T - C_p p n_T + e_p(N_T - n_T) \qquad (1)$$

n et p sont les indices correspondant aux électrons et aux trous libres. Dans l'équation 1, N_T est la concentration totale des pièges, $C_{n,p}$ sont les taux de capture des électrons et des trous respectivement, n_T la concentration des pièges remplis d'électron, $e_{n,p}$ sont les vitesses d'émission d'un électron et d'un trou, respectivement.

Le premier terme de l'équation 1 représente la capture d'un électron par le niveau de piège, pour cela il faut que le piège soit initialement vide d'électron. Ce terme dépend de n et de C_n.

Le second terme représente l'émission d'un électron par le niveau de piège. Le troisième représente la capture d'un trou par le niveau de piège (il faut qu'il contienne un électron pour capturer un trou) et le dernier représente l'émission d'un trou par le niveau de piège.

Si le niveau de piège est proche de la bande conduction BC, e_n est plus grande que e_p ce qui rend négligeable le dernier terme [(N_T-n_T) ~0]. Si l'on se place dans la zone de charge d'espace d'une jonction pn (voire d'une diode schottky), alors la concentration de porteurs libres est négligeable est n = p ~ 0. Dans ce cas, le premier et le troisième terme de l'expression deviennent négligeables et l'équation 1 devient :

$$\frac{dn_T}{dt} = -e_n n_T \qquad (2)$$

En considérant que tous les pièges sont remplis au temps t = 0, cette équation a pour solution,

$$n_T = N_T \, exp(-e_n t) \qquad (3)$$

5.2.2 Procédure de mesure

Le principe de la DLTS est réalisé par un remplissage et vidage des pièges présents dans la zone de charge d'espace, ZCE et d'en analyser temporellement l'émission et la capture des

pièges associés à une mesure de variation de capacité. Ce principe est illustré dans la figure suivante :

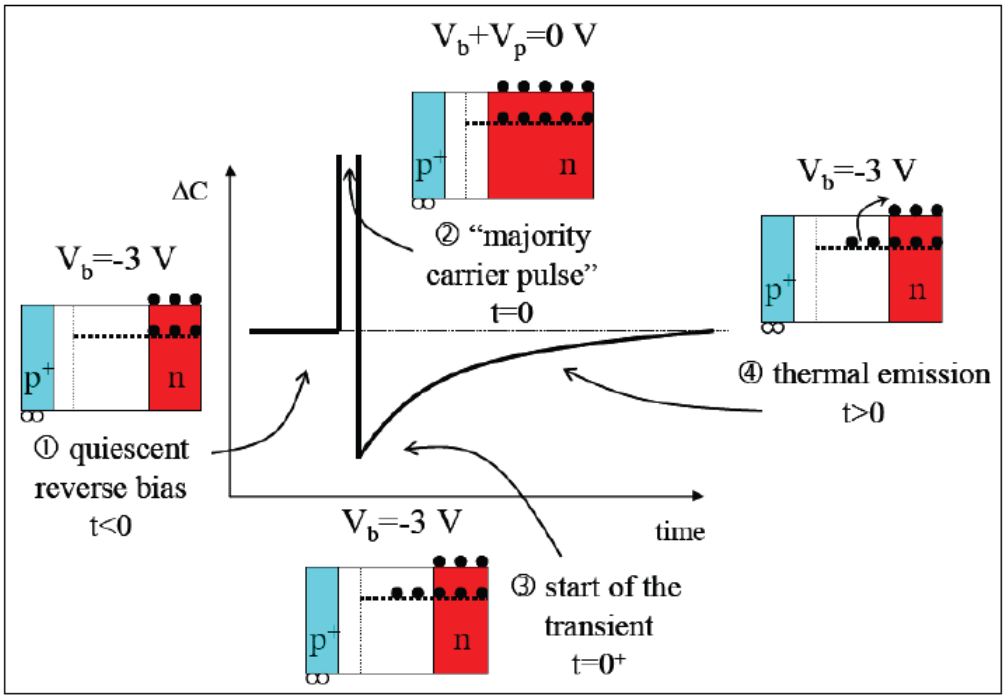


Figure 1 : les différentes phases d'une mesure DLTS [11]

Nous pouvons ainsi décomposer le cycle de mesure DLTS en quatre phases :
Dans la phase numéro (1) : il est appliqué une tension inverse V_b à la jonction. La ZCE est alors maximale, les niveaux de piège sont vides à l'intérieur de la ZCE. La capacité de la jonction est à une valeur constante dont que l'on déterminera par la relation suivante :

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_d - V_b)}{\varepsilon q N_D} \qquad (4)$$

Avec V_d, la tension de diffusion, V_b, la tension inverse, ε, la permittivité relative, q, la charge élémentaire, N_D, la concentration relative aux impuretés donneurs

Dans la phase numéro (2) : on applique une impulsion de tension V_p de durée τ_p, $V_b + V_p = 0$. On parle alors d'impulsion majoritaire car seuls les électrons sont injectés. Dans ce cas, la largeur de la ZCE est réduite et la capacité augmente.

La phase numéro (3), pendant laquelle la mesure DLTS est faite, débute à la fin de l'impulsion de tension, comme l'indique la figure 1. C'est le début du transitoire de capacité

car pendant cette phase, le composant retourne à son niveau de polarisation inverse initial V_r. Les pièges se vident progressivement des charges captées, la capacité revient alors à un niveau inférieur c.-à-d. à son niveau initial. On obtient la relation suivante :

$$C = \left(\frac{\varepsilon q N_{eff}}{2(V_d - V_b)}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (5)$$

Où N_{eff} est la concentration effective de porteurs.
La méthode utilisée pour traiter ce transitoire de capacité que l'on mesure est celle développée par Lang [4].
Dans la phase numéro (4), la variation transitoire de capacité dépend de la température.

La figure suivante reprend les différentes phases présentées ci-dessus montrant dans la phase 3, les deux instants de mesures.

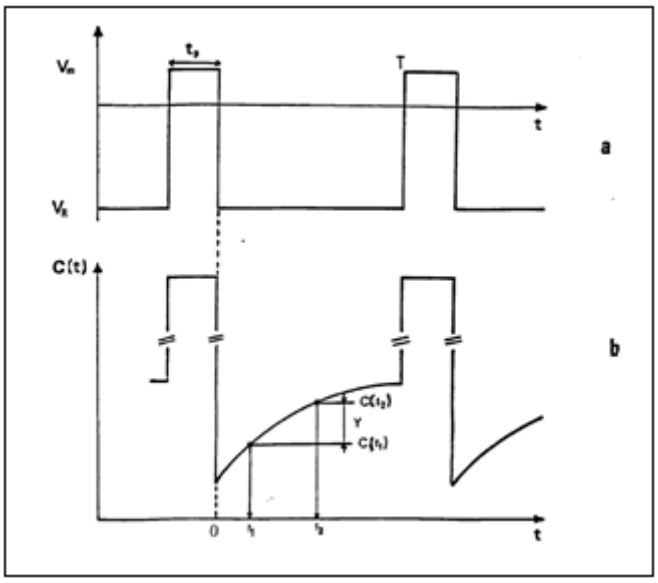


Figure 2 : Schéma illustrant les phases de la mesure DLTS des tensions de polarisation ; (b) du transitoire de capacité. [12]

5.2.3 Le tracé du spectre DLTS. Méthode de Lang

La méthode de Lang est habituellement utilisée pour analyser les signaux DLTS déduit de la mesure de la variation de la capacité de la jonction induite par l'application d'un échelon de tension. Le principe de la méthode associée est simple. Dans cette méthode, la variation de

capacité ΔC en fonction de la température est mesurée entre ces deux instants t_1 et t_2 dans cette phase 3 du cycle. Nous allons la décrire brièvement maintenant : à partir de l'enregistrement des transitoires effectués à différentes températures, il est possible de déterminer la variation de ΔC pour un couple de temps t_1 et t_2 donné. Pour cet intervalle de temps donné, nous obtenons un signal DLTS normalisé comme montré dans la figure 3, centré sur une valeur maximum de variation de capacité ΔC_{max} obtenue pour une température donnée T_{max} caractéristiques des défauts [8] est donné par l'équation suivante :

$$DLTS = \Delta C = C(t_2) - C(t_1) = A[exp(-e_n t_2) - exp(-e_n t_1)] \qquad (6)$$

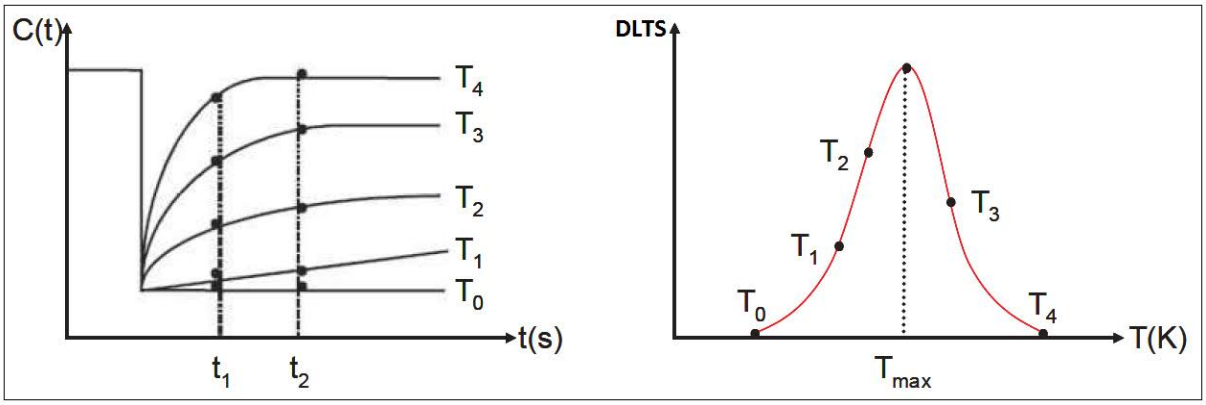


Figure 3 : Evolution du transitoire de capacité et du signal DLTS normalisé ΔC avec la température avec, dans cet exemple $T_4 > T_3 > ... > T_0$ [8]

A une température très inférieure à une température de seuil notée T_{max} c'est à dire à basse température, le niveau de piège émet l'électron piégé en un temps très inférieur par rapport à t_2. A haute température, pour une température très supérieure à T_{max}, l'émission des électrons piégés est faite en un temps très inférieur par rapport à t_1. Alors, aucune variation de capacité n'est donc observée entre les temps t_1 et t_2 pour les basses et hautes températures. Par contre, dans la fenêtre d'observation entre t_1 et t_2, il est possible de déduire de l'équation 6 la vitesse d'émission correspondant au maximum de signal DLTS au point T_M. A ce point $d\Delta C/dT = 0$ qui peut se décomposer de la façon suivante $(d\Delta C/de_n)(de_n/dT) = 0$. Or la dérive de e_n par rapport à la température ne s'annulant jamais, l'équation ci-dessus s'écrit $(de_n/dT) = 0$ et nous obtenons l'inverse du taux d'émission, c'est à dire la vitesse d'émission, $e_n = \ln[(t_2/t_1)/(t_2-t_1)]$

définie ainsi au maximum du signal DLTS et correspondant à la température T_M. La position de ce maximum dépend des couples de valeurs de t_1 et t_2 choisis pour l'enregistrement de la capacité. Mais quel que soit le couple (t_1, t_2) choisi, la position de T_m et l'amplitude du signal DLTS à cette température dépendra du niveau du piège. [8]

Pour différents couples t_1 et t_2, nous obtiendrons différents signaux DLTS possédant différentes valeurs (e_n, T_{max}). C'est à partir de ces paramètres qu'il sera possible de tracer le diagramme d'Arrhenius afin de déterminer la signature du piège à savoir les caractéristiques des défauts, telles que la concentration, l'énergie du niveau (E_c - E_t), la section efficace apparente de capture σ comme nous le voyons dans le paragraphe suivant.

La figure 4 représente un exemple d'une droite d'Arrhenius qui permet le calcul des paramètres comme l'énergie d'activation et la section efficace de capture des porteurs.

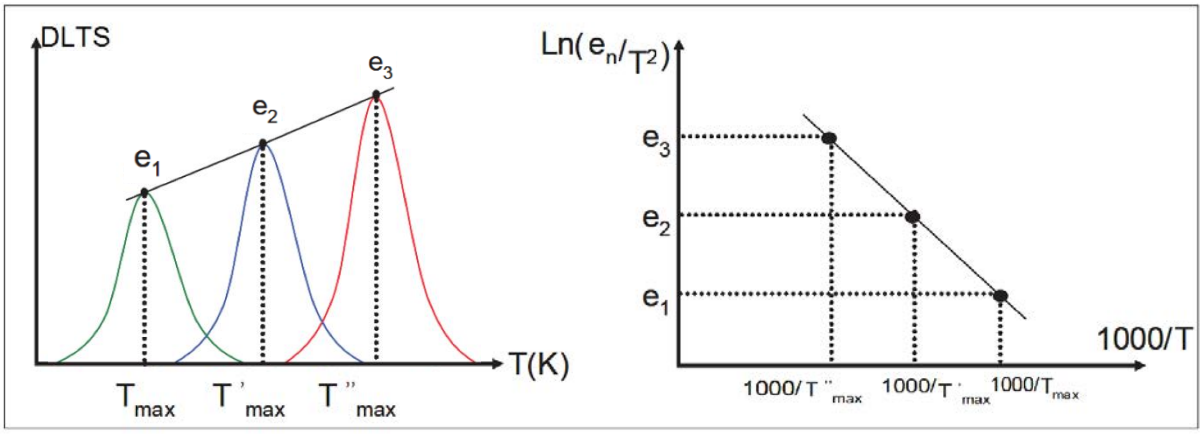


Figure 4 : Le tracé de la droite d'Arrhenius par la méthode de Lang.

L'énergie d'activation d'un défaut E_a et sa section efficace de capture de porteurs σ peuvent ainsi être déterminés par l'expression de la vitesse d'émission d'électrons e_n. Par la relation suivante [4] :

$$e_n(T) = AT^2\, exp\left(-\frac{E_a}{KT}\right) \quad avec \quad A = \frac{4\sqrt{6}\,\sigma k^2 \pi^{\frac{3}{2}} m^*}{h^3} \qquad (7)$$

Où T est la température absolue, k est la constante de Boltzmann, m* est la masse effective de l'électron, h est la constante de Planck.

Le tracé de ln $\left(\frac{e_n}{T^2}\right)$ en fonction de 1/kT pour les couples de valeurs e_{ni} et T est effectué par la relation [13] :

$$ln\left(\frac{e_n}{T^2}\right) = ln(A) - \frac{E_a}{KT} \qquad (8)$$

Ce tracé correspond à une droite, appelée droite d'Arrhenius dont la pente est égale à l'énergie d'activation du défaut. Son ordonnée à l'origine, égale à ln(A), permet de retrouver la section de capture du piège. Dans le cas du silicium, nous avons la relation suivante -ln(A) = ln σ +49,031. [14]

5.2.4 Optimisation de la méthode de Lang : Méthode d'extraction des paramètres en 5 points

La méthode de Lang présentée ci-dessus extrait la température T_M et la vitesse d'émission e_n à la valeur maximale de la réponse DLTS. Afin de tracer la droite d'Arrhenius avec un nombre ne suffisant de points représentatifs pour le composant électronique en test c'est à dire, les modules dans notre étude, il est possible d'extraire la température T_i et la vitesse d'émission e_{ni} en cinq points particuliers (i =1…5) de chaque pic DLTS. Ces cinq points sont choisis comme étant l'extremum (correspondant à la valeur retenue dans la méthode de Lang, les deux points à mi-hauteur, les deux points au 3/4 du maximum d'amplitude).

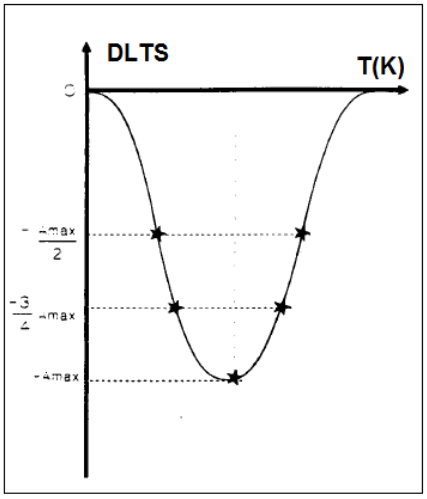


Figure 5 : Le choix des cinq points par le signal DLTS

Afin d'expliquer cette méthode, nous présenterons les calculs en fixant un rapport $\alpha = \frac{t2}{t1} = 2$ permettant de fixer la valeur maximale du paramètre A à A_{max} = A / 4 déterminé à partir de la

valeur de l'amplitude maximale du pic. Cette valeur, est liée à l'équation du signal DLTS, équation 6 par :

$$A_{max} = | A\ [exp\ (-Ln(\frac{t2}{t1})\ /\ \frac{1-t1}{t2})) - exp\ (-Ln(\frac{t2}{t1})\ /\ \frac{t2}{t1-1})] | \quad (9)$$

$$A_{max} = | A\ [exp\ (\frac{-Ln(\alpha)}{1-\alpha^{-1}})) - exp\ (\frac{-Ln(\alpha)}{\alpha-1})] | \quad (10)$$

La première étape calculatoire de la méthode est, à partir de la relation 6 de déterminer la vitesse d'émission e_{n3} correspondant au maximum d'amplitude tel que proposé par Lang dans sa méthode. Lors de la description de la méthode DLTS, nous avons précédemment présenté le calcul de la vitesse en ce point que l'on obtient comme solution de l'équation $d\Delta C/dT = 0$, soit $d\Delta C/d\ e_n = 0$. Cette valeur particulière de la vitesse d'émission e_{n3}, solution de cette équation est donc trouvée égale à $e_{n3} = ln(\frac{t2}{t1}) / (t_2-t_1) = 0.693/t_1$. Cette valeur correspond bien à la valeur de la vitesse d'émission maximale proposée dans la méthode de Lang.

Les vitesses e_{n1} et e_{n5}, peuvent maintenant être calculées. Elles sont solutions de l'équation 6 lorsque $\Delta C = -A_{max} / 2 = -A / 8$ ce qui permet d'écrire $x^2 - x + 1/8 = 0$, avec $x=exp\ (-e_n\ t_1)$. Les deux solutions de cette équation sont $e_{n1} = 0.158/t_1$ et $e_{n5} = 1.921/t_1$.

De même, les vitesses e_{n2} et e_{n4} sont alors solutions de la relation $\Delta C = -\ 3\ A_{max}\ /4 = -\ 3\ A\ /\ 16$, ce qui nous donne l'équation $x^2 - x + 3/16 = 0$ à résoudre et finalement, obtenir les solutions $e_{n2} = 0.288/t_1$ et $e_{n4} = 1.386/t_1$

En résumé, 1'ensemble des cinq vitesses d'émission obtenues sont $e_{n1} = 0.158/t_1$, $e_{n2} = 0.288/t_1$, $e_{n3} = 0.693/t_1$, $e_{n4} = 1.386/t_1$, et $e_{n5} = 1.921/t_1$

Les différents couple (e_{ni}, T) obtenus permettent de tracer la droite d'Arrhenius.

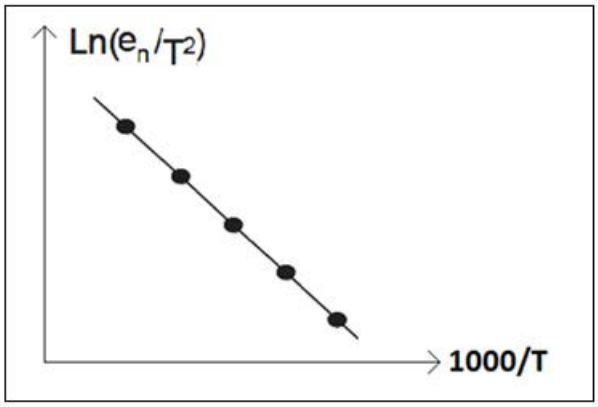


Figure 6 : Le tracé de la droite d'Arrhenius par la méthode de cinq points.

5.3 Appareil de mesure DLTS

Un système DLTS est composé d'un générateur de pulses, un préamplificateur, un capacimètre et deux corrélateurs double boxcar. Le système que nous avons utilisé est un spectromètre de la société Sula Technologies. Il permet de mesurer les variations de tension aux bornes du composant en test en réponse à une impulsion. Il ne donne pas directement la variation de capacité qu'il sera possible néanmoins de calculer directement, à partir de la variation de tension avec une relation linéaire tenant compte du gain de l'appareil. Tout comme dans la CDLTS classique décrite ci-dessus, cet appareillage permet de remplir les niveaux profonds lors de l'impulsion et leurs caractéristiques d'émission seront extraites de l'analyse des transitoires. Nous allons décrire maintenant les différentes parties de cet appareillage. Il comprend :

- Un générateur impulsionnel permettant de fournir la tension de polarisation et une tension périodique de fréquence allant de 1 Hz à 5 KHz avec des largeurs d'impulsions de 300 ns à 100 ms, pour une tension pouvant varier de 0 à -13 V pour Vr, et avec pour Vm-Vr, une amplitude maximale de 13V.

Figure 7 : Générateur d'impulsions

- Un capacimètre rapide à 1 MHz permettant de mesurer la capacité transitoire au cours du processus d'émission grâce à un temps de réponse de 10 µs et pour des calibres allant de 10 à 1000 pF.

$$C(pf) = RANGE * DPM\ READING\ (Ce\ qui\ est\ affiché\ sur\ l'écran) \qquad (11)$$

Figure 8 : Capacimètre

- Un préamplificateur permettant d'amplifier la valeur de la capacité d'un facteur allant de 1 à 1000.
- Un premier corrélateur double boxcar, permettant de fixer la fenêtre t_1 et t_2, et une valeur de t_1 pouvant prendre différentes valeurs : 0.02/0.05/0 .1/ . . . /20/50/100 ms.

L'équation de la variation de la capacité avec la valeur du pic mesuré, y (cm) est donné par :

$$\Delta C\ (pf) = DLTS = \frac{2.Y.R}{G} \qquad (12)$$

Avec Y= y.S, S la sensibilité du canal (mV/cm), R, l'échelle de la mesure (pF) et G, le gain de l'amplificateur.

Figure 9 : Préamplificateur + corrélateur

- Un deuxième générateur corrélateur fournissant une seconde impulsion qui sera utilisée en mode double DLTS dans la technique DDLTS.

Figure 10 : Corrélateur

La figure 11 représente l'ensemble des appareils décrits ci-dessus intégrés au spectromètre Sula Technologies.

Le montage technique complet du banc de caractérisation DLTS utilisé durant nos études est représenté sur la figure 12.

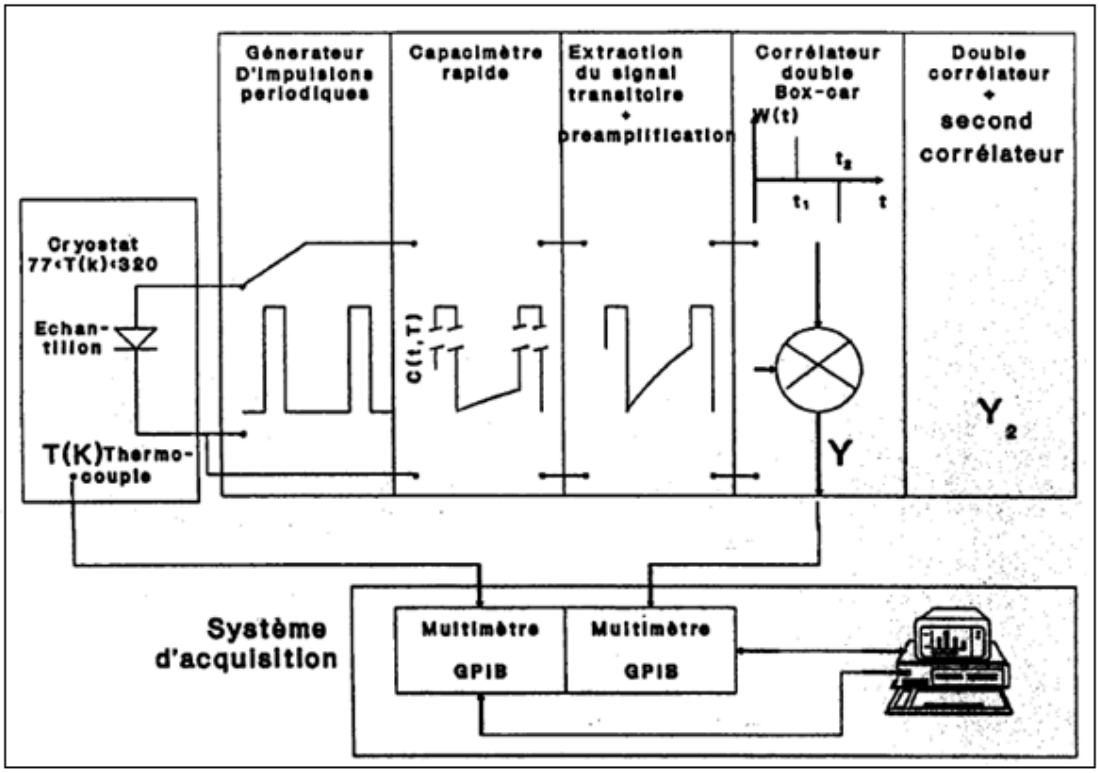
Figure 11 : Schéma de l'appareil de caractérisation DLTS de Sula Technologies utilisé.

- Pour les mesures à basses températures, un cryostat permet de caractériser l'échantillon à étudier à une température minimale de 77K. Pour les mesures à hautes températures, une résistance chauffante nous permet de travailler jusqu'à 320K. La mesure de la température est mesurée par un thermocouple.

- En plus du spectromètre DLTS, le système d'acquisition comprend :
  Un oscilloscope programmable (figure 11.a) qui permet de visualiser les signaux DLTS en fonction du temps. Deux multimètres programmables I.E.E.E. pour relever le signal de la sortie Y (Volt), et la température de l'échantillon délivrée par le thermocouple (Volt). (Figure 11.b).
  Un micro-ordinateur contrôle la mesure.

5.4 Méthode de mesure

Avant et après chaque niveau de contraintes (thermique ou l'injection inverse), l'échantillon à caractériser est placé dans l'azote liquide et branché entre le générateur d'impulsion et le capacimètre. De même, à chaque niveau, les courbes de la sortie Y(Volt) en fonction de temps sont obtenues. Le signal DLTS en fonction de la température est obtenu à partir de l'équation 12. Ensuite par ces signaux, on peut extraire les valeurs du couple (e_n, T) de chaque pic permettant de tracer les diagrammes d'Arrhenius. Ces diagrammes sont en réalité des droites à partir desquelles nous pouvons extraire les différents paramètres des défauts dans les cellules et les modules à savoir leur niveau d'énergie E_T (eV) et leur section efficace de capture σ (cm^2)).



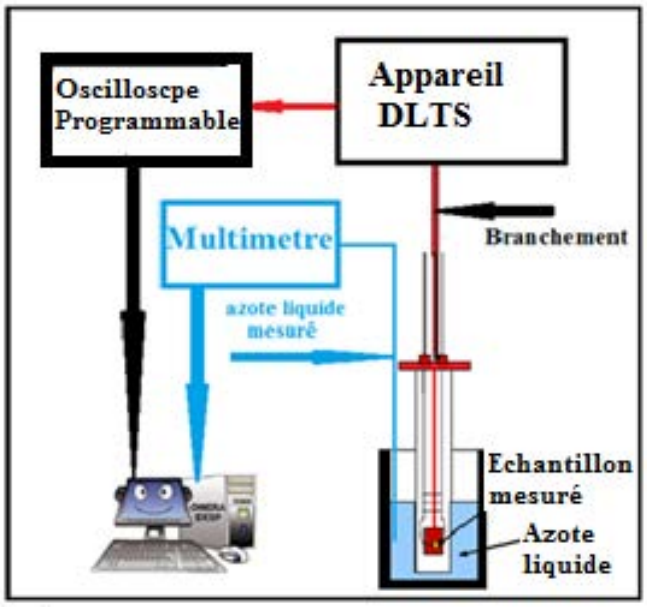


Figure 12 : Schéma bloc du dispositif expérimental [13]

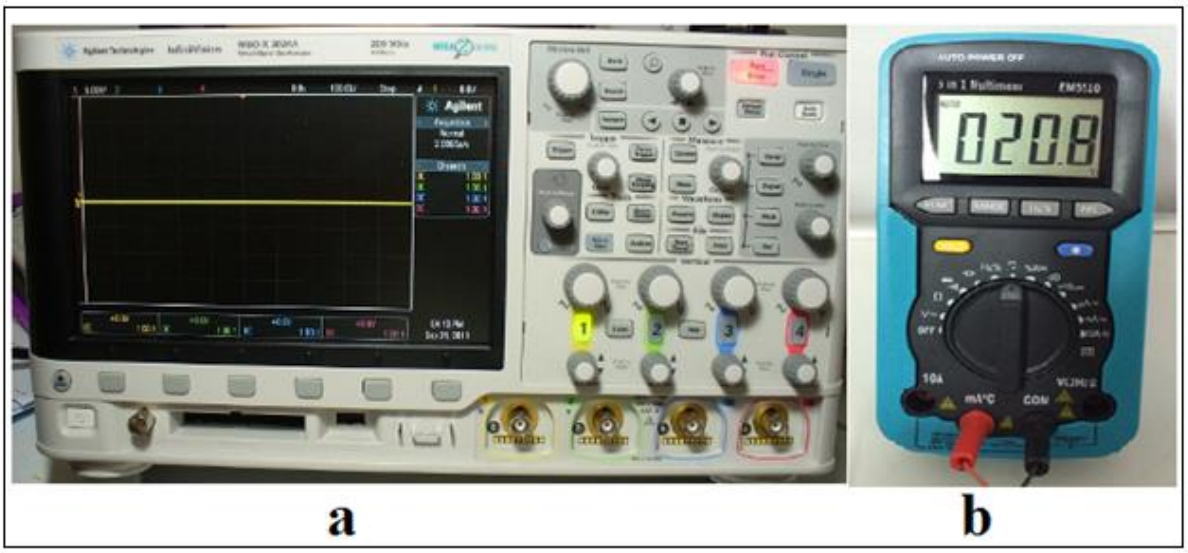


Figure 13 : Appareils principaux de mesures : a) Oscilloscope programmables ; b) Multimètre

L'oscilloscope employé permet de visualiser l'impulsion et la sortie Y (Volt) en fonction de temps avec une très haute précision. La figure suivante représente une copie écran de l'oscilloscope programmable lors d'une manipulation DLTS.

Figure 14 : Copie écran de l'oscilloscope lors d'une manipulation DLTS.

La capacité a été mesurée à l'aide d'un capacimètre, et le rang est 1000 pF pour un module et 10 pF pour une cellule. Le gain de PRE-AMP est 10 pour un module et 3 pour une cellule. L'impulsion de remplissage utilisée possède les caractéristiques illustrées dans la figure suivante.

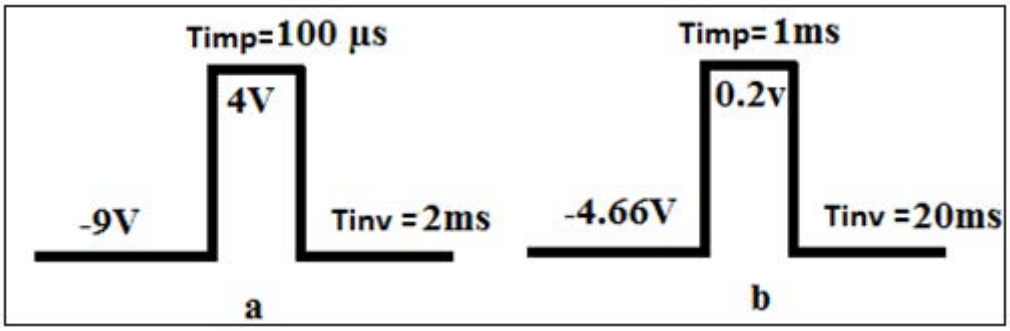


Figure 15 : Impulsions utilisées pour a) le module caractérisé, b) la diode de référence

5.5 Procédures expérimentales

Au cours de cette thèse, l'étude DLTS des modules photovoltaïques a été réalisée à la suite des caractérisations électriques et capacitives présentées dans les chapitres précédents. En effet, comme précédemment mentionné, les mesures I(V) et C(V) ne permettent qu'une qualification indirecte, basée sur des modèles phénoménologiques des défauts dans les

modules photovoltaïques. Pour avoir des caractérisations directes, nous avons alors prolongé ces études par la spectroscopie DLTS. Dans le choix des modules photovoltaïques que nous avons étudiés, et du fait du grand nombre de modules stressés et dégradés dans ces premières études, nous avons eu l'obligation de réinvestir dans des nouveaux modules commerciaux. La non disponibilité des précédents, du fait de l'amélioration des performances des modules commercialisés environ deux années après le début de la thèse nous a conduit à choisir pour les caractérisations DLTS, des modules photovoltaïques commerciaux (40*40 mm) 2V, 0.12W, 60mA. Par ailleurs, cette dernière série d'études que nous avons effectuées dans ces travaux de thèse ont permis de doter les deux laboratoires de la technique DLTS grâce à l'acquisition de l'appareil de caractérisation Sula technology. Un travail conséquent a été réalisé pour la mise en place de la technique, la calibration et la synchronisation des appareils utilisés.

Afin de tester la machine DLTS, de valider la procédure expérimentale de Lang puis la méthode d'extraction des paramètres des pièges dans une jonction par la méthode des 5 points, nous avons étudié dans un premier temps les niveaux de pièges dans une diode 1N4001 MIC à laquelle nous avons appliqué un stress électrique puis thermique. La diode 1N4001 MIC [15], est utilisée ici comme référence. Mais comme pour les autres dispositifs électroniques, le constructeur n'a pas donné les données technologiques détaillées. C'est pour cela que les mesures obtenues sur cette diode peuvent confirmer la validité du matériel expérimental, de la méthode et de l'analyse de la DLTS. Ce qui permet d'attribuer un niveau de confiance aux analyses des modules. En effet, si l'on considère le modèle à une diode des cellules photovoltaïques, nous pouvons partiellement expliquer le comportement d'une cellule solaire à l'obscurité en considérant une diode standard. Dans le cas des modules photovoltaïques, les constructeurs ne donnent pas non-plus d'informations technologiques. Il n'est donc pas possible de réaliser une simulation de type SPICE (*Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)* ou S-PISCES de SILVACO. Il n'est que possible, de réaliser des caractérisations expérimentales et dans l'analyse, de se référer à certains résultats de la diode sachant que les technologies et mécanismes de conduction sont totalement différents. Les différences réelles de comportement entre la diode et la cellule, de même que la validité du modèle à une diode, seront discutées dans la suite de ce chapitre.

Pour les deux systèmes électroniques étudiés, diode et modules PV, l'injection inverse contrôlée pour les porteurs chauds et le stress thermique est appliquée à l'obscurité et pour

une période de 10 min pour chaque dose de stress. Le stress électrique a été réalisé par l'injection d'un courant inverse de 20mA et 30mA tandis que le stress thermique est considéré à des températures égales à 50°C et 75°C. Avant et après l'application des deux stress, la DLTS est mesurée à l'obscurité. L'intervalle de la température étudiée se situe entre 140-291K (pour garantir l'élimination de la contribution du courant de fuite). La figure 16 illustre les détails expérimentaux de la DLTS.

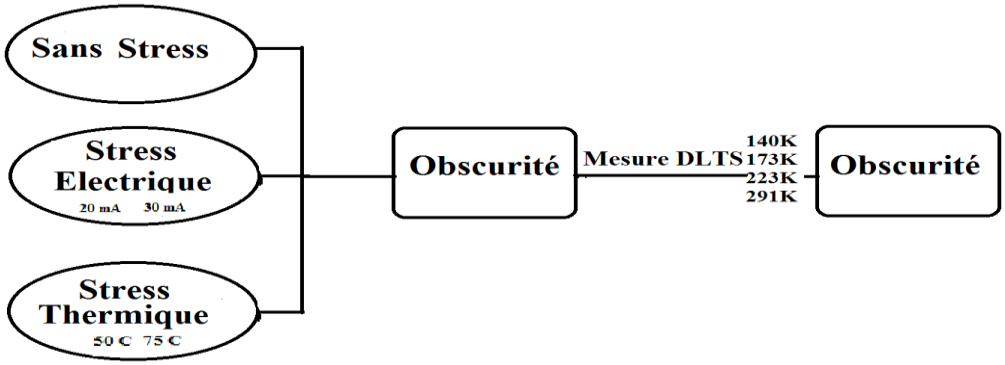


Figure 16 : Schéma expérimental

5.6 Etude des défauts avant et après stress pour une diode

Les figures 17 et 18 représentent les caractéristiques expérimentales V(t) de la diode 1N4001 MIC en fonction du temps, sans stress induit, puis après l'injection d'un courant inverse de 20mA puis 30 mA créant le stress électrique, et après l'augmentation de la température à 50°C puis 75°C créant le stress thermique. Ces caractéristiques sont données directement par l'appareil connecté à l'oscilloscope.

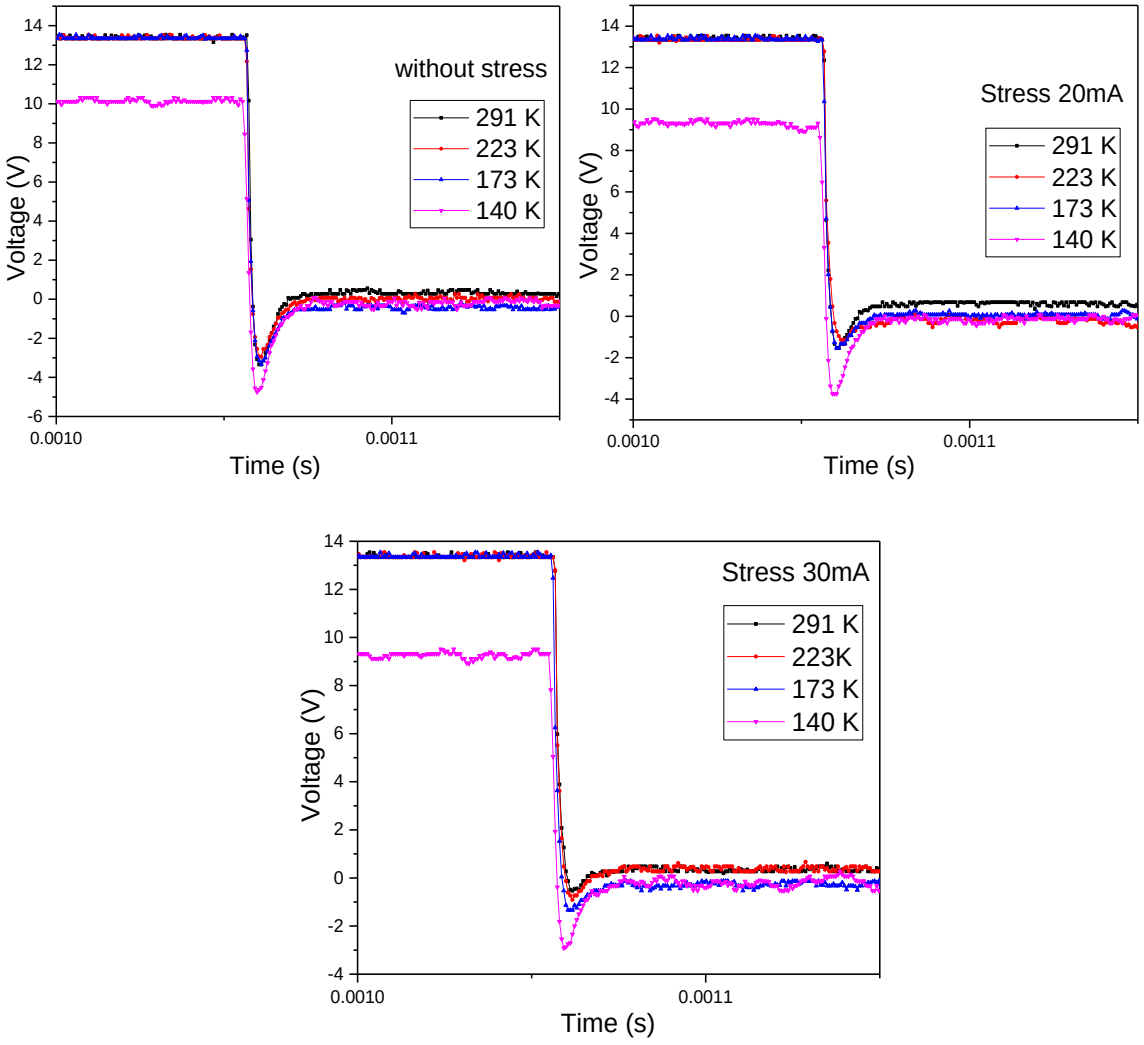


Figure 17 : Caractéristiques Tension vs. Temps(s) après un stress électrique pour différents courants inverses injectés, mesurées à différentes températures.

Nous constatons dans figure 17 que toutes les caractéristiques V(t) présentent le même comportement et qu'un décalage en tension des caractéristiques existe pour celles enregistrées à 140K quel que soit le stress électrique que la diode a subi. Nous avons attribué ce décalage aux limites d'appareil, en particulier de l'enceinte thermique dans laquelle la diode est placée créant à cette température, du fait de l'humidité ambiante, une conduction extérieure à la diode limitant de ce fait, l'amplitude de la tension délivrée par l'appareil de caractérisation DLTS. Ce décalage en tension pour les caractéristiques enregistrées à 140K est également observé pour les mesures faites après le stress thermique.

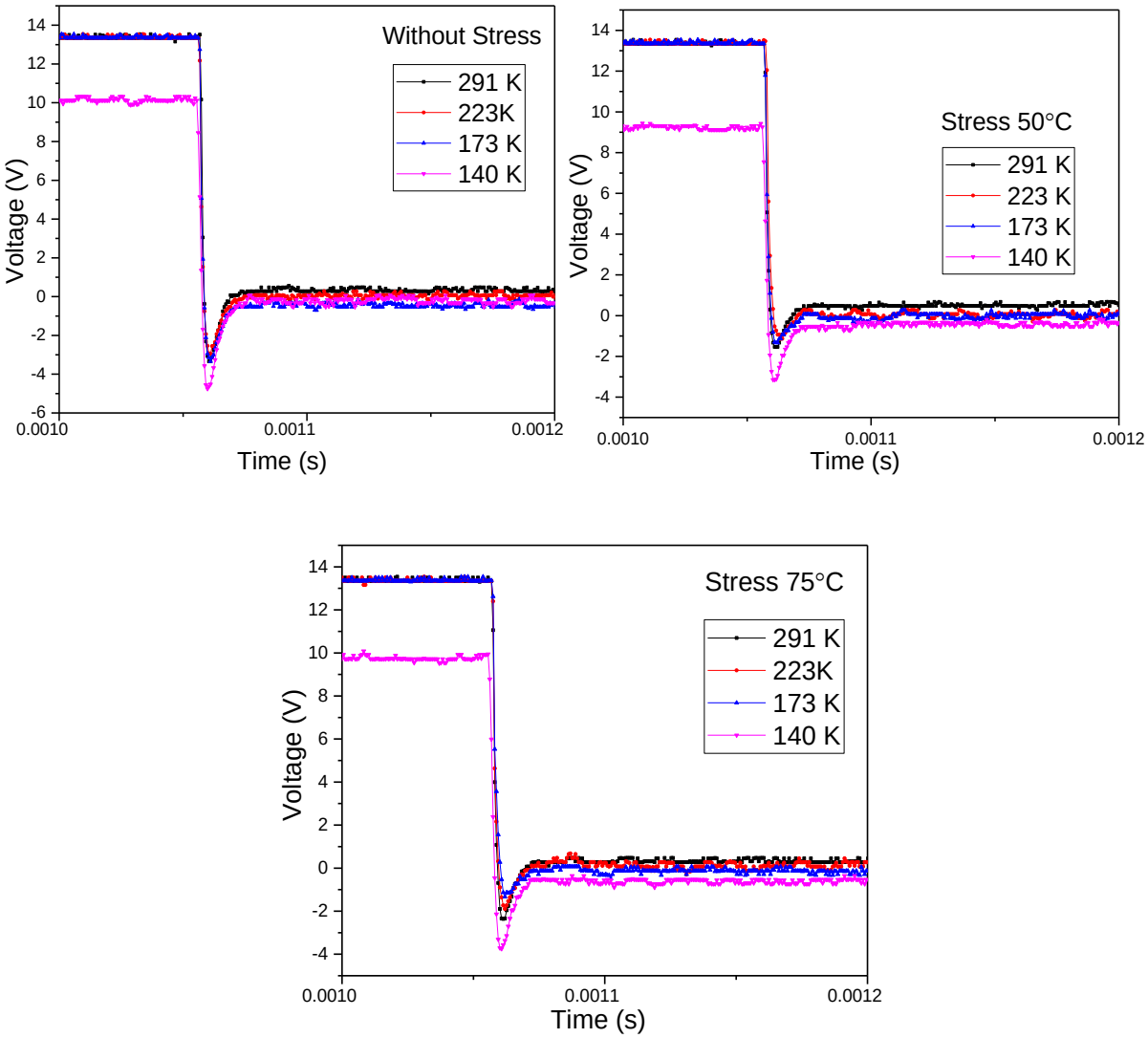


Figure 18 : Caractéristiques Tension vs. Temps(s) après un stress thermique à différentes températures, mesurées à différentes températures.

Nous pouvons constater le même comportement de la réponse V(t) enregistrée après un stress électrique qu'après un stress thermique. Les signaux DLTS enregistrés après les deux types de stress en fonction de la température sont déterminés par l'équation 12 et tracés dans la figure 19. Pour ce faire, nous avons choisi, comme détaillé dans la présentation de la méthode de Lang, une fenêtre d'observation de la réponse, t_2-t_1, identique pour toutes les réponses V(t) aux diverses températures et de telle sorte que le rapport $\alpha=t_2/t_1$ soit égal à 2.

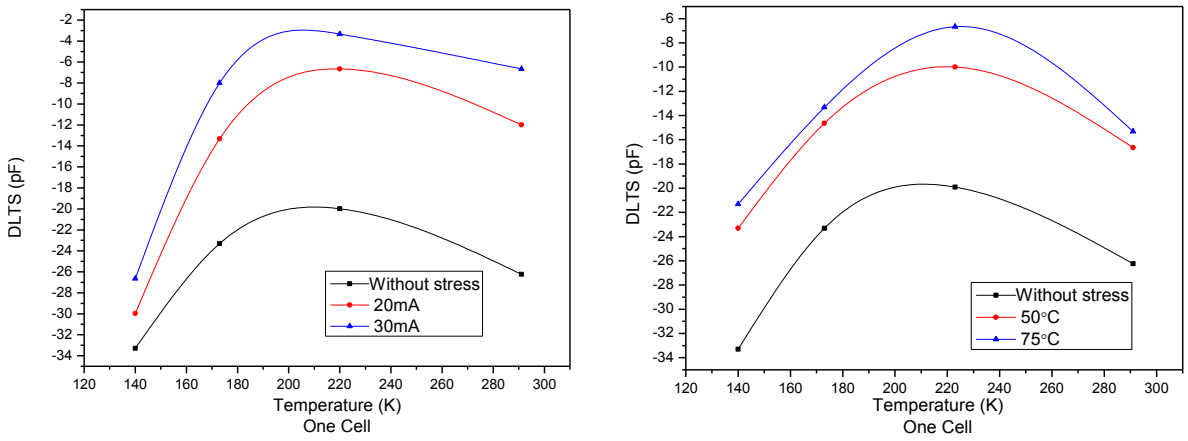


Figure 19 : Signaux DLTS vs Température (K) après un stress d'une diode a- électrique et b- thermique

A partir de ces signaux, nous avons donc appliqué la méthode des cinq points et déterminé ainsi cinq vitesses d'émission, e_{ni} liées à cinq températures T_i en utilisant directement les relations présentées également précédemment dans le cas que nous avons choisi, c'est à dire pour α=2. Les couples (e_{ni}, T_i) ont permis de tracer les droites d'Arrhenius, montrées figure 20 à partir desquelles les paramètres des défauts peuvent être calculés. [13]

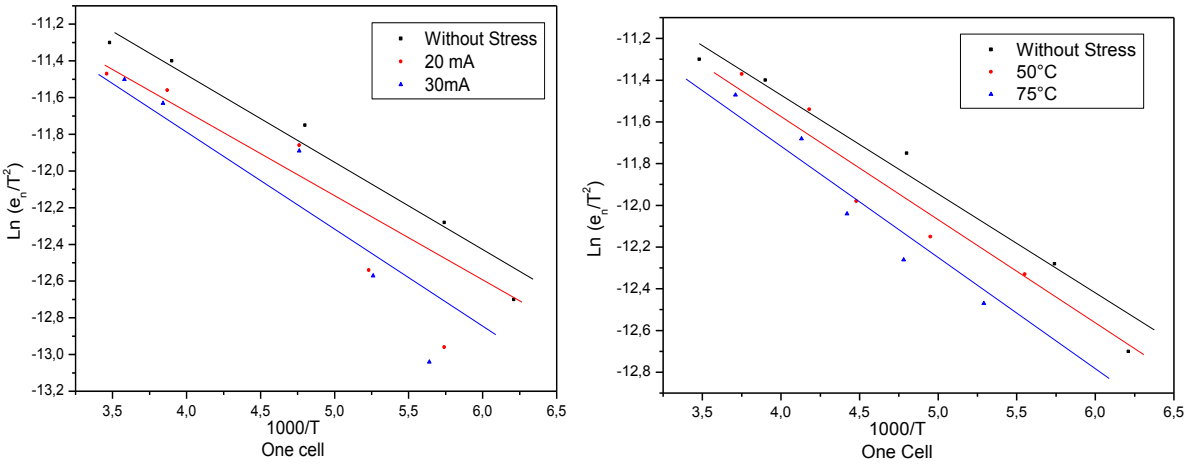


Figure 20 : Le tracé de la droite d'Arrhenius après un stress d'une diode a- électrique et b- thermique

En calculant la pente de la droite du diagramme d'Arrhenius et son intersection avec l'axe des ordonnées nous avons obtenu les énergies d'activations du défaut et ses sections efficaces relatives à chaque type de stress. Pour une diode vierge, nous obtenons une énergie d'activation de 0.3 eV et la section de capture est de 3.72 x10-17 cm^2. L'énergie de ces défauts montre qu'ils sont situés dans la partie inférieure du gap du semi-conducteur [16] en

comparant à celle d'E_{Fp} (0.55eV) dans le cas de silicium. La section efficace de capture, quant à elle, exprime la facilité avec laquelle un défaut peut capturer un porteur. Le tableau 1 montre la variation de ces paramètres en fonction de la valeur de stress appliqué.

Stress électrique	**E_a (ev)**	**σ(cm^2)**
Sans Stress	0.3	3.72×10^{-17}
20mA	0.44	4.11×10^{-17}
30mA	0.48	4.54×10^{-17}
Stress thermique	**E_a (ev)**	**σ(cm^2)**
Sans Stress	0.3	3.72×10^{-17}
50°C	0.49	3.9×10^{-17}
75°C	0.52	4.32×10^{-17}

Tableau 1 : Valeurs de l'énergie d'activation Ea et de la section efficace de capture σ des défauts de la diode

Ces résultats montrent que les stress électriques et thermiques amplifient la profondeur des défauts et leurs sections de captures dans des structures semi-conductrices de faible dimension, même sous faible intensité de stress. Ces résultats montrent également que les valeurs que nous avons choisies dans cette étude pour créer le stress, à savoir des courants inverses jusqu'à 30mA, et des températures jusqu'à 75°C, vont engendrer le même type d'effet dans la jonction puisque les deux séries de valeurs de section efficace de capture et d'énergie d'activation que nous avons trouvé sont comparables entre elles. Enfin, à partir de ces résultats, nous avons constaté que les défauts induits par le stress correspondent à des diffusions des lacunes ou défauts existants dans la diode vierge et cette diffusion est liée à l'augmentation de la section efficace de capture. Dans la diode vierge, le niveau Ea est lié à une impureté à diffusion rapide telle que Fe, Co, Ni, Pt ou Cu. Cet effet est bien connu dans les jonctions à base de silicium monocristallin avec la présence d'ions métalliques introduits comme défauts au moment de la fabrication par le bâti de croissance ou par une impureté dans les composants théoriquement purs [17]. Il est également montré que ces lacunes augmentent le courant inverse et en faisant baisser la tension de circuit ouvert, dégrade les performances de la diode.

Cette caractérisation DLTS de la diode préliminaire à celle du module valide le fonctionnement de la machine et l'application de la méthode de calcul. La même méthodologie de travail est maintenant appliquée pour la caractérisation de modules photovoltaïques commerciaux.

5.7 Etude des défauts avant et après stress pour un module photovoltaïque

Avec les mêmes conditions de stress que précédemment dans le cas de la diode, les figures 21 et 22 représentent les caractéristiques expérimentales V(t) d'un module photovoltaïque. Les stress ont été induits à l'obscurité.

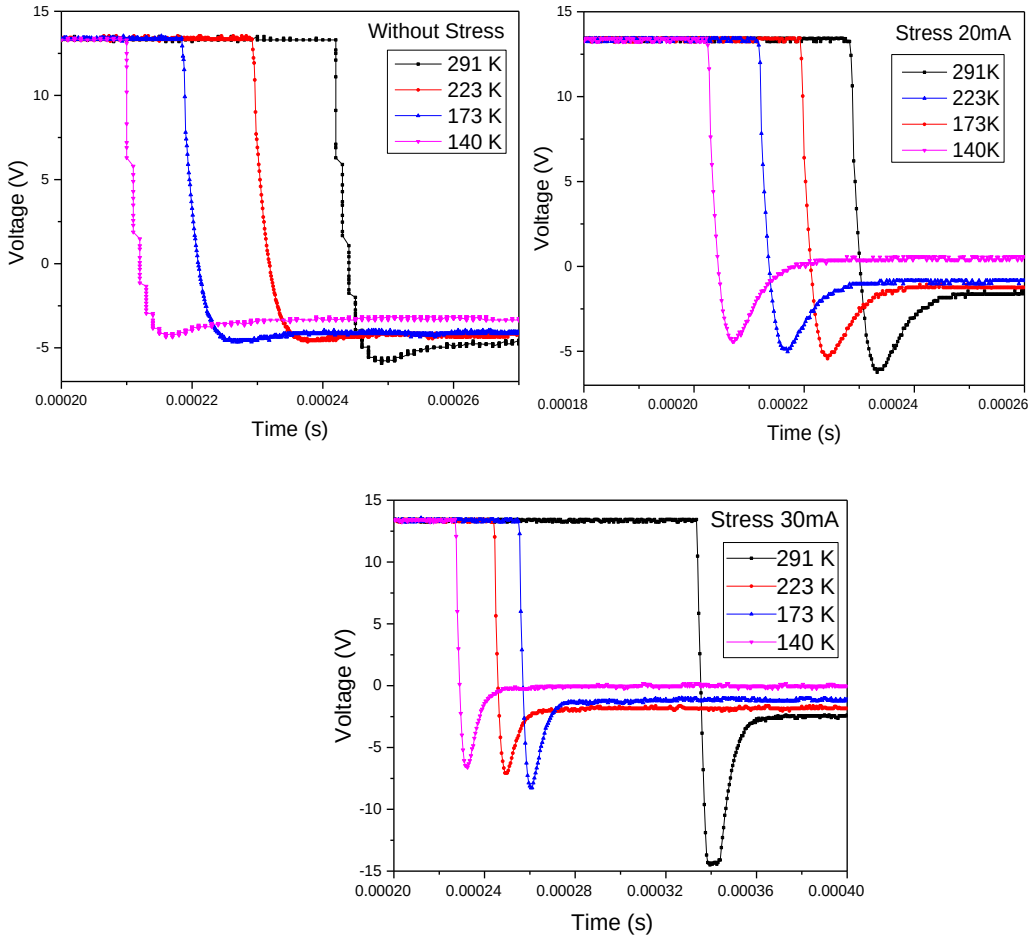


Figure 21 : Caractéristiques Tension vs. Temps(s) après un stress électrique pour différents courants inverses injectés, mesurées à différentes températures.

Dans l'analyse des résultats présents figure 21, nous constatons des changements importants

entre les différentes caractéristiques V(t). En effet, nous constatons une diminution du temps de réponse du module lorsque l'on diminue la température des modules au moment de la mesure. Nous constatons également une augmentation de l'amplitude maximale de la réponse liée à l'intensité du stress appliqué avant les mesures, en particulier dans le cas du module stressé par un courant inverse de 30mA.

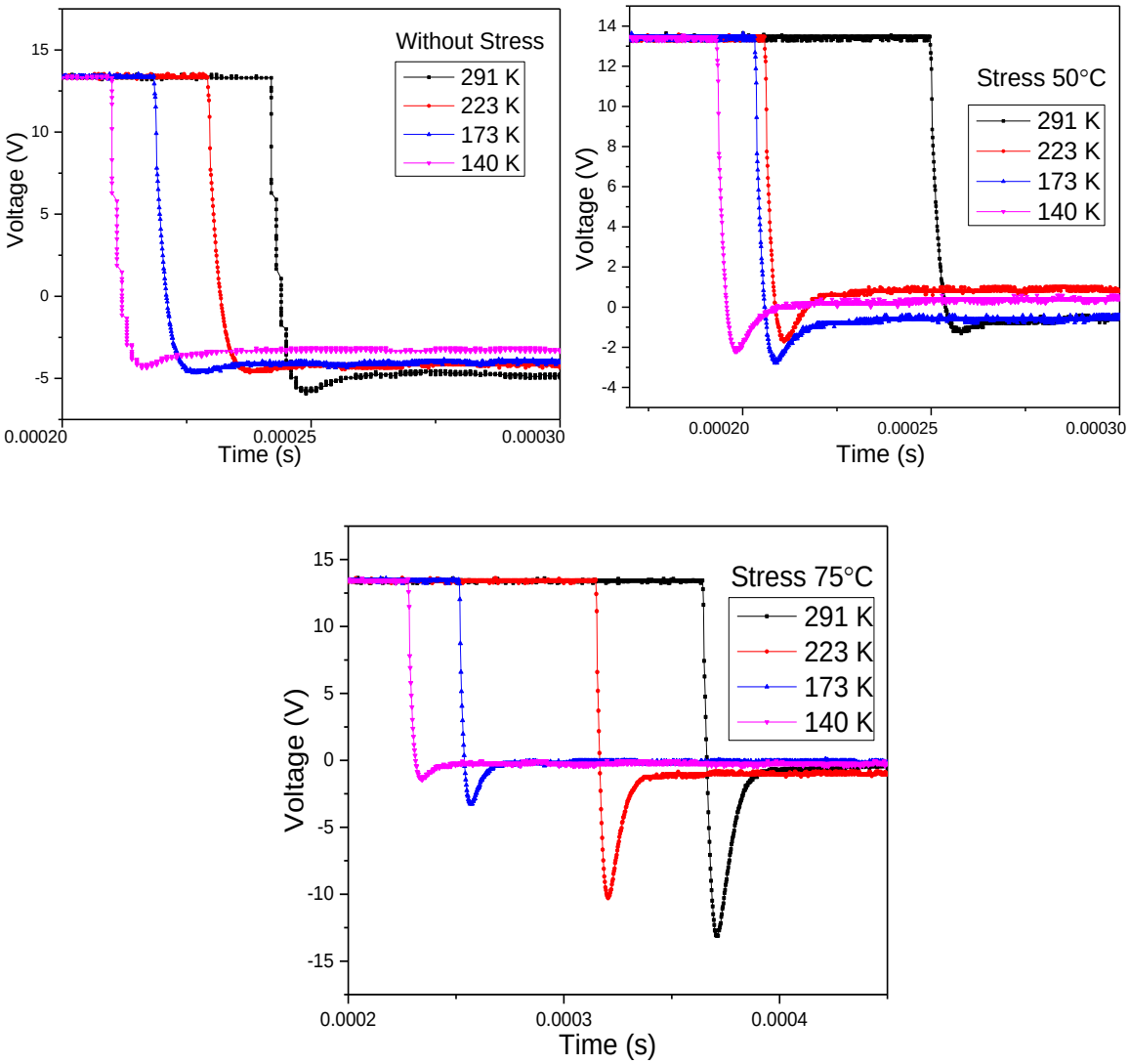


Figure 22 : Caractéristiques Tension vs. Temps(s) après un stress thermique à différentes températures, mesurées à différentes températures.

Les mêmes constatations que précédemment concernant la forme de la réponse V(t) suite à un stress électrique (figure 21) peuvent être faites dans les mesures faites après un stress

thermique (figure 22). La diminution du temps de réponse du module lorsqu'on diminue la température des modules au moment de la mesure et l'augmentation de l'amplitude maximale de la réponse liée à l'intensité du stress appliqué avant les mesures n'avaient pas été faites lors de l'étude préliminaire de la diode. Ce phénomène peut être attribué au fait qu'un module photovoltaïque est un système électronique complexe. En effet, un module photovoltaïque présente une jonction semi-conductrice de grande surface et dont la qualité ne peut pas être assurée sur toute cette surface aussi rigoureusement que dans une diode dans laquelle la surface de la jonction est petite. Par ailleurs, le module présente également une surface d'échange très grande avec le métal formant les électrodes et de ce fait une résistance de fuite naturellement plus grande que dans une simple diode ou le passage de courant est assuré par deux simples fils. Ainsi, le décalage (shift) des réponses V(t) observé dans les modules mais pas dans la diode ne peut être considéré qu'en l'absence d'un résultat pour une seule cellule. Considérant les résultats obtenus dans la diode, ils traduisent le fait qu'il n'y a que peu de création de centres recombinants dans le gap car le facteur de qualité (ou ideality factor) varie en général très peu dans une diode commerciale entraînant une faible variation du courant de saturation inverse et de la résistance shunt du fait des données technologiques. Ces trois paramètres sont indissociables. Ainsi, la différence obtenue dans les réponses V(t) entre la diode simple et le module photovoltaïque confirme la nécessité de choisir un modèle fonctionnel complet pour le module et donc l'utilisation du modèle à deux diodes que nous avons utilisé dans notre étude.

Enfin, dans la caractérisation des modules DLTS, nous n'observons plus le décalage en tension obtenu dans les réponses V(t) mesurées à 140K observé pour la diode. Ceci peut confirmer l'erreur d'appareil évoqué lors dans les paragraphes présentant l'étude de la diode.

Les signaux DLTS en fonction de la température sont déterminés par l'équation 12. Nous avons choisi pour ce faire le même intervalle de temps t_2-t_1 que pour les mesures des caractéristiques de la diode avec α=2. Ces signaux sont tracés dans la figure 23.

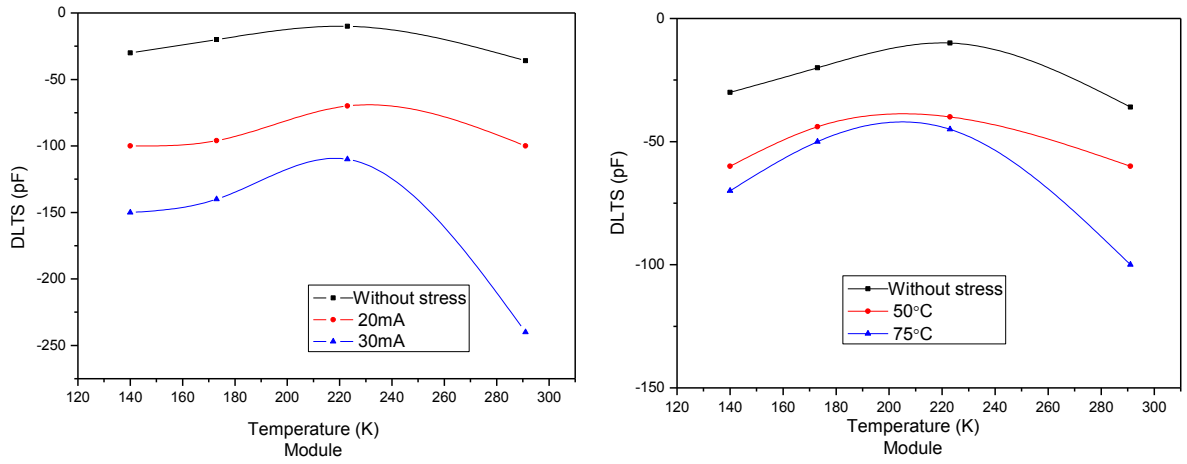


Figure 23 : Signaux DLTS vs Température (K) après un stress d'un module a- électrique et b- thermique

La même méthode des cinq points a été utilisée pour tracer les diagrammes d'Arrhenius (figure 24) à partir duquel les paramètres des défauts seront calculés.

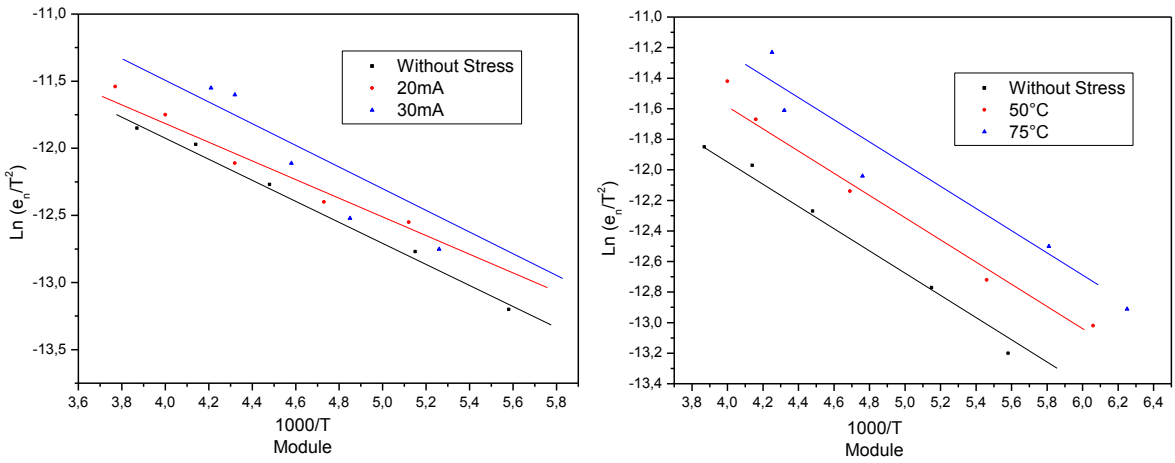


Figure 24 : Le tracé de la droite d'Arrhenius après un stress d'un module a- électrique et b- thermique

Pour un module vierge, nous obtenons une énergie d'activation de 0.4 eV et la section de capture est de 6.3 $x10^{-17}$ cm^2.

Stress électrique	**E_a (ev)**	**σ(cm^2)**
Sans Stress	0.4	6.3×10^{-17}
20mA	0.71	5×10^{-17}
30mA	0.8	4.2×10^{-17}
Stress thermique	**E_a (ev)**	**σ(cm^2)**
Sans Stress	0.4	6.3×10^{-17}
50°C	0.69	4.54×10^{-17}
75°C	0.79	4×10^{-17}

Tableau 2 : Valeurs de l'énergie d'activation Ea et de la section efficace de capture σ des défauts d'un module photovoltaïque

Nous constatons, comme dans le cas de la diode, dans la limite de sensibilité de l'appareil DLTS, la présence dans le module photovoltaïque non stressé d'un défaut principal. Dans le cas du module, celui-ci est situé à 0.4eV, ce qui est du même ordre de grandeur que la valeur de l'énergie d'activation que nous avions trouvée pour la diode vierge. Par contre ce défaut dans le module vierge possède une section de capture très importante, environ 1.7 fois celle trouvée dans le cas de la diode. Ceci fait apparaître une certaine incohérence dans les mesures DLTS faites sur le module par rapport à celles faites avec la diode. En effet, d'après la figure 15, l'impulsion de remplissage et le temps de vidage diffèrent entre la diode et le module caractérisé. Ceci est dû au fait que le module est une structure complexe composé de cellules en série et parallèle, contrairement à une diode qui apparaît alors comme une structure simple. Ceci montre la difficulté d'interprétation des résultats obtenus en DLTS sur un module photovoltaïque commercial. Ce lien possible entre les résultats DLTS et la réalité de l'apparition et de la modification des défauts dans le module sous stress est confirmé par le fait que la section de capture des défauts diminue avec l'augmentation du stress dans les modules contrairement à ce que nous avions observé dans les structures semi-conductrices simples comme la diode.

Si nous considérons néanmoins les mesures DLTS dans les modules comme la signature du stress, nous constatons que le défaut observé se déplace dans les profondeurs de la bande interdite avec l'augmentation de la valeur du stress, qu'il soit électrique ou thermique et passe

au-delà d'E_{Fp}. Dans les limites de précision de l'appareil DLTS utilisé nous n'avons pas pu mettre en évidence la création éventuelle de défauts supplémentaires avec le stress. Nous voyons ainsi l'influence directe du stress sur ce défaut principal, qui devient un centre de recombinaison plus profond avec, dans la gamme de courant inverse et de température utilisés pour induire le stress, un doublement de son énergie d'activation et une diminution de sa section de capture d'environ 50%. Ce phénomène va induire une possibilité plus grande de capture des électrons photo-excités, diminuant ainsi le courant photovoltaïque et donc le rendement du module.

Les tableaux 1 et 2 résument les résultats obtenus par la mesure DLTS sur une diode et un module photovoltaïque avant et après la contrainte électrique et thermique respectivement.
Nous constatons que la valeur d'Ea reste inférieure à E_{Fp} (0.55eV) dans notre cas (silicium de type p) dans le cas de la diode mais que l'énergie d'activation de ce défaut augmente au-delà de E_{Fp} dans le cas des modules stressés électriquement et thermiquement. Néanmoins, dans les gammes de courants inverses et de températures utilisées pour générer les stress, nous constatons que les énergies d'activation et les sections efficaces de captures sont très voisines pour les deux types contraints.
Comme dans la diode, la présence des défauts dans les modules induits généralement des dysfonctionnements et des détériorations des caractéristiques électriques des modules photovoltaïques.
En revenant aux résultats que nous avons obtenus qualitativement par des mesures électriques détaillés dans les différents chapitres, présentant le stress induit à l'obscurité et mesuré à l'obscurité, nous avons constaté que la valeur de R_{sh} est grande dans le cas du module vierge mais qu'elle diminue fortement en fonction des stress appliqués. Cette faible résistance de shunt, dans les modules stressés indique une augmentation significative du courant de fuite, en lien avec l'augmentation du courant inverse mesuré (voir les chapitres précédents).
Par ailleurs, dans les limites de précisions des appareils et méthodes utilisés, nous avons trouvé le facteur d'idéalité pour un module vierge, proche de 1 correspondant au cas idéal. Dans le cas des modules stressés nous avons obtenus des valeurs supérieures à 1 indiquant donc une dégradation des performances. Ces dégradations peuvent être dues à la dégradation physique du composant, par exemple au niveau des interfaces entre les électrodes et la cellule, ou l'encapsulation ce qui a été confirmé en microscopie SEM, montrant de façon

qualitative l'apparition de dommages importants en surface du module lorsque les stress ont été appliqués. Par ailleurs, ces défauts peuvent également être attribués à la création ou modification de centres de recombinaison/ génération dans la ZCE tels qu'observé de façon quantitative par la technique DLTS, dans la limite des remarques précédentes liées à la complexité de la structure des modules.

Les résultats ont été obtenus sur des modules composés de plusieurs cellules. Cette structure est complexe ce qui crée un environnement électrique délicat des cellules à l'origine de la réponse DLTS, montré entre autre par le décalage des réponses temporelles avec la température de mesure. En effet, le capacimètre de l'appareil de mesure SULA Tech utilisé pour nos mesures ne donne des résultats fiables que pour des courants de fuite inférieurs à 100 μA. Des études complémentaires devront être effectuées sur des cellules seules pour valider de façon plus certaine le processus de migration, voire de création de défauts suite à un stress. De plus, en faisant ces mesures suite à la création de stress électrique et stress thermique en même temps, spécialement sous illumination, nous pourrons alors se rapprocher du fonctionnement des cellules en conditions réelles et se rapprocher des conditions extrêmes de stress à l'origine des points chauds.

5.8 Conclusion

Il existe plusieurs modes de mesure, suivant le type d'excitation (électrique ou optique) et la grandeur mesurée (tension, courant ou capacité). La technique DLTS a une sensibilité plus élevée pour la mesure des paramètres des défauts que toute autre technique de diagnostic de semi-conducteurs.

Nous avons débuté ce chapitre par une présentation de la caractérisation DLTS et de son principe. Nous avons ensuite décrit la procédure de mesure, puis la procédure expérimentale a été détaillée. Nous avons montré la caractérisation d'une diode commerciale permettant, en retrouvant les résultats de la littérature de valider la méthode et l'étalonnage de l'appareillage. Cette validation a permis également de mener une discussion sur les résultats obtenus dans la caractérisation de modules photovoltaïques. Nous avons mis en évidence le fait que la caractérisation par la technique DLTS de structures complexes comme un module photovoltaïque par exemple est très délicate et que les conclusions quantitatives ne peuvent pas être considérées comme aussi fiables que dans le cas de structures semi-conductrices

simples, par exemple les diodes. Ceci peut expliquer le fait que cette première étude que nous avons réalisée par DLTS de modules photovoltaïque n'a pu être supportée, dans l'analyse des résultats par ceux publiés dans la littérature inexistante sur ce sujet. Enfin, en prenant en compte, de façon critique les remarques ci-dessus, nous avons terminé ce chapitre par la discussion des résultats obtenus et montré la limite de notre étude liée à la caractérisation de modules et non de cellules unitaires. En particulier, du fait des conditions expérimentales choisies, du non disponibilité de cellules individuelles et des limites de l'appareil, il n'a pas été possible de vérifier si le stress entraînait la création de défauts nouveaux dans le module photovoltaïque.

Le principal résultat obtenu dans cette partie est que dans la gamme de courant inverse et de température utilisés pour induire le stress, les défauts existant initialement dans le module vierge vont avoir une énergie d'activation qui augmente ce qui correspond à une migration vers les niveaux profonds de la bande interdite. Ce phénomène explique l'augmentation du courant de diffusion et de saturation dans les modules stressés, tel qu'observé par les mesures électriques présentées dans les chapitres précédents. Toutes ces observations confirment ainsi la diminution de la résistance shunt et la dégradation des performances des cellules ayant subi un stress pouvant aller jusqu'à la création de points chauds et la destruction du module. Ceci nous permet de constater que le vieillissement des modules est lié directement au stress appliqué. Ces résultats obtenus par la DLTS expliquent la dégradation des performances des modules lorsqu'ils ont subi des contraintes électriques ou thermiques suite à un dysfonctionnement.

Conclusion générale et perspectives

Ce manuscrit présentant nos résultats et analyses est divisé en cinq chapitres principaux.

Le premier chapitre introduit les généralités concernant une étude bibliographie détaillée d'une cellule solaire. Ainsi que les structures d'une cellule solaire, les principes de la conversion et du fonctionnement ont été présentés. La deuxième partie de ce chapitre introduit les différentes caractéristiques et les paramètres importants dont il faut tenir compte dans l'analyse du fonctionnement des cellules ou modules photovoltaïques spécialement en présence de défauts liés à un stress thermique ou électrique. Les différents modèles comportementaux électriques sont également décrits en détail afin d'introduire les modélisations faites dans les chapitres suivants. Ce premier chapitre introduit les différents types de défaut que nous pouvons trouver dans une cellule ou module photovoltaïque, induit par un stress d'origine électrique ou thermique.

Après l'étude bibliographie, les chapitres suivants II, III et IV sont consacrés à l'étude de l'effet de l'injection de courant en inverse, de l'application d'une contrainte thermique et des deux contraintes combinées. Cette étude est basée sur un travail expérimental important effectué avec des modules solaires commerciaux. Les caractéristiques des modules sont présentées en début de chaque chapitre ainsi que les méthodes expérimentales de mesure utilisées. Les paramètres fonctionnels considérés sont les caractéristiques courant-tension et capacité-tension, les résistances et capacités, le facteur d'idéalité. Les stress des modules ont été appliqués à l'obscurité et sous éclairement. Les mesures post-stress ont été réalisées à l'obscurité et sous éclairement. Ces conditions expérimentales variées nous ont permis d'obtenir différentes séries de mesures et de discuter certaines analyses comportementales des modules stressés.

Les résultats expérimentaux obtenus en I(V) ont montré qu'en augmentant la contrainte, la tension de diffusion et les caractéristiques I(V) diminuent indiquant une dégradation du fonctionnement et du rendement du module, directement liée à la valeur du stress appliqué. Dans le cas de la courbe inverse I(V), le courant inverse augmente progressivement après chaque niveau de stress indiquant une augmentation du courant de fuite en lien avec l'augmentation des défauts créés.

En utilisant le modèle à deux diodes et sept paramètres, nous avons calculé les résistances shunt et série des modules dans les différents cas de stress. La diminution observée de la résistance shunt et quantifiée à l'obscurité est en lien direct avec la diminution de la caractéristique I(V). Nous avons, néanmoins observé que cette diminution de Rsh était observée plus rapidement lorsque le module était sous éclairement montrant l'influence du photo-courant dans l'installation des défauts dans la jonction.

Les courants de diffusion et de recombinaison ont été aussi déterminés lors d'un stress à l'obscurité et mesurés à l'obscurité de façon à dissocier ces courants du photo-courant présent dans les modules en fonctionnement. Leurs comportements de type exponentiel en fonction du stress du module montrent également que les stress influent fortement sur leurs valeurs spécialement aux forts niveaux.

Dans ces chapitres, nous avons également présentés les caractéristiques C(V) des modules en fonction de leur stress. Nous avons développé un modèle permettant d'isoler les variations des capacités induites par l'éclairement et celles induites par chaque stress. Cette deuxième contribution est nettement supérieure à celle induite par l'éclairement ce qui confirme que, le photo-courant facilite l'installation des défauts dans la jonction lors d'un stress. Enfin, concernant les capacités, nous avons montré que les valeurs des capacités obtenues dans les deux séries en présence d'un stress électrique permettent de tracer les droites $1/C^2$ en fonction de la tension V conformément au modèle de Mott-Schottky. Néanmoins, notre étude de modules photovoltaïques ne permet pas d'extraire les différents paramètres qu'il est possible d'obtenir dans le cas de l'étude des cellules seules.

Après l'étude de l'effet des contraintes sur le fonctionnement des modules solaires, le dernier chapitre a été consacré à l'étude de la caractérisation DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy) afin de localiser et identifier les défauts actifs induits par les contraintes. Dans la première partie de ce chapitre une description du principe de la DLTS, de la procédure de mesure et de tracé du spectre a été faite. Dans la deuxième partie de ce chapitre, la méthode de mesure et les méthodes expérimentales ont été détaillées.

A partir de résultats expérimentaux obtenus dans des modules vierges et stressés, nous avons analysé les défauts induits par la contrainte. La spectroscopie DLTS nous a permis de calculer l'énergie d'activation que nous avons trouvée, avec l'intensité du stress, relativement

constante égale à une valeur proche de 0.55 eV ce qui correspond à un niveau énergétique au milieu du gap du silicium et donc à un niveau profond dans la bande interdite pour la localisation des défauts. Nous avons trouvé une augmentation importante avec le stress de la section efficace de capture des porteurs. Ces résultats obtenus par la DLTS confirment les résultats précédents obtenus à l'issue des longues campagnes de mesures I(V) et C(V). En particulier, ces résultats expliquent l'origine de l'augmentation des courants de diffusion et de recombinaison avec le stress et ainsi, la dégradation des performances des modules lorsqu'ils ont subi des contraintes électriques ou thermiques suite à un dysfonctionnement.

Ce travail de thèse peut être considéré comme une contribution à l'étude de la fiabilité des structures silicium employées dans le domaine des énergies renouvelables suite à leur fonctionnement sous conditions extrêmes. Certains résultats restent qualitatifs et d'autres ont pu être quantifiés. Nous souhaitons que l'expérience acquise lors de cette étude et que le travail réalisé pendant cette thèse servent de base à un travail complémentaire sur les mêmes types de modules silicium. Notre expérience montre qu'il sera indispensable alors d'effectuer, plutôt qu'avec des modules, des caractérisations sur des cellules dont les caractéristiques initiales des cellules vierges seront parfaitement connues ou qu'il sera possible de déterminer sans influence des cellules voisines, des contacts, de l'encapsulation et autres paramètres externes. Nous proposons également que les méthodologies mises en place pour les mesures électriques et par DLTS, permettent d'étudier d'autres structures que celles à base de silicium, comme les nouvelles structures émergentes dans les cellules photovoltaïques à base de matériaux III-V, par exemple à base de GaN, les cellules en couches minces de type CIGS, CZTS, CZTSSe.

Bibliographie

RÉFÉRENCES CHAPITRE I

[1] Sze, S.M., (1981): "Physics of semiconductors devices"; 2nd Edition, Wiley Interscience, Editor: John Wiley and Sons (WIE). ISBN-10 04710566 18. New York 11 p. 802.

[2] Shockley, W., Bardeen, J. and Brattain, W., 91949, "The Theory of P-N Junctions in Semiconductors and P-N Junction Transistors" Bell System Technical Journal, Semiconductive Materials Transistor. ISSN: 0005-8580, Vol 28: 1949, p. 435.

[3] Energie solaire photovoltaique.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07.

[4] Shockley, W. and Read, W. T., (1952): "Statistics of the recombination of holes and electrons", Physical Review. ISSN: 0031-9007 Vol. 87, p. 835-842.

[5] E.R.Observ; Baromètre du solaire photovoltaïque; système solaire Avril 2004.

[6] Wang, A., Zhao, J. and Green, M. A. (1990): "24% efficient silicon solar cells," Applied Physics Letters, ISSN 0003-6951vol. 57, p. 602-604.

[7] La letter du solaire, Cythelia sarl,avril 2005, vol 5, numérau 4

[8] D.M.Chapin, C.S.Fuller, G.L.Pearson; A new silicom pn jonction photocell for converting solar radiation into electrical power; JApp phys, vol.25, pp.676-677. 1954

[9] M.J.Stocks, A.J.Carr, A.W.Backer; Tewturing of poly cristalline silicon solar En; Mat. & sol. Cells. - 1996.

[10] http:/www. Production d'énergie électrique : Energie solaire photovoltaïque.pdf

[11] Yu, G., Gao, J., Hummelen, J.C., Wudl, F. and Heeger, A.J. (1995), "Polymer photovoltaic cells: enhanced efficiencies via a network of internal Donor-Acceptor Heterojunctions", Science, Vol. 270, pp. 1789-1791.

[12] Pearce, J.M., Podraza, N., Collins, R.W., Al Jassim, M.M.,Jones, K.M., Deng, J. and Wronski, C.R. (2007), "Optimization of open circuit voltage in amorphous silicon solar cells with mixed-phase (amorphous _ nanocrystalline) p-type contacts of low nanocrystalline content", Journal of Applied Physics, Vol. 101, pp. 114301-114307.

[13] Abdullah, H., Lennie, A., Saifuddin, M.J. and Ahmad, I. (2009), "The effect of electrical properties by texturing surface on GaAs solar cell efficiency", American Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 2 No. 1, pp. 189-193.

[14] Folkes, P., Uppal, P. and Moffitt, P. (2009), FY08 Final Report on Photovoltaic Solar Cell Research at BAE/ARL, Army Research Laboratory, ARL-TR-4845, available at: www.arl.army.mil/arlreports

[15] Jean Caillaud, L'énergie solaire photovoltaïque, lycée des métiers de l'énergie de la métallurgie et de la vente, QualiPV par l'ADEME pp. 4-7, 2010.

[16] Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie, Université AUL SABATIER – Toulouse III, Décembre 2003.

[17] M. Petibon Stéphane, thèse « Titre : Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Université de Toulouse, pp.10-11,20 janvier 2009.

[18] C.Tellier, LEEA 3ème, titre : « Description de la jonction P-N et diodes », 23/08/2004.

[19] Bendjellouli Zakaria, Mémoire "contribution à la modélisation d'une cellule solaire ", Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique, UNIVERSITE DE BECHAR, Faculté des Sciences et Technologie, pp.25-26, 2008-2009

[20] Publié par bloggerinfo27, le 14/01/2013, dans green enivrement, mémoire fin d'étude sur les cellules photovoltaïques, chapitre i-iii-09 page (16-17).

[21] H Chenoufi, 'Optimisation du procède technologique de réalisation d'une cellule solaire par la technique de diffusion'. Mémoire de Magistère, Université de Batna- 2005

[22] http://pveducation.org/pvcdrom

[23] José Miguel Navarro, Titre : Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible, mémoire fin d'étude Délivré par l'Université Toulouse III - Paul Sabatier, 23 octobre 2008, page (21-23)

[24] Shockley W., J. Bardeen and W. Brattain, "The Theory of P-N Junctions in Semiconductors and P-N Junction Transistors," Bell System Technical Journal, Vol 28: 1949, pp. 435 Semiconductive Materials Transistor. ISSN: 0005-8580.

[25] Wolf M. and Hans Rauschenbach (1963): Series resistances effects on solar cell measurement. Advanced energy conversion. ISSN 0196-8904. Volume 3, pp 445 - 479. Pergamon Press 1963. ISSN : 0196-8904.

[26] A. Ricaud ; Photopiles solaire de la physique de conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédées ; presses polytechniques et universitaires romandes 1997.

[27] Edoardo Barbisio (2000): "Diffusion capacitance identification of PV cells". Proc. 16th European photovoltaic solar energy conference. ISBN 1 902916 18 2. Date 1 – 5 May 2000, Glasgow, UK, pp 919 - 922.

[28] Hichem et Moussaab Mammar et Belarbi, mémoire dans l'étude du paramètre influençant les performances des cellules solaires sensibilisées par colorant, publié : Energie Solaire Thermodynamique Avec Soleil, Vent, Pluie ou la Nuit, Université Abou-Belkaid Tlemcen –licence 2011 page (11-16).

[29] H. Hoppe, N. Arnold, D. Meissner, N. S. Sariciftci, Thin Solid Films, 589, 451 (2004).

[30] I. D. Parker. J. Appl. Phys. 75, 1656 (1994).

[31] Publié par bloggerinfo27, le 14/01/2013, dans green enivrement, mémoire fin d'étude sur les cellules photovoltaïques, chapitre ii-iii-09 page (26-30)

[32] Mr Bousaid Mohammad ; " Modélisation des phénomènes de vieillissement des modules Photovoltaïques", mémoire de magistère, UNIVERSITE ABOU-BAKR BELKAÏD – TLEMCEN Faculté des Sciences- Département de Physique, année 2011-2012.

[33] O.Mohamed Yahya ; Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque ; Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°3 2008.

[34] Z.M. Salaeh, Optimum Switching Points for Array Reconfiguration Controler; Department of electrical Engi University of lowell MA 01854. IEEE, pp : 971-976. 1990

[35] F. zerhouni, Approche Dans La Modélisation D'un Générateur Photovoltaïque ; ICEL, november 13-15, U.S.T. Oran, Algeria 2000.

[36] http://www.cythelia.fr Conseil et formation en énergie photovoltaïque.

[37] L.Kemmouche ; Modele de fonctionnement d'une station solaire photovoltaique, en prevision de panne", mémoire de magistère, université de Constantine, année 2002

[38] Nicola M. Pearsall and Robert Hill, Photovoltaics Modules, Systems and Applications Nicola, Northumbria Photovoltaics Applications Centre University of Northumbria at Newcastle pp.4-5.

[39] Energie solaire photovoltaique.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin.

[40] W. Herrmann, W. Wiesner, W. Vaaßen, TÜV Rheinland Sicherheit und Umweltschutz GmbH, Hot spot investigations on PV modules - New concepts for a test standard and consequences for module design with respect to bypass diodes, D-51101 Cologne, Germany.

[41] Yunlin Sun, Xiangzhi Li, Ruijiang Hong, Hui Shen "Analysis on the Effect of Shading on the Characteristics of Large-scale on-grid PV System in China"--School of Physics and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou, China - Published Online July 2013.

[42] Yunlin Sun, Siming Chen, Liying Xie, Ruijiang Hong and Hui Shen, Investigating the Impact of Shading Effect on the Characteristics of a Large-Scale Grid-Connected PV

Power Plant in Northwest China, International Journal of Photoenergy Volume 2014, Article ID 763106.

[43] Daniel W. Analysis of Hot Spots in Crystalline Silicon - Modules and their Impact on Roof Cunningham, Structures - BP Solar - February 17th 2011.

[44] C. R. Crowell and S. M. Sze, Temperature dependence of avalanche multiplication in semiconductors, Appl. Phys. Lett., 9 (1966) 242.

[45] Malek GASSOUMI, titre « Etude des défauts électriquement actifs dans les composants hyperfréquences de puissance dans les filières SiC et GaN. Thèse à Laboratoire de Physique de la Matière(LPM) et Laboratoire de Physique des Semi-conducteurs et des Composants Electroniques (Monastir ; Tunisie) ,2003

[46] Olivier HAAS, titre « Étude des défauts électriquement actifs dans les cellules solaires organiques », thèse à UNIVERSITÉ DE NANTES FACULTÉ DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES, 2012

REFERENCES CHAPITRE II

[1] M. Chegaar et al, titre : Determination of Solar Cells Parameters under Illuminated Conditions, Journal of Electron Devices, Vol. 2, 2003, pp. 17-21.

[2] Mohan Lal Priyanka, S.N. Singh, A new method for the measurement of series and shunt resistance of silicon solar cells, Solar Energy Materials and Solar Cells 91 (2007) 137–142.

[3] N.H. Reich, W.G.J.H.M. Van Sark, E.A. Alsema, R.W. Lof, R.E.I. Schropp, W.C. Sinke, W.C. Turkenburg, Crystalline silicon cell performance at low light intensities, Solar Energy Materials and Solar Cells 93 (2009) 1471–1481.

[4] Michael D. Lammert, Richard J. Schwarts, The integrated back contact solar cell: A silicon solar cell for use in concentrated sunlight, IEEE Transactions on Electron Devices ED-24 (1997) 337–342.

[5] M. Wolf, and H. Rauschenbach, Advanced Energy Conversion, 1963, 3, 455.

[6] M. S. Imamura, and J. I. Portschheller, Proc. VIII. IEEE Photovoltaic Spec. Conf., Seattle 1970 (p.102).

[7] J. P. Charles, M. Abdelkrim, Y. H. Muoy, and P. Mialhe, 1981, Solar Cells, 4, 169-178

[8] S. K. Agrawal, R. Muralidharam, A. Agrawala, V. K. Tewary, and S. C. Jain, J. Phys. D, 1981, 14, 1634.

[9] G. L. Araujo, and E. Sanchez, 1982, IEEE Transactions on Electron Devices Vol ED-29, 1511-1513.

[10] K. Al Abdullah, Faisal Al Alloush, Ali Jaafar and C. Salame ,(2013) " Study of the Effects Related to the Electric Reverse Stress Currents on the Mono-Si Solar Cell Electrical Parameters", Energy Procedia 36 (2013) 104 – 113.

[11] Tsai, H., Tu, C. and Su, Y. (2008), "Development of generalized photovoltaic model using MATLAB /SIMULINK", Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008, WCECS 2008, October 22 - 24, San Francisco, USA.

[12] Salame, C. and Habchi. R., (2008), "Silicon MOSFET devices electrical parameters evolution at high temperatures", Microelectronics International, Vol. 25, No. 1, pp. 21-24.

[13] Denise Lugo-Munoz, Juan Muci, Adelmo Ortiz-Conde, Francisco J. Garcia-Sanchez, Michelly de Souza, Marcelo A. Pavanello,(2011) "An explicit multi-exponential model for semiconductor junctions with series and shunt resistances", Journal Microelectronics Reliability, 51 (2011) 2044-2048.

[14] Keithley Instruments, Inc., (2007), "Making I-V and C-V measurements on solar/ photovoltaic cells using the model 4200-SCS semiconductor characterization system", Keithley Instruments, Application note series number 2876, www.keithley.com, USA. Report downloaded Nov. 20, 2009.3

[15] J. Sidawi, R. Habchi, N. Abboud, A. Jaafar, Faisal Al Allouch, G. El Haj Moussa, M. Aillerie, P. Petit, A. Zegaoui, C. Salame,(2011) " The effect of reverse current on the dark properties of photovoltaic solar modules", Energy Procedia 6 (2011) 743 – 749.

[16] Nadine Abboud, titre « Etude et caractérisation de structure à base de silicium. Thèse cotutelle entre l'université libanaise (Liban) et l'université de Montpellier II (France) ,2011

[17] S.M. Sze. Semiconductor devices: physics and technology. John Wiley and Sons, USA, 2001. ISBN: 0471333727.

[18] E.H. Nicollian and J.R. Brews. MOS (Metal Oxide Semiconductor) physics and technology.John Wiley and Sons, USA, 1982. ISBN : 0471085006.

[19] H.Mathieu.Physique des semi-conducteurs et des composants électronique.5ème édition, Dunod, 2001.

[20] Sidawi, J., Zaraket, C., Habchi, R., Bassil, N., Salame, C., Aillerie, M., Charles, J.P., (2014), "Evolution of photovoltaic solar modules dark properties after exposition to electrical reverse stress current inducing thermal effect". (2014). Microelectronics International, Emerald, Volume 31, Number 2, 2014, p. 90-98.

RÉFÉRENCES CHAPITRE III

[1] TÜV Rheinland, "Design qualification and type approval of PV modules according to 61215:2005/IEC61646:2008", (2009), TÜV Rheinland Immissionsschutz und Energiesysteme Gmbh, Renewable Energies, pp. 1-5.

[2] Rheinland TÜV. (2009). Design qualification and type approval of PV modules according to 61215:2005/IEC 61646:2008. TÜV Rheinland Immissionsschutz und Energiesysteme Gmbh. Renewable Energies, 1-5. www.solar-academy.com/menuis/IEC_61215_61646022540.pdf

[3] Standards that apply to the testing of solar panel and photovoltaic modules. http://www.envirotronics.com/solrpan.html

[4] Nordmann, T., and Clavadetscher, L., "Understanding temperature effects on PV systems performance", (2003), paper presented at the 3rd world conference on Photovoltaic Energy Conversion, 11-18 May 2003, Osaka, Japan.

[5] Friesen, G., Zaaiman, W., and Bishop, J., "Temperature behaviour of photovoltaic parameters", (1998), Proceedings of 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, 6-10 July, Wien, Austria.

[6] Saengprajak, A., and Pattanasethanon, S., "The low temperature analysis of the used PV modules during on-site generation in Thailand", (2009), Journal of Applied Sciences, vol. 9, No. 22, pp. 3966-3974.

[7] Sharri, S., Sopian, K., Amin, N., and Kassim, M., "The temperature dependence coefficients of amorphous silicon and crystalline photovoltaic modules using Malaysian field test investigation", (2009), American Journal of Applied Sciences, vol. 6, No. 4, pp. 586-593.

[8] Özdemir, S. and Dökme, I., & Altındal, S. (2011), The forward bias current density–voltage–temperature (J–V–T) characteristics of Al–SiO2–pSi (MIS) Schottky diodes, International Journal of Electronics, 98-6, 699-712.

[9] Taherbaneh M., Rezaie A. H., Ghafoorifard H., Rahimi K., Menhaj M. B., & Milimonfared, J. M. (2011), "Evaluation of two-diode-model of a solar panel in a wide range of environmental conditions", International Journal of Electronics, 98-3, 357-377.,

[10] Zegaoui, A., Aillerie, M., Petit, P., Sawicki, J. -P., Charles, J. –P., Belarbi, A. W. (2011). Dynamic behaviour of PV generator trackers under irradiation and temperature changes. Solar Energy, 85(11), 2953-2964. http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2011.08.038.

[11] Mahanama, G. D. K., & Reehal, H. S. (2005), Dark and illuminated characteristics of crystalline silicon solar cells with ECR plasma CVD deposited emitters, International Journal of Electronics, 92(9), 525-537.

[12] Andreev, V., Grilikhes, V., & Rumyanstev, V. (1997). Handbook of photovoltaic science and engineering. John Wiley and Sons, ISBN : 978-0-471-96765-1, UK.

[13] H.Mathieu. Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques, 5ème edition, Dunod, 2001.

[14] B. Streetman and S .Banerjee. Solid-state electronic devices. Prentice Hall, fifth edition, ISBN0-13-025538-6, 2000.

[15] Committee on Materials for High-Temperature Semiconductor Devices, Commission on Engineering and Technical Systems, National Research Council. Materials for High-Temperature Semiconductor Devices, National Academy Press, ISBN: 0-309-59653-X, 1995.

RÉFÉRENCES CHAPITRE IV

[1] A. Guerrero, E.J. Juarez-Perez, J. Bisquert, I. Mora-Sero, G. Garcia-Belmonte " Electrical field profile and doping in planar lead halide perovskite solar cells", Applied Physics Letters 105 , 133902 (2014); doi: 10.1063/1.4896779

[2] D. Jena, V. Venkata Ramana, « Modeling of photovoltaic system for uniform and non-uniform irradiance: A critical review », In Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 52, 2015, Pages 400-417, ISSN 1364-0321, DOI : 10.1016/j.rser.2015.07.079.

[3] A. Kaminski, B. Vandelle, A. Fave, J.P. Boyeaux, Le Quan Nam, R. Monna, D. Sarti, A. Laugier, « Aluminium BSF in silicon solar cells, In Solar Energy Materials and Solar Cells », Volume 72, Issues 1–4, 2002, Pages 373-379, ISSN 0927-0248, DOI:10.1016/S0927-0248(01)00185-4.

RÉFÉRENCES CHAPITRE V

[1] C. Nyamhere, P. N. K. Deenapanray, F. D. Auret and F.C. Farlow, Characterization of defects created in Cz and epitaxial Si doped with Ga or B using Laplace-DLTS. Physica B, Vol.376-377, pp. 161-164, 2006

[2] J.-P. Colinge and C. A. Colinge. Physics of semiconductor devices. Kluwer Academic Publisher, 2002

[3] E. Placzek-Popko, J. Trzmiel, E. Zielony, S. Grzanka, R. Czernecki and T. Suski. Deep level transient spectroscopy signatures of majority traps in GaN p-n diodes grown by

metal-organic vapor-phase epitaxy technique on GaN substrates. Physica B, Vol. 404, pp.4889-4891, 2009

[4] D.V. Lang "Deep-level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors", J. Appl.Phys., Vol 45, Issue 7, pp.3023-3032, July 1974

[5] I. Thurzno,K.Kresakova and J.Jakubovic.on the interpretation of DLTS spectra of MIS capacitors.Journal of physics D :Applied Ohysics,Vol 15 ,pp 1751-1764,1982

[6] K.Dmowski and A.jakubowski.Sensitivity analysis of bulk traps detection in analog deep-level transient spectroscopy measurement systems with exponentially weighted average.rev.Sci.Instrum, Vol.60, pp106, 1989

[7] Priyashree S.Bhave, Sharad T.Chavan and Vasant N Bhoraskar.Improvement in switching characteristics of silicon didoes through a selective zone of defects produced by 6 Mev electrons .Nuclear Instruments and Methods in physics Research section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Vol.95,pp.334-338,1995

[8] N. Abboud, « Etude et caractérisation de structure à base de silicium. Thèse cotutelle entre l'université libanaise (Liban) et l'université de Montpellier II (France) ,2011

[9] A. Neemgeer, M. Burgelman, 25th IEEE photovoltaic specialist conference, Washington, D.C. (1996) 901-904. Numerical modelling of ac-characteristics of CdTe and CIS solar cells

[10] Y. XU, « Fabrication et caractérisation des films CuInGaSe2 par pulvérisation cathodique Etude des défauts par la spectroscopie des pièges profonds par la charge », thèse à Université De Nantes Faculté Des Sciences Et Des Techniques,2014.

[11] P. Léveque. Caractérisation des matériaux et des composants. Cours Master 2 MNE,Université Louis paster, UFR Sciences Physiques.

[12] Mohamed El Bouabdellati, « Etude par spectroscopie DLTS des structures formees sur ino(n) par oxydation plasma », Présenté à l'université de METZ ,20 DEC 1994.

[13] E. Losson, « Méthodes d'exploitation des transitoires de capacité en spectroscopie des niveaux profonds (DLTS) Application a des jonctions Au-InP. Présenté à l'université de METZ ,1992.

[14] P. Arnolda, « La création de défauts de déplacements atomiques dans le silicium et son impact sur les composants électroniques à applications spatiales », thèse à L'université De Toulouse, 2011

[15] https://mklec.com/pdf/mic_1N4001-1N4007_datasheet

[16] O. Haas, titre « Étude des défauts électriquement actifs dans les cellules solaires organiques », thèse à UNIVERSITÉ DE NANTES FACULTÉ DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES, 2012.

[17] F. Beeler, O.K. Andersen, and M. Scheffler,"Electronic and magnetic structure of 3*d*–transition-metal point defects in silicon calculated from first principles" Phys. Rev. B 41, 1990, pp. 1603