



HAL
open science

Modélisation, élaboration et caractérisation de cellules photovoltaïques à base de silicium cristallin pour des applications sous concentration

Benoit Guillo Lohan

► To cite this version:

Benoit Guillo Lohan. Modélisation, élaboration et caractérisation de cellules photovoltaïques à base de silicium cristallin pour des applications sous concentration. Electronique. Université de Lyon, 2018. Français. NNT : 2018LYSEI093 . tel-02124603

HAL Id: tel-02124603

<https://theses.hal.science/tel-02124603v1>

Submitted on 9 May 2019

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.



INSA

N°d'ordre NNT : 2018LYSEI093

THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON

opérée au sein de

L'Institut des Nanotechnologies de Lyon

Ecole Doctorale ED 160

Electronique, Electrotechnique, Automatisme

Spécialité de doctorat :

Electronique, Micro et Nanoélectronique, Optique et Laser

Soutenue publiquement le 26/11/2018, par :

Benoit Guillo Lohan

Modélisation, élaboration et caractérisation de cellules photovoltaïques à base de silicium cristallin pour des applications sous concentration

Devant le jury composé de :

Gourbilleau Fabrice, Directeur de Recherche, CIMAP
Dubois, Sébastien, Docteur HDR, CEA-INES
Clerc, Raphaël, Professeur, Université Jean Monnet
Kaminski-Cachopo, Anne, Professeur, Grenoble-INP

Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examinatrice

Amara, Mohamed, Chargé de Recherche, INSA de Lyon
Lemiti, Mustapha, Professeur, INSA de Lyon

Co-encadrant
Directeur de thèse

Département FEDORA – INSA Lyon - Ecoles Doctorales – Quinquennal 2016-2020

SIGLE	ECOLE DOCTORALE	NOM ET COORDONNEES DU RESPONSABLE
CHIMIE	CHIMIE DE LYON http://www.edchimie-lyon.fr Sec. : Renée EL MELHEM Bât. Blaise PASCAL, 3e étage secretariat@edchimie-lyon.fr INSA : R. GOURDON	M. Stéphane DANIELE Institut de recherches sur la catalyse et l'environnement de Lyon IRCELYON-UMR 5256 Équipe CDFA 2 Avenue Albert EINSTEIN 69 626 Villeurbanne CEDEX directeur@edchimie-lyon.fr
E.E.A.	ÉLECTRONIQUE, ÉLECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE http://edeea.ec-lyon.fr Sec. : M.C. HAVGOUDOUKIAN ecole-doctorale.eea@ec-lyon.fr	M. Gérard SCORLETTI École Centrale de Lyon 36 Avenue Guy DE COLLONGUE 69 134 Écully Tél : 04.72.18.60.97 Fax 04.78.43.37.17 gerard.scorletti@ec-lyon.fr
E2M2	ÉVOLUTION, ÉCOSYSTÈME, MICROBIOLOGIE, MODÉLISATION http://e2m2.universite-lyon.fr Sec. : Sylvie ROBERJOT Bât. Atrium, UCB Lyon 1 Tél : 04.72.44.83.62 INSA : H. CHARLES secretariat.e2m2@univ-lyon1.fr	M. Philippe NORMAND UMR 5557 Lab. d'Ecologie Microbienne Université Claude Bernard Lyon 1 Bâtiment Mendel 43, boulevard du 11 Novembre 1918 69 622 Villeurbanne CEDEX philippe.normand@univ-lyon1.fr
EDISS	INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES-SANTÉ http://www.ediss-lyon.fr Sec. : Sylvie ROBERJOT Bât. Atrium, UCB Lyon 1 Tél : 04.72.44.83.62 INSA : M. LAGARDE secretariat.ediss@univ-lyon1.fr	Mme Emmanuelle CANET-SOULAS INSERM U1060, CarMeN lab, Univ. Lyon 1 Bâtiment IMBL 11 Avenue Jean CAPELLE INSA de Lyon 69 621 Villeurbanne Tél : 04.72.68.49.09 Fax : 04.72.68.49.16 emmanuelle.canet@univ-lyon1.fr
INFOMATHS	INFORMATIQUE ET MATHÉMATIQUES http://edinfomaths.universite-lyon.fr Sec. : Renée EL MELHEM Bât. Blaise PASCAL, 3e étage Tél : 04.72.43.80.46 infomaths@univ-lyon1.fr	M. Luca ZAMBONI Bât. Braconnier 43 Boulevard du 11 novembre 1918 69 622 Villeurbanne CEDEX Tél : 04.26.23.45.52 zamboni@maths.univ-lyon1.fr
Matériaux	MATÉRIAUX DE LYON http://ed34.universite-lyon.fr Sec. : Stéphanie CAUVIN Tél : 04.72.43.71.70 Bât. Direction ed.materiaux@insa-lyon.fr	M. Jean-Yves BUFFIÈRE INSA de Lyon MATEIS - Bât. Saint-Exupéry 7 Avenue Jean CAPELLE 69 621 Villeurbanne CEDEX Tél : 04.72.43.71.70 Fax : 04.72.43.85.28 jean-yves.buffiere@insa-lyon.fr
MEGA	MÉCANIQUE, ÉNERGÉTIQUE, GÉNIE CIVIL, ACOUSTIQUE http://edmega.universite-lyon.fr Sec. : Stéphanie CAUVIN Tél : 04.72.43.71.70 Bât. Direction mega@insa-lyon.fr	M. Jocelyn BONJOUR INSA de Lyon Laboratoire CETHIL Bâtiment Sadi-Carnot 9, rue de la Physique 69 621 Villeurbanne CEDEX jocelyn.bonjour@insa-lyon.fr
ScSo	ScSo* http://ed483.univ-lyon2.fr Sec. : Viviane POLSINELLI Brigitte DUBOIS INSA : J.Y. TOUSSAINT Tél : 04.78.69.72.76 viviane.polsinelli@univ-lyon2.fr	M. Christian MONTES Université Lyon 2 86 Rue Pasteur 69 365 Lyon CEDEX 07 christian.montes@univ-lyon2.fr

Remerciements

J'ai eu la chance de travailler dans trois laboratoires : l'Institut des Nanotechnologies de Lyon, le Centre d'Energétique et de Thermique de Lyon et l'Institut de la Microélectronique et de la Photonique : laboratoire d'Hyperfréquence et de Caractérisation.

Dans un premier temps, mes remerciements vont bien évidemment à mon directeur de thèse, Mustapha Lemiti, ainsi qu'à mes encadrants, Mohamed Amara et Anne Kaminski-Cachopo. Grâce à leur disponibilité, leur implication et leur écoute, j'ai pu mener ce travail de thèse dans les meilleures conditions possibles. Cette thèse fut pour moi une expérience exceptionnelle aussi bien sur le plan professionnel que personnel de laquelle je ressors grandi.

Je tiens également à remercier toute l'équipe Photovoltaïque de l'INL pour m'avoir accueilli et apporté de nombreux conseils. Merci Céline pour ta bonne humeur, Danièle pour ta disponibilité, Alain pour notre petit voyage à San Diego (et puis les wafers aussi), Erwann (Sâlûut), Fabien pour nos petites discussions scientifiques (et tes phrases toujours encourageantes et motivantes). Merci à vous tous. Et puis merci Benjamin, tu m'as bien aidé durant ces trois années, que ce soit au laboratoire ou en dehors (je pense que tu sais exactement de quoi je veux parler #protéines). Je n'oublie pas également tout le personnel plateforme et administratif ainsi que toutes les autres personnes du laboratoire avec qui j'ai pu discuter de sujets scientifiques (et autres!).

Cette thèse fut également l'occasion de partager de bons moments avec les « vieux » doctorants Corina, Félix, Amaury et Romain, puis avec les « jeunes », Nico, Flo, Ali, Victor, Xiao et Nelly sans oublier Benjamin et Solène. Ce fût un réel plaisir de partager ces années à vos côtés.

Il y a aussi toutes les personnes qui sont extérieures au laboratoire. Ceux de Paris et de Grenoble avec qui j'ai pu élargir mes compétences culinaires en (re)découvrant les tacos, la raclette, la bière et profiter pleinement de mes jours de repos, puis ceux que j'ai rencontrés pendant ma thèse à Lyon avec qui j'ai pu passer de nombreuses soirées très studieuses et être ainsi bien reposé pour le début de la semaine.

Pour finir, je tiens à remercier ma famille. Merci Luc, Pierre, Fang et Jordane pour votre écoute et votre soutien. Merci Maman, merci Papa ; vous qui m'avez toujours accompagné et encouragé durant toutes ces années et m'avez apporté un soutien inconditionnel dans les moments difficiles.

Résumé

Les performances électriques des cellules photovoltaïques à base de silicium sont fortement dégradées lorsque leur température augmente. Cette problématique, pourtant bien connue, n'est pas suffisamment prise en considération dans l'industrie du photovoltaïque. Pour parer à cette dégradation, deux voies d'améliorations peuvent être explorées : diminuer la température de fonctionnement des cellules ou réduire leurs coefficients de dégradation en température. Cette étude est d'autant plus importante pour les applications sous concentrations, un éclairage élevé favorisant l'échauffement des cellules. Pour les facteurs de concentration élevés, l'utilisation de systèmes de refroidissement actifs réduit drastiquement la température de fonctionnement. Pour les faibles éclairages, le refroidissement passif est préféré, bien moins coûteux en énergie. Ce travail de thèse est focalisé sur l'étude du comportement thermo-électrique des cellules sous faible concentration du rayonnement incident.

Un banc de caractérisation innovant développé dans cette thèse a rendu possible la quantification des variations de la température de la cellule avec la tension de polarisation sous différents facteurs de concentration. Avec l'augmentation de la polarisation, une évolution du facteur d'émission thermique est observée du fait des variations de la concentration de porteurs de charge minoritaires. Le refroidissement radiatif est minimal au courant de court-circuit et est maximal à la tension de circuit ouvert : la température atteinte au point de court-circuit est supérieure à celle atteinte en circuit ouvert. Pour une cellule donnée, sous un éclairage de 3 soleils, un écart de température de $6.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a pu être mesuré entre ces deux points. La fabrication de cellules avec des propriétés différentes nous a permis de confirmer l'importance du dopage de la base et de l'architecture sur l'augmentation du refroidissement radiatif avec la polarisation. De plus, la comparaison du comportement thermo-électrique des cellules de type de dopages différents a mis en avant de plus faibles coefficients de dégradation en température de la tension en circuit ouvert pour les cellules ayant un substrat de type n. Par exemple, pour une température de et sous un éclairage de 1 soleil, un coefficient de dégradation en température du V_{oc} de $-0.45\% \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ a été mesuré sur une cellule de type n contre $-0.49\% \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ pour une cellule de type p.

Abstract

The electrical performances of silicon based solar cells strongly degrade when increasing their temperature. However, such a well-known issue is too scarcely considered in the photovoltaic industry. To prevent the degradation of silicon based solar cells, two ways of improvement can be explored : one can either decrease the cells' functioning temperature or either reduce the temperature degradation coefficient. As light intensity tends to favor cell heating, the study is even more important under concentrated sunlight. Regarding high light intensities, active cooling systems can be used to drastically reduce the cell temperature. For low light intensities, passive cooling systems, such as radiative cooling, are more energetically savvy. The thesis aims at studying the electro-thermal behavior of cells under low light intensities.

An innovative experimental set-up has been developed during this thesis to quantify the variation of the cell temperature with the applied bias voltage. When increasing the bias, an evolution of the cell emissivity is observed because of a variation of the minorities carrier concentration. The radiative cooling is at its lowest at the short circuit current and peaks its highest value at the open circuit voltage : as a result, the reached temperature is higher at the short circuit current than at the open circuit voltage. For a given solar cell, under 3 suns, a temperature shift of $6.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ was measured between these two points. The control of the fabrication process gives the opportunity to analyse the influence of the base doping and cell architecture on the evolution of the radiative cooling with the applied bias. Furthermore, the comparison between the electro-thermal behaviors of solar cells, which are related to their type of doping, has shown a lower thermal degradation coefficient of the open circuit voltage for n-type based dope solar cells. For example, at $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ and under 1 sun, we measured a thermal degradation coefficient $\beta_{V_{oc}} = -0.45\text{ \%} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ for a n type solar cell whereas the p type solar cell recorded $\beta_{V_{oc}} = -0.49\text{ \%} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Liste des symboles

Constantes physiques

c	Célérité de la lumière dans le vide
h	Constante de Planck
k	Constante de Boltzmann
q	Charge élémentaire
σ	Constante de Stefan-Boltzmann

Grandeurs physiques (lettres grecques)

α	Coefficient d'absorption
α_{th}	Coefficient de diffusivité thermique
β_{th}	Coefficient d'expansion thermique
$\beta_{V_{oc}}$	Coefficient de dégradation en température du V_{oc}
β_{η}	Coefficient de dégradation en température du rendement
ε	Facteur d'émission thermique
ε_{cell}	Facteur d'émission thermique de la cellule
η	Rendement
λ	Longueur d'onde
Λ	Libre parcours moyen des molécules d'air
$\mu_{n,p}$	Mobilités des électrons et des trous
ν	Fréquence
ν_{vc}	Coefficient de viscosité cinématique
ρ	Résistivité du substrat
$\tau_{n,p}$	Durée de vie des porteurs minoritaires
ϕ_{inc}	Flux lumineux incident
Φ_{rad}	Flux radiatif
$\Psi(\lambda)$	Flux photonique surfacique spectral
Ω	angle solide

Grandeurs physiques

$C_{géo}$	Facteur de concentration géométrique
$D_{n,p}$	Coefficient de diffusion des électrons et des trous
E_g	Énergie de la bande interdite
F_{i-cell}	Facteur de forme entre une surface i et la cellule
$F(\lambda)$	Éclairement spectral
FF	Facteur de forme
g	accélération de la pesanteur
h_{conv}, h_{rad}	Coefficient d'échanges convectif et radiatif
$I_{solaire}$	Irradiance spectrale du spectre solaire AM1.5G
J_{mpp}	Densité de courant au point de puissance maximale
J_{dark}	Densité de courant sous obscurité
$J_{n,0}$	Densité de courant de saturation
J_{sc}	Densité de courant de court-circuit
k_{air}	conductivité thermique
Kn	Nombre de Knudsen
L_D	Longueur de diffusion
L_{Ω}^0	Luminance d'un corps noir par unité d'angle solide
$L_{\lambda,\Omega}^0$	Luminance spectrale d'un corps noir par unité d'angle solide
M_{pp}	Point de puissance maximale
N	Concentration de porteurs libres
$N_{A,D}$	Concentration d'atomes accepteurs et donneurs
n	Coefficient d'idéalité de la diode
n_e	Concentration d'électrons
n_i	Concentration de porteurs intrinsèques
P	Pression
pFF	Pseudo facteur de forme
R	Coefficient de réflectance
Ra_L	Nombre de Rayleigh
R_c	Résistance de contact
R_{eff}	Réflectance effective
R_{λ}	Coefficient de réflexion
R_0	Rayon moléculaire
S	Surface
T	Température
T_{λ}	Coefficient de transmission
T_{cell}	Température de la cellule

T_{Jsc}	Température du courant de court-circuit
T_{Mpp}	Température au point de puissance maximale
T_{Voc}	Température de la tension en circuit ouvert
V_{base}	Tension de base
V_j	Tension de jonction
V_{jb}	Tension de jonction en face arrière
V_{mpp}	Tension au point de puissance maximale
V_{oc}	Tension en circuit ouvert
X	Facteur de concentration

Table des matières

Introduction	1
1 Comportements thermique et électrique des cellules photovoltaïques en silicium cristallin : état de l'art	5
1.1 Approche générale	5
1.1.1 Aspects théoriques	5
1.1.2 Influence de la température sur les performances électriques des cellules	8
1.1.3 Le besoin d'optimiser les cellules PV avec des critères thermiques	12
1.1.4 Facteur d'émission et d'absorption	16
1.1.5 Conclusion	17
1.2 Modèle numérique : simulation du comportement thermo-électrique des cellules	17
1.2.1 Évolution de la température avec la tension de polarisation	18
1.2.2 Influence du dopage de la base	23
1.3 Étude du comportement thermique des cellules sous concentration	25
1.3.1 Exemple de dispositif pour la faible concentration	26
1.3.2 Comportement des cellules sous concentration	27
1.4 Conclusion du chapitre 1	30
2 Développement d'un banc de caractérisation avancée de cellules photovoltaïques sous environnement contrôlé	33
2.1 Objectifs expérimentaux	34
2.1.1 Caractérisations électrique et thermique de cellules PV	34
2.1.2 Originalité de notre banc de caractérisation	35
2.2 Présentation et dimensionnement du banc de caractérisation	36
2.2.1 Aspect général	36
2.2.2 Influence de T_{paroi} , $T_{\text{couvercle}}$ et T_{fond} sur le refroidissement radiatif d'une cellule sous éclairnement	39
2.2.3 Le travail sous concentration par ajout d'une lentille de Fresnel	41
2.3 Calibration du banc expérimental	43
2.3.1 Calibration du système de mesure	43

2.3.2	Calibration de l'éclairage	46
2.4	Mesures : méthode générale, stabilité et limites	48
2.4.1	Méthode de mesure expérimentale	48
2.4.2	Stabilité des mesures	49
2.4.3	Les limites du dispositif	53
2.5	Conclusion du chapitre 2	57
3	Fabrication et caractérisation de cellules photovoltaïques à architecture PERT	59
3.1	Fabrication de cellules photovoltaïques à architecture PERT	59
3.1.1	Architectures étudiées	59
3.1.2	Procédé de fabrication	61
3.1.3	Présentation des différents lots de cellules	65
3.2	Texturation de surface par voie chimique	67
3.2.1	Choix de la méthode de texturation par voie chimique	67
3.2.2	Méthode expérimentale et premiers résultats	68
3.2.3	Texturation de surface : influence du type de dopage et de la résistivité	71
3.3	Caractérisation des cellules fabriquées	72
3.3.1	Mesure des grandeurs électriques des cellules	72
3.3.2	Réponse spectrale	75
3.4	Conclusion du chapitre 3	77
4	Caractérisation thermo-électrique avancée de cellules photovoltaïques à base de silicium	79
4.1	Évolution de la température de fonctionnement avec la tension de polarisation	80
4.1.1	Objectif et principe de la mesure	80
4.1.2	Mesure P-V et T-V	80
4.1.3	Influence de la résistivité du substrat sur les caractéristiques P-V et T-V	84
4.1.4	Estimation des incertitudes de mesure	85
4.1.5	Retour sur le modèle physique	86
4.2	Variation de la température de stabilisation entre le J_{sc} et le V_{oc}	88
4.2.1	Influence du dopage de la base	88
4.2.2	Évolution du facteur d'émission thermique avec la polarisation	91
4.2.3	Influence de la concentration du rayonnement incident pour différents dopages de base sur le comportement thermo-électrique des cellules	93
4.2.4	Influence de la pression	96

4.3	Mesure du coefficient de dégradation en température du V_{oc} avec la concentration	97
4.3.1	Contrôle de la température de la cellule par conduction avec une plaque de cuivre thermostatée	98
4.3.2	Évolution du V_{oc} et du $\beta_{V_{oc}}$ avec la température et le facteur de concentration	100
4.3.3	Influence du dopage du substrat : comparaison de $\beta_{V_{oc}}$ pour différents dopages de substrat	103
4.3.4	Influence du type de dopage sur $V_{oc} - X$ et $\beta_{V_{oc} - X}$	106
4.4	Conclusion du chapitre 4	108
	Conclusion générale	111
	Perspectives	113
	Bibliographie	114
	Publications de l'auteur	125

Introduction

À la croissance de notre société est indéniablement associée une consommation énergétique effrénée, nécessaire au développement de l'industrie, du transport ou encore de l'agriculture. Notre consommation, de plus en plus importante d'année en année, soulève de nombreuses problématiques. Encore aujourd'hui, la production énergétique mondiale provient très majoritairement des énergies fossiles comme le pétrole (31.7%), le charbon (28.1%), ou le gaz naturel (21.6%). Ces derniers sont responsables de la majeure partie des émissions de CO_2 dans l'atmosphère [1], contribuant grandement aux gaz à effet de serre qui sont les principaux vecteurs du réchauffement climatique. Diminuer les dégagements de tels gaz est par conséquent devenu l'une des principales priorités afin de garantir un avenir viable de la biodiversité sur notre planète.

Une mutation profonde de la production et de la consommation énergétique est en cours. Durant ces dernières années, la production provenant des sources d'énergies renouvelables a nettement augmenté. Parmi ces sources, le solaire photovoltaïque, qui transforme l'énergie lumineuse incidente en électricité, se démarque : à lui seul, il possède le potentiel suffisant pour combler la totalité des besoins énergétiques dans le monde. Sa capacité de production croît de façon significative au cours des années, comme en témoigne la figure 0.1. En 2017, la capacité de production a connu un bond considérable de 98 GW sur les 402 GW de capacité totale mondiale installée à la fin de l'année 2017 [2]. Cependant, cette progression reste encore insuffisante face à la croissance des besoins énergétiques. Parmi les pays les plus producteurs, la Chine s'est rapidement installée comme le numéro un mondial. Elle jouera un rôle décisif sur l'avenir du photovoltaïque dans le monde.

Cette avancée considérable est le fruit de nombreuses recherches visant aussi bien à l'amélioration des performances électriques des panneaux photovoltaïques qu'à la réduction des coûts de fabrication, principaux verrous de l'essor du PV dans le monde. Par exemple, en Allemagne, le prix d'une installation classique est passé de $14000 \text{ €} \cdot \text{kWc}^{-1}$ à $1140 \text{ €} \cdot \text{kWc}^{-1}$ en l'espace de 27 ans [3]. Les rendements actuels des cellules varient selon le matériau utilisé. Grâce aux connaissances provenant de la microélectronique, le silicium est un matériau de choix pour le photovoltaïque. Les panneaux à base de silicium multi ou monocristallin représentent plus de 90% de la production mondiale [3], d'où l'intérêt que nous portons pour ce matériau. Pour les cellules à base de silicium, les rendements records atteignent 26.7% sur

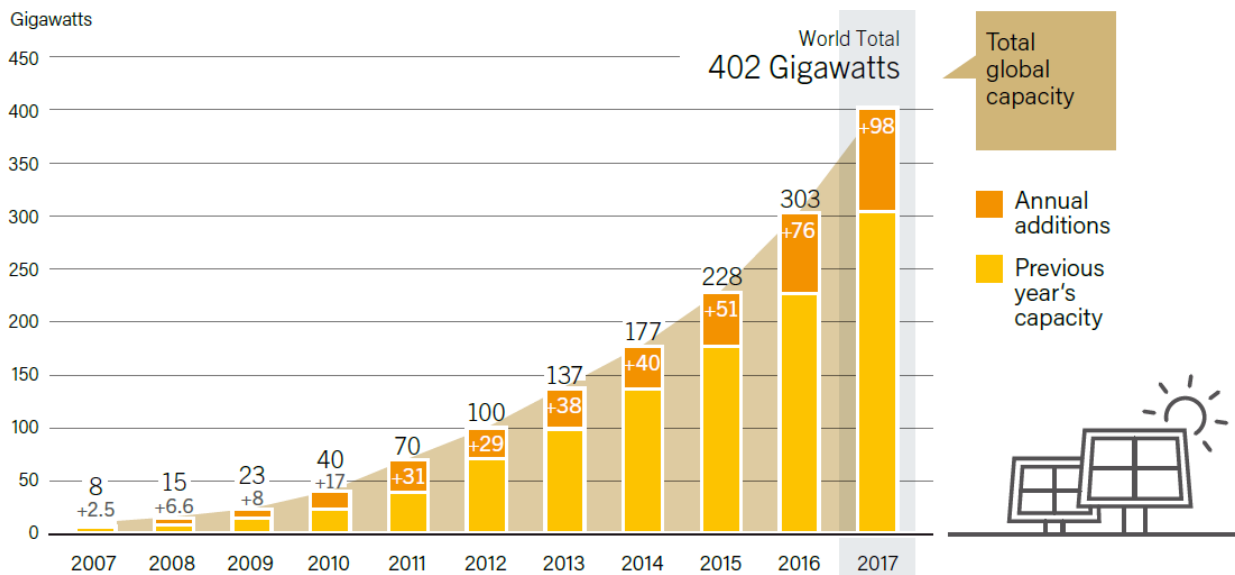


FIGURE 0.1 – Évolution de la capacité de production du solaire photovoltaïque dans le monde entre 2007 et 2017. Source : *Global Statut Report - Renewables 2018 Energy* [2].

substrat monocristallin pour une cellule à contacts arrière interdigités et 22.3 % sur substrat multicristallin [4].

Le coût élevé des installations photovoltaïques vient essentiellement du prix du panneau. En réduisant la quantité de silicium utilisé, le prix de production chute significativement. La diminution de l'épaisseur des substrats de 300 μm en 2004 à 180 μm en 2017 a fortement réduit la quantité de silicium utilisé par module [3], et donc le prix de production. Si l'on souhaite conserver les performances des cellules, une telle réduction de l'épaisseur doit être accompagnée par de nombreux progrès technologiques comme l'amélioration du piégeage optique des photons où la qualité du matériau. D'après les simulations [5], le rendement théorique maximal sur une cellule mono-jonction à base de silicium, qui est de 29.4 %, est atteint pour une cellule ayant une épaisseur de 110 μm . Des économies de matériau peuvent donc encore être faites sur la réduction de l'épaisseur des cellules.

Une autre voie d'amélioration consiste à réduire la surface des modules tout en augmentant le flux surfacique du rayonnement incident à l'aide de systèmes optiques performants : c'est ce que propose le CPV (*Concentrator Photo Voltaic*). Les avantages du CPV sont nombreux. Outre le gain provenant de la réduction des surfaces des modules, les rendements atteints sont plus élevés, les temps de retour énergétique sont plus faibles [6] et les performances électriques des cellules sont moins affectées par l'élévation de la température. Car si les rendements sont souvent donnés à 25 °C, cette température ne correspond absolument pas à la température réelle de fonctionnement. En moyenne, les modules atteignent des températures de l'ordre de 60 °C ; et les conséquences sur la production électrique sont désastreuses.

Plus la température du module est élevée, plus son rendement sera faible. De plus, il paraît évident que la température de la cellule augmente avec l'éclairement incident. Plus généralement, la température de fonctionnement d'un module dépend de sa capacité à échanger la chaleur avec son milieu environnant, que ce soit par des échanges convectifs, conductifs ou radiatifs. Même si les zones possédant les plus forts ensoleillements ont les plus gros potentiels de production, l'influence de la température ambiante ne peut être négligée. En effet, certaines régions possédant des ensoleillements élevés peuvent voir leurs potentiels de production chuter [7].

Mieux comprendre le comportement thermique des cellules photovoltaïques est une nécessité si l'on souhaite réduire la dégradation des performances des cellules lorsque la température augmente. Si jusqu'à maintenant les recherches étaient focalisées sur l'amélioration des performances électriques des cellules, des gains conséquents sur la puissance produite pourraient être obtenus grâce à la prise en compte de critères thermiques. Selon l'architecture de la cellule ou ses propriétés (dopage de la base, type de dopage,...), le comportement thermique sera différent.

Ce travail de thèse, articulé autour de la problématique de l'échauffement des cellules, est motivé par la volonté d'élargir les connaissances actuelles sur le comportement thermo-électrique des cellules, notamment pour des applications sous concentration. Différents objectifs ont été fixés dans le cadre de cette étude. La base de ce travail de thèse repose sur la mise en place d'un banc de caractérisation innovant permettant d'étudier le comportement thermo-électrique des cellules. Grâce à ce dispositif où les conditions environnantes à la cellule sont contrôlées, la possibilité d'une optimisation de l'architecture et des propriétés des cellules PV en silicium en prenant en considération des critères thermiques pourra être étudiée.

Le premier chapitre est dédié à l'état de l'art sur le comportement thermo-électrique des cellules photovoltaïques. Après avoir brièvement rappelé leur principe de fonctionnement, l'influence de la température sur les performances des cellules est détaillée. Un modèle numérique, développé dans le cadre de précédents travaux et permettant de coupler les différents phénomènes thermiques, électriques et radiatifs intervenant lors du fonctionnement des cellules, est présenté. Le comportement des cellules PV sous faibles concentration du rayonnement incident y est étudié par simulation en utilisant ce modèle numérique.

Dans le chapitre 2, nous présentons un banc de caractérisation du comportement thermo-électrique des cellules. Ce dispositif a été développé dans le cadre de cette étude. Les principales étapes de calibration et d'étalonnage du dispositif sont détaillées, tout comme les limites de fonctionnement.

Dans le chapitre 3, un procédé de fabrication de cellules à architectures PERT est présenté. Un tel procédé nous permet de contrôler précisément les différentes propriétés des cellules

(dopage de la base, type de dopage,...) afin d'étudier leur influence sur le comportement thermo-électrique des cellules. Un accent particulier est mis sur la texturation par voie chimique de la face avant. Les performances électriques des cellules fabriquées sont mesurées et comparées à celles d'une cellule de référence.

Pour finir, dans le chapitre 4, les comportements thermo-électriques de plusieurs cellules sont comparés grâce au banc de caractérisation développé dans cette thèse. L'évolution de la température de la cellule avec la tension de polarisation est mise en avant, et l'influence du dopage de la base sur le refroidissement radiatif des cellules est étudié. La dégradation en température des performances électriques des cellules est également présentée.

Cette thèse, financée par la région Auvergne-Rhône-Alpes, a été réalisée au sein de l'Institut des Nanotechnologies de Lyon (INL), en partenariat avec le Centre d'Énergétique et de Thermique de Lyon (CETHIL) et l'Institut de Microélectronique Électromagnétisme et Photonique et le Laboratoire d'Hyperfréquences et de Caractérisation (IMEP-LaHC).

Chapitre 1

Comportements thermique et électrique des cellules photovoltaïques en silicium cristallin : état de l'art

Malgré l'importance qu'ont les phénomènes thermiques sur les performances électriques des cellules photovoltaïques en silicium cristallin, trop peu d'études s'intéressent à la compréhension des différents mécanismes thermiques et électriques régissant le fonctionnement des cellules. L'amélioration du rendement à 25 °C est devenu la principale priorité, sans forcément s'attarder sur l'impact qu'ont les diverses améliorations apportées sur le fonctionnement des cellules en conditions réelles.

Ce premier chapitre introduit le contexte et les objectifs de cette thèse. Après avoir brièvement rappelé les principes régissant le fonctionnement des cellules photovoltaïques, l'influence de la température sur les caractéristiques des cellules sera exposée. Par la suite, nous présenterons un outil numérique puissant développé dans le cadre d'une thèse précédente permettant de simuler le comportement thermo-électrique des cellules photovoltaïques à architecture simple. Pour finir, nous exposerons l'influence de la concentration du rayonnement solaire sur le comportement des cellules photovoltaïques.

1.1 Approche générale

1.1.1 Aspects théoriques

Grâce à l'effet photovoltaïque, l'énergie des photons incidents est en partie convertie en énergie électrique. La cellule photovoltaïque est une photodiode qui, pour le silicium, est réalisée à l'aide d'une jonction *pn*. L'ajout d'impuretés dans le matériau telles que des atomes de bore ou phosphore permet d'augmenter drastiquement la concentration de porteurs de charges à savoir des trous pour le bore et des électrons pour le phosphore. Lors de l'absorption du

rayonnement incident par la cellule photovoltaïque, des paires électrons-trous sont générées dans le matériau. Pour pouvoir être collectés, ces porteurs doivent être séparés. La séparation est assurée par une plus importante conductivité des trous (respectivement électrons) dans la zone p (respectivement n), intervenant dans le calcul des forces que subissent les porteurs de charges par phénomène de diffusion du fait des variations des quasi-niveaux de Fermi [8]. Ainsi, cette variation de conductivité favorise la diffusion des porteurs de charges, et par conséquent leur collecte, dans la zone où ils sont majoritaires. On observe alors l'apparition d'un courant photogénéré, qui s'oppose au courant de diode. D'après l'équation de Shockley [9], la densité de courant collecté peut être calculée en fonction de la polarisation appliquée aux bornes de la cellule. La densité de courant total correspond à la somme algébrique de la densité de courant photogénéré J_{ph} et du courant de diode J_{diode} auxquelles s'ajoute le terme traduisant les différentes pertes résistives. La caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque sous éclairage s'exprime, sous le principe de superposition, par la relation suivante :

$$J(V) = J_{ph} - J_{n,0} \left[\exp \left(\frac{q(V + JS_{cell}R_s)}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{V + JS_{cell}R_s}{R_{sh}} \quad (1.1)$$

Où R_s et R_{sh} représentent respectivement les résistances série et parallèle, S_{cell} la surface de la cellule, $J_{n,0}$ représente la densité de courant de saturation, fonction de la densité de porteurs intrinsèques, des coefficients de diffusion ainsi que de la durée de vie des différents porteurs de charges, k la constante de Boltzmann, T la température de la cellule et n le facteur d'idéalité de la diode. Dans le cas où le courant sous obscurité est gouverné par des courants de diffusion, le facteur d'idéalité n vaut 1. La cellule photovoltaïque est classiquement modélisée par le schéma électrique présenté sur la figure [1.1]. Elle peut être approximée par un générateur de courant idéal ($I_{ph} = J_{ph}S_{cell}$) monté en parallèle avec une diode et une résistance shunt R_{sh} , le tout en série avec une résistance R_s . La polarisation de la cellule est obtenue en branchant une résistance de charge R à ses bornes.

Dans le cas où R_s est faible, $J_{ph} = J_{sc}$, J_{sc} étant la densité de courant de court-circuit. En circuit ouvert, la densité de courant total est nulle. D'après l'équation [1.1], la tension en circuit ouvert V_{oc} s'exprime dans le cas où R_{sh} est infinie par la relation :

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{J_{sc}}{J_{n,0}} + 1 \right) \quad (1.2)$$

Le facteur de forme (noté FF) peut être introduit pour rendre compte de l'effet de la résistance série et de la résistance parallèle, traduisant les pertes résistives dans la cellule lors de la collecte des porteurs. Il s'exprime par le ratio entre la puissance extraite de la cellule au point de puissance maximale (M_{pp}) et la puissance idéale que l'on pourrait obtenir

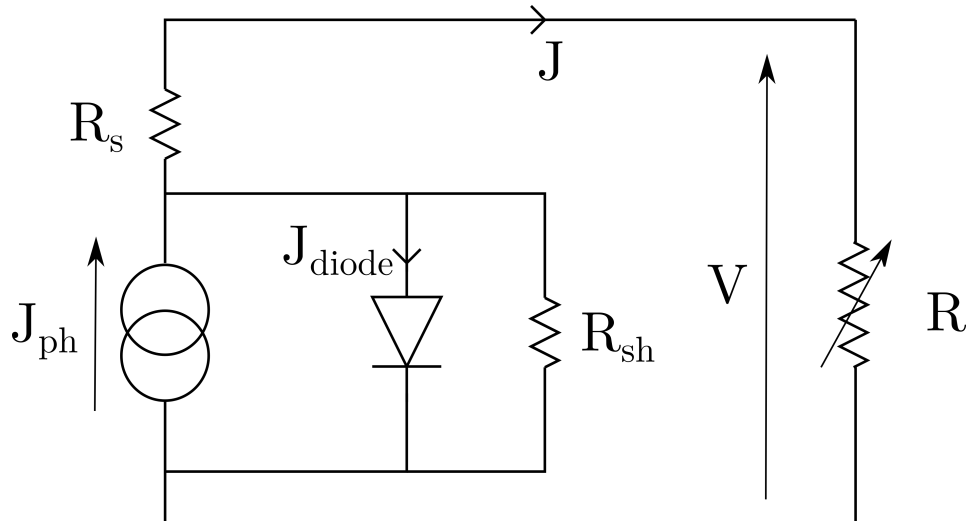


FIGURE 1.1 – Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairement.

en l'absence de pertes résistives. Il s'écrit :

$$FF = \frac{J_{mpp} V_{mpp}}{J_{sc} V_{oc}} \quad (1.3)$$

J_{mpp} et V_{mpp} représentent respectivement la densité de courant et la tension au point de puissance maximale. Finalement, le rendement électrique de la cellule s'exprime par le rapport entre la puissance maximale extraite et la puissance incidente :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{incidente}} = \frac{J_{mpp} V_{mpp} S_{cell}}{P_{incidente}} \quad (1.4)$$

En traçant l'évolution de la densité de courant et de la puissance correspondante en fonction de la polarisation, les caractéristiques électriques de la cellule peuvent aisément être déterminées. Par soucis de convention, la valeur absolue de la densité de courant est préférée à sa valeur algébrique. Sur la figure [1.2](#), les paramètres principaux de la cellule sont représentés, à savoir J_{sc} , V_{oc} et P_{max} .

Il est important de noter que cette caractéristique a été obtenue pour une température de cellule de 25 °C. Son évolution avec la température sera présentée dans le paragraphe suivant.

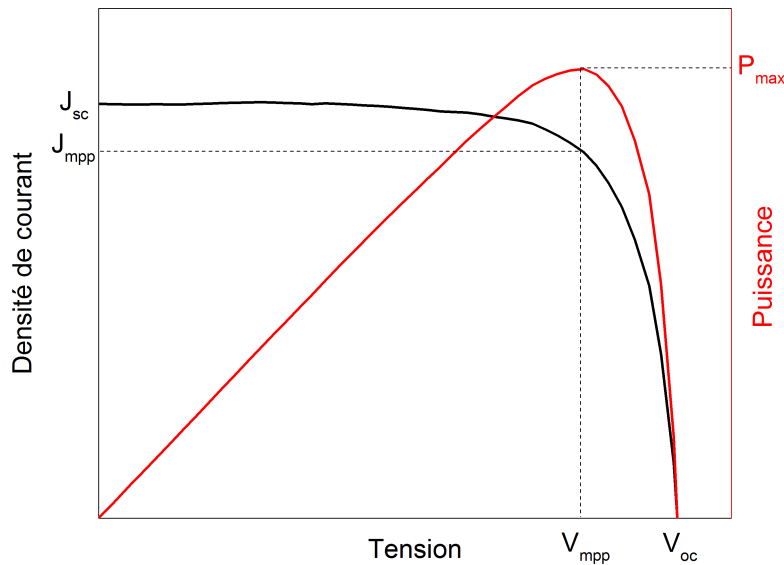


FIGURE 1.2 – Caractéristiques J-V et P-V d'une cellule photovoltaïque sous éclairement.

1.1.2 Influence de la température sur les performances électriques des cellules

1.1.2.1 Éclairement, environnement convectif et température de fonctionnement

L'équilibre thermique entre une cellule photovoltaïque et son environnement dépend principalement :

- de l'éclairement spectral,
- des différents échanges thermiques (convectifs, conductifs, radiatifs),
- des propriétés de la cellule considérée.

Dans ces conditions de fonctionnement, la cellule atteindra une température bien supérieure à 25 °C [10]. Les différents paramètres inhérents à cette température de fonctionnement, comme l'éclairement spectral, dépendent notamment de la localisation géographique. Parmi les trois modes de transfert thermique, le rayonnement se différencie de la convection et de la conduction. Il ne nécessite pas d'un milieu intermédiaire comme l'air pour transporter la chaleur. Pour un corps à une température donnée, l'agitation thermique entraîne l'émission d'ondes électromagnétiques de fréquence ν . D'après la dualité onde-corpuscule, ce transfert d'énergie peut être vu comme la propagation de particules, appelées photons, porteurs d'une énergie $h\nu$. L'énergie des photons issus du rayonnement solaire pourra alors être absorbée par le matériau et convertie en électricité si elle est supérieure à celle du gap du matériau. Pour le silicium, on a $E_g(300\text{ K}) = 1.12\text{ eV}$: les photons de longueurs d'onde supérieures à 1110 nm ne sont pas absorbés.

La puissance transportée par ce rayonnement dans une direction donnée, par unité d'in-

tervalle spectral, de surface apparente et d'angle solide est appelée luminance spectrale. Nous nous intéressons ici au rayonnement émis par le soleil, corps noir à une température de 5778 K. Pour un corps noir, la totalité de l'énergie radiative incidente sur ce dernier est absorbée. La loi de Planck [11] relie la luminance spectrale d'un corps noir à sa température T , exprimée en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$:

$$L_{\Omega,\lambda}^0(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left[\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1\right]} \quad (1.5)$$

En intégrant l'équation [1.5] sur tout le spectre, on obtient la luminance d'un corps noir définie par la loi de Stefan-Boltzmann :

$$L_{\Omega}^0(T) = \int_{\lambda} L_{\lambda}^0(T) d\lambda = \sigma \frac{T^4}{\pi} \quad (1.6)$$

où σ est la constante de Stefan-Boltzmann, qui vaut $5.67 \times 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$.

Le rayonnement du corps noir est isotrope. La puissance reçue par unité de surface à la surface de la terre, hors atmosphère, peut être calculée en multipliant la luminance du soleil par l'angle solide sous lequel le soleil est vu depuis la terre Ω_{T-S} :

$$\phi_{\text{Terre,hors atmosphère}} = \Omega_{T-S} L_{\Omega}^0(T) \quad (1.7)$$

L'angle solide sous lequel le soleil est vu depuis la surface de la terre étant de $6.842 \times 10^{-5} \text{sr}$, $\phi_{\text{Terre,hors atmosphère}}$ vaut :

$$\phi_{\text{Terre,hors atmosphère}} = 1376 \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \quad (1.8)$$

La traversée de l'atmosphère entraîne une diminution de cette densité de puissance où une partie du rayonnement solaire y est absorbée. Pour traduire cette absorption, le nombre d'air masse a été introduit. Il est défini comme le rapport entre la distance parcourue par le rayonnement solaire sur l'épaisseur de l'atmosphère. Pour la caractérisation des cellules photovoltaïques, on utilise le spectre AM1.5G qui est défini par la norme ASTM G173-03 [12]. Le terme G pour Global prend en compte le rayonnement direct et diffus. D'une densité de puissance égale à $1000 \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, l'éclairement spectral suivant la norme ASTM G173-03 est présenté sur la figure [1.3]. Ce dernier est comparé sur la figure [1.3] à l'éclairement spectral du rayonnement hors atmosphère AM0.

La localisation géographique influence fortement le potentiel de production photovoltaïque des modules à base de silicium de par la valeur de la température ambiante et de l'éclairement spectral incident. Ces deux paramètres sont, entre autres, responsables des fluctuations de la production photovoltaïque dans le monde [13]. Certaines régions comme l'Himalaya pos-

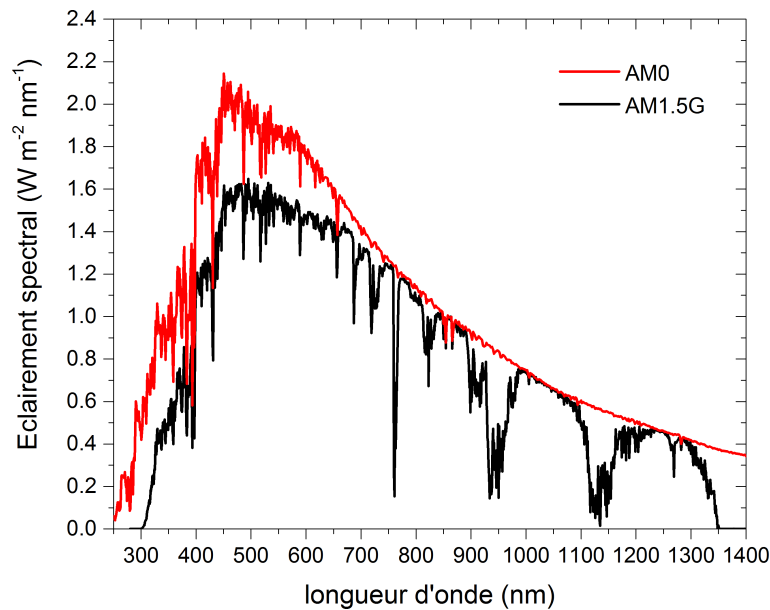


FIGURE 1.3 – Comparaison des éclairements spectraux des rayonnements AM0 et AM1.5G dans la gamme de longueur d'onde [250 nm,1400 nm].

sèdent de forts potentiels de production et ce, grâce aux faibles températures ambiantes combinées à un ensoleillement élevé (influence de l'altitude). La vitesse du vent, l'orientation du panneau par rapport au soleil ou les conditions climatiques sont autant de paramètres qui influent sur la production photovoltaïque. De plus, du fait d'un éclairement plus important hors-atmosphère, l'échauffement des cellules hors-atmosphère provenant de l'éclairement sera plus important.

1.1.2.2 Température et caractéristique I-V

Les grandeurs caractéristiques présentées sur la figure 1.2 évoluent avec la température. Le fonctionnement des cellules photovoltaïques à base de silicium est très impacté par l'élévation de la température [14, 15, 16, 17, 18]. D'après la littérature, il est observé avec l'augmentation de la température :

- une légère augmentation du J_{sc} ,
- une forte diminution du V_{oc} ,
- une diminution du η .

Pour comprendre un tel comportement, il convient de rappeler quelques éléments de théorie. La densité de courant de court-circuit idéale est obtenue en considérant que chaque paire électron-trou générée par absorption d'un photon est collectée. A partir de l'éclairement spectral, noté $F(\lambda)$ (en $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$), le flux photonique surfacique spectral $\Psi(\lambda)$ (en nombre de photons $\cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot nm^{-1}$) s'exprime par la relation :

$$\Psi(\lambda) = F(\lambda) \frac{\lambda}{hc} \quad (1.9)$$

avec h la constante de Planck (en $\text{J} \cdot \text{s}$) et c la célérité de la lumière dans le vide (en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$). Il en résulte la densité de courant de court-circuit idéale par intégration sur tout le spectre :

$$J_{sc} = q \int_0^{\lambda_{max}} \Psi(\lambda) d\lambda \quad (1.10)$$

avec q la charge élémentaire, et λ_{max} la longueur d'onde de coupure correspondant au gap du matériau E_g , à partir de laquelle les photons ne possèdent plus l'énergie nécessaire pour être absorbés. Pour le silicium, à 25°C , $E_g = 1.12 \text{ eV}$, soit $\lambda_{max} = 1108 \text{ nm}$. La dépendance de l'énergie de la bande interdite avec la température pour les semi-conducteurs a été mise en avant par Varshni [17] dans une relation empirique :

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{aT^2}{T+b} \quad (1.11)$$

Où a et b sont des constantes qui sont fonction du matériau. Ces constantes sont positives pour le silicium [17]. D'après l'équation [1.11] une élévation de la température entraîne une diminution de E_g . Avec l'augmentation de la température de la cellule, de plus en plus de photons possèdent une énergie $\frac{hc}{\lambda}$ suffisante pour être absorbés. Par conséquent, la densité de courant de court-circuit augmente avec la température. Le J_{sc} idéal présenté dans l'équation [1.10] ne prend pas en compte les différentes pertes par recombinaisons (volumique ou surfacique), qui tendent à en diminuer la valeur. En réalité, ce dernier dépend fortement de la longueur de diffusion des porteurs de charges ($L_D = \sqrt{D\tau}$) qui traduit les recombinaisons volumiques. La longueur de diffusion L_D augmentant avec la température du fait de la dépendance en température de la diffusivité des électrons et des trous [14], le J_{sc} est amélioré lorsque la température de la cellule augmente.

Le paramètre de recombinaison $J_{n,0}$ défini dans l'équation [1.2] est le principal responsable de la chute du V_{oc} avec la température. Dans le cas d'un régime sous faible injection où le courant sous obscurité est gouverné par les courants de diffusion, et en négligeant les vitesses de recombinaison en surface, il s'écrit de manière simplifiée d'après [9] :

$$J_{n,0} = qn_i^2 \left[\sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} \frac{1}{N_A} + \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \frac{1}{N_D} \right] \quad (1.12)$$

Où τ_n et τ_p représentent la durée de vie des porteurs de charge minoritaires (électrons et trous respectivement) et D_n et D_p leurs diffusivités. La variation de $J_{n,0}$ avec la tempéra-

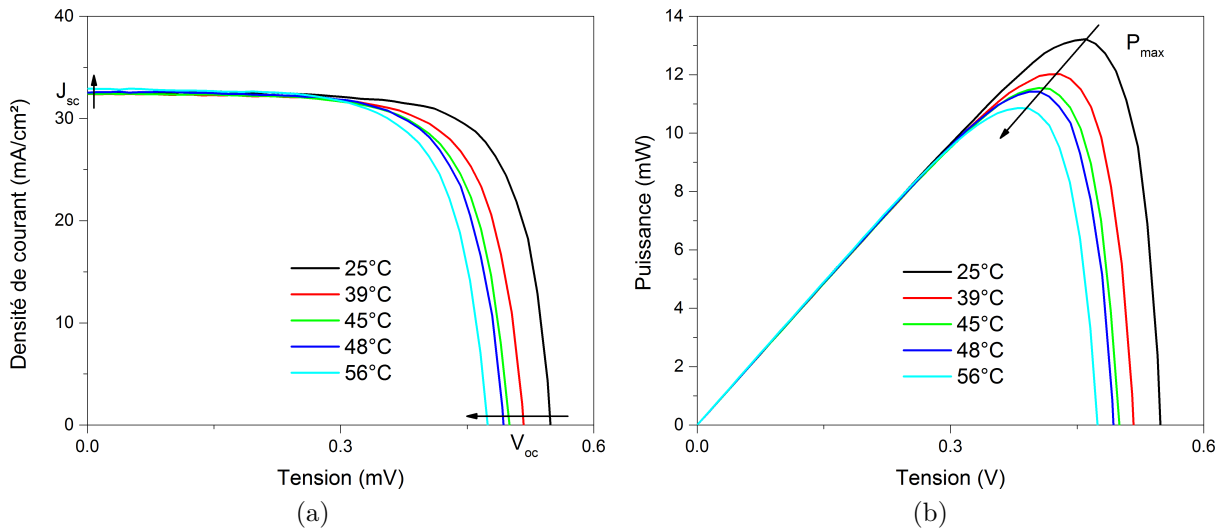


FIGURE 1.4 – Influence de la température sur les caractéristiques (a) J-V et (b) P-V d'une cellule photovoltaïque sous un éclairement de $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

ture provient essentiellement de l'évolution de la densité de porteurs intrinsèques n_i avec la température.

Le V_{oc} chute fortement lorsque la température de la cellule augmente. D'après Green [16], la forte sensibilité du V_{oc} à la température gouverne la dégradation du rendement avec la température : la faible amélioration du J_{sc} n'est pas suffisante pour contre-balancer la dégradation due au V_{oc} .

Pour rendre compte de l'influence de la température sur les caractéristiques I-V et P-V des cellules photovoltaïques, nous avons tracé sur la figure 1.4, les évolutions de ces deux caractéristiques pour différentes températures et pour un éclairement de $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Comme attendu par la théorie, la légère amélioration du J_{sc} combinée à la forte diminution du V_{oc} résulte en une baisse significative du rendement maximal de la cellule avec la température.

1.1.3 Le besoin d'optimiser les cellules PV avec des critères thermiques

1.1.3.1 Les coefficients de dégradation en température

L'introduction de coefficients de dégradation en température permet de quantifier l'évolution des différentes caractéristiques avec la température. La dégradation des performances électriques des cellules avec la température s'exprime le plus généralement grâce à la relation d'Evans [19] en introduisant le coefficient de dégradation en température de rendement β_η :

$$\eta(T) = \eta(T_0) [1 - \beta_\eta (T - T_0)] \quad (1.13)$$

Où T_0 représente la température de référence (généralement égale à 25 °C). Le coefficient β_η dépend principalement du matériau utilisé. D'après la littérature, il varie pour le silicium entre $0.004\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ et $0.006\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ [20] où de nombreuses études sur les cellules en Mono-Si, Poly-Si ou a-Si sont recensées. Par exemple, pour une cellule à base de silicium mono cristallin, d'après la figure 1.4, ce coefficient est estimé à $0.0057\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, ce qui correspond aux valeurs présentées par [20].

En dérivant l'équation 1.2 par rapport à la température, il vient [21, 16] :

$$\frac{dV_{oc}}{dT} = \frac{V_{oc}}{T} + \frac{nkT}{q} \left[\frac{1}{J_{sc}} \frac{dJ_{sc}}{dT} - \frac{1}{J_{n,0}} \frac{dJ_{n,0}}{dT} \right] \quad (1.14)$$

Nous pouvons alors introduire le coefficient de dégradation du V_{oc} , $\beta_{V_{oc}}$, qui s'exprime également en $\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$:

$$\beta_{V_{oc}} = \frac{1}{V_{oc}} \frac{dV_{oc}}{dT} \quad (1.15)$$

On peut montrer par des considérations théoriques [22, 21] que $\frac{dV_{oc}}{dT}$ dépend essentiellement de $\frac{V_{oc} - \frac{E_g}{q}}{T}$. Une telle dépendance démontre que des cellules ayant un V_{oc} plus élevé seront moins affectées par l'élévation de la température [16] : en valeur absolue, le coefficient $\beta_{V_{oc}}$ diminue lorsque le V_{oc} de la cellule augmente.

Le V_{oc} et le rendement sont supposés varier linéairement avec la température [16] sur une certaine gamme de température. Quant au J_{sc} et le FF , nous pouvons trouver dans la littérature de nombreuses relations traduisant leurs évolutions avec la température. Cependant, du fait de leur faible influence sur le rendement corrélativement avec la température, nous nous intéresserons principalement dans cette thèse à la mesure des coefficients $\beta_{V_{oc}}$ et β_η . La mesure de ces coefficients est effectuée par régression linéaire sur une plage de température variant entre 25 et 75 °C.

1.1.3.2 L'importance de l'architecture de la cellule

Il existe plusieurs voies d'amélioration des performances des cellules via des critères thermiques :

- L'amélioration des coefficients de dégradation en température
- La diminution de la température de fonctionnement

Les mesures des coefficients de dégradation en température $\beta_{V_{oc}}$ reportées dans la littérature [23, 24, 25, 26, 27] mettent en avant la dépendance du $\beta_{V_{oc}}$ avec le V_{oc} , fortement lié à l'architecture de la cellule. Parmi les nombreuses architectures existantes, trois retiendront principalement notre attention et seront étudiées dans cette thèse :

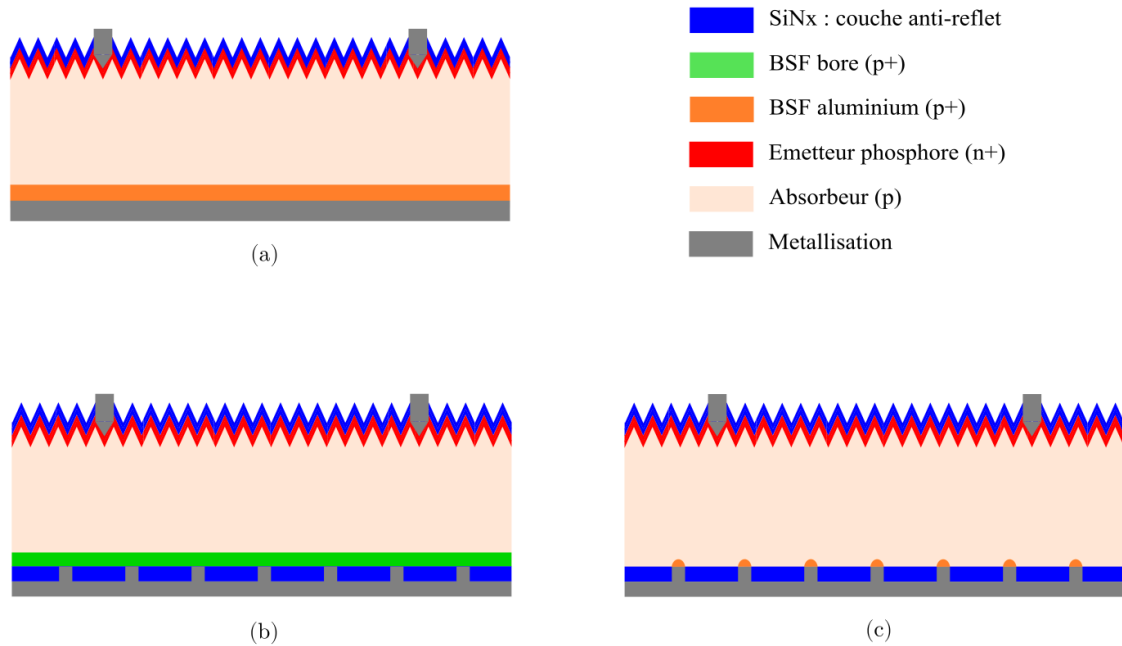


FIGURE 1.5 – Présentation des différentes architectures utilisées dans cette thèse : (a) Al-BSF, (b) PERT et (c) PERC.

- Les cellules *Aluminium Back Surface Field* (Al-BSF),
- Les cellules *Passivated Emitter Rear Cell* (PERC),
- Les cellules *Passivated Emitter Rear Totally diffused* (PERT).

Elles sont représentées sur la figure 1.5. Ces trois architectures sont encore aujourd'hui les plus commercialisées dans l'industrie du photovoltaïque [28]. La principale différence entre elles réside dans la face arrière. La structure des cellules Al-BSF est considérée comme l'architecture la plus simple [29]. La présence d'un BSF (*Back Surface Field*) en face arrière obtenu par diffusion de l'aluminium sur un substrat de type p permet de créer un champ répulsif pour les porteurs minoritaires en face arrière, entraînant une réduction des recombinaisons surfaciques. Une telle amélioration entraîne une nette augmentation du V_{oc} [30].

L'ajout d'une couche de passivation en face arrière avec un BSF localisé contribue à une augmentation significative de la durée de vie des porteurs de charges et améliore la réflexion optique en face arrière. Cette amélioration technologique donne naissance à la cellule PERC [31]. La cellule PERT est obtenue en remplaçant le BSF aluminium par un BSF bore, tout en suivant le même procédé que la PERC. Un procédé de fabrication détaillé de cellule à architecture PERT sera présenté dans le chapitre 3.

La température de fonctionnement d'une cellule dépend des conditions climatiques mais aussi des propriétés thermiques de la cellule (comme le facteur d'émission thermique). Vogt et al. [32] ont mis en avant l'importance du réflecteur en face arrière des cellules. Du fait

de leur plus haute réflectivité optique en face arrière, l'absorption parasite des IR dans la métallisation en face arrière est plus faible pour les PERC. Ainsi, les cellules à architectures PERC fonctionnent à des températures plus faibles que les cellules Al-BSF. Les simulations démontrent qu'en supprimant totalement l'absorption parasite pour des longueurs d'ondes supérieures à 1200 nm, la température de fonctionnement pourrait être abaissée de 3.2°C [32], améliorant ainsi le rendement de la cellule dans des conditions de fonctionnement réelles.

1.1.3.3 Diminuer l'impact de la température

Abaisser la température de fonctionnement d'une cellule permet d'atteindre des rendements de cellule plus élevés. Il existe principalement deux possibilités pour diminuer cette température : le refroidissement actif et le refroidissement passif. Dans le refroidissement actif une partie de la chaleur est évacuée par transferts thermiques avec un fluide comme l'air ou l'eau [33, 34]. Ces systèmes sont très efficaces puisqu'ils permettent d'une part de diminuer la température de fonctionnement de la cellule et ainsi récupérer l'énergie thermique évacuée. Néanmoins, l'utilisation de tels systèmes est coûteuse en énergie.

Le refroidissement passif se contente quant à lui d'améliorer la dissipation de la chaleur. Le refroidissement radiatif des cellules est une alternative efficace aux systèmes de refroidissement actifs. Une étude récente menée par Zhu et al. [35] a montré que l'ajout d'une couche structurée permet d'augmenter significativement son facteur d'émission thermique dans le moyen infra-rouge (MIR), favorisant le refroidissement radiatif de la cellule. L'influence de la structure complète de la cellule n'est cependant pas prise en compte dans ces travaux. Plus récemment, Riverola et al. [36] se sont intéressés à la contribution de chaque partie de la cellule sur l'émissivité dans la gamme en longueur d'onde entre 0.35 μm et 16 μm . L'importance des zones fortement dopés (BSF, émetteur) sur le calcul des coefficients d'absorption et d'émission y est étudiée, expliquant ainsi la haute émissivité des cellules non encapsulées dans le MIR.

En cas de vents forts, les échanges thermiques sont dominés par la convection. En cas de vents faibles, le refroidissement radiatif des cellules devient un atout puissant si l'on souhaite diminuer la température de fonctionnement des cellules. Par conséquent, une meilleure compréhension du comportement thermo-électrique des cellules en silicium se fait ressentir : l'optimisation de l'architecture et des propriétés des cellules par le biais de critères thermiques constitue une nouvelle étape nécessaire au développement et à l'essor du photovoltaïque. Afin de mieux comprendre le fonctionnement du refroidissement radiatif des cellules, le facteur d'émission thermique et le facteur d'absorption se doivent d'être définis.

1.1.4 Facteur d'émission et d'absorption

1.1.4.1 Introduction du facteur d'émission

Les échanges radiatifs sont gouvernés par le facteur d'émission ou émissivité ε . La notion de luminance nous permet d'introduire ce coefficient ε qui quantifie la puissance radiative émise par un corps. Cette grandeur dépend entre autres de la nature du corps considéré : noir, opaque, transparent ou semi-transparent. Un matériau est qualifié d'opaque au rayonnement dans une zone spectrale donnée si la totalité du rayonnement spectral incident est absorbée sur une distance de l'ordre de la longueur d'onde considérée. A l'inverse, un matériau est dit transparent si le rayonnement n'est quasiment pas absorbé sur une grandeur caractéristique du système. On comprend alors assez facilement la notion de semi-transparence, qui se situe dans le cas intermédiaire entre les corps opaques et transparents.

Les cellules photovoltaïques sont constituées d'un empilement de couches semi-transparentes ; les différents phénomènes d'absorption et d'émission du rayonnement interviennent dans l'ensemble du volume de la cellule. A l'équilibre thermodynamique, la deuxième loi de Kirchhoff stipule que les coefficients d'émission et d'absorption monochromatiques pour une direction \vec{u} donnée sont égaux :

$$\varepsilon_\lambda(\vec{u}) = \alpha_\lambda(\vec{u}) \quad (1.16)$$

Dans le cas d'une surface lambertienne, cette loi est transposable aux grandeurs hémisphériques : $\varepsilon_\lambda(\vec{u}) = \varepsilon_\lambda^\square = \alpha_\lambda^\square$. Le facteur d'émission d'une plaquette [37] ou d'une cellule [36] est défini dans des conditions opératoires bien précises. Un faisceau incident normal à la surface de la cellule éclaire l'échantillon. A l'aide d'une sphère intégrante, les coefficients de réflexion (R_λ) et de transmission hémisphérique (T_λ) sont mesurés, et nous avons :

$$\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda = 1 - R_\lambda - T_\lambda \quad (1.17)$$

Pour mieux comprendre l'origine de l'émissivité du silicium, il convient de s'intéresser plus spécifiquement au coefficient d'absorption.

1.1.4.2 Les différents mécanismes d'absorption dans le silicium

Différents phénomènes sont responsables de l'absorption des photons incidents dans le silicium : l'absorption par le réseau (interaction photon-phonon), l'absorption inter-bandes et l'absorption par les porteurs libres (absorption d'un photon par un électron/trou dans la bande de conduction/valence). En l'absence de dopage, le coefficient d'absorption diminue fortement avec la longueur d'onde [38]. Pour les faibles longueurs d'onde, l'absorption inter

bandes assure un coefficient d'absorption élevé.

L'absorption des photons de forte longueur d'onde (supérieure à $1.2\ \mu\text{m}$) se fait par l'intermédiaire des porteurs libres et du réseau. Il existe dans la littérature plusieurs relations exprimant le coefficient d'absorption des porteurs libres $\alpha_{\text{porteurs libres}}$. De manière générale, $\alpha_{\text{porteurs libres}}$ est fonction de la longueur d'onde et de la concentration de porteurs libres N [39] :

$$\alpha_{\text{porteurs libres}} = C \cdot N \cdot \lambda^\gamma \quad (1.18)$$

Où C et γ sont des constantes. Cette absorption peut donc être favorisée en dopant le matériau (par du bore ou du phosphore) afin d'augmenter la concentration de porteurs libres. Le coefficient d'absorption total s'exprime comme la somme du coefficient d'absorption inter bandes, par le réseau et par les porteurs libres :

$$\alpha_\lambda = \alpha_{\text{inter bandes}} + \alpha_{\text{réseau}} + \alpha_{\text{porteurs libres}} \quad (1.19)$$

Les mesures des coefficients d'absorption et d'émission entre $0.3\ \mu\text{m}$ et $16\ \mu\text{m}$ [36, 40] ont montré l'importance de l'absorption des porteurs libres sur le refroidissement radiatif des cellules liée à l'augmentation des coefficients d'émission et d'absorption dans le MIR.

1.1.5 Conclusion

Dans cette section, après avoir rappelé le fonctionnement général des cellules PV en silicium, la dégradation des performances électriques des cellules avec la température a été mise en avant. L'intérêt d'une optimisation des propriétés des cellules par le biais de critères thermiques a été évoqué. Dans la section suivante, nous présentons un modèle numérique simulant le comportement thermo-électrique des cellules, en couplant les différents phénomènes thermiques et électriques intervenant lors du fonctionnement des cellules photovoltaïques.

1.2 Modèle numérique : simulation du comportement thermo-électrique des cellules

De nombreuses études s'intéressent à l'évaluation de la température de fonctionnement des cellules ou modules selon les conditions extérieures [7, 41, 42]. Ces modèles sont basés sur la recherche de corrélations existantes entre les conditions environnementales (éclairage, température ambiante, vitesse du vent,...) et la température de la cellule. Ils n'analysent donc pas dans le détail l'origine de l'échauffement des cellules. Dans le cadre de travaux précédents [43], un modèle thermo-électrique des cellules photovoltaïques en silicium cristallin

a été développé et constitue la base de notre étude. En couplant les équations de transfert radiatif, conductif, convectif avec l'équation de transport de porteurs de charge, ce modèle permet de simuler le comportement thermo-électrique d'une cellule d'architecture connue pour différentes conditions environnementales.

Dans ce modèle, la simulation de la cellule photovoltaïque est unidimensionnelle. L'architecture de la cellule simulée est simple. Elle est constituée d'une couche antireflet, d'un émetteur de type n et d'un substrat de type p. La résolution des équations de continuité régissant le mouvement des porteurs de charge permet de calculer la densité de courant total circulant dans la cellule pour une tension de polarisation donnée. Le comportement thermique des cellules peut être modélisé en couplant les différentes sources à l'origine de l'échauffement de la cellule aux puits de chaleur (échanges convectifs et radiatifs). Ce modèle n'inclut ni la texturation de surface ni les résistances série et parallèle qui sont supposées nulle et infinie respectivement. Les recombinaisons à l'interface entre le métal et le semi-conducteur sont simulées par des vitesses de recombinaisons surfaciques en face avant et en face arrière. Dans ce modèle, l'hypothèse de faible injection dans le calcul des équations de transport de charge et des propriétés physiques est prise en compte.

Le couplage de tous ces phénomènes rend possible l'étude de l'évolution de la température de la cellule avec la tension de polarisation et l'observation des conséquences sur les caractéristiques I-V des cellules. L'influence du dopage du substrat sur le comportement thermo-électrique des cellules peut également être étudié.

1.2.1 Évolution de la température avec la tension de polarisation

Nous avons vu que sous éclairage la cellule photovoltaïque atteint une température de fonctionnement qui dépend des conditions environnantes dans laquelle elle est placée, mais aussi de différentes propriétés telle que son architecture (Al-BSF, PERT, PERC). Cette température de fonctionnement est souvent définie au V_{oc} et est supposée constante quelle que soit la tension de polarisation appliquée à ses bornes. Il est cependant possible de réfuter cette hypothèse à l'aide d'un simple bilan de puissance. La puissance électrique que l'on peut extraire d'une cellule photovoltaïque est nulle au V_{oc} et au J_{sc} et est maximale au M_{pp} . La puissance lumineuse absorbée qui est convertie et électriquement collectée ne contribue pas à l'échauffement de la cellule. Par conséquent, la température au M_{pp} est plus faible que la température mesurée au J_{sc} et au V_{oc} .

L'utilisation du modèle numérique développé dans de précédents travaux permet de confirmer cette analyse. Nous avons choisi de simuler le comportement thermo-électrique d'une cellule ayant des propriétés définies dans le tableau [1.2](#), pour des conditions environnantes bien précises, à savoir une température ambiante de 25 °C et un coefficient d'échanges convec-

Paramètre de simulation	Valeur
Épaisseur du substrat	275 μm
Dopage du substrat	10^{16} cm^{-3}
Dopage de l'émetteur	$5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
Profondeur de jonction	300 nm
Vitesse de recombinaison surfacique en face avant	$10^3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$
Vitesse de recombinaison surfacique en face arrière	$10^4 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$
Durée de vie SRH	1 ms

TABLE 1.2 – Paramètres de la cellule simulée.

tifs $h_{conv} = 5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Ce coefficient h_{conv} traduit notamment l'influence de la vitesse du vent. Un coefficient $h_{conv} = 5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ permet de simuler un cas de vent faible (convection naturelle), tandis que $h_{conv} = 1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ revient à imposer la température de la cellule à celle de l'ambiante (convection forcée). Dans le cas d'un coefficient h_{conv} élevé, la contribution des échanges radiatifs ($\sim \sigma T_{cell}^4$) sera bien plus faible que celle provenant des échanges convectifs.

Les résultats présentés sur la figure [1.6](#) confirment le simple bilan de puissance réalisé précédemment. La température de la cellule atteint une valeur minimale au point de puissance maximale, $T_{Mpp} = 78.2 \text{ }^\circ\text{C}$. La température est maximale au J_{sc} : $T_{Jsc} = 90.8 \text{ }^\circ\text{C}$. Il est important de souligner que du fait d'un problème lié à la convergence des simulations thermiques le V_{oc} n'est pas tout à fait atteint. Un écart de température $\Delta T(J_{sc} \rightarrow M_{pp}) = 12.6 \text{ }^\circ\text{C}$ est observé par simulation.

Afin de mieux comprendre cette variation de la température avec la tension de polarisation, il convient de présenter les différents sources et puits thermiques impliqués dans l'équilibre thermique atteint entre la cellule et son environnement. Ces mécanismes sont soit responsables de l'échauffement de la cellule soit de son refroidissement. Certains de ces mécanismes dépendent de la polarisation appliquée. Leurs évolutions ont été étudiées [\[44\]](#) pour trois points de polarisations spécifiques : $V = 0 \text{ V}$, V_{mpp} et V_{oc} .

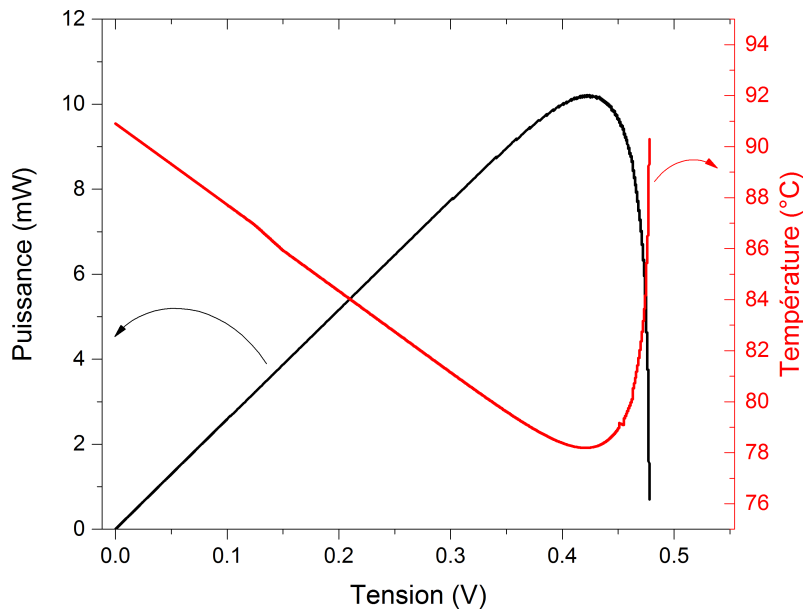


FIGURE 1.6 – Évolution de la puissance et de la température de la cellule en fonction de la tension de polarisation appliquée.

1.2.1.1 Présentation des différents mécanismes physiques d'échauffement et de refroidissement de la cellule

Nous distinguons quatre principaux mécanismes responsables de l'échauffement de la cellule : l'effet Joule, l'effet Peltier, les recombinaisons des porteurs libres et la thermalisation des porteurs. Ces phénomènes sont présentés sur la structure de bande d'une jonction PN polarisée en inverse et sous éclairage sur la figure 1.7.

L'effet Joule décrit par Lindefelt [45] s'exprime par le produit scalaire entre le champ électrique et la densité de courant. Ce produit scalaire est positif au niveau de la ZCE, ce qui indique un échauffement de la cellule. Une partie de l'énergie des porteurs libres est cédée à la cellule sous forme phononique. D'après l'approximation de la zone de déplétion, le champ électrique est nul dans les zones quasi-neutres et est non nul dans la ZCE. Par conséquent, ici, l'effet joule apparaît uniquement dans la ZCE. À l'interface métal/semi-conducteur, une partie de l'énergie des porteurs est de nouveau cédée au réseau, conduisant à un échauffement de la cellule : c'est l'effet Peltier.

Les porteurs de charge libres peuvent être sujets à différents mécanismes de recombinaison [46] :

- Recombinaison Shockley Read Hall (SRH) : la présence d'impuretés ou de défauts dans le matériau crée des niveaux d'énergie dans la bande interdite du silicium, qui agiront comme centres recombinants pour les paires électron-trou.
- Recombinaison Auger : un porteur libre absorbe l'énergie libérée lors de la recombinaison.

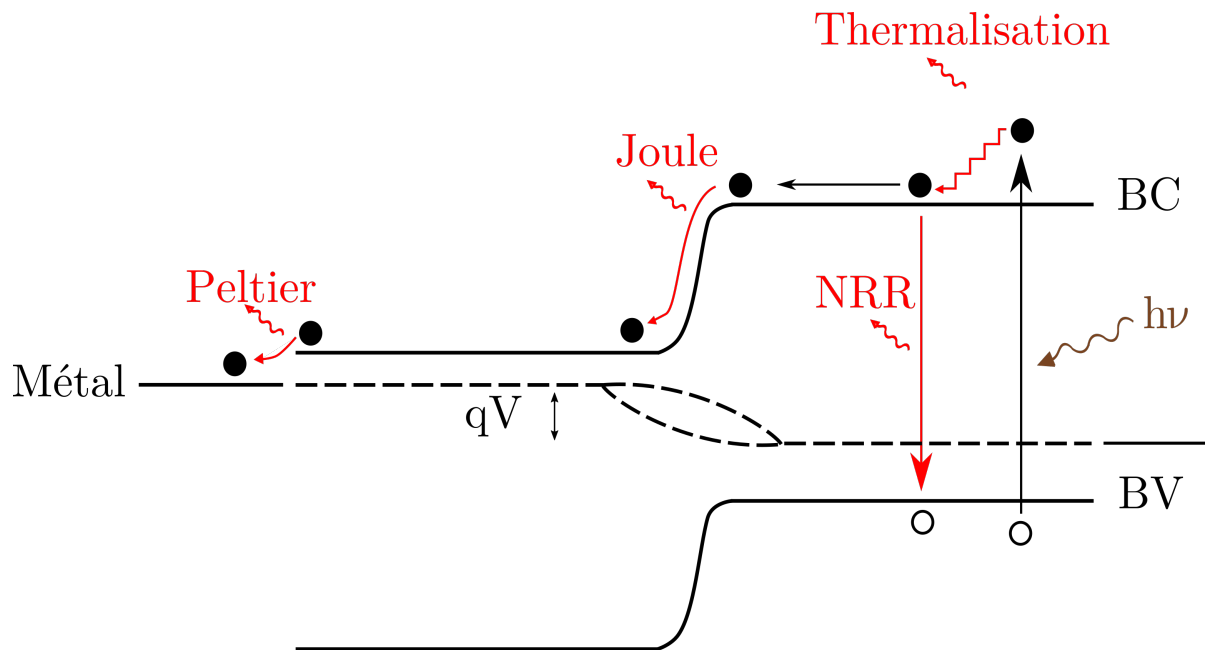


FIGURE 1.7 – Diagramme de bandes d'une jonction PN polarisée en inverse. Présentation des différents mécanismes d'échauffement de la cellule photovoltaïque : effet joule, effet peltier, thermalisation des porteurs et recombinaisons non radiatives (NRR).

naissance d'une paire électron-trou, puis la cède par thermalisation.

- Recombinaison radiative : un photon d'énergie égale à celle de la bande interdite du matériau est émis après recombinaison d'une paire électron-trou. Dans le cas du silicium, matériau à gap indirect, cette recombinaison est assistée par un phonon.

Pour le silicium, le taux de recombinaisons radiatives est négligeable devant les recombinaisons non radiatives (NRR) [47]. Ainsi, seules les recombinaisons SRH et Auger sont considérées dans cette étude.

1.2.1.2 Évolution des sources et des puits thermiques avec la tension de polarisation

L'évolution des différents sources et puits thermiques avec la tension de polarisation est étudiée pour trois points de polarisation correspondant au J_{sc} , M_{pp} et V_{oc} .

D'après les diagrammes présentés sur les figures 1.8 et 1.9, la source thermique provenant des recombinaisons non radiatives, insignifiante au J_{sc} , atteint son maximum au V_{oc} . D'un autre côté, les sources thermiques provenant de l'effet Joule et de l'effet Peltier s'atténuent avec la tension de polarisation, jusqu'à devenir négligeables au V_{oc} . En revanche, la puissance dissipée par thermalisation ne dépend pas de la polarisation appliquée. L'effet Joule et l'effet Peltier sont directement liés au courant circulant dans la jonction PN. Sous polarisation, une diminution de la hauteur de barrière est observée. Par conséquent, le courant total circulant

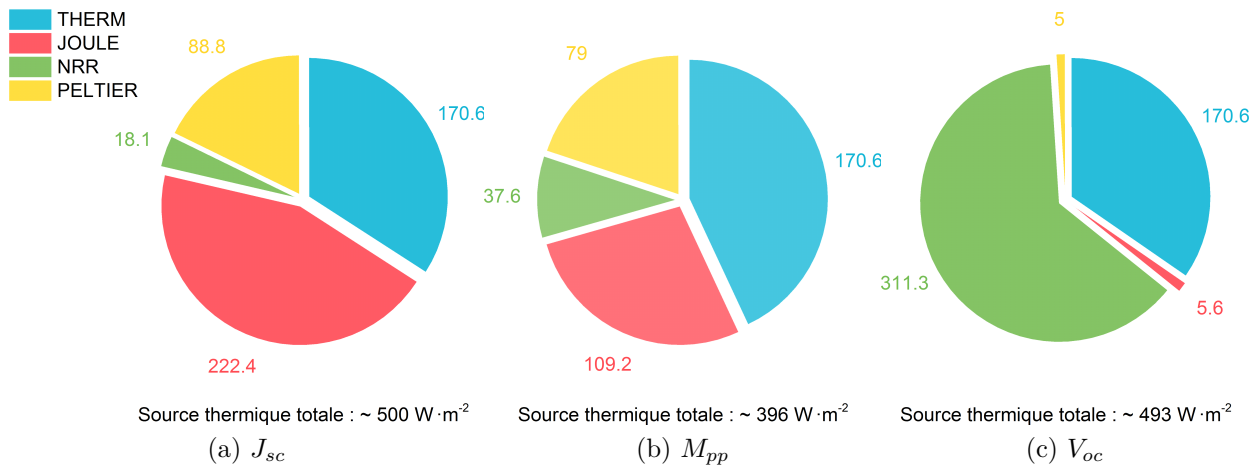


FIGURE 1.8 – Évolution des différentes sources thermiques (en $W \cdot m^{-2}$) avec la tension de polarisation pour une cellule ayant un dopage de base de 10^{16} cm^{-3} .

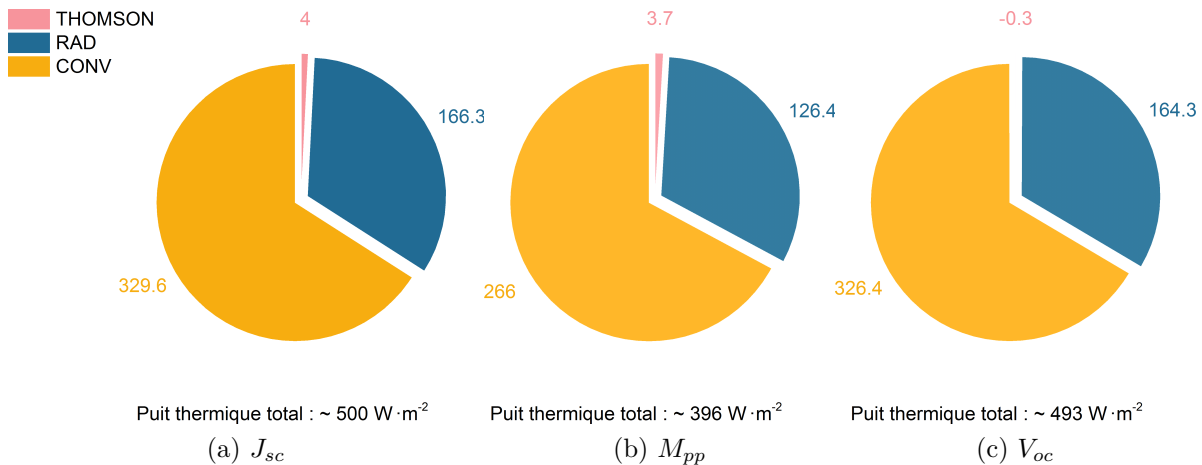


FIGURE 1.9 – Évolution des différents puits thermiques (en $W \cdot m^{-2}$) avec la tension de polarisation pour une cellule ayant un dopage de base de 10^{16} cm^{-3} .

dans la cellule diminue (equation [1.1](#)) du fait de l'équilibre entre le courant photogénéré et le courant de diode, ce qui entraîne une réduction de la puissance dissipée par ces deux sources. Il est important de noter que par soucis de convergence numérique, un léger écart entre la source thermique totale au J_{sc} et au V_{oc} est observé.

Les puits thermiques quant à eux sont sensiblement les mêmes au J_{sc} et au V_{oc} . L'effet Thomson, qui traduit la dissipation de puissance du fait des variations de la densité de courant dans le matériau [\[45\]](#), est négligeable devant la convection et les échanges radiatifs. Dans ces conditions de simulation, les puits thermiques provenant de échanges convectifs et radiatifs sont équivalents.

Du fait de l'équilibre thermique atteint entre les différents mécanismes d'échauffement et de refroidissement de la cellule, la température de la cellule peut être modélisée pour une polarisation donnée. L'évolution de la température de la cellule entre le J_{sc} et le V_{oc} peut être observée sur la figure [1.6](#). L'évolution de la température de la cellule avec la tension de polarisation est un résultat important : la température de fonctionnement étant plus faible que celle prévue par le constructeur (mesurée au V_{oc}), le rendement de la cellule en conditions réelles est sous-estimé.

A l'aide de ce modèle numérique, il est ainsi possible d'étudier l'évolution du comportement thermo-électrique des cellules photovoltaïques pour différentes conditions extérieures ou encore différents paramètres de la cellule tels que le dopage de la base ou de l'émetteur.

1.2.2 Influence du dopage de la base

1.2.2.1 Sur l'émission thermique

Nous avons vu dans le paragraphe [1.1.4](#) que l'augmentation du dopage de la base favorise, du fait de l'absorption par les porteurs libres, le refroidissement radiatif des cellules (equation [1.18](#)). Pour quatre dopages de bases différents, entre 10^{15} cm^{-3} et 10^{18} cm^{-3} , la contribution du puit radiatif au puit thermique total est présentée sur la figure [1.10](#).

Une augmentation du dopage de la base de 10^{15} cm^{-3} à 10^{18} cm^{-3} entraîne une forte diminution de la température de fonctionnement de la cellule de plusieurs dizaines de degrés celsius. Simultanément, une augmentation conséquente du puit thermique radiatif est observée, malgré les plus faibles températures de fonctionnement atteintes. Un dopage de base élevé favorise le refroidissement radiatif des cellules.

1.2.2.2 Sur le coefficient de dégradation en température du V_{oc}

La variation du dopage de la base possède également une conséquence sur le V_{oc} . Pour un dopage d'émetteur donné, l'augmentation du dopage de la base tend à augmenter la

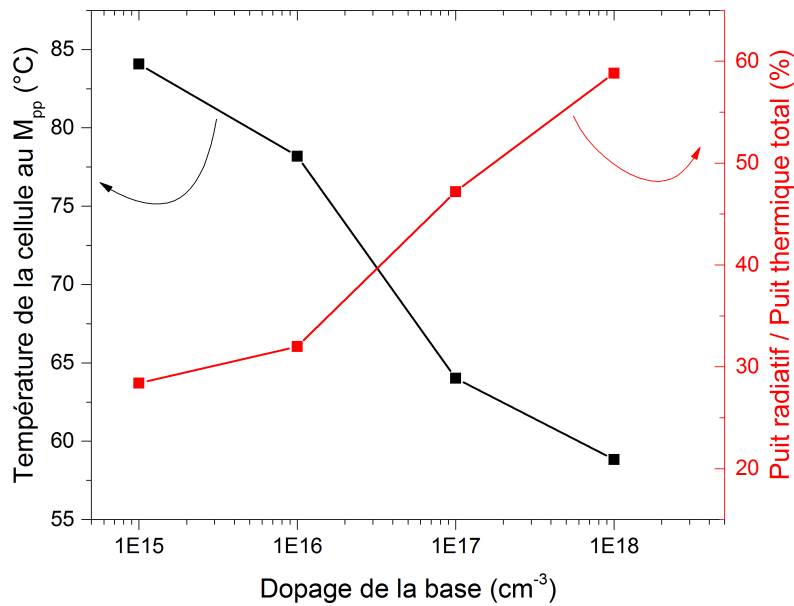


FIGURE 1.10 – Influence du dopage de la base sur la température de la cellule au M_{pp} et sur son refroidissement radiatif.

différence entre les niveaux de fermi de la base et de l'émetteur. Le V_{oc} étant directement lié à la hauteur de barrière, une augmentation du V_{oc} avec le dopage de la base est observée [18, 48].

Étant donné que $\beta_{V_{oc}}$ est directement lié au V_{oc} (equation 1.15), nous avons tracé sur la figure 1.11 l'évolution de ce coefficient avec la température pour différents dopages de base en gardant les autres paramètres présentés dans le tableau 1.2 inchangés. D'après les formulations de Green [16], la dégradation en température du V_{oc} est principalement responsable de la sensibilité en température des performances électriques de la cellule. Par conséquent, l'étude seule de $\beta_{V_{oc}}$ donne une bonne indication sur la dégradation du rendement avec la température.

Pour une température donnée, $\beta_{V_{oc}}$ diminue lorsque le dopage de la base augmente. Cette caractéristique provient essentiellement de la dépendance en $\frac{1}{V_{oc}}$ du $\beta_{V_{oc}}$. D'après la figure 1.11, $\beta_{V_{oc}}$ n'est pas constant avec la température : la dépendance en température du $\beta_{V_{oc}}$ est d'autant plus forte que le dopage de la base est faible.

D'un point de vue thermique, nous décelons principalement deux avantages à la réalisation de cellules photovoltaïques à partir d'un substrat plus fortement dopé :

- Le refroidissement radiatif est favorisé, tendant à diminuer la température de fonctionnement de la cellule,
- Le rendement des cellules ayant un dopage de base élevé est moins affecté par l'élévation en température.

Cependant, les rendements des cellules diminuent pour des dopages de base élevés [43]. Un

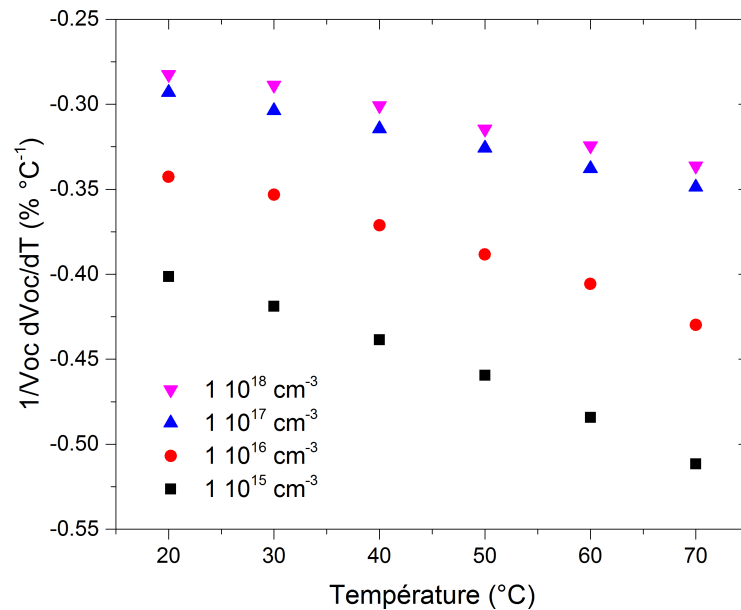


FIGURE 1.11 – Influence du dopage de la base sur le coefficient de dégradation en température du V_{oc} , $\beta_{V_{oc}}$.

compromis doit être trouvé selon l'application visée : du fait de son plus faible coefficient de dégradation en température, une cellule ayant un dopage de base élevé sera préférée dans le cas de fonctionnement à des hautes températures.

Dans cette section, nous avons présenté un modèle numérique simulant le comportement thermo-électrique des cellules photovoltaïques. Les différents mécanismes thermiques et électriques intervenant lors du fonctionnement des cellules ont été exposés. Diminuer la température de fonctionnement ou réduire l'impact de la température sur la dégradation des cellules constituent des bonnes voies d'amélioration de leurs performances en condition de fonctionnement réelle. Une autre voie d'amélioration consiste à travailler sous concentration du rayonnement solaire. Cette technique, très largement utilisée, implique cependant un échauffement bien plus important des cellules. La nécessité d'une meilleure compréhension du comportement thermique des cellules sous concentration se fait donc ressentir.

1.3 Étude du comportement thermique des cellules sous concentration

Une des voies d'amélioration des performances des panneaux photovoltaïques consiste à travailler sous concentration. La concentration du rayonnement solaire incident permet de repousser les limites des rendements atteignables sur des cellules à base de silicium [49, 50], et possède de nombreux avantages économiques. La réduction de la surface effective de

la cellule rend possible l'utilisation de cellules photovoltaïques d'architectures plus complexes, et implicitement ayant de meilleures performances, sans pour autant augmenter le prix de production. Dans certaines régions fortement ensoleillées, l'industrie du photovoltaïque concentré (CPV) rivalise avec les montages photovoltaïques classiques en termes de prix de revient de l'électricité [51]. Cette analyse démontre le potentiel de la filière CPV. L'un des principaux avantages du CPV est qu'il peut facilement être mis en place sur des systèmes déjà existants, permettant d'augmenter drastiquement la production de certains champs photovoltaïques [52].

On distingue principalement deux catégories dans le CPV : les hautes (HCPV) et faibles (LCPV) concentrations. Le facteur de concentration X varie généralement entre 300 et 1000 alors que pour le LCPV, les facteurs de concentration sont inférieurs à 100 [53]. Ce coefficient est défini par rapport au flux surfacique du rayonnement solaire correspondant à un éclairage de 1 soleil ($1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, sous AM1.5G) : on parle alors d'un éclairage de X soleils. L'utilisation des cellules multi-jonctions est préférée pour le HCPV [54], nécessitant l'utilisation de systèmes de tracking très performants, du fait de leur forte dépendance à la composante directe du rayonnement solaire. Pour le travail sous plus faible concentration, le silicium reste le choix le plus avantageux de part son abondance et des nombreuses connaissances provenant de l'industrie de la microélectronique. De nombreuses architectures de cellules à base de silicium [55, 56, 52] ont montré une meilleure adéquation avec le CPV que les architectures plus « classiques » présentées dans le paragraphe 1.1.3.2. Outre l'architecture de la cellule, le type de dopage de la base joue également un rôle essentiel sur la dégradation en température du V_{oc} [57].

Dans cette thèse, nous ne nous intéresserons cependant qu'aux faibles concentrations, inférieures à 10 soleils.

1.3.1 Exemple de dispositif pour la faible concentration

On trouve dans la littérature de nombreux dispositifs pour concentrer le rayonnement solaire. Ces concentrateurs utilisent les lois de la réflexion et/ou de la réfraction de la lumière. Du fait de leur forte sensibilité au rayonnement direct, des systèmes de tracking montés sur un ou deux axes sont nécessaires au bon fonctionnement des concentrateurs.

Sous concentration, les cellules PV atteignent des températures de fonctionnement bien plus élevées du fait de la valeur de l'éclairage incident : des systèmes de refroidissement sont nécessaires afin d'opérer dans les meilleures conditions possibles [58]. Selon le type de refroidissement choisi (actif ou passif), la température de fonctionnement de la cellule pourra être imposée. L'étude de l'évolution du comportement thermique et électrique des cellules pour différents facteurs de concentration est donc nécessaire.

Les concentrateurs utilisant des lentilles de Fresnel (linéaires ou ponctuels) sont particulièrement adaptés pour une étude sous faible concentration [59]. Le refroidissement passif des cellules, qui a été introduit dans la sous section 1.1.3.3, peut être suffisant pour ce type de systèmes [54], les températures atteintes n'étant pas suffisamment élevées pour nécessiter un circuit de refroidissement actif. Un schéma du principe de fonctionnement des lentilles de Fresnel sera présenté dans le prochain chapitre.

1.3.2 Comportement des cellules sous concentration

1.3.2.1 Facteur de concentration et grandeurs électriques : forme générale

Sous concentration, la puissance lumineuse est augmentée d'un facteur X . Nous pouvons traduire l'influence de la concentration sur les différentes grandeurs électriques des cellules, notamment sur le J_{sc} et sur le V_{oc} . En première approximation, le courant de court-circuit augmente linéairement avec la concentration [60] :

$$J_{sc,X \text{ soleils}} = X J_{sc,1 \text{ soleil}} \quad (1.20)$$

En injectant l'équation 1.20 dans l'équation 1.2, il vient :

$$\begin{aligned} V_{oc,X \text{ soleils}} &= \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{X J_{sc,1 \text{ soleil}}}{J_{n,0}} + 1 \right) \\ &\approx \frac{nkT}{q} \left[\ln(X) + \ln \left(\frac{J_{sc,1 \text{ soleil}}}{J_{n,0}} \right) \right] \\ V_{oc,X \text{ soleils}} &\approx \frac{nkT}{q} \ln(X) + V_{oc,1 \text{ soleil}} \end{aligned} \quad (1.21)$$

L'équation 1.21 est la forme la plus générale de la tension en circuit ouvert sous X soleils que l'on peut trouver dans la littérature. On voit assez facilement que du fait de la dépendance du V_{oc} avec le courant de court-circuit, le V_{oc} augmente pour des facteurs de concentration supérieurs à l'unité. Néanmoins, ces équations sont valables en régime de faible injection, soit lorsque la densité de porteurs minoritaires est bien plus faible que celle des porteurs majoritaires [61]. Nous avons vu dans le section 1.1 l'importance du BSF sur le comportement thermique des cellules. Cependant, la relation donnée par l'équation 1.21 ne prend pas en considération la présence du BSF. De plus, selon le type de dopage de la base (n ou p), l'évolution du V_{oc} avec la concentration diffère. Ces deux paramètres modifient fondamentalement le V_{oc} , comme nous allons le voir par la suite.

D'après l'équation 1.21, nous pouvons définir l'évolution du coefficient de dégradation en température du V_{oc} :

$$\beta_{V_{oc},X \text{ soleils}} = \frac{1}{V_{oc},X \text{ soleils}} \frac{dV_{oc},X \text{ soleils}}{dT} = \frac{1}{V_{oc},X \text{ soleils}} \frac{nk}{q} \ln(X) + \frac{V_{oc,1 \text{ soleil}}}{V_{oc},X \text{ soleils}} \beta_{V_{oc,1 \text{ soleil}}} \quad (1.22)$$

Pour le silicium aux faibles concentrations, le coefficient de dégradation en température du rendement est dominé par le V_{oc} [15]. Nous nous focaliserons principalement dans cette étude sur l'évolution du V_{oc} avec la température et la concentration.

1.3.2.2 Influence du type de dopage de la base : effet Dember

Avec l'augmentation de l'éclairement, des écarts entre la relation théorique présentée dans l'équation [1.21] ont été expérimentalement observés [62]. Si le dopage de la base est de type p, l'augmentation du V_{oc} est à partir d'un certain facteur de concentration, plus lente que celle prévue par la théorie. En revanche, s'il est de type n, elle est plus rapide. Une telle différence de comportement s'explique par l'effet Dember. Du fait de la différence de mobilité entre les électrons et les trous dans le silicium, l'augmentation de la densité de porteurs minoritaires dans la base entraîne une variation des quasi-niveaux de Fermi [63], résultant en l'apparition d'une tension V_{base} dans la base. Le V_{oc} dépend en premier lieu de la variation de la tension de jonction V_j , provenant de l'éclairement, par rapport à l'équilibre thermodynamique. D'après [57], V_{base} se retranche à V_j pour une cellule $n^+ - p$ et s'ajoute à V_j pour une cellule $p^+ - n$:

$$\begin{cases} V_{oc,n+p} &= V_j - V_{base} \\ V_{oc,p+n} &= V_j + V_{base} \end{cases} \quad (1.23)$$

Cet effet apparaît lorsque la densité de porteurs minoritaires devient suffisamment élevée par rapport à la densité de porteurs majoritaires, et devient de plus en plus important au fur et à mesure que la concentration augmente. En prenant en compte le rapport des mobilités entre les électrons et les trous ($b = \frac{\mu_n}{\mu_p}$), deux expressions analytiques ont été introduites par Fossum et al. [57] traduisant l'évolution du V_{oc} avec la concentration selon le type de dopage de la base, lorsque le régime de faible injection n'est plus valable :

$$V_{oc,n+p} = \frac{2}{b+1} \frac{nkT}{q} \left[\ln \left(\frac{J_{sc}}{J_{n,0,e}} \right) + (b-1) \ln \left(\frac{N_a}{n_i} \right) \right] \quad (1.24)$$

$$V_{oc,p+n} = \frac{2b}{b+1} \frac{nkT}{q} \left[\ln \left(\frac{J_{sc}}{J_{n,0,h}} \right) - \left(\frac{b-1}{b} \right) \ln \left(\frac{N_d}{n_i} \right) \right] \quad (1.25)$$

Où $J_{n,0,e}$ et $J_{n,0,h}$ représentent la densité de courant de saturation en régime de forte injection pour les électrons et les trous respectivement. Sous concentration, en utilisant le

même raisonnement que pour l'équation [1.21](#), nous pouvons écrire :

$$V_{oc,n+p,X \text{ soleils}} = \frac{2}{b+1} \frac{nkT}{q} \ln(X) + V_{oc,n+p,1 \text{ soleil}} \quad (1.26)$$

$$V_{oc,p+n,X \text{ soleils}} = \frac{2b}{b+1} \frac{nkT}{q} \ln(X) + V_{oc,p+n,1 \text{ soleil}} \quad (1.27)$$

Pour les faibles éclairagements, la variation du V_{oc} avec la concentration suit l'équation [1.21](#). Une rupture de pente [57](#) est observée à partir d'une certaine valeur de concentration afin de suivre les variations définies par les équations [1.26](#) et [1.27](#). D'après les équations [1.26](#) et [1.27](#), nous pouvons conclure que la concentration du rayonnement est plus bénéfique dans le cas d'une cellule sur type n que sur type p (car $b > 1$ pour le silicium), le V_{oc} ayant une croissance plus marquée avec la concentration pour une cellule p^+n .

1.3.2.3 Influence du BSF sur l'évolution du V_{oc} avec la concentration

La présence d'un BSF en face arrière possède un effet bénéfique sur l'évolution du V_{oc} avec la concentration [62](#). L'ajout d'un BSF permet dans un premier temps de réduire les recombinaisons et d'améliorer le V_{oc} [64](#), et ce, quel que soit le type de dopage considéré. D'après les travaux de Wu et al. [65](#), l'ajout du BSF modifie la forme du V_{oc} par l'ajout d'une tension V_{jbsf} ayant pour origine la jonction pp^+ (nn^+). Le système d'équations [1.23](#) devient alors :

$$\begin{cases} V_{oc,n+pp^+} &= V_j + V_{jbsf} - V_{base} \\ V_{oc,p+nn^+} &= V_j + V_{jbsf} + V_{base} \end{cases} \quad (1.28)$$

Des expressions analytiques ont été développées par Wu et al. [65](#) pour exprimer les variations du V_{oc} avec la concentration pour des cellules avec BSF. D'après les résultats obtenus par simulation [65](#), la contribution de V_{base} au V_{oc} est plus faible que celle de V_{jbsf} dans le cas où le BSF est dopé à 10^{19} cm^{-3} . Néanmoins, pour deux cellules possédant des dopages équivalents (émetteur, base, BSF) et ayant la même architecture, l'augmentation du V_{oc} avec la concentration devrait être d'après [65](#) tout de même plus importante dans le cas d'une cellule p^+nn^+ , et ce, du fait des plus faibles courants de saturation sous obscurité. D'après les simulations présentées dans [65](#), les différences de comportements entre une cellule p^+nn^+ et n^+pp^+ apparaîtraient aux fortes concentrations ($X > 100$ soleils).

1.3.2.4 Évolution des coefficients de dégradation en température du V_{oc} avec la concentration

Les équations introduites dans le paragraphe précédent nous permettent de définir de nouveaux coefficients de dégradation en température en prenant notamment en compte l'influence du type de dopage. En l'absence de BSF, le coefficient de dégradation en température $\beta_{V_{oc}}$ peut s'écrire d'après l'équation [1.15] (dans le cas où le facteur de concentration est suffisamment élevé pour voir l'apparition de la tension V_{base}) :

$$\beta_{V_{oc},n+p,X \text{ soleils}} = \frac{1}{V_{ocn+p,X \text{ soleils}}} \frac{2}{b+1} \frac{nk}{q} \ln(X) + \frac{V_{ocn+p,1 \text{ soleil}}}{V_{ocn+p,X \text{ soleils}}} \beta_{V_{oc},n+p,1 \text{ soleil}} \quad (1.29)$$

$$\beta_{V_{oc},p+n,X \text{ soleils}} = \frac{1}{V_{ocp+n,X \text{ soleils}}} \frac{2b}{b+1} \frac{nk}{q} \ln(X) + \frac{V_{ocp+n,1 \text{ soleil}}}{V_{ocp+n,X \text{ soleils}}} \beta_{V_{oc},p+n,1 \text{ soleil}} \quad (1.30)$$

Quel que soit le type de dopage considéré, les coefficients de dégradation en température du V_{oc} sont négatifs. Si l'on considère deux cellules (type n et type p) ayant des V_{oc} équivalents, étant donné que $b > 1$ pour le silicium, les cellules de type n seront moins affectées par l'élévation de la température : $|\beta_{V_{oc},n+p,X \text{ soleils}}| > |\beta_{V_{oc},p+n,X \text{ soleils}}|$. Une telle propriété rendrait l'utilisation de cellules de type n plus favorable pour des applications sous concentration, puisqu'elles seront moins dégradées par l'élévation de la température de fonctionnement. De plus, quel que soit le type de dopage, le coefficient de dégradation en température diminue lorsque le facteur de concentration augmente.

Cependant, nous avons vu que l'ajout d'un BSF modifie fondamentalement l'évolution du V_{oc} avec la concentration et avec la température [65]. Il n'existe néanmoins pas à notre connaissance dans la littérature d'expression théorique du $\beta_{V_{oc}}$ permettant d'étudier l'effet de la présence d'un BSF sur le coefficient de dégradation du V_{oc} avec la concentration. L'évolution des coefficients de dégradation en température du V_{oc} avec différents facteurs de concentration et températures sera étudiée dans le dernier chapitre pour des cellules de résistivité et de type de dopage différents.

1.4 Conclusion du chapitre 1

Ce chapitre nous a permis de rappeler la problématique de l'échauffement des cellules photovoltaïques en silicium cristallin, et les conséquences de l'élévation de la température de fonctionnement sur les performances électriques des cellules. L'importante diminution des rendements des cellules avec la température nous oblige à mieux comprendre les comportements thermique et électrique des cellules photovoltaïques. Diminuer la température de fonctionnement d'une cellule représente une voie d'amélioration non négligeable dans la

course aux hauts rendements des cellules en silicium. Parmi les différentes méthodes de refroidissement existantes, l'utilisation des propriétés radiatives des cellules constitue une bonne alternative aux systèmes de refroidissement actifs, ces derniers étant souvent trop coûteux en énergie.

Les modèles numériques donnent la possibilité de mieux appréhender le comportement thermo-électrique des cellules. Le modèle physique et numérique développé par Couderc et al. [44] constitue le point de départ de notre travail. L'évolution de la température de la cellule avec la tension de polarisation y est présentée, remettant en cause la détermination de la température de fonctionnement au V_{oc} . L'influence du dopage de la base sur le refroidissement radiatif des cellules a également été mise en avant, rendant compte de l'importance du choix des propriétés de la cellule selon l'application visée. Le développement d'un banc de caractérisation original et innovant permettant d'étudier de tels comportements sera présenté dans le chapitre 2.

Pour finir, le comportement des cellules sous concentration a été présenté. La concentration du rayonnement solaire incident permet de repousser les limites des rendements atteignables. La dégradation du rendement des cellules avec la température provenant essentiellement du V_{oc} ; s'intéresser à l'évolution de ce paramètre avec la concentration et la température facilite la comparaison de cellules d'architectures et de propriétés différentes. Selon le type de dopage de la base, l'augmentation du V_{oc} avec le facteur de concentration sera plus ou moins importante. La présence d'un BSF semble néanmoins inhiber cette différence d'évolution du V_{oc} . L'étude du comportement thermo-électrique de cellules à architecture PERT avec différentes propriétés (type de dopage, résistivité de la base,...), dont le procédé de fabrication est décrit dans le chapitre 3, sera présentée dans le chapitre 4.

Chapitre 2

Développement d'un banc de caractérisation avancée de cellules photovoltaïques sous environnement contrôlé

La caractérisation du comportement thermo-électrique des cellules est peu développée dans la littérature. Dans le milieu du photovoltaïque, les différents outils de caractérisation du comportement thermique ne permettent d'accueillir que des modules, afin d'établir des corrélations entre les conditions extérieures (vitesse du vent, température ambiante,...) et la température de fonctionnement de ce dernier. Par conséquent, ces dispositifs ne permettent pas une étude poussée des différents phénomènes thermiques intervenant au sein même de la cellule.

Ce chapitre est dédié à la présentation d'un banc de caractérisation innovant de cellules photovoltaïques sous conditions thermiques (convective et radiative) contrôlées que nous avons développé au cours de cette thèse. Après un bref exposé des différents outils de caractérisations électrique et thermique utilisés dans le domaine du photovoltaïque, nous découvrirons un banc expérimental original qui permet d'étudier le comportement thermo-électrique des cellules photovoltaïques dans des conditions environnementales maîtrisées. Les différentes étapes de calibration et d'étalonnage nécessaires à l'utilisation du dispositif expérimental sont présentées et ses limites sont étudiées.

2.1 Objectifs expérimentaux

2.1.1 Caractérisations électrique et thermique de cellules PV

2.1.1.1 Caractérisation électrique des cellules photovoltaïques

Les caractéristiques IV sous obscurité et sous éclairement des cellules photovoltaïques renseignent sur leurs propriétés électriques. Elles sont obtenues par mesure quatre pointes. Pour la caractérisation électrique d'une cellule, celle-ci est placée sur un plateau conducteur de température contrôlée, le contact électrique en face arrière étant assuré grâce à une aspiration sous vide. De ce fait, la température de la cellule est également imposée à 25 °C par contact avec le plateau refroidi. La puissance de la lampe, ainsi que la hauteur du plateau par rapport à la lentille, sont étalonnées à l'aide d'une cellule de référence pour assurer un éclairement de 1 soleil ($1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$). Les caractéristiques électriques de cette cellule de référence seront présentées par la suite.

Dans cette thèse, toutes les caractéristiques IV des cellules données à 25 °C ont systématiquement été mesurées avec le simulateur solaire calibré présent dans notre laboratoire. Ainsi, nous pouvons extraire les grandeurs principales des cellules, à savoir la tension en circuit ouvert V_{oc} , le courant de court-circuit J_{sc} , le facteur de forme FF et le rendement η pour une température donnée. Cependant, ce simulateur solaire ne permet pas d'étudier l'évolution des caractéristiques I-V des cellules avec la température.

2.1.1.2 Caractérisation thermique des cellules photovoltaïques : température de fonctionnement et coefficient de dégradation en température

Outre les caractéristiques électriques, il convient de connaître pour une cellule

- sa température de fonctionnement,
- ses différents coefficients de dégradation en température du V_{oc} ($\beta_{V_{oc}}$) et du rendement η (β_{η}).

Ces paramètres sont nécessaires si l'on souhaite estimer les performances des installations photovoltaïques dans des conditions de fonctionnement réelles. La température de fonctionnement des cellules photovoltaïques, ou *Nominal Operating Cell Temperature* (NOCT) est mesurée dans des conditions expérimentales précises, à savoir [66] :

- un éclairement de $800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,
- une température ambiante de 25 °C ,
- une vitesse de vent de $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Cette température est définie au V_{oc} , et est supposée correspondre à la température atteinte au point de fonctionnement (M_{pp}).

Les coefficients de dégradation en température renseignent quant à eux sur l'évolution des caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque (V_{oc} , J_{sc} , FF , η , ...) lorsque sa température varie. Pour mesurer ces coefficients, la cellule est placée sur une surface dont la température peut varier sur une large plage de valeurs (généralement entre 15 et 70 °C). Les performances électriques de la cellule sont mesurées pour différentes températures, puis, par régression linéaire, les coefficients $\beta_{V_{oc}}$, $\beta_{J_{sc}}$ et β_{η} sont déterminés. Ainsi, pour une température de cellule donnée, nous pouvons estimer les performances électriques de la cellule. De nombreuses études s'intéressent à la mesure de la température de fonctionnement des modules [67, 68]. Nous pouvons notamment citer les travaux de [20], où les différentes corrélations existantes entre la production de modules photovoltaïques et les conditions extérieures sont recensées.

2.1.2 Originalité de notre banc de caractérisation

Dans le chapitre 1, nous avons évoqué la validité de l'hypothèse quant à la mesure de la température de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque au V_{oc} . D'après le modèle physique et numérique développé dans le cadre de la thèse de R. Couderc [43], la température de fonctionnement de la cellule au point de puissance maximum est plus faible que celle atteinte au J_{sc} et au V_{oc} . Or, il n'existe actuellement dans la littérature aucun dispositif expérimental permettant d'étudier une telle variation.

Pour quantifier cette évolution de la température avec la tension de polarisation, nous avons développé un banc innovant de caractérisation thermique et électrique, où il est possible :

- de contrôler les différents échanges convectifs, radiatifs et conductifs entre la cellule et son environnement,
- de mesurer la température de la cellule et du courant délivrée par celle-ci pour une tension de polarisation donnée,
- de simuler des conditions environnementales extrêmes (faible ou moyenne concentration solaire, température ambiante extrême),

Avant toute utilisation, le banc de caractérisation devra être calibré et étalonné, puis ses limites de fonctionnement devront être testées. Nous serons alors en mesure d'étudier dans le dernier chapitre l'influence de la tension de polarisation sur le comportement thermo-électrique des cellules photovoltaïques.

2.2 Présentation et dimensionnement du banc de caractérisation

2.2.1 Aspect général

Un banc de caractérisation, présenté sur la figure 2.1 a été imaginé pour répondre au cahier des charges présenté auparavant. Dans ce paragraphe, nous présenterons l'enceinte, le porte-échantillon, le système de mesure, ainsi qu'une vue d'ensemble du banc de caractérisation.

2.2.1.1 Présentation de l'enceinte

L'enceinte est constituée d'une chambre cylindrique d'une hauteur de 23 cm et d'un diamètre intérieur de 15 cm, recouverte par un couvercle amovible. Les parois intérieures de l'enceinte sont recouvertes d'une membrane absorbante d'émissivité proche de 1 de sorte à simuler les propriétés d'un corps noir à une température donnée. Dans l'enceinte, nous distinguons : le couvercle, le fond de l'enceinte et la paroi (cylindrique). Une vue schématique ainsi qu'une photographie de la chambre sont présentées sur les figures 2.1 et 2.2.

Le dispositif de mesure présente les spécificités suivantes :

- La pression dans la chambre est contrôlée à l'aide d'une vanne reliée à un système de pompage primaire, permettant de travailler entre 10^{-2} mbar et 10^{-1} mbar. Une pompe turbo-moléculaire nous permet d'atteindre des pressions inférieures à 10^{-3} mbar. La pression dans la chambre est mesurée par une jauge Pirani (limite de résolution : 10^{-3} mbar).
- L'enceinte possède un système de double parois où un flux d'air, dont la température est imposée, peut être injecté. En variant la température de l'air injecté (entre -55 et 125 °C) et son débit (entre 0 et $7 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$), la température de la paroi intérieure peut être contrôlée.
- L'éclairage est assuré par une lampe à arc Xénon munie d'un filtre Air Mass, dont la concordance avec le spectre solaire est présentée dans la prochaine section.
- L'ouverture optique en CaF_2 possède un coefficient de transmission supérieur à 90 % dans la gamme en longueur d'onde $[0.2 \mu\text{m}, 7 \mu\text{m}]$.
- L'isolation extérieure de l'enceinte est réalisée à l'aide d'une épaisse couche de laine de verre, afin d'éviter toute perturbation due aux conditions thermiques de la salle. Nous verrons par la suite que cette isolation est nécessaire si l'on souhaite contrôler avec précision la température de la paroi de l'enceinte.
- Une surface réfléchissante placée autour de la fenêtre optique diminue l'absorption parasite au niveau du couvercle.

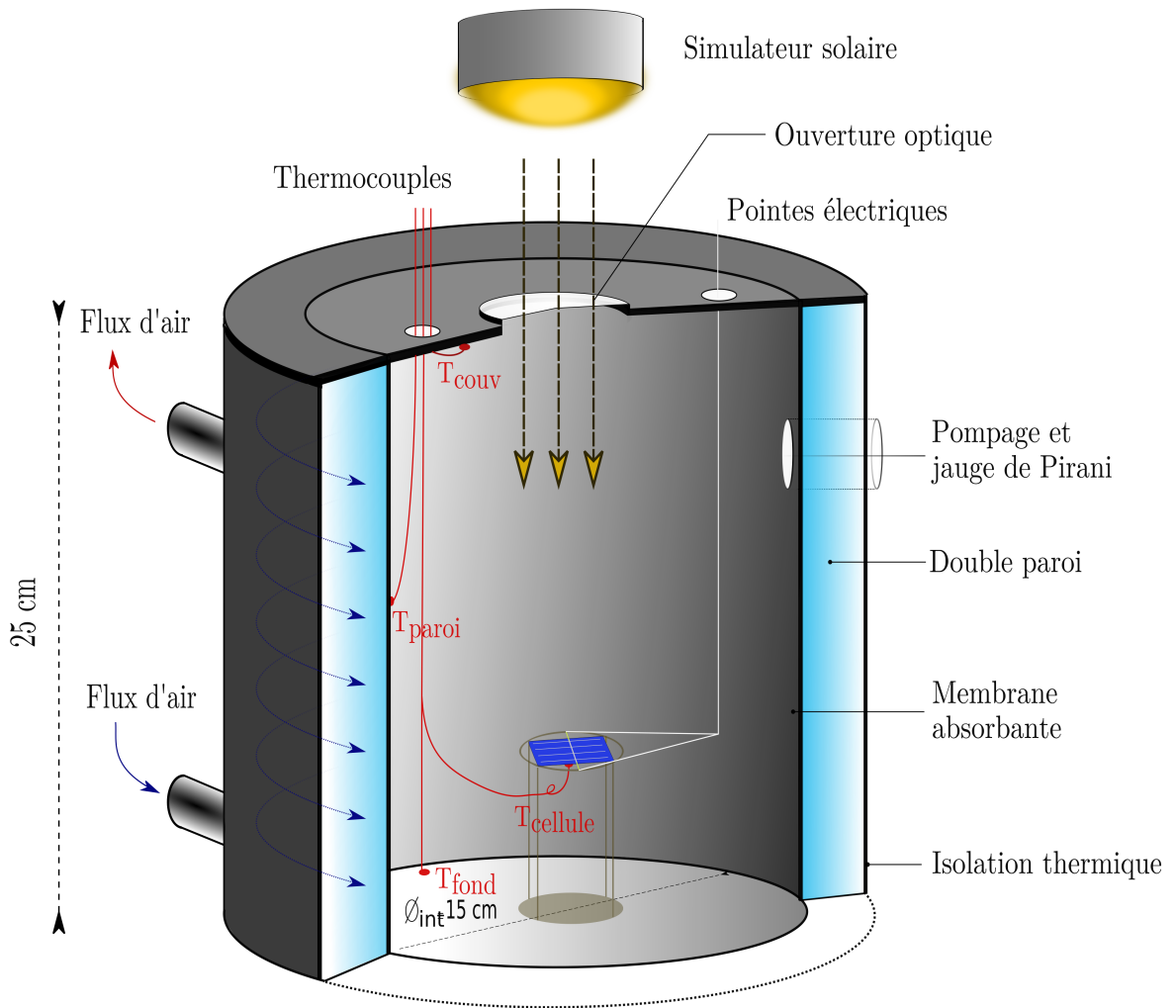


FIGURE 2.1 – Vue schématique du dispositif de caractérisation thermo-électrique de cellules photovoltaïques sous environnement contrôlé.

Plusieurs thermocouples assurent la mesure des températures de la paroi, du couvercle, de l'air et de la cellule. Deux thermocouples placés à l'extérieur de l'enceinte permettent de mesurer les variations de température de la salle. Sur la figure 2.1, seuls les thermocouples placés sur la paroi et sous la cellule sont représentés.

2.2.1.2 Présentation du porte-échantillon

Contrairement aux nombreux dispositifs de caractérisation déjà existants, nous ne souhaitons pas imposer la température de la cellule par contact avec un plateau métallique. Un porte-échantillon a été spécialement conçu comme présenté sur la figure 2.3. La cellule est tenue par ses quatre coins pour minimiser les échanges conductifs pouvant affecter la



FIGURE 2.2 – Photographie du dispositif de caractérisations thermique et électrique de cellules photovoltaïques sous environnement contrôlé.

température de stabilisation de la cellule. Deux porte-échantillons permettant de travailler avec des cellules de 4 cm^2 et 1 cm^2 ont été mis au point.

Un système de mesure quatre pointes est intégré au porte-échantillon. Un thermocouple monté sur un ressort assure la mesure de la température de la cellule en face arrière. Du fait de la haute conductivité thermique du silicium ($130\text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) et des faibles échanges convectifs présents dans l'enceinte (travail sous vide primaire), la température mesurée en face arrière est proche de la température de la cellule.

2.2.1.3 Vue d'ensemble du banc expérimental

Outre l'enceinte et le porte-échantillon présentés précédemment, le banc expérimental comprend :

- La lampe à arc Xénon et son alimentation,
- le système de pompage primaire et secondaire,
- le générateur d'air dont la température et le débit sont contrôlés,
- une carte d'acquisition pour la mesure de la température,
- un sourcemeter Keithley 2400 A pour l'acquisition des caractéristiques électriques, configuré en mesure 4 pointes,
- un ordinateur muni de logiciels Labview utilisés pour l'acquisition des données

Dans toute notre étude, nous utiliserons deux logiciels d'acquisition, créés sur Labview :

- Un logiciel de caractérisation IV classique, où nous pouvons choisir la plage de tensions

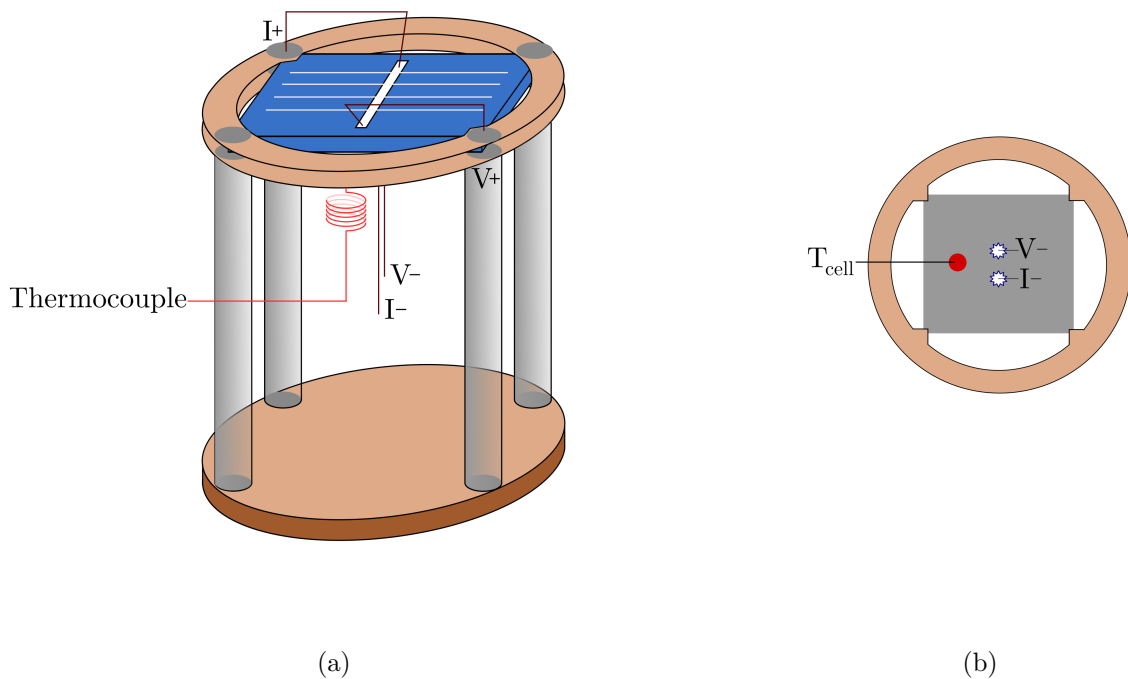


FIGURE 2.3 – Vue latérale (a) et vue de dessus (b) du porte-échantillon spécifiquement développé pour le banc de caractérisation.

balayées, le sens du balayage et le nombre de points sur la caractéristique. Le V_{oc} étant bien plus sensible à la température que le J_{sc} , l’acquisition se fera toujours en “*Forward (polarisation directe) → Reverse (polarisation inverse)*”. Le temps entre chaque point de mesure est fixé à 30 ms.

- Un logiciel d’acquisition où les températures de la paroi, du couvercle, du fond de l’enceinte, de la cellule et de la salle ainsi que le courant délivré par la cellule sont relevés en fonction du temps.

2.2.2 Influence de T_{paroi} , $T_{couvercle}$ et T_{fond} sur le refroidissement radiatif d’une cellule sous éclairement

L’originalité de notre dispositif réside dans le contrôle de l’environnement thermique de la cellule photovoltaïque sous éclairement. Nous avons vu dans le paragraphe précédent que la température de l’enceinte peut être contrôlée par un flux d’air. Cependant, l’échange thermique entre le flux d’air et l’enceinte se fait uniquement par le biais de la double paroi. Par conséquent, le couvercle et le fond de l’enceinte peuvent être sujets à des variations de température, et ce notamment lors d’une évolution de la température de la salle. Il est alors nécessaire de s’assurer que de telles variations n’ont que très peu d’influence sur la

température de stabilisation de la cellule.

A l'aide d'un modèle thermique de premier ordre, nous pouvons étudier l'évolution de la température de la cellule pour différentes températures de paroi, de couvercle et de fond de l'enceinte. Le modèle est basé sur les hypothèses suivantes :

- Les échanges convectifs et conductifs sont négligeables par rapport aux échanges radiatifs,
- La surface de la cellule est négligeable par rapport à celle du couvercle, de la paroi, et du fond de l'enceinte : $S_{cell} \ll S_{couvercle}, S_{parois}, S_{fond}$,
- La paroi, le couvercle et le fond de l'enceinte sont assimilés à des corps noirs d'émissivité $\varepsilon = 1$ et de températures imposées et invariantes,
- La cellule photovoltaïque, ayant une surface de 1 cm^2 , est assimilée à un corps gris d'émissivité $\varepsilon_{cell} = 0.85$ [37],
- La cellule est fixée à 13 cm du couvercle, et à 10 cm du fond de l'enceinte.

Pour une puissance lumineuse incidente donnée, le calcul des puissances émises et perçues par les différents éléments présents dans l'enceinte nous permet d'estimer la température atteinte par la cellule en régime permanent (au J_{sc}). Puisque les températures de la paroi, du couvercle et du fond de l'enceinte ne varient pas, nous pouvons considérer uniquement le bilan thermique de la cellule. À l'équilibre, la puissance absorbée par la cellule est égale à la puissance émise par celle-ci :

$$P_{\text{absorbée par la cellule}} = P_{\text{émise par la cellule}} \quad (2.1)$$

La puissance absorbée par la cellule comprend deux termes : l'absorption de l'éclairement incident et l'absorption du rayonnement provenant des différentes parties de l'enceinte. On peut donc écrire :

$$P_{\text{absorbée par la cellule}} = S_{cell} \phi_{inc} \alpha_{cell} + \sum_i \alpha_{cell} S_i \sigma F_{i-cell} T_i^4 \quad (2.2)$$

Où F_{i-cell} , appelé facteur de forme, représente la fraction de flux hémisphérique issue de l'une des parties de l'enceinte qui atteint la surface de la cellule, T_i la température de l'une des parties de l'enceinte, S_i sa surface, S_{cell} la surface de la cellule, ϕ_{inc} le flux lumineux incident, α_c le coefficient d'absorption de la cellule et σ la constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$) [69]. Le calcul des facteurs de forme, non présenté ici, dépend de la géométrie du problème considéré.

La puissance émise par la cellule est quant à elle fonction de son émission propre. D'où :

$$P_{\text{émise par la cellule}} = \sum_i \varepsilon_{cell} S_{cell} \sigma F_{cell-i} T_{cell}^4 \quad (2.3)$$

D'après les propriétés fondamentales des facteurs de formes, on a $S_{cell}F_{cell-i} = S_iF_{i-cell}$. De plus, d'après la loi de Kirchhoff, on a $\alpha_{cell} = \varepsilon_{cell}$. En réinjectant les équations 2.2 et 2.3 dans 2.1, nous pouvons écrire :

$$S_{cell}\phi_{inc}\varepsilon_{cell} + \sum_i \varepsilon_{cell}S_{cell}\sigma F_{cell-i}T_i^4 = \sum_i \varepsilon_{cell}S_{cell}\sigma F_{cell-i}T_{cell}^4 \quad (2.4)$$

En implémentant l'équation 2.4 sous Matlab, la résolution de l'équation de la chaleur nous permet d'étudier l'évolution de la température de la cellule pour différentes températures de paroi, couvercle et fond de l'enceinte en régime transitoire. En fixant deux des trois températures ($T_{paroi}, T_{couvercle}, T_{fond}$) à 25 °C et en faisant varier la troisième température entre 15 et 35 °C, nous observons l'évolution de la température de la cellule. Les résultats obtenus par simulation sont présentés sur la figure 2.4.

D'après les résultats, les variations des températures du couvercle et du fond (figure 2.4.a et 2.4.c) n'altèrent que très peu la température de stabilisation sous éclairage. En revanche, une variation de la température de la paroi cylindrique influe fortement la température de la cellule.

Nous verrons dans la dernière partie que les transferts par conduction thermique avec l'air sont en réalité présents à la pression de travail. Cependant, ce type de transfert thermique se fait suivant un gradient de température. Ici, du fait de la proximité de l'échantillon avec la paroi cylindrique par rapport au couvercle et au fond de l'enceinte, le gradient de température est principalement dirigé vers la paroi cylindrique. Par conséquent, le seul refroidissement (ou réchauffement) de la température de la paroi est suffisant pour contrôler les échanges thermiques entre la cellule et l'enceinte.

2.2.3 Le travail sous concentration par ajout d'une lentille de Fresnel

Dans l'objectif d'étudier le comportement thermoélectrique des cellules PV sous différents éclairages, l'enceinte doit être capable d'accueillir un système de concentration. Limité par la taille du dispositif, notre choix s'est porté vers une lentille de Fresnel ayant pour avantage d'avoir une focale bien plus faible qu'une lentille classique. Ce type de lentille est régulièrement utilisé pour la fabrication de systèmes sous concentration [59, 70]. Nous avons choisi une lentille de focale 51 mm et de diamètre $\varnothing_{fresnel} = 50mm$. Cette dernière est placée au dessus de la cellule, telle que présentée sur la figure 2.5.

Le facteur de concentration maximal que nous pouvons atteindre est limité par la taille de la cellule (1 cm²) et le diamètre de la fenêtre optique $\varnothing_{fen\hat{e}tre\ optique} = 38$ mm. Le faisceau étant circulaire, le diamètre du cercle circonscrit à la cellule $\varnothing_{cellule}$ est de 14.2 mm. Nous pouvons alors calculer le facteur de concentration géométrique maximal :

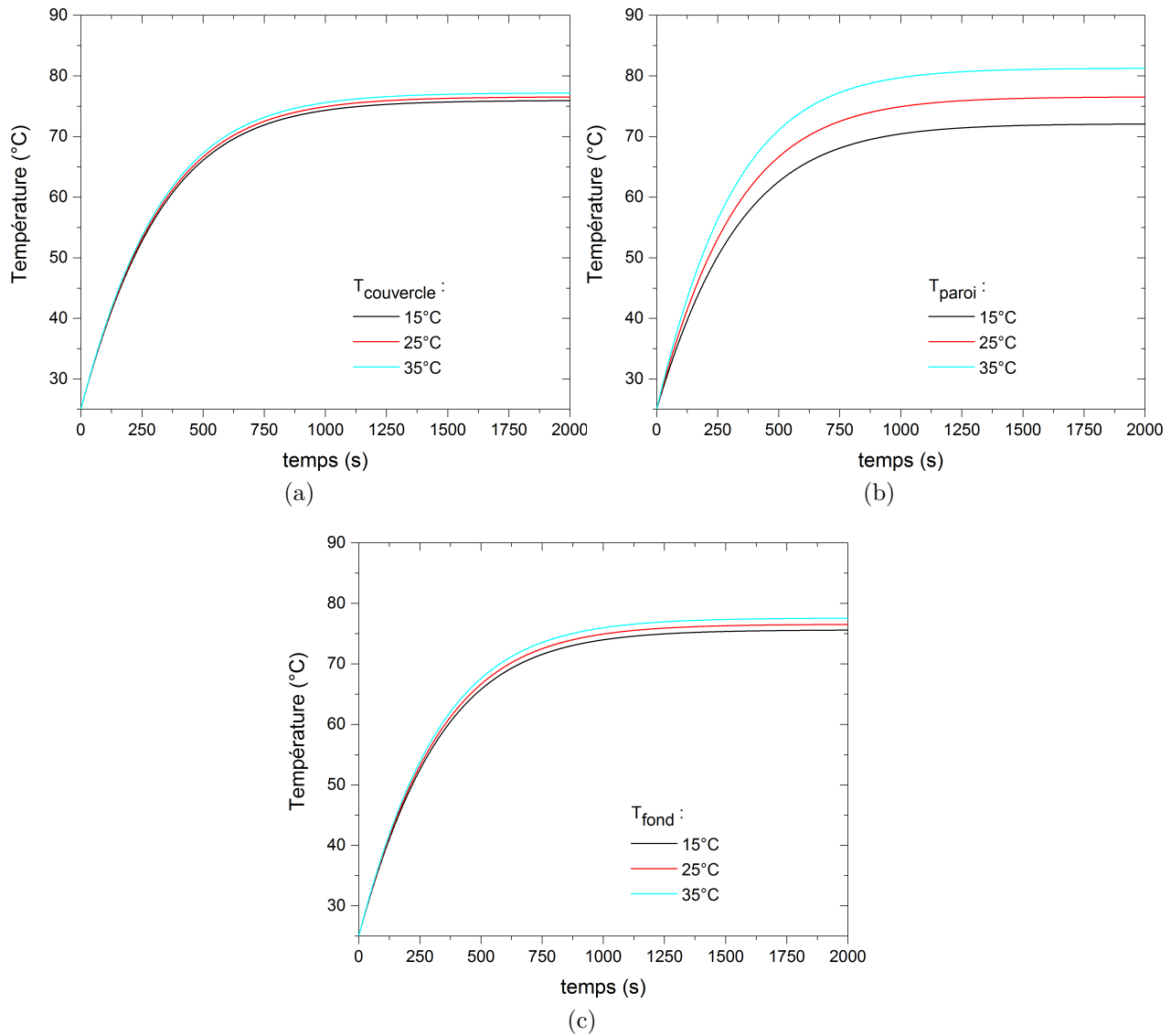


FIGURE 2.4 – Évolution de la température de la cellule avec (a) $T_{couvercle}$, pour $T_{paroi} = T_{fond} = 25^{\circ}\text{C}$ (b) T_{paroi} , pour $T_{couvercle} = T_{fond} = 25^{\circ}\text{C}$ (c) T_{fond} , pour $T_{couvercle} = T_{paroi} = 25^{\circ}\text{C}$.

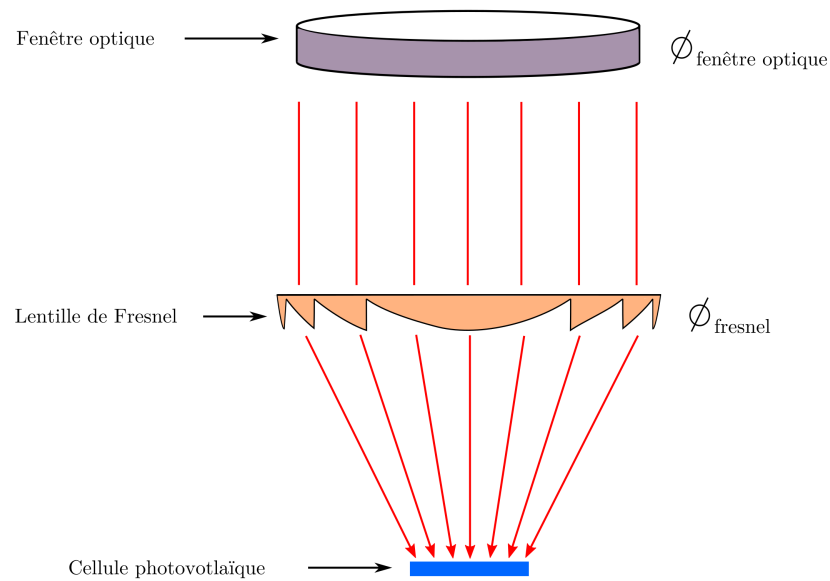


FIGURE 2.5 – Schéma du concentrateur utilisé pour travailler sous moyenne concentration.

$$C_{max,géo} = \left(\frac{\pi \phi_{\text{fenêtre optique}}}{\pi \phi_{\text{cellule}}} \right)^2 = 7.16 \quad (2.5)$$

L'éclairement incident n'est cependant pas homogène sur toute la surface (effets de bords). Il est donc judicieux de se limiter à un diamètre de l'éclairement incident de 20 mm, ce qui correspond à un facteur de concentration maximal de 3.6.

2.3 Calibration du banc expérimental

Cette partie s'attachera à détailler les différentes étapes de calibration réalisées avant de pouvoir commencer toutes séries de mesures. Nous aborderons dans ce paragraphe :

- La calibration des dispositifs de mesures électrique et thermique,
- La calibration de la lampe, pour assurer un éclairement de $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

2.3.1 Calibration du système de mesure

2.3.1.1 Calibration électrique

Avant de réaliser des mesures sous éclairement, nous devons nous assurer de la validité du système d'acquisition électrique. Pour ce faire, nous comparons les caractéristiques IV sous obscurité d'une cellule photovoltaïque mesurées sur le simulateur solaire calibré et sur notre

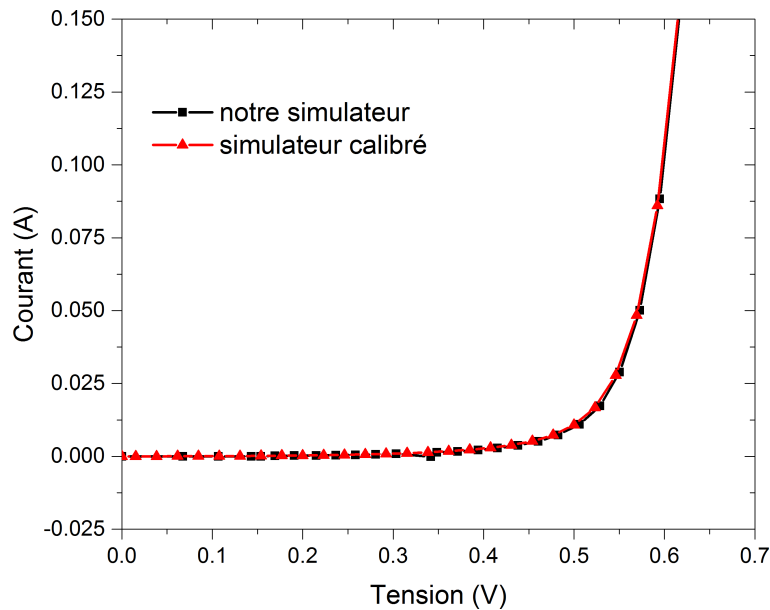


FIGURE 2.6 – Comparaison de la caractéristique sous obscurité d’une cellule photovoltaïque mesurée avec notre dispositif et sous un simulateur solaire calibré.

nouveau dispositif de mesure. Dans les deux cas, la cellule est montée sur le porte-échantillon telle que présentée sur la figure 2.3. Sur la figure 2.6, la caractéristique IV sous obscurité obtenue sur le simulateur calibré (en rouge) est comparée à celle mesurée sur notre simulateur (en noir). Les deux caractéristiques étant parfaitement superposées, cette comparaison nous confirme la validité de notre chaîne d’acquisition électrique.

2.3.1.2 Calibration thermique

La calibration des thermocouples nous permet d’appliquer dans une certaine plage de température une correction à nos mesures. Les thermocouples à calibrer sont placés avec une sonde de référence (PT100) dans une enceinte thermostatée par un système de reflux d’huile (figure 2.7). En contrôlant la température de l’huile, la température des parois de l’enceinte est maîtrisée. De la laine de verre placée au sommet de l’enceinte assure une bonne homogénéité de la température dans l’enceinte.

La température de l’huile peut être contrôlée entre 10 °C et 50 °C. Pour différents paliers de température, après avoir attendu l’équilibre thermique dans l’enceinte (environ 30 minutes), les températures mesurées par le thermocouple et par la sonde étalon sont relevées toutes les 3 minutes et ce, pendant une demi-heure. En moyennant pour chaque palier de température l’écart entre la température mesurée par le thermocouple de la cellule et celle mesurée par la sonde étalon (figure 2.8), des corrections peuvent être apportées aux mesures de température.

Cependant, le dispositif d’étalonnage ne permet pas de calibrer les thermocouples pour des températures supérieures à 50 °C. D’après les données du constructeur, l’incertitude

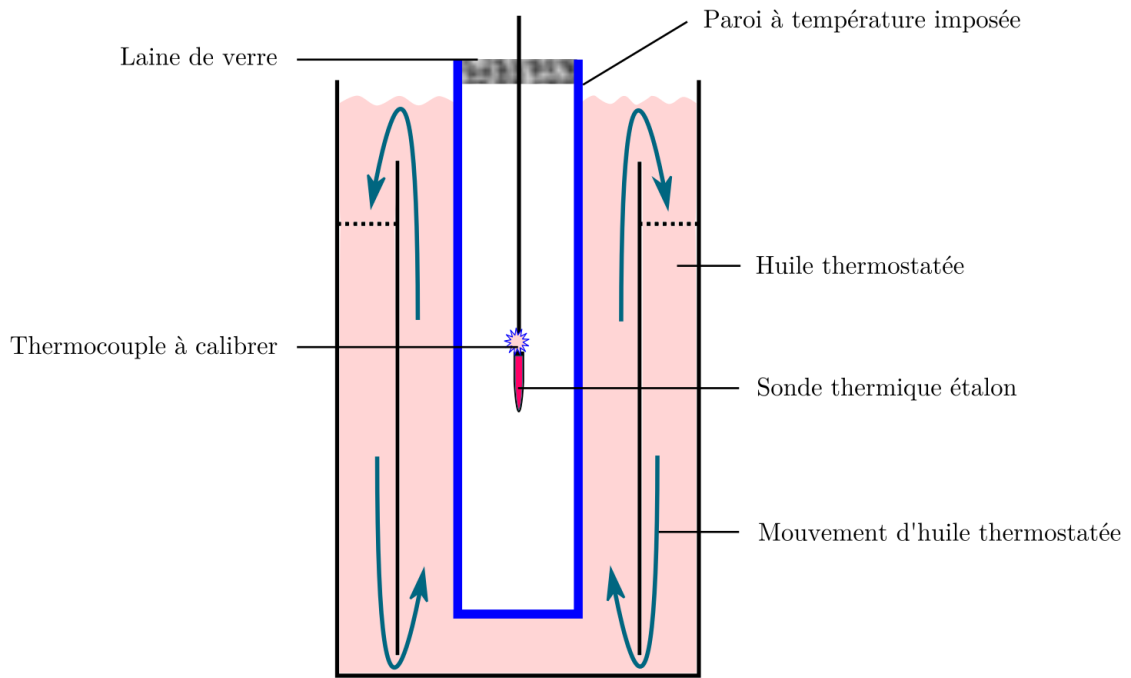


FIGURE 2.7 – Schéma du dispositif de calibration des thermocouples.

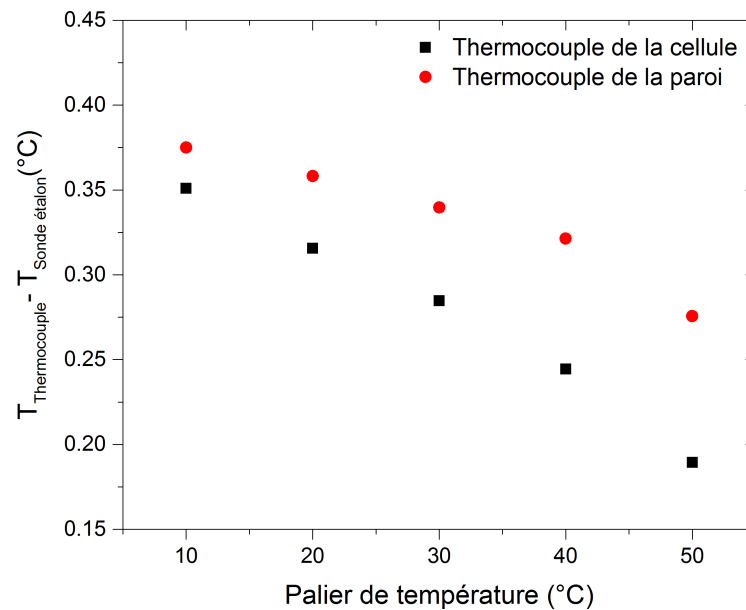


FIGURE 2.8 – Évolution de la température des thermocouples de la cellule et de la paroi comparée à la température de la sonde étalon, pour différents paliers de température : [10 °C, 20 °C, 30 °C, 40 °C, 50 °C].

maximale sur la mesure du thermocouple utilisé est de $\pm 2.5^\circ\text{C}$. Néanmoins, nous pouvons assumer que dans la plage de température de travail (entre 40°C et 90°C) la correction à appliquer sur la mesure de température sera du même ordre de grandeur que celle mesurée lors de la calibration présentée sur la figure [2.8](#). Lors des mesures de température supérieures à 60°C , nous rajouterons une incertitude de $\pm 0.5^\circ\text{C}$ sur la mesure absolue de température.

2.3.2 Calibration de l'éclairement

2.3.2.1 Allure de l'éclairement spectral et classe du simulateur

Pour simuler le spectre solaire, notre choix s'est porté sur une lampe à arc Xénon (Xe), les autres lampes (tungstène, mercure ou halogénure) ayant une trop faible correspondance avec le spectre solaire [\[71\]](#). Un filtre AM1.5 modifie le spectre incident pour assurer une meilleure correspondance de l'éclairement spectral avec le rayonnement solaire à la surface de la Terre (direct et diffus). Les lampes à arc Xénon sont très couramment utilisées dans les simulateurs solaires pour la caractérisation des cellules photovoltaïques.

Sous incidence normale, l'éclairement spectral du simulateur solaire a été mesuré dans la gamme [300 nm, 950 nm]. L'éclairement obtenu a ensuite été comparé à celui d'un simulateur solaire de classe AAA ainsi qu'à l'éclairement AM1.5G défini par la norme ASTM G173-03 [\[12\]](#). L'éclairement spectral d'une lampe à arc (Xe) provenant du constructeur est également représentée. L'allure des différents spectres est présentée sur la figure [2.9](#).

La classe d'un simulateur solaire est définie par :

- Sa correspondance avec le spectre solaire,
- Sa stabilité dans le temps,
- L'uniformité spatiale de son éclairement.

D'après le constructeur, notre simulateur solaire est de classe ABA. Nous observons une bonne correspondance entre les différents spectres. Les faibles écarts observés entre les lampes à arc sur la figure [2.9](#) (dans l'UV et dans le proche IR) peuvent provenir du vieillissement des lampes ainsi que du photodétecteur utilisé pour la mesure de l'éclairement spectral.

La puissance de la lampe ainsi que sa hauteur par rapport à la cellule doivent maintenant être calibrées pour assurer un éclairement incident à la surface de la cellule de $1000\text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

2.3.2.2 Calibration de la puissance et de la distance lampe-cellule

Le dispositif de caractérisation électrique étant fonctionnel, nous pouvons observer l'influence de la puissance de la lampe et de la distance lampe-cellule sur l'éclairement incident. Cette étude, réalisée à l'aide de la cellule de référence présentée dans la section [2.1.1.1](#), nous permet d'identifier un couple (puissance lampe, distance lampe-cellule) permettant d'assurer

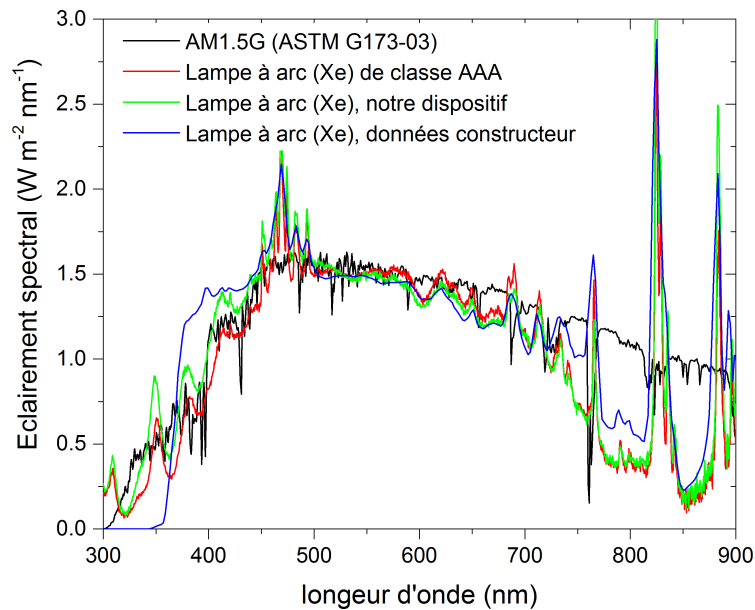


FIGURE 2.9 – Comparaison des éclairements spectraux de la lampe à arc (Xe) utilisée dans notre dispositif expérimental, de lampe à arc (Xe) de classe AAA et du rayonnement solaire AM1.5G défini selon la norme ASTM G173-03 [12]. L'éclairement spectral d'une lampe à arc (Xe) provenant du constructeur est fournie.

un éclairement de 1 soleil.

La puissance de la lampe peut varier entre 250 et 330 W, et la distance lampe-cellule entre 13 et 50 cm. Pour éviter toute dégradation accélérée de la lampe, il est préférable de ne pas travailler à des puissances trop élevées. En jouant sur ces deux paramètres, nous retrouvons la caractéristique IV de la cellule calibrée, telle que présentée sur la figure 2.10 pour un couple (285 W, 15 cm). La caractéristique est comparée à celle fournie par l'Institut Fraunhofer.

Nous obtenons les caractéristiques électriques suivantes :

- $I_{sc} = 116.2 \text{ mA}$,
- $V_{oc} = 656 \text{ mV}$,
- $I_{mpp} = 108.3 \text{ mA}$ et $V_{mpp} = 556.4 \text{ mV}$, soit $FF = 79 \%$

Les valeurs mesurées sont en accord avec celles données par l'Institut Fraunhofer ($I_{sc} = 116.7 \pm 2.2 \text{ mA}$, $V_{oc} = 650.7 \pm 2.0 \text{ mV}$, $FF = 78.92 \pm 0.51 \%$). Un faible écart sur la mesure du V_{oc} est néanmoins observé. Cette variation a pour origine la température réelle de la cellule. La cellule de calibration étant encapsulée, sa température ne peut être imposée par conduction thermique avec un plateau ; et correspond donc à la température ambiante de la salle. Dans notre mesure, il semblerait ici que la température de la cellule soit légèrement inférieure à 25°C . Il n'est cependant pas possible de la mesurer du fait de la présence de l'encapsulation. De plus, la valeur de I_{sc} justifie la bonne calibration de l'éclairement incident. Par la suite, nous choisirons le couple (285 W, 15 cm) comme référence, assurant un

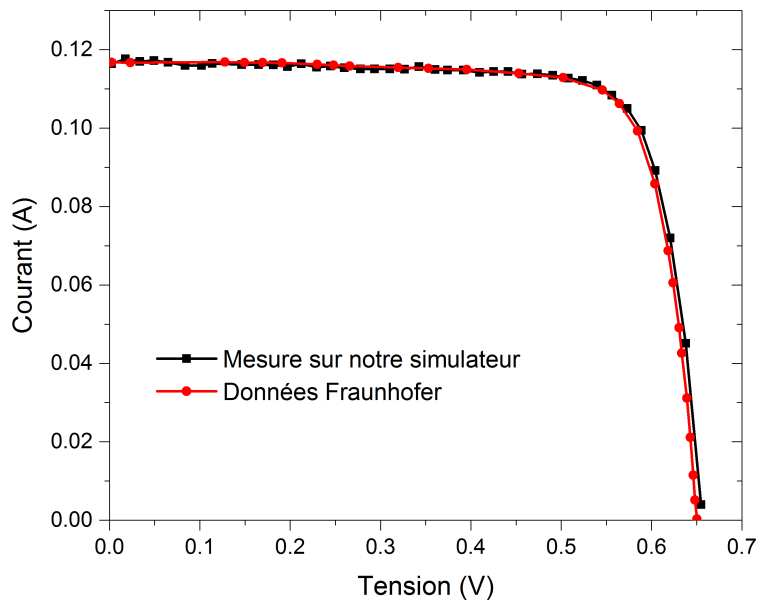


FIGURE 2.10 – Caractéristique IV de la cellule de référence calibrée par l’Institut Fraunhofer, mesurée pour une puissance de lampe de 285 W et une distance lampe-cellule de 15 cm.

éclairage de 1 soleil. Il est important de noter que cette calibration a été effectuée au début de la thèse. Par conséquent, cette étape a dû être renouvelée plusieurs fois, pour s’assurer de la validité de l’éclairage incident du fait d’un vieillissement potentiel de la lampe à arc.

2.4 Mesures : méthode générale, stabilité et limites

Plusieurs cellules de différentes tailles fabriquées dans le laboratoire ont été utilisées pour obtenir les résultats exposés dans ce paragraphe. Dans un premier temps, nous présenterons la méthode expérimentale utilisée pour chaque mesure de température de cellule. Dans un second temps, la stabilité ainsi que la reproductibilité de nos mesures seront mises en avant. Pour finir nous étudierons les limites de notre banc expérimental et nous nous attacherons à l’évaluation des différents coefficients d’échanges thermiques (radiatifs, conductifs, convectifs).

2.4.1 Méthode de mesure expérimentale

La cellule contactée sur le porte-échantillon est placée dans l’enceinte telle que présenté sur la figure 2.11, puis une caractérisation I-V sous obscurité est effectuée. La caractéristique obtenue est comparée à celle mesurée sur le simulateur continu de classe AAA pour s’assurer du bon contact électrique entre les pointes et la cellule. Une fois le couvercle refermé, la vanne liant le système de pompage à l’enceinte est ouverte. En éclairant la fenêtre optique,

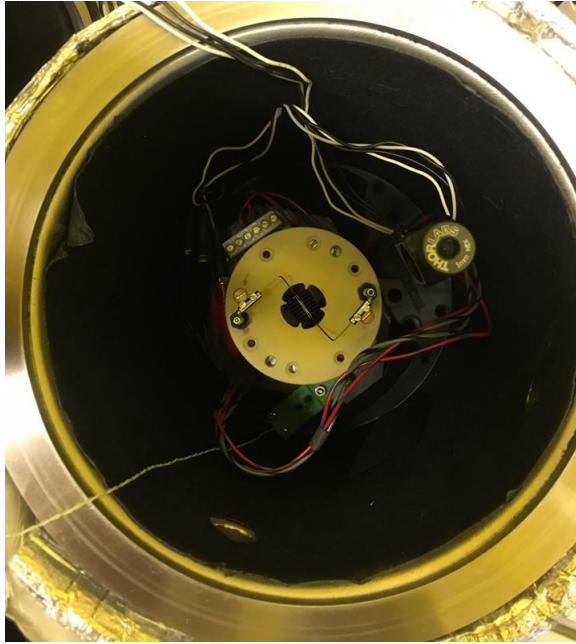


FIGURE 2.11 – Vue photographique d'une cellule de 1 cm^2 placée dans l'enceinte avant éclairage.

nous observons pour une tension de polarisation donnée (consigne) :

- L'évolution du courant généré par la cellule,
- Les évolutions de la température de la cellule, de la paroi, du couvercle et de la salle,
- La pression dans l'enceinte.

2.4.2 Stabilité des mesures

2.4.2.1 Contrôle et homogénéité de la température de la paroi

L'originalité de notre dispositif réside dans la mesure de la température de la cellule PV placée dans un environnement contrôlé. Le refroidissement de la cellule étant principalement radiatif, nous nous sommes intéressés à la stabilité de la température de la paroi lorsque la cellule est placée sous éclairage. Pour atteindre l'équilibre thermique entre la cellule et l'enceinte, nous avons dans un premier temps choisi d'injecter dans la double paroi un flux d'air froid à 2°C , à un débit de $6 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$. Malgré ce refroidissement, la température de la paroi n'est pas stabilisée et des fluctuations de celle-ci peuvent être observées (figure 2.12).

Cette instabilité de la température provient d'une mauvaise isolation de l'enceinte vis-à-vis de l'extérieur. En effet, des variations de la température de la salle empêchent de contrôler, avec précision, la température de la paroi. Pour limiter les fluctuations provenant des échanges thermiques entre les parois extérieures de l'enceinte et la salle, nous avons rajouté une couverture isotherme en contact avec le dispositif de mesure (cf : isolation thermique

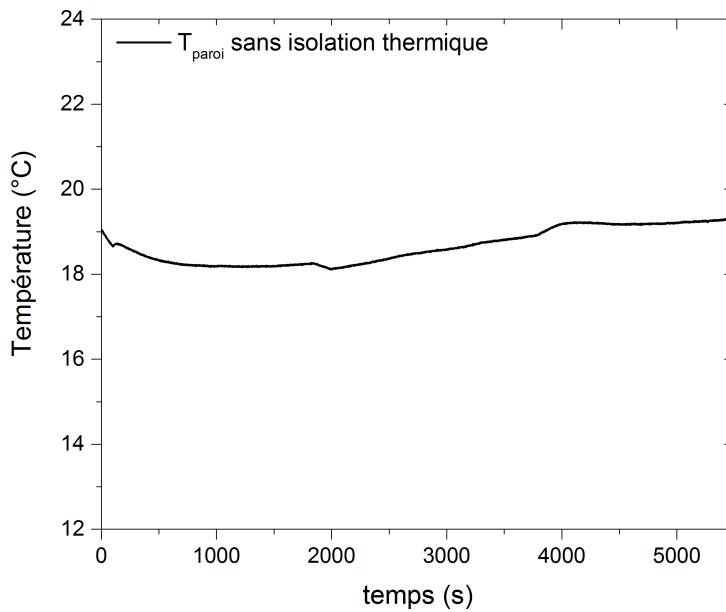


FIGURE 2.12 – Évolution de la température de la paroi en fonction du temps pour une circulation d'air froid dans la double paroi (2°C , $6\text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$).

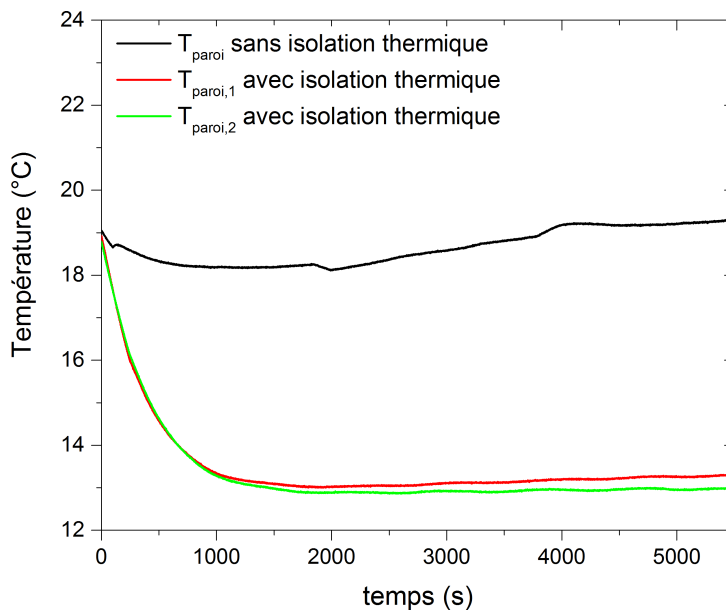


FIGURE 2.13 – Influence de l'isolation thermique de l'enceinte sur la stabilité de la température de la paroi pour une circulation d'air froid dans la double paroi (2°C , $6\text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$).

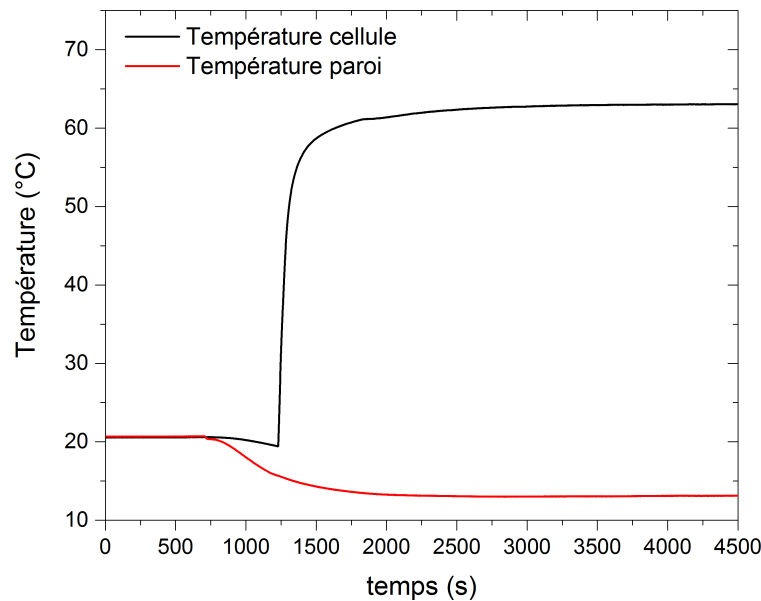


FIGURE 2.14 – Évolution de la température de la cellule en fonction du temps pour une température de paroi stabilisée à 13°C. (2°C , $6\text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$).

présentée dans la figure 2.1). Dans les mêmes conditions de mesure, une nette amélioration de la stabilité de la température de la paroi est observée (figure 2.13). De plus, de plus faibles températures de paroi sont atteintes du fait de la limitation des échanges thermiques avec l'extérieur.

L'homogénéité de la température de la paroi est un paramètre important de cette étude. Un deuxième thermocouple dans l'enceinte ($T_{paroi,2}$), diamétralement opposé au premier, permet de s'assurer de la bonne homogénéité de la température. Les deux températures, $T_{paroi,1}$ et $T_{paroi,2}$, étant sensiblement les mêmes, nous supposons par la suite que la température de la paroi est homogène sur toute la surface intérieure de l'enceinte.

La température de paroi mesurée a été obtenue en considérant l'équilibre thermique atteint entre la cellule et l'enceinte. Dans le prochain paragraphe, nous nous intéressons à la stabilisation de la température de la cellule pour ces conditions données.

2.4.2.2 Stabilisation de la température d'une cellule photovoltaïque pour une température de paroi imposée

Pour une cellule Al-BSF de 4 cm^2 , l'évolution de la température mesurée au J_{sc} en fonction du temps est tracée figure 2.14. A $t = 700\text{ s}$, le pompage est enclenché, et un flux d'air à 2°C d'un débit de $6\text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ circule dans la double paroi, ce qui explique la chute de température de la cellule et de la paroi. L'ouverture du volet de la lampe à $t = 1250\text{ s}$ entraîne l'échauffement de la cellule. A partir de $t = 3500\text{ s}$, un équilibre thermique entre la cellule et l'enceinte est observé, où nous pouvons mesurer une température de la cellule de 63°C (au J_{sc}).

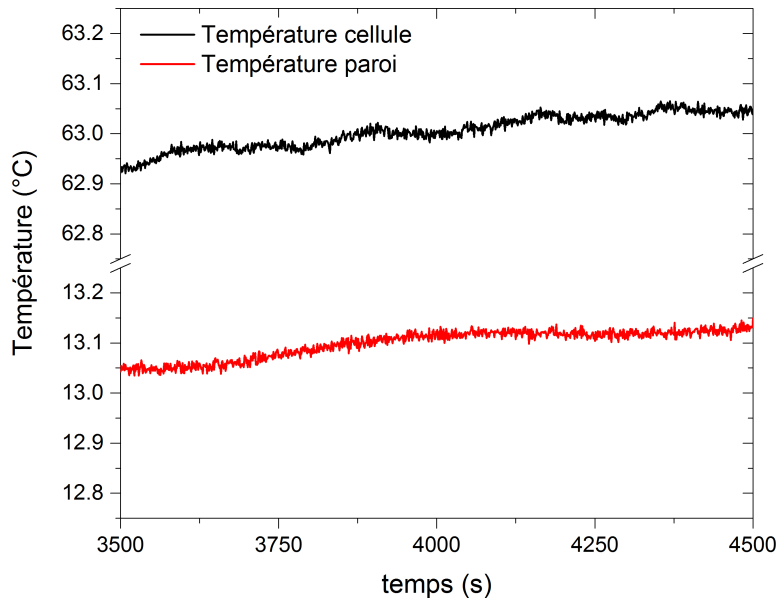


FIGURE 2.15 – Échauffement permanent mesuré sur la cellule et sur la paroi : zoom sur la figure 2.14.

Nous avons regroupé sur le tableau 2.1 les différentes conditions appliquées à l'enceinte pour lesquelles la mesure de température a été effectuée. Par la suite, nous nous intéresserons principalement à la température de la paroi et de la cellule obtenue sous un éclairage de 1 soleil.

$T_{Salle}(\text{°C})$	Pression (mbar)	Débit ($\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$)	$T_{air\ injétée}(\text{°C})$	$T_{paroi}(\text{°C})$	$T_{Jsc}(\text{°C})$
20	0.3	6	2	13	63

TABLE 2.1 – Conditions expérimentales de mesure permettant d'obtenir l'équilibre thermique observé sur la figure 2.14, sous un éclairage de 1 soleil.

Malgré l'isolation thermique et le flux d'air, un échauffement permanent peut être observé à l'aide des thermocouples présents à l'intérieur de l'enceinte lorsque la température de la cellule semble être stabilisée. Cet échauffement représenté sur la figure 2.15 grâce aux mesures des thermocouples de la paroi et de la cellule peut être approximé comme variant linéairement avec le temps et est identique quel que soit le thermocouple considéré (paroi, cellule ou couvercle). Cette variation provient des diverses instabilités du générateur d'air ainsi que de l'évolution de la température de la salle. Néanmoins, du fait de sa faible valeur ($\sim 10^{-4} \text{°C} \cdot \text{s}^{-1}$), cette instabilité pourra être corrigée par la suite lors des mesures de températures.

2.4.3 Les limites du dispositif

Dans cette section, nous nous proposons d'étudier les limites du dispositif expérimental. Après avoir mesuré les puissances lumineuses accessibles ainsi que les températures de paroi minimale et maximale atteignables, nous nous intéresserons à l'influence de la pression dans l'enceinte sur la température de la cellule à l'équilibre. Pour finir nous estimerons les différents coefficients d'échanges thermiques (conductifs, convectifs et radiatifs).

2.4.3.1 Puissance incidente : éclairage et facteur de concentration

Pour les conditions opératoires décrites dans la sous section [2.3.2](#), nous obtenons un éclairage de $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. En mesurant le courant de court-circuit de la cellule de référence, nous pouvons remonter au facteur de concentration correspondant d'après l'équation [1.20](#). Avec l'ajout d'une lentille de Fresnel, un éclairage de $4000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ sur une cellule de 1 cm^2 peut être atteint. Les facteurs limitant l'éclairage maximal sont :

- la position de la cellule dans l'enceinte,
- la taille de la cellule étudiée,
- la taille du faisceau incident en amont de la lentille,
- la puissance maximale du boîtier de la lampe à arc.

Pour éviter une dégradation accélérée de la lampe, il est préférable de se limiter à une puissance du boîtier de la lampe de 310 W . Pour une distance maximale entre la lampe et la cellule et une puissance du boîtier de la lampe de 250 W , un faible éclairage de $170 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ est atteint.

En théorie, de plus hauts facteurs de concentration pourraient être atteints. Par exemple, travailler sur des cellules de 0.25 cm^2 nous permettrait d'atteindre des concentrations de plusieurs dizaines de soleils. Cependant, cette étude ne serait pas viable du fait de la forte influence des effets de bords sur les cellules de faibles dimensions [\[72\]](#). L'étude du comportement thermoélectrique des cellules sera donc effectuée entre 0.2 et 4 soleils.

2.4.3.2 Limites du générateur d'air : température de la paroi minimale et maximale

Le générateur d'air permet de faire circuler un flux d'air dans la double paroi. La température du flux d'air peut varier entre -55 et $125 \text{ }^\circ\text{C}$. Une telle plage de valeurs de la température du flux d'air injecté nous permet d'étudier le comportement des cellules photovoltaïques dans des conditions extrêmes. En imposant un flux d'air à $-55 \text{ }^\circ\text{C}$, une température de paroi relativement faible peut être atteinte ($\leq -10 \text{ }^\circ\text{C}$). Du fait de la faible capacité calorifique de l'air, cette température minimale de la paroi dépendra :

- des conditions météorologiques extérieures,

- de la taille de la cellule considérée,
- de l'éclairement incident.

Il est aussi possible de chauffer la paroi en imposant un flux d'air de température élevée. De nombreux tests ont révélé qu'à partir d'une certaine température de la paroi ($\sim 70^\circ\text{C}$), plus aucun courant n'était collecté. Dans la suite de notre étude, nous nous limiterons donc à des températures de paroi inférieures à 70°C .

2.4.3.3 Compétition entre les échanges par convection, par conduction thermique avec l'air et par radiation

Dans les mêmes conditions expérimentales que celles présentées dans le Tableau 2.1, nous avons mesuré pour une cellule de 1 cm^2 une température au J_{sc} de 48°C . Ici, la température atteinte au J_{sc} est plus faible que dans le cas d'une cellule de 4 cm^2 . Cette différence provient des variations des facteurs de forme entre la cellule et les différentes parties de l'enceinte (paroi, couvercle et fond de l'enceinte). Le fond de l'enceinte et le couvercle ne sont pas refroidis. Étant donné que la cellule de 4 cm^2 voit « plus » le couvercle et le fond de l'enceinte, l'équilibre thermique entre la cellule et son environnement est modifié et sa température à l'équilibre est plus élevée.

Pour cette même cellule, nous nous sommes intéressés à l'évolution de sa température pour différents paliers de pression variant entre $4 \times 10^{-3}\text{ mbar}$ et 14 mbar , pour un éclairement et une température de paroi fixés. La figure 2.16 présente les variations de la température de la cellule en fonction de la pression dans l'enceinte. Pour une pression inférieure à 0.2 mbar , nous observons une forte variation de la température de la cellule avec la pression. En diminuant la pression dans l'enceinte, la baisse significative des échanges thermiques par convection perturbe l'équilibre thermique entre la cellule et l'enceinte. Ce comportement nous sera utile lors de l'étude des cellules photovoltaïques sous faible concentration pour atteindre des hautes températures dans l'objectif de mesurer les différents coefficients de dégradation en température.

Dans notre cas, lorsque le système de pompage est coupé, la convection est dite naturelle. D'après [69], le coefficient d'échange h_{conv} peut s'exprimer par :

$$h_{conv} = C Ra_L^n \frac{k_{air}}{L} \quad (2.6)$$

où L représente une distance caractéristique, k_{air} la conductivité thermique de l'air, et Ra_L le nombre de Rayleigh. C et n sont des coefficients empiriques qui dépendent de la valeur de Ra_L déterminée. Ra_L est défini comme :

$$Ra_L = \frac{g\beta_{th}(T_{cell} - T_{air})L^3}{\nu\alpha_{th}} \quad (2.7)$$

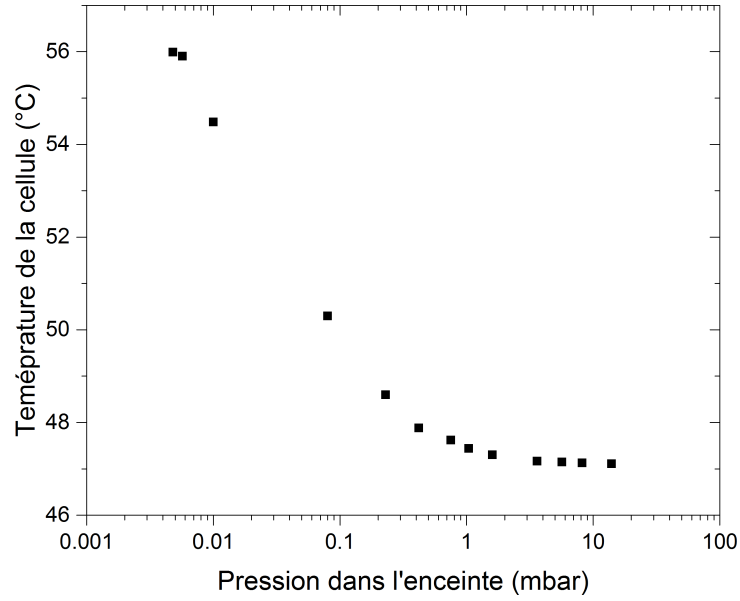


FIGURE 2.16 – Évolution de la température de la cellule photovoltaïque (au J_{sc}) en fonction de la pression dans l'enceinte.

avec g l'accélération de la pesanteur, β_{th} le coefficient d'expansion thermique, ν_{vc} le coefficient de viscosité cinématique et α_{th} le coefficient de diffusivité thermique. La géométrie qui nous intéresse est bien connue, et nous pouvons calculer h_{conv} pour l'air à 25 °C et sous 1 bar à l'aide des coefficients de corrélation. Pour une température de cellule de 50 °C, on trouve $Ra_L = 2577$. D'après [73], nous pouvons en déduire les valeurs de C et n correspondantes et ainsi estimer un coefficient d'échange convectif $h_{conv} = 10.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

Quelle que soit la pression dans l'enceinte, nous pouvons définir un coefficient d'échange radiatif h_{rad} . En considérant la cellule placée dans l'enceinte isotherme d'émissivité égale à 1, le flux radiatif échangé entre la cellule et la paroi s'exprime par :

$$\begin{aligned}
 \Phi_{rad} &= \varepsilon_{cell} \sigma (T_{cell}^4 - T_{enceinte}^4) \\
 &= \varepsilon_{cell} \sigma (T_{cell}^2 - T_{enceinte}^2) (T_{cell}^2 + T_{enceinte}^2) \\
 &= \varepsilon_{cell} \sigma (T_{cell} - T_{enceinte}) (T_{cell} + T_{enceinte}) (T_{cell}^2 + T_{enceinte}^2)
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

Pour T_{cell} et $T_{enceinte}$ fixées, nous pouvons définir un coefficient d'échange radiatif :

$$h_{rad} = \varepsilon_{cell} \sigma (T_{cell} + T_{enceinte}) (T_{cell}^2 + T_{enceinte}^2) \tag{2.9}$$

tel que

$$\Phi_{rad} = h_{rad} (T_{cell} - T_{enceinte}) \tag{2.10}$$

En utilisant l'équation [2.9], nous pouvons estimer le coefficient h_{rad} à $5.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. A pression atmosphérique, h_{rad} est donc du même ordre de grandeur que h_{conv} .

La troisième source d'échanges thermiques provient du transfert de chaleur par conduction dans l'air du fait des collisions entre les molécules dans le gaz. Lorsque la pression diminue, le libre parcours moyen des molécules augmente, ce qui modifie le régime de conduction dans lequel on se trouve. Pour les faibles pressions, le transfert de chaleur par conduction est qualifié de balistique, puisque la molécule se déplacera d'une surface à une autre sans rencontrer d'autre molécule. Sinon, il est qualifié de diffusif. En introduisant le nombre adimensionnel de Knudsen (Kn) défini comme le rapport entre le libre parcours moyen Λ des molécules d'air et une longueur caractéristique du système, il est possible de déterminer le régime de transfert dans lequel on se situe. Pour $Kn \gg 1$, la conduction est balistique, alors que pour $Kn \ll 1$, elle est diffuse. Le libre parcours moyen est inversement proportionnel à la pression, et s'écrit, d'après [11] :

$$\Lambda = \frac{kT}{\pi(2R_0)^2\sqrt{2}P} \quad (2.11)$$

Ou R_0 représente le rayon de la molécule considérée et P la pression dans l'enceinte. Pour notre problème, nous pouvons estimer le nombre Kn pour deux pressions différentes et ainsi identifier le régime de conduction correspondant. Pour des pressions de 10 mbar et 10^{-4} mbar, on trouve des nombres de Knudsen proches de 10^{-3} et 100 respectivement. La transition entre le régime de conduction diffuse et la conduction balistique s'effectue donc dans la gamme de pression d'étude, justifiant la rupture de pente observée sur la figure [2.16].

Un transfert de chaleur purement radiatif pourrait être obtenu pour des pressions inférieures à 10^{-4} mbar (régime de conduction balistique), ce qui nous permettrait de repousser les limites des températures de cellules atteignables, notamment lors de l'étude du comportement thermique des cellules sous faible concentration. Cependant, malgré la présence de la pompe turbomoléculaire, des micro-fuites empêchent de travailler à de telles pressions.

Le choix de la pression de travail (d'environ 3×10^{-1} mbar) utilisée pour la caractérisation des différents échantillons se justifie par deux arguments. D'une part, nous souhaitons travailler à des pressions où la convection est bien plus faible que les autres modes de transfert thermique. D'autre part, nous observons que pour les pressions inférieures à 10^{-1} mbar, la température de la cellule est fortement affectée par la variation de la pression dans l'enceinte. Ainsi, travailler à une pression de 3×10^{-1} mbar permet de limiter d'éventuelles variations sur la mesure de température de la cellule liées aux fluctuations de la pression dans l'enceinte tout en assurant une prépondérance des échanges radiatifs devant les échanges convectifs.

2.5 Conclusion du chapitre 2

Dans ce chapitre, nous avons présenté un banc de caractérisation innovant permettant d'étudier le comportement thermique et électrique des cellules photovoltaïques. Contrairement aux différents outils de caractérisations thermique et électrique déjà existants, la température de la cellule n'est pas imposée par conduction. L'utilisation d'un porte-échantillon spécialement conçu pour cette application nous permet de mesurer la température d'une cellule sous un éclairage donné et dans un environnement contrôlé. Le travail sous vide assure un bon contact thermique entre le thermocouple et la cellule. L'ajout d'une lentille de Fresnel nous permet de travailler sous différentes concentrations.

Après avoir effectué la calibration des différents systèmes de mesure thermique et électrique, des premières mesures expérimentales nous ont permis de nous assurer de la bonne stabilité et de la bonne reproductibilité des résultats obtenus sur différentes cellules (de 1 cm^2 et 4 cm^2). En contrôlant la pression dans l'enceinte ainsi que la température de la paroi, un équilibre thermique entre la cellule et l'enceinte est observé. La reproductibilité des mesures et des conditions expérimentales nous permet de comparer l'évolution du comportement thermo-électrique de cellules de propriétés différentes.

Grâce à ce banc de caractérisation original, nous pourrions notamment étudier le comportement thermique des cellules PV sous faible et moyenne concentration, entre 170 et $4000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Il a été montré que des conditions extrêmes pouvaient être simulées, et ce notamment en contrôlant la température de la paroi ou en faisant varier la pression dans l'enceinte. Les différents échanges thermiques présents à la pression d'étude ont également été listés. Un régime d'échange thermique purement radiatif pourrait être obtenu pour des pressions inférieures à 10^{-4} mbar.

Chapitre 3

Fabrication et caractérisation de cellules photovoltaïques à architecture PERT

Ce troisième chapitre est dédié à la réalisation ainsi qu'à la caractérisation électrique de cellules photovoltaïques. Souhaitant étudier l'influence du type de dopage (n ou p) ainsi que de la résistivité du substrat sur le comportement thermo-électrique des cellules photovoltaïques, nous avons fabriqué des cellules à architectures PERT sur différents substrats de propriétés connues.

Dans la première section de ce chapitre, le choix de l'architecture est justifié. Le procédé de fabrication utilisé pour la réalisation de cellules sur des substrats de type p y est également détaillé. Du fait de l'influence de la structuration de la face avant sur le refroidissement radiatif des cellules, nous nous intéresserons particulièrement dans un second temps à la texturation de surface par voie chimique à l'aide d'une solution de TMAH. L'influence du type de dopage et de la résistivité du substrat sur le procédé de texturation y est étudiée. Finalement, nous présenterons les différentes caractéristiques électriques à 25 °C des cellules fabriquées selon le procédé présenté dans ce chapitre.

3.1 Fabrication de cellules photovoltaïques à architecture PERT

3.1.1 Architectures étudiées

L'architecture PERT (*Passivated Emitter Rear Totally diffused*) présentée sur la figure 3.1 a été dans un premier temps introduite dans le but d'améliorer le FF en réduisant les pertes résistives en face arrière, et ce notamment pour les substrats fortement dopés [74].

La cellule PERT combine les avantages des cellules Al-BSF et PERC. La présence d'une zone fortement dopée en face arrière, appelée *Back Surface Field* (BSF), permet de repousser les porteurs de charge minoritaires en les confinant dans l'absorbeur, réduisant ainsi les recombinaisons surfaciques. Le réflecteur en face arrière est constitué d'une ou plusieurs couches diélectriques. Pour le photovoltaïque, les matériaux les plus couramment utilisés sont

le nitrure de silicium hydrogéné ($\text{SiN}_x\text{:H}$), l'oxyde de silicium (SiO_2) ou encore l'alumine (Al_2O_3). L'utilité d'une telle couche est triple :

- Les liaisons pendantes à la surface du silicium sont passivées par la présence des diélectriques (liaisons Si-N, SiH, Si-O, ...),
- La présence de charges dans l'oxyde peuvent induire une passivation par effet de champ,
- Du fait de l'indice optique de ces couches, l'interface silicium/diélectrique/métal améliore grandement la qualité du réflecteur en face arrière.

Le procédé de fabrication des PERT est relativement proche des cellules Al-BSF. La solubilité limite de l'aluminium dans le silicium [75] ne permet pas d'obtenir des zones fortement dopées. Un BSF p+ (n+) obtenu par implantation ionique ou par diffusion thermique du bore (phosphore) permet de contourner ce problème et d'améliorer ainsi son efficacité. De plus, le BSF permet de limiter les pertes résistives dues au mouvement latéral des porteurs en face arrière, très présentes dans les PERC [76]. Dans la littérature, les cellules PERT sont généralement réalisées sur des substrats de type n [77, 78, 79]. Ce choix est principalement justifié par les raisons suivantes :

- L'utilisation d'un substrat de type p entraîne la formation de complexes bore-oxygène [80], responsables d'une dégradation des performances électriques des cellules lorsqu'elles sont placées sous éclairage,
- Du fait des différences de solubilités limites entre le bore et le phosphore dans le silicium, le budget thermique (température et temps de diffusion) requis pour l'obtention d'un BSF au bore est supérieur à celui nécessaire pour l'obtention d'un BSF au phosphore.

Par conséquent, afin de minimiser le budget thermique total utilisé dans le procédé de fabrication et d'éviter la formation de complexes bore-oxygène, il est préférable de réaliser les structures PERT sur un substrat de type n.

Si l'on s'intéresse à la dégradation thermique des cellules, les n-PERT possèdent de plus faibles coefficients de dégradation en température [27] que les cellules Al-BSF et PERC. Néanmoins, son étude ne permet pas de comparaison direct entre deux cellules de même architecture mais ayant un dopage différent. L'influence du type de dopage sur le comportement thermique des cellules étant un des points clefs de notre étude, des PERT seront fabriquées sur des substrats de type n et p en suivant le procédé de fabrication décrit dans la section suivante.

Cette étude prend également toute son importance lors du travail sous concentration. Dans le chapitre 1, nous avons vu que le $\beta_{V_{oc}}$ des cellules sur un substrat de type n était, en théorie, plus faible que pour les cellules de type p, que ce soit pour les faibles ou les fortes concentrations. Cette observation justifierait l'utilisation préférentielle, d'un point de vue thermique, de cellules fabriquées sur un substrat de type n ; ces dernières étant moins

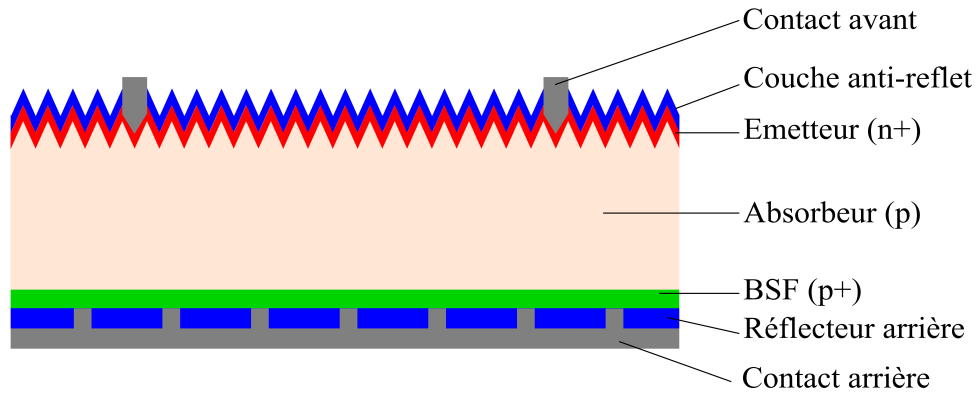


FIGURE 3.1 – Cellule p-PERT.

affectées par l'élévation de la température de la cellule.

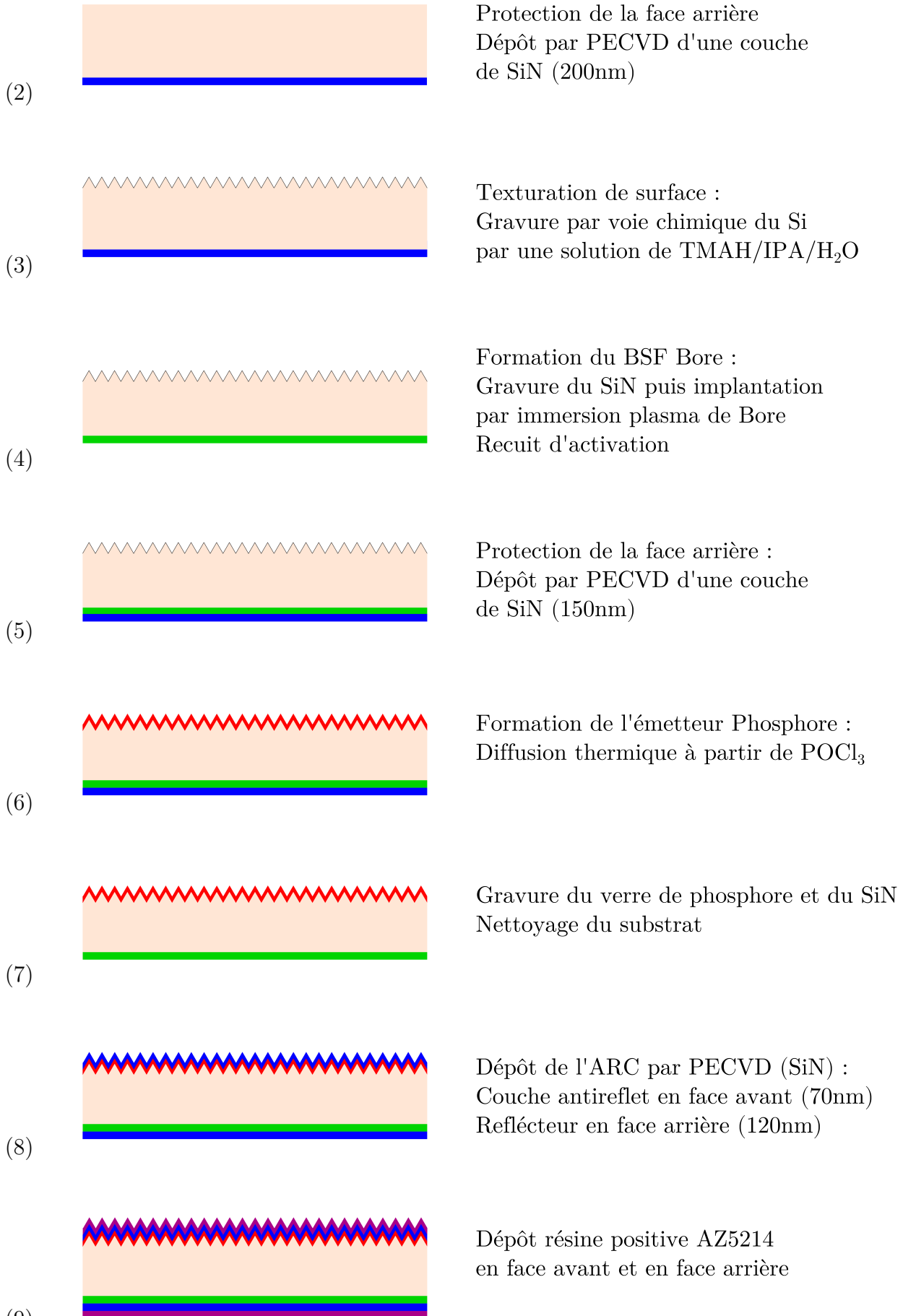
La fabrication de cellules PERT est guidée par le souhait de comparer les comportements thermique et électrique de cellules d'architecture et de propriétés différentes (dopage de la base,...). De cellules PERC et Al-BSF disponibles au laboratoire ont été utilisées pour cette étude.

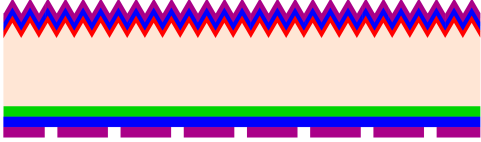
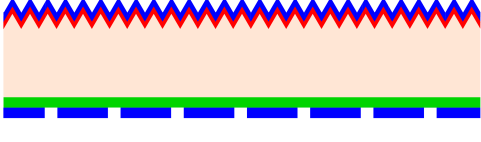
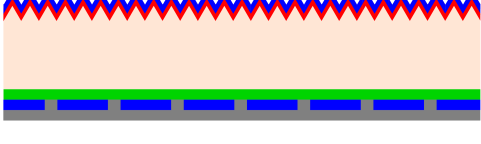
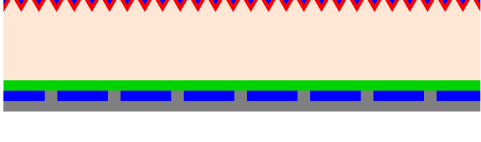

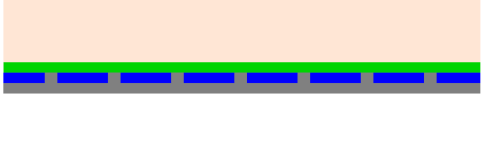
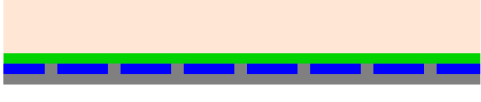
Pour des applications sous concentration, les cellules à contacts arrière interdigités (IBC - *Interdigitated Back Contact*) sont généralement préférées aux architectures plus « classiques » [52]. Cependant, l'architecture des IBC étant très différentes des PERC et des Al-BSF (absence de métallisation en face avant, émetteur et BSF en face arrière,...), nous avons choisi de fabriquer des PERT, ces dernières possédant une architecture relativement proche des PERC et des Al-BSF. Il nous paraît important de souligner que même si l'un des principaux facteurs limitant l'utilisation des architectures standards sous concentration est la résistance série, ces dernières peuvent néanmoins être utilisées sous faible concentration en adaptant la métallisation en face avant [81].

3.1.2 Procédé de fabrication

Le procédé de fabrication de cellules PERT sur substrat de type p est présenté dans cette section. Il a été réalisé sur des substrats FZ et CZ de type p, d'une épaisseur de 275 μm et des résistivités variant entre 0.5 $\Omega \cdot \text{cm}$ et 5.5 $\Omega \cdot \text{cm}$.

- | | | |
|-----|--|---|
| (1) | <p>p-Si 275 μm</p> | <p>Nettoyage substrat par une solution de HF(5%) / H₂O₂:H₂SO₄ (1:1) / HF (5%)</p> |
|-----|--|---|



- (10)  Insolation de la résine en face arrière pour la création des motifs
Développement de la résine
- (11)  Ouverture du SiN en face arrière par une solution de BOE
Retrait de la résine et nettoyage substrat
- (12)  Prise de contact en face arrière :
Dépôt par évaporation d'une couche d'aluminium ($\sim 2\mu\text{m}$)
- (13)  Dépôt résine négative nlof 2070 en face avant
- (14)  Insolation de la face avant : motifs pour les contacts avant
Ouverture du SiN (BOE)
- (15)  Prise de contact en face avant :
Dépôt par évaporation de Ti(50nm)/Pd(50nm)/Ag(1000nm)
- (16)  Lift off
Recuit des contacts 250°C , 1min

Les étapes (1) à (3) sont consacrées à la structuration de la face avant. Après avoir nettoyé

le substrat (gravure de l'oxyde natif par une solution de HF 5 %, oxydation chimique de la surface par une solution Piranha, gravure de l'oxyde formé), un dépôt de 200 nm de nitrure de silicium (SiN) est réalisé par PECVD en face arrière. Ce dépôt va servir de masque lors de la texturation de la face avant grâce à une solution de TMAH. L'étape de texturation de surface est détaillée dans la section suivante.

Après avoir retiré le masque de nitrure, le BSF dopé bore est formé par implantation ionique sous immersion plasma suivie d'un recuit d'activation des dopants (1050 °C pendant 10 min). Cette technique d'implantation a l'avantage d'être bien moins coûteuse que l'implantation par faisceau d'ions, et permet d'implanter simultanément un grand nombre d'échantillons [82]. L'étape suivante permet de protéger la face implantée lors de l'étape de diffusion thermique du phosphore pour la formation de l'émetteur (réalisée à 850 °C).

Le dépôt des couches antireflet par PECVD (*Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition*) est réalisé lors de l'étape (8). En face avant, une couche de SiN d'une épaisseur de 70 nm permet d'optimiser la transmission des photons en face avant et de maximiser par conséquent le J_{sc} [83]. En face arrière, un dépôt de SiN de 120 nm possède deux avantages : une bonne passivation de surface [84] et un bon réflecteur en face arrière [85].

Les étapes (9) à (12) ont pour objectif la prise de contact en face arrière. Pour la réalisation des contacts localisés en face arrière de la cellule PERT, nous avons donc choisi un réseau périodique carré de trous ayant un diamètre de 200 μm , espacés de 1000 μm [86]. La gravure localisée du SiN en face arrière est réalisée à l'aide d'une solution de HF tamponnée (BOE, *Buffer Oxide Etch solution*) chauffée à 30 °C, après avoir défini le motif par photolithographie UV. Une fois la gravure effectuée, la résine est retirée et l'aluminium est déposé par évaporation sur toute la face arrière.

Pour finir, les étapes (13) à (16) consistent à créer le contact en face avant. Après étalement d'une résine négative et définition du motif de la face avant par photolithographie UV, la résine est développée. Une fois le nitrure gravé localement, un procédé *de lift off* est appliqué : la résine est dissoute après le dépôt des différentes couches de métal par évaporation sous vide. Pour cette étape, nous nous sommes orientés vers une résine négative nlof 2070 d'une épaisseur de 7 μm principalement pour deux raisons :

- La résine déposée doit être suffisamment épaisse (environ trois fois supérieure à l'épaisseur totale de la couche métallique),
- Le lift off est facilité grâce à l'allure des flancs inversés (profil en casquette) après développement de la résine insolée.

Le schéma détaillé du *lift off* est présenté figure 3.2.

La surface de la métallisation en face avant a été optimisée auparavant de sorte à obtenir le meilleur compromis entre une faible résistance série et les pertes par ombrage. Pour finir, un recuit à 250 °C pendant 1 min est appliqué dans le but d'améliorer la qualité des contacts

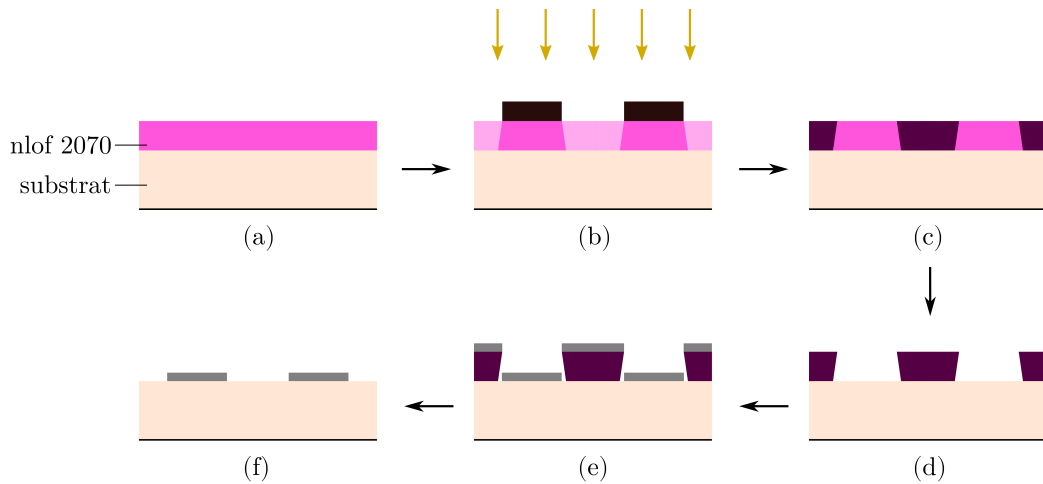


FIGURE 3.2 – Procédé lift off réalisé à l’aide de la résine négative nlof 2070 (a) étalement de la résine et durcissement (b) insolation à travers un masque (c) recuit de la résine insolée (d) développement de la résine (e) dépôt du métal (f) *lift off*.

électriques.

3.1.3 Présentation des différents lots de cellules

Les propriétés et les architectures des différentes cellules utilisées dans cette thèse sont présentées dans le tableau 3.2. Les cellules PERT fabriquées selon le procédé présenté dans la section 3.1.2 ont été réalisées sur des substrats de type n et p de différentes résistivités (0.5 , 1.5 et $5.5 \Omega \cdot \text{cm}$ pour type p et $4.5 \Omega \cdot \text{cm}$ pour type n). En outre, pour étudier l’influence de l’architecture des cellules sur les propriétés thermiques, nous avons disposé de cellules Al-BSF et PERC provenant de travaux d’une thèse précédente ainsi que d’un laboratoire partenaire. Les dopages des différents lots de cellules utilisées dans cette thèse ont été mesurés par méthode C-V (*Capacité-Tension*).

Les principales différences entre les cellules proviennent :

- De la présence d’un BSF pleine plaque ou localisé et du dopant (diffusion aluminium ou bore),
- Du type de dopage du substrat ainsi que de sa résistivité,
- L’utilisation de silicium mono ou multi-cristallin,
- De la qualité du substrat : tirage *Czochralski* (CZ) ou *Float zone* (FZ),
- De la nature du réflecteur en face arrière (SiN ou SiO_2/SiN).

Dans cette thèse, les échantillons seront nommés suivant le type de dopage (n ou p), l’architecture et la résistivité du substrat (donnée en $\Omega \cdot \text{cm}$). Par exemple, une cellule PERT fabriquée sur un substrat de type p et de résistivité $1.5 \Omega \cdot \text{cm}$ sera présentée sous l’acronyme

Architecture	Substrat	Résistivité ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Dopage du substrat (cm^{-3})
PERT	CZ p	0.5	$3.3 \cdot 10^{16}$
	FZ p	1.5	$9.7 \cdot 10^{15}$
	CZ p	5.5	$2.5 \cdot 10^{15}$
	CZ p	6.8	$2.04 \cdot 10^{15}$
	CZ n	3.5	$1.3 \cdot 10^{15}$
PERC	CZ p	1	$1.5 \cdot 10^{16}$
	FZ p	5.3	$2.6 \cdot 10^{15}$
	FZ p	5.5	$2.5 \cdot 10^{15}$
	FZ p	6.1	$2.2 \cdot 10^{15}$
Al-BSF	mc p	1	$1.5 \cdot 10^{16}$
	FZ p	1.9	$7.6 \cdot 10^{15}$
	FZ p	2.2	$6.5 \cdot 10^{15}$

TABLE 3.2 – Présentation des différents lots de cellules étudiées.

pPERT1.5. Pour qualifier l'effet de la structuration de surface sur le refroidissement radiatif, un lot de cellules sans texturation a été fabriqué.

3.2 Texturation de surface par voie chimique

La texturation de surface est la première étape du procédé de fabrication présentée dans la section 3.1.2. Elle a pour objectif de réduire les pertes optiques par réflexion à l'interface air/silicium et d'augmenter ainsi le courant de court-circuit. Pour une orientation de substrat donnée, la forme de la structuration de surface et son efficacité seront différentes selon la méthode de gravure utilisée [87]. La texturation de surface par voie humide reste cependant la plus utilisée dans l'industrie du photovoltaïque de par son efficacité et son bas coût.

Outre les bénéfices que la texturation de surface apporte sur les performances électriques des cellules photovoltaïques, cette dernière permet d'augmenter significativement le coefficient d'émission thermique et donc le refroidissement radiatif des cellules [37, 35]. Le refroidissement radiatif étant un point clef de notre étude, le procédé de texturation par voie chimique a été optimisé dans cette thèse.

3.2.1 Choix de la méthode de texturation par voie chimique

On trouve dans la littérature différentes méthodes de gravure anisotropiques du silicium par voie chimique. Pour le silicium, des solutions alcalines à base d'hydroxyde de potassium (KOH) [88] ou d'hydroxyde de sodium (NaOH) sont couramment utilisées. Ces solutions apportent cependant des contaminations au substrat (ions K^+ et Na^+) qui sont source de dégradation de la durée de vie des porteurs minoritaires [89]. L'utilisation d'une solution à base de *Tetramethylammonium hydroxyde* (TMAH, $(CH_3)_4NOH$) constitue une excellente alternative à ces solutions alcalines [90, 91]. Du fait de la différence de sélectivité entre les plans $\langle 111 \rangle$ et $\langle 100 \rangle$ [92, 93], la gravure chimique révèle les plans $\langle 111 \rangle$, qui se traduit par la formation de structures pyramidales de différentes tailles (gravure anisotrope). La faible vitesse de gravure du nitrure de silicium par le TMAH [94] permet de l'utiliser comme masque lors de l'attaque chimique.

On trouve de nombreux articles dans la littérature portant sur le procédé de texturation à l'aide d'une solution de TMAH sur des substrats $\langle 100 \rangle$. Les cinétiques de gravure dépendent de nombreux paramètres comme la concentration volumique en TMAH, la température de la solution, le temps de gravure, la présence ou non d'un surfactant [94, 91, 95].

Selon Iencinella [96], l'uniformité de la texturation dépend de la présence de silicium déjà gravé dans la solution : l'utilisation répétée d'une solution favoriserait l'uniformité de la gravure. Papet quant à lui propose une autre approche pour améliorer la reproductibilité de

la texturation : un surfactant, l'IPA (IsoPropAnol), est ajouté et la solution est agitée lors de la gravure [97].

L'origine de la formation des pyramides aléatoires sur le silicium est bien détaillée dans les travaux de P. Papet [89] : la formation des bulles d'hydrogène à la surface de l'échantillon entraîne un pseudo masquage favorisant la formation anisotropique de pyramides. De trop grosses bulles inhibent cependant l'homogénéité de la gravure, d'où l'intérêt de l'ajout d'un surfactant limitant l'adhérence des bulles d'hydrogène à la surface du silicium.

Les travaux de Papet ont permis d'atteindre des réflectances effectives proches de celles obtenues par un procédé de texturation classique par KOH. Les conditions expérimentales sont détaillées dans le paragraphe suivant.

3.2.2 Méthode expérimentale et premiers résultats

Nous avons choisi de suivre le procédé de texturation développé dans la thèse de Pierre Papet [89]. Dans un premier temps, une solution de TMAH dilué dans de l'eau déionisée est chauffée à l'aide d'un bain marie. Une fois la solution à la température désirée, l'échantillon est introduit dans le bûcher et le surfactant (IPA) y est ajouté. La gravure est initiée par agitation ultrasonique afin d'assurer une bonne homogénéité de la texturation de surface, puis elle se poursuit en l'absence d'agitation.

Dans ce procédé, les conditions de gravure ont été optimisées afin d'obtenir des réflectances effectives proches de celles obtenues par une solution de KOH. Dans nos travaux, quelques paramètres ont été légèrement modifiés. Les concentrations des différents éléments ont été modifiées et le temps d'activation de la gravure sous agitation a été diminué :

- Concentration des différents éléments dans la solution : TMAH (2.1 %) et IPA (6.4 %),
- Température de la solution : 80 °C,
- Temps de gravure : 10 min sous agitation ultrasonique (US, à 80 kHz) puis 10 min sans agitation.

La température d'ébullition de l'IPA (82.3 °C) étant proche de la température de la solution, il est primordial de couvrir le bûcher. Si la concentration en TMAH est trop faible ou si le temps de gravure est trop court, une sous-gravure peut être observée. Dans les bonnes conditions de gravure, il en résulte la formation de pyramides aléatoires de quelques micromètres de hauteur. L'allure de la structuration de surface est présentée sur la figure 3.3. La taille des pyramides peut être modifiée en faisant varier le temps de gravure. Cependant, un temps de gravure trop long diminue la qualité de la texturation de surface, notamment à cause de l'apparition de cratères entre les pyramides [98].

La mesure de la réflectance effective nous renseigne sur l'efficacité de la texturation de surface et de la couche antireflet. L'évolution de la réflectance avec la longueur d'onde, notée

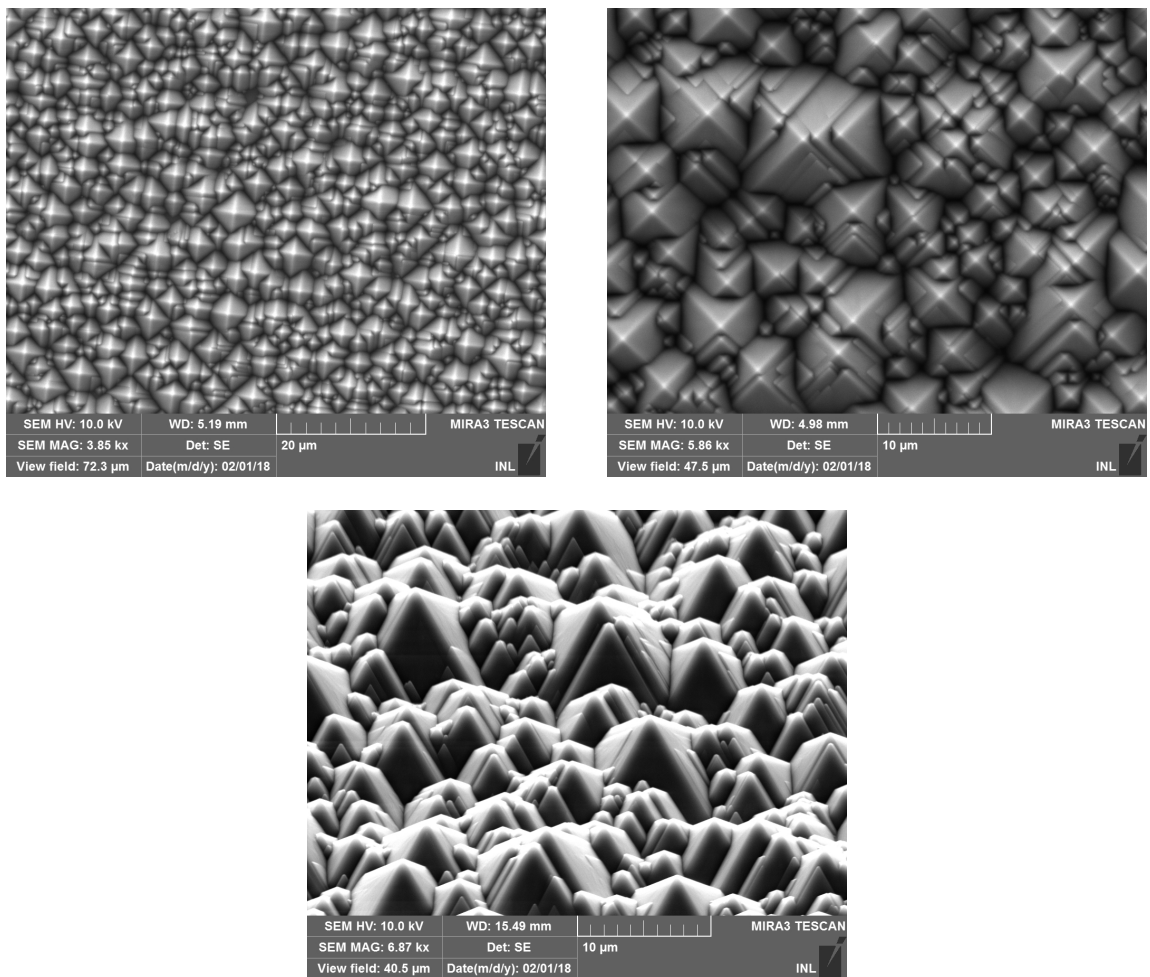


FIGURE 3.3 – Images MEB de la structuration de surface par gravure TMAH en vue de dessus et en vue inclinée.

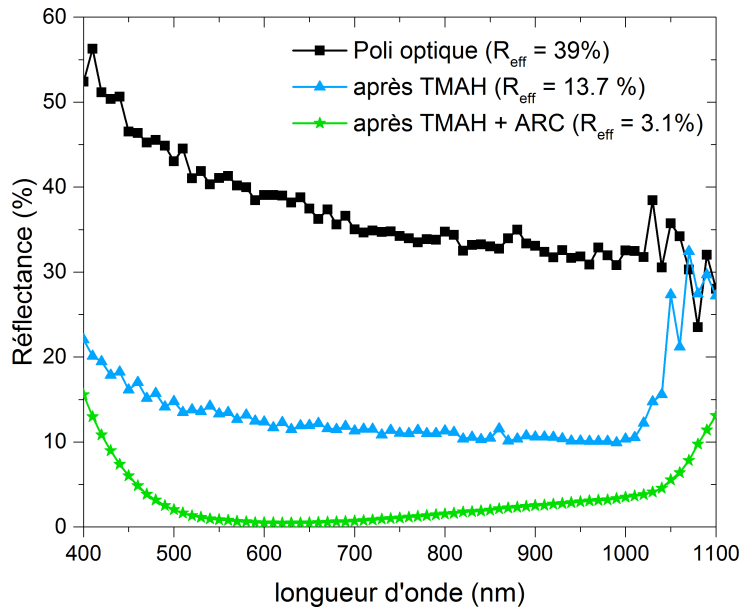


FIGURE 3.4 – Mesure de la réflectance pour un substrat poli optique et un substrat (de type p et de résistivité égale à $1.5 \Omega \cdot \text{cm}$) texturé, avec ou sans couche anti-reflet.

$R(\lambda)$, est mesurée à l'aide d'une sphère intégrante. L'échantillon, tilté à 7° , reçoit un faisceau monochromatique polarisé en incidence normale provenant d'une lampe Xénon. Le signal réfléchi est récupéré à l'aide d'un photodétecteur (silicium) placé sur la sphère elle-même. Le balayage en longueur d'onde permet de mesurer la réflectance sur la gamme $[\lambda_{inf} = 400 \text{ nm}, \lambda_{sup} = 1100 \text{ nm}]$ par comparaison avec une référence calibrée.

Afin de comparer les résultats obtenus pour différentes structures (avec ou sans texturation de surface, avec ou sans couche antireflet), nous introduisons la réflectance effective (R_{eff}) définie comme la réflectance pondérée par l'irradiance spectrale ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$) du spectre solaire AM1.5G ($I_{solaire}(\lambda)$), et normalisée par l'irradiance totale du spectre sur l'intervalle considéré $[\lambda_{inf}, \lambda_{sup}]$:

$$R_{eff} = \frac{\int_{\lambda_{inf}}^{\lambda_{sup}} R(\lambda) I_{solaire}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{inf}}^{\lambda_{sup}} I_{solaire}(\lambda) d\lambda} \quad (3.1)$$

Afin d'observer l'influence de la texturation de surface, nous comparons la réflectance effective de deux échantillons : un substrat de silicium poli optique et un substrat de silicium structuré, tel que celui présenté sur la figure 3.3. L'influence de la couche antireflet est également étudiée. La structuration de surface diminue fortement la réflectance effective, comme en témoigne la figure 3.4. Le chemin optique étant plus important, le coefficient de transmission à l'interface air/silicium augmente drastiquement.

Les résultats reportés sur la figure 3.4 ont été obtenus pour un substrat de type p ayant une résistivité de $1.5 \Omega \cdot \text{cm}$. Une fois la face avant texturée, l'ajout d'une couche antireflet (ARC) permet de diminuer drastiquement la réflectance. Avec l'ARC, la réflectance effective passe de 13.7 % à 3.1 %. Les paramètres de dépôt utilisés pour l'ARC ont été optimisés lors de différentes thèses [83, 86]. Une couche de SiN d'une épaisseur de 70 nm et d'un indice proche de 2.08 (à 633 nm) est déposée par PECVD, correspondant à un minimum de réflectance à une longueur d'onde proche de 600 nm (longueur d'onde correspondant au maximum de photons dans le spectre AM1.5G). De plus, lors de ce dépôt, l'hydrogène présent dans le nitrure de silicium diffuse vers l'interface favorisant la passivation de surface (passivation des liaisons pendantes).

3.2.3 Texturation de surface : influence du type de dopage et de la résistivité

D'après la littérature, une zone fortement dopée au bore peut être utilisée en tant que barrière pour la gravure chimique du silicium par une solution de TMAH/IPA [94] : la cinétique de gravure varie avec la résistivité du substrat. Plus le dopage de la base est élevé, plus la vitesse de gravure est faible [99, 100]. Le procédé de gravure présenté précédemment a été optimisé pour des substrats ayant un dopage classique pour l'industrie du photovoltaïque ; c'est à dire une résistivité proche de $1.5 \Omega \cdot \text{cm}$. Il est intéressant de se pencher sur l'évolution de ce procédé pour des substrats de résistivités différentes. Les premiers essais réalisés sur des substrats plus fortement dopés ($\rho \sim 0.5 \Omega \cdot \text{cm}$) ont mis en avant une sous-gravure pour un temps de gravure de 10 min sous ultrasons suivi de 10 min sans agitation. Localement, des zones non gravées sont observées, induisant une augmentation de la réflectance effective. En rallongeant le temps de gravure sans ultrasons de quelques minutes, une meilleure homogénéité ainsi qu'une meilleure réflectance effective sont observées. Pour les échantillons plus faiblement dopés, le temps de gravure sans ultrasons est raccourci de quelques minutes afin d'éviter une sur-gravure.

Le type de dopage influe également sur la cinétique de gravure. Dans la littérature [90, 101], il est reporté que la vitesse de gravure sur des substrats de type n est un peu plus importante que sur des substrats de type p à résistivité équivalente, du fait d'une plus faible concentration de dopants. Le temps de gravure est donc légèrement plus court pour les substrats de type n.

Les différents échantillons utilisés ont été texturés en utilisant la même solution. D'après Incinella [96], la solution de texturation peut être réutilisée de nombreuses fois tout en assurant d'excellentes valeurs de réflectances effectives. La réutilisation de la solution possède un deuxième avantage : la présence de silicium dans la solution, provenant des précédentes

gravures, assure une meilleure homogénéité de la texturation de surface [96]. Les substrats de résistivité et de type de dopage différent ont été texturés les uns après les autres dans la même solution, en ajustant le temps de gravure selon les propriétés du substrat considéré. Un morceau de silicium a été introduit dans la solution avant d’amorcer la première gravure. Tous les échantillons possèdent une réflectance effective proche de la valeur minimale reportée sur la figure 1.4 (inférieure à 14 %) et ce en ayant utilisé une unique solution pour l’ensemble des échantillons.

3.3 Caractérisation des cellules fabriquées

Dans cette section, nous présentons les caractéristiques électriques des cellules réalisées grâce au procédé de fabrication présenté précédemment. Dans un premier temps, les performances électriques des cellules sont présentées. Dans un second temps, nous tenterons de déterminer l’origine des différentes pertes responsables des rendements mesurés.

3.3.1 Mesure des grandeurs électriques des cellules

Les caractéristiques électriques des cellules PERT fabriquées ont été obtenues en utilisant un simulateur Sinton FCT-350 (mesure sous un éclairage de type flash). Ici, la méthode de mesure est bien différente de celle sur simulateur continu présentée dans le deuxième chapitre. Pour une tension de polarisation donnée, la cellule est soumise à un flash dont l’intensité varie avec le temps (entre 2 et 0.5 soleils). Lorsque l’intensité du flash atteint 1 soleil (mesurée à l’aide d’une cellule de référence calibrée), la valeur du courant délivré par la cellule est relevée. Simultanément, une mesure Suns- V_{oc} [102] est effectuée. Cette mesure permet d’extraire le *pseudo facteur de forme* (pFF) de la cellule, qui correspond au FF en l’absence de pertes résistives. Le pFF atteste donc de la qualité de la jonction en révélant notamment la présence de shunts dans la cellule. Outre la mesure du pFF , l’utilisation de la mesure flash possède un deuxième avantage : la faible durée du flash pour chaque point de mesure (de quelques ms) permet d’assurer un contrôle efficace de la température de la cellule. Les différentes caractéristiques photovoltaïques obtenues grâce au simulateur Sinton FCT-350 (J_{sc} , V_{oc} , FF , pFF et rendement η) sont présentées figure 3.5. Les grandeurs présentées ont été mesurées pour une température de cellule de 25 °C.

L’analyse de ces caractéristiques montre que les cellules sur substrat de type p possèdent des J_{sc} variant entre 30.4 et 34.7 mA cm⁻². Sur un même lot, la disparité des valeurs de J_{sc} peut potentiellement provenir :

- d’une inhomogénéité de la texturation de surface (variation de la taille et de la densité des pyramides selon la localisation sur la plaquette),

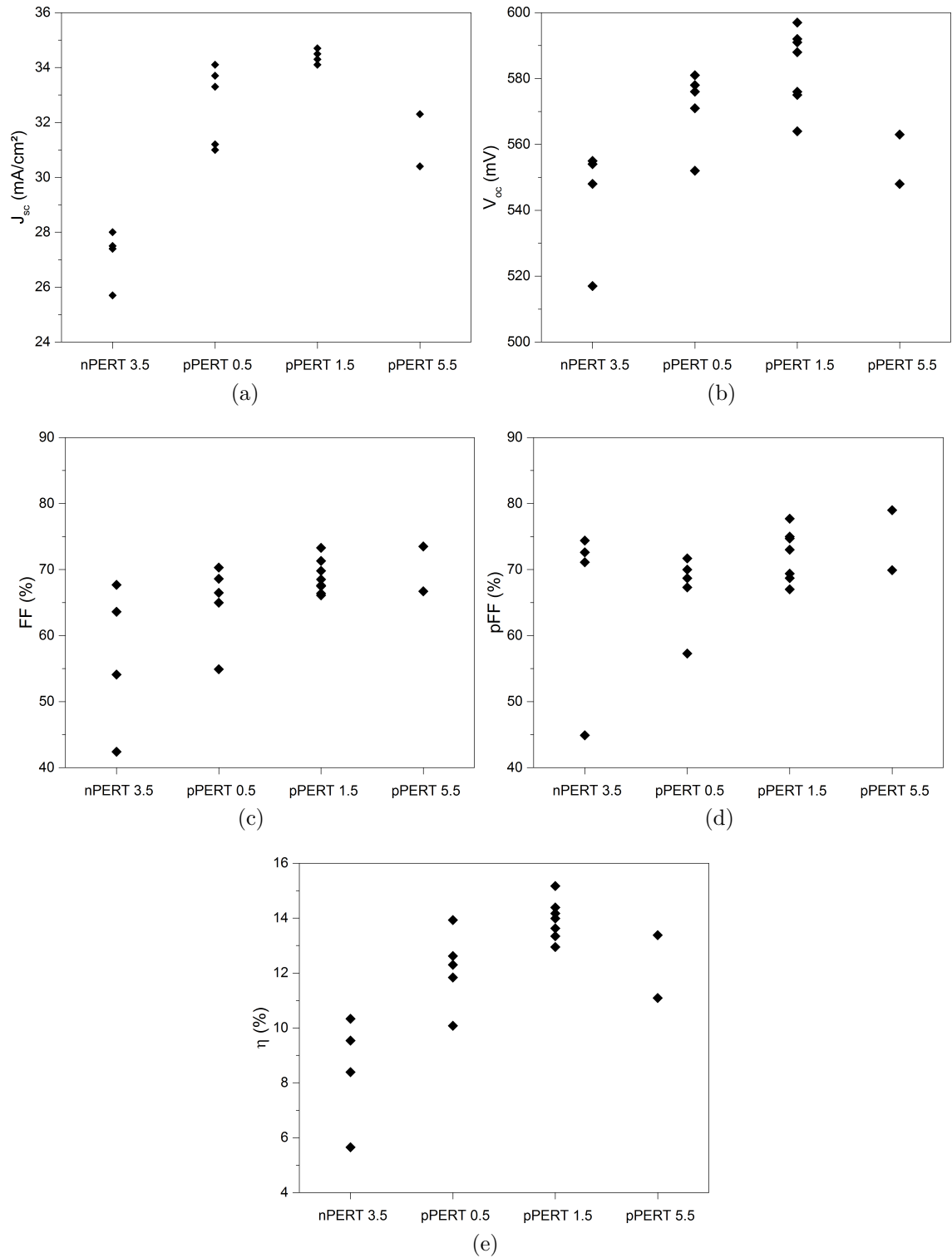


FIGURE 3.5 – Caractéristiques électriques des cellules PERT (a) J_{sc} (b) V_{oc} (c) FF (d) pFF (e) rendement η .

— d'une variation spatiale de l'épaisseur de la couche antireflet lors du dépôt par PECVD.

On observe également que les échantillons réalisés sur des substrats de type n possèdent des J_{sc} bien plus faibles que les trois autres lots. L'origine de ces faibles valeurs sera expliquée grâce à la mesure de la réponse spectrale de la cellule.

Les meilleurs V_{oc} sont obtenus sur les substrats ayant une résistivité de $1.5 \Omega \cdot \text{cm}$. Le V_{oc} dépend principalement du dopage de la base, de la qualité du substrat et de la qualité de la passivation de surface. Les substrats obtenus par tirage FZ possèdent des durées de vies volumiques bien plus importantes que les substrats obtenus par tirage Cz [103]. Du fait d'un dopage de base plus faible, les cellules pPERT 5.5 possèdent de plus faibles V_{oc} . Les nPERT possédant des J_{sc} plus faibles que les pPERT (en moyenne 27 mA cm^{-2}), nous observons à dopage équivalent des V_{oc} plus faibles pour les nPERT. D'un point de vue général, les faibles valeurs de V_{oc} observées par rapport à la littérature peuvent être assimilées à la qualité de la passivation de surface, et ce notamment lors de la prise de contact en face avant, lors du procédé *lift off* ou lors des différents nettoyages chimiques. De plus, le travail sur des cellules de petite taille est un désavantage sur le V_{oc} du fait des effets de bords [72].

Les valeurs de FF et de pFF sont relativement proches : il nous est alors possible d'éliminer les pertes résistives comme source principale des faibles valeurs de FF observées. Cette analyse est validée par l'utilisation de la méthode TLM (*Transmission Line Measurement*) [104, 86], qui nous a permis de mesurer la résistivité de contact en face avant ρ_c . Pour les pPERT1.5, on trouve d'après les mesures TLM $\rho_c = 0.012 \Omega \text{ cm}^2$; ce qui est en accord avec les résultats présentés dans la littérature [105, 106]. La faible différence entre FF et pFF serait liée au recuit final à 250°C pendant 1 min qui a amélioré la qualité du contact entre le métal et le semiconducteur. Aussi, les faibles valeurs de FF mesurées seraient probablement dues à la présence de shunts.

Pour finir, les meilleures cellules possèdent des rendements de 10.3% pour nPERT3.5, 13.9% pour pPERT0.5 15.2% pour pPERT1.5 et 13.4% pour pPERT5.5. Afin d'élargir notre d'étude, d'autres cellules disponibles au laboratoire ayant des caractéristiques électriques proches de celles présentées pour les pPERT, ont été analysées. Leurs caractéristiques électriques seront données dans le chapitre suivant, consacré à la comparaison des comportements thermique et électrique des différents types de cellules .

Pour mieux identifier l'origine des faibles performances observées, et notamment celles sur les cellules nPERT, nous avons eu recours à d'autres méthodes de caractérisation, et plus particulièrement à la mesure de la réponse spectrale des cellules.

3.3.2 Réponse spectrale

3.3.2.1 Définitions et principe de la mesure

La mesure de la réponse spectrale permet de mieux appréhender l'origine des pertes dans la cellule photovoltaïque. Un faisceau monochromatique est envoyé sur la surface de la cellule. Les photons étant transmis par la face avant sont absorbés dans le silicium et génèrent des paires électron-trou. On introduit alors deux notions :

- $EQE(\lambda)$: le rendement quantique externe qui s'exprime par le rapport entre le nombre de porteurs collectés sur le nombre de photons incidents,
- $IQE(\lambda)$: le rendement quantique interne, défini comme le rapport entre le nombre de porteurs collectés sur le nombre de photons transmis par la face avant.

L'IQE permet de s'affranchir des réflexions en face avant et s'exprime par la relation :

$$IQE(\lambda) = \frac{EQE(\lambda)}{1 - R(\lambda)} \quad (3.2)$$

Le rendement quantique interne renseigne sur la qualité de l'absorption et de la collecte des photons par la cellule. Les photons de faibles longueurs d'onde sont absorbés proche de la face avant alors que les photons de fortes longueurs d'onde doivent parcourir de plus grandes distances avant d'être absorbés. Les photons absorbés dans le métal sont inclus dans la définition de l'IQE et tendent à en diminuer la valeur dans l'IR. Idéalement, pour une absorption totale, l'IQE vaut 1 quelle que soit la longueur d'onde. La réponse IQE permet donc de distinguer les comportements de la face avant et de la face arrière.

L'interprétation de l'IQE est multiple. La réponse spectrale de la cellule dans le bleu est fortement influencée par les recombinaisons surfaciques en face avant. Une mauvaise réponse spectrale aux fortes longueurs d'onde indique une mauvaise qualité du réflecteur en face arrière ou d'importantes recombinaisons surfaciques en face arrière. La mesure de l'IQE est obtenue par comparaison avec celle d'une cellule de référence calibrée.

3.3.2.2 Mesure de EQE et des IQE des cellules

Afin d'expliquer l'origine des faibles performances observées sur les nPERT3.5, des mesures d'EQE et d'IQE ont été réalisées sur les différents échantillons produits. Les EQE et IQE ont été mesurés sur la gamme [300 nm, 1100 nm] ; les résultats obtenus sur les nPERT3.5 et pPERT1.5 sont présentés sur la figure 3.6. Les mesures d'EQE obtenues sont comparées à l'EQE d'une cellule d'excellente qualité (cellule de référence), fournie par un partenaire. Afin de constater l'influence des pertes dues à la réflectance, l'EQE de la cellule pPERT1.5 est comparée sur la figure 3.6a à son IQE.

D'après la figure 3.6a, on ne remarque que très peu de différences entre l'EQE et l'IQE

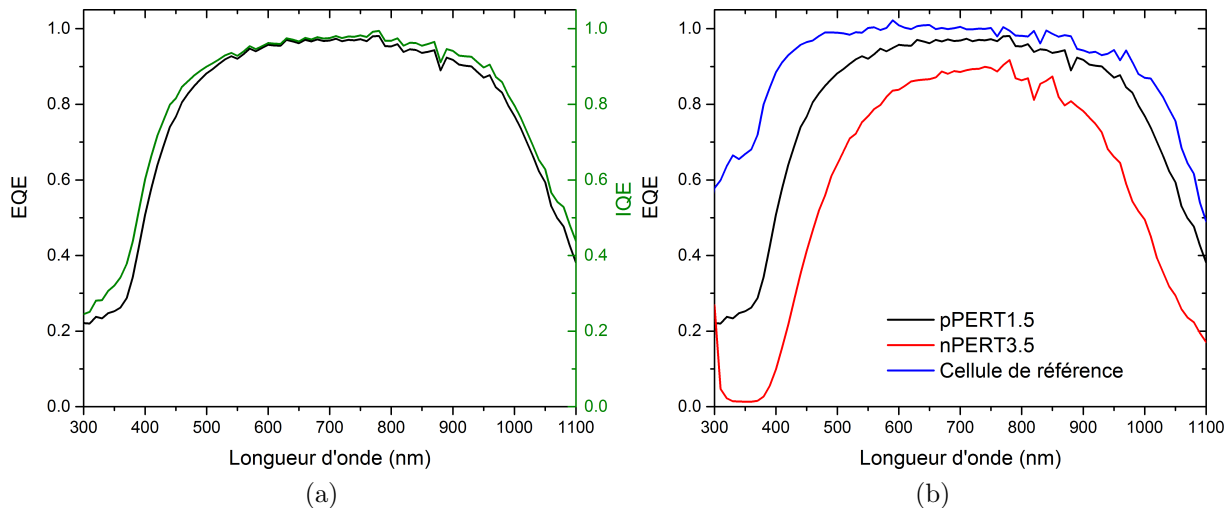


FIGURE 3.6 – (a) Comparaison de l'EQE et de l'IQE en fonction de la longueur d'onde pour pPERT1.5 (b) EQE des meilleures cellules nPERT3.5 et pPERT1.5, comparé à l'EQE d'une cellule de référence.

pour la cellule pPERT1.5 (la même observation est faite sur cellule nPERT3.5). Les seules différences notables résident dans les courtes et les fortes longueurs d'onde. Cette écart s'explique facilement par la réflectance observée sur la figure 3.4. Il est important de noter que les réflectances effectives de l'ensemble des échantillons avec ARC (type n ou p) ne diffèrent pas de celle présentée sur la figure 3.4 pour pPERC1.5.

Plusieurs informations peuvent être tirées de la figure 3.6b. Tout d'abord, la faible réponse des nPERT et pPERT dans les courtes longueurs d'onde comparée à la cellule de référence met en évidence une mauvaise optimisation de l'émetteur. En effet, une jonction trop profonde tend à dégrader l'EQE dans l'ultra-violet (UV), du fait de l'importance des recombinaisons dans l'émetteur. Dans le visible, la qualité du matériau (via la longueur de diffusion) prend toute son importance. Les cellules nPERT ayant été réalisées sur des substrats Cz, la différence de qualité avec les substrats FZ explique les variations observées dans le visible. Nous remarquons également une réponse plus faible pour la cellule pPERT1.5 fabriquée sur un substrat FZ que pour la cellule de référence fabriquée sur un substrat Cz. Cette différence provient très probablement de la présence d'une étape à haute température lors de notre procédé de fabrication (supérieure à 800 °C), entraînant une baisse significative de la longueur de diffusion des porteurs dans le substrat FZ [107].

Enfin, nous observons une bonne réponse spectrale en face arrière pour les pPERT. La dégradation de l'EQE dans l'IR pour les nPERT peut s'expliquer par une mauvaise passivation de la face arrière, très certainement due aux aléas de fabrication.

Les EQE des cellules pPERT0.5 et pPERT5.5 ne sont pas présentées sur la figure 3.6b par soucis de concision, ces derniers ne possédant pas de différences fondamentales avec les

cellules pPERT1.5.

3.4 Conclusion du chapitre 3

Dans ce troisième chapitre, nous nous sommes intéressés à la fabrication de cellules photovoltaïques à architecture PERT. La fabrication de nos échantillons nous a permis d'avoir un contrôle sur les propriétés des cellules (dopage du substrat, type de dopage,...), afin de pouvoir en observer l'influence sur leurs comportements thermo-électriques. Après avoir brièvement rappelé les avantages de cette architecture sur les cellules Al-BSF et PERC, un procédé de fabrication a été décrit. Ce procédé a été réalisé simultanément sur des substrats de type n et de type p, de différentes résistivités.

La structuration de surface réalisée au début du procédé permet de diminuer les pertes optiques par réflexion à l'interface. De plus, la texturation de surface est d'une importance capitale sur le refroidissement radiatif des cellules puisqu'elle permet d'augmenter le coefficient d'émission thermique. Ces deux raisons justifient l'intérêt particulier porté à cette étape du procédé de fabrication. L'utilisation d'une solution à base de TMAH a été préférée à une solution plus classique à base de KOH, notamment grâce à l'absence de pollution apportée lors de l'utilisation du TMAH. Le procédé de texturation a été détaillé dans ce chapitre. L'utilisation d'une unique solution pour la texturation de nombreux échantillons a démontré d'excellents résultats de réflectance, et ce quel que soit le type de dopage ou la résistivité du substrat.

Les écarts de V_{oc} observés entre les différentes cellules PERT fabriquées proviennent des variations de résistivité entre les différents substrats mais aussi à la qualité des substrats. Des faibles valeurs de pFF ont été mesurées, écartant les pertes résistives comme principale source de dégradation. Les faibles performances des cellules nPERT ont pu être expliquées grâce aux EQE. La qualité des émetteurs (bore ou phosphore) a été remise en question à la vue des réponses spectrales dans l'UV. Plus généralement, des problèmes de passivation de surface ont pu être observés. L'émetteur sur type n et le BSF sur type p au bore ont été réalisés simultanément par implantation sous immersion plasma. Cette étape ayant été optimisée pour l'obtention d'un BSF, l'émetteur n'a pas été réalisé dans des conditions optimales.

Le principal objectif de cette étude était de réaliser des cellules à architecture PERT sur des substrats de résistivités et de type de dopage différents. Afin de pouvoir comparer leur comportement thermo-électrique, les cellules doivent posséder des performances électriques similaires. Les cellules nPERT3.5 et pPERT5.5 possèdent des V_{oc} équivalents; ce qui nous permet d'étudier l'influence du type de dopage sur le coefficient de dégradation en température du V_{oc} , $\beta_{V_{oc}}$, pour différentes concentrations du rayonnement solaire. La proximité

des performances électriques de pPERT0.5, pPERT1.5 et pPERT5.5 rend possible l'étude de l'influence de la résistivité du substrat sur le comportement thermo-électrique des cellules.

Chapitre 4

Caractérisation thermo-électrique avancée de cellules photovoltaïques à base de silicium

L'importance de la thermique a été longuement exposée dans les chapitres précédents. Afin d'améliorer le fonctionnement des cellules photovoltaïques en conditions réelles, une optimisation de leurs différentes propriétés par le biais de critères thermiques est nécessaire. Dans ce dernier chapitre, nous nous intéressons à la caractérisation du comportement thermo-électrique des cellules à notre disposition à l'aide du banc expérimental original présenté dans le chapitre 2. Une telle étude nous permet d'approfondir nos connaissances sur le couplage des phénomènes thermiques et électriques intervenant dans le fonctionnement des cellules. L'influence de diverses propriétés telles que le dopage de la base ou la résistivité sur le comportement thermo-électrique y est étudiée.

Nous présentons dans la première section l'évolution de la température de fonctionnement de la cellule avec la tension de polarisation appliquée à ses bornes. Obtenu par simulation, ce résultat constitue un jalon important de notre étude puisqu'il renseigne sur l'erreur commise lors de la détermination de la température de fonctionnement, qui est assimilée à celle mesurée au V_{oc} . L'utilisation du banc de caractérisation original développé dans le chapitre 2 nous permet d'observer expérimentalement cette évolution de la température. Dans un second temps, les divergences entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus par simulation sont exposées. Les influences de la résistivité du substrat ainsi que de la concentration du rayonnement incident sur les performances des cellules sont mises en avant. Finalement, l'influence de la résistivité du substrat ou du type de dopage sur l'évolution du V_{oc} avec la température est étudiée, notamment grâce aux échantillons fabriqués et présentés dans le chapitre 3. De plus, les coefficients $\beta_{V_{oc}}$ de ces cellules sont comparés pour différents éclairagements.

4.1 Évolution de la température de fonctionnement avec la tension de polarisation

4.1.1 Objectif et principe de la mesure

Les simulations présentées dans le premier chapitre ont mis en avant l'évolution de la température de la cellule avec la tension de polarisation : la température de la cellule est maximale au J_{sc} et au V_{oc} , et est minimale au M_{pp} . Ainsi, selon la polarisation appliquée, les simulations prévoient un équilibre thermique différent et donc une température de cellule différente. L'utilisation du banc de caractérisation présenté dans le deuxième chapitre permet de stabiliser la température d'une cellule photovoltaïque dans un environnement donné, moyennant un échauffement permanent qui pourra être corrigé par la suite.

Afin de quantifier cette évolution de la température avec la polarisation, nous reprenons la cellule utilisée dans le chapitre 2 pour les différentes calibrations thermiques et électriques du dispositif de mesure (cellule d'architecture Al-BSF ayant une surface de 4 cm^2). L'équilibre thermique présenté sur la figure 2.14 a été atteint au J_{sc} , sous une concentration de 1 soleil ($1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$).

La figure 4.1 représente l'évolution temporelle de la température de la cellule $T_{cellule}$. Simultanément, l'évolution de la tension de polarisation est tracée. Une fois l'équilibre thermique atteint au J_{sc} tel que présenté sur la figure 2.14 la cellule est polarisée au M_{pp} , puis est de nouveau basculée au J_{sc} . Au cours de ces deux transitions, des variations conséquentes de la température peuvent être observées. Il en résulte une température plus faible au M_{pp} qu'au J_{sc} : $T_{M_{pp}} < T_{J_{sc}}$.

Ce résultat atteste du bon dimensionnement du banc de caractérisation développé : la sensibilité du dispositif de caractérisation permet d'estimer l'évolution de la température de la cellule pour deux points de polarisation donnés. Il convient maintenant de s'intéresser à l'évolution de la température pour chaque point de polarisation appartenant à la courbe P-V d'une cellule photovoltaïque.

4.1.2 Mesure P-V et T-V

Les résultats présentés dans la suite de cette thèse ont tous été obtenus pour une température de paroi de $25 \text{ }^\circ\text{C}$, une pression de 0.3 mbar et sous un éclairage de 1 soleil. Pour atteindre ces conditions, le débit du flux d'air injecté dans la double paroi ainsi que sa température ont été adaptés selon la température de la salle. Le travail sous concentration ayant été envisagé par la suite, nous avons choisi d'utiliser des cellules de 1 cm^2 afin de pouvoir

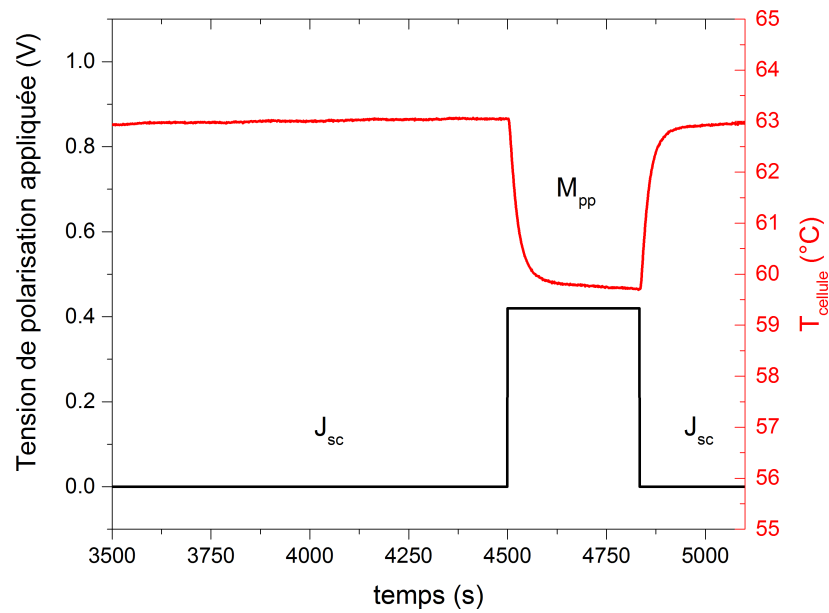


FIGURE 4.1 – Évolution de la température de la cellule Al-BSF ayant une surface de 4 cm^2 pour deux points de polarisation donnés : J_{sc} ($V = 0\text{ mV}$) et M_{pp} ($V = 420\text{ mV}$).

atteindre des facteurs de concentration plus élevés.

Pour les premières mesures, nous avons utilisé une cellule d'architecture PERC fabriquée avec un substrat de type p et possédant une résistivité proche de $1\ \Omega \cdot \text{cm}$.

Afin de relever les caractéristiques P-V et T-V, la cellule est dans un premier temps placée sous éclaircissement en suivant le schéma expérimental présenté dans le paragraphe [2.4.2.2](#). Une fois la température stabilisée au J_{sc} , différents plateaux de tension sont appliqués. Sur chaque plateau, une stabilisation de la température est attendue. Sur la figure [4.2](#), les évolutions temporelles du courant délivré par la cellule, de la tension appliquée à ses bornes et de sa température comparée à celle au J_{sc} ($T_{cellule} - T_{J_{sc}}$) sont représentées. Initialement, la cellule est polarisée au J_{sc} . Puis, l'équilibre thermique étant atteint, elle est polarisée au V_{oc} . Pour cette cellule, à la température de travail, le V_{oc} est environ égal à 540 mV . Les plateaux électriques permettent un retour au point de polarisation correspondant au J_{sc} . Il est important de noter qu'aucune hystérésis n'a été observée sur l'évolution de la température avec la polarisation : les résultats sont identiques pour une variation de polarisation suivant le schéma $J_{sc} \rightarrow V_{oc} \rightarrow M_{pp} \rightarrow J_{sc}$ ou le schéma $J_{sc} \rightarrow M_{pp} \rightarrow V_{oc}$.

En relevant avant chaque changement de polarisation les paramètres (tension, courant, température), nous pouvons tracer simultanément l'évolution de la puissance électrique délivrée par la cellule et de sa température (comparée à celle mesurée au J_{sc}), et ce, en fonction de la polarisation appliquée. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure [4.3](#). La cellule

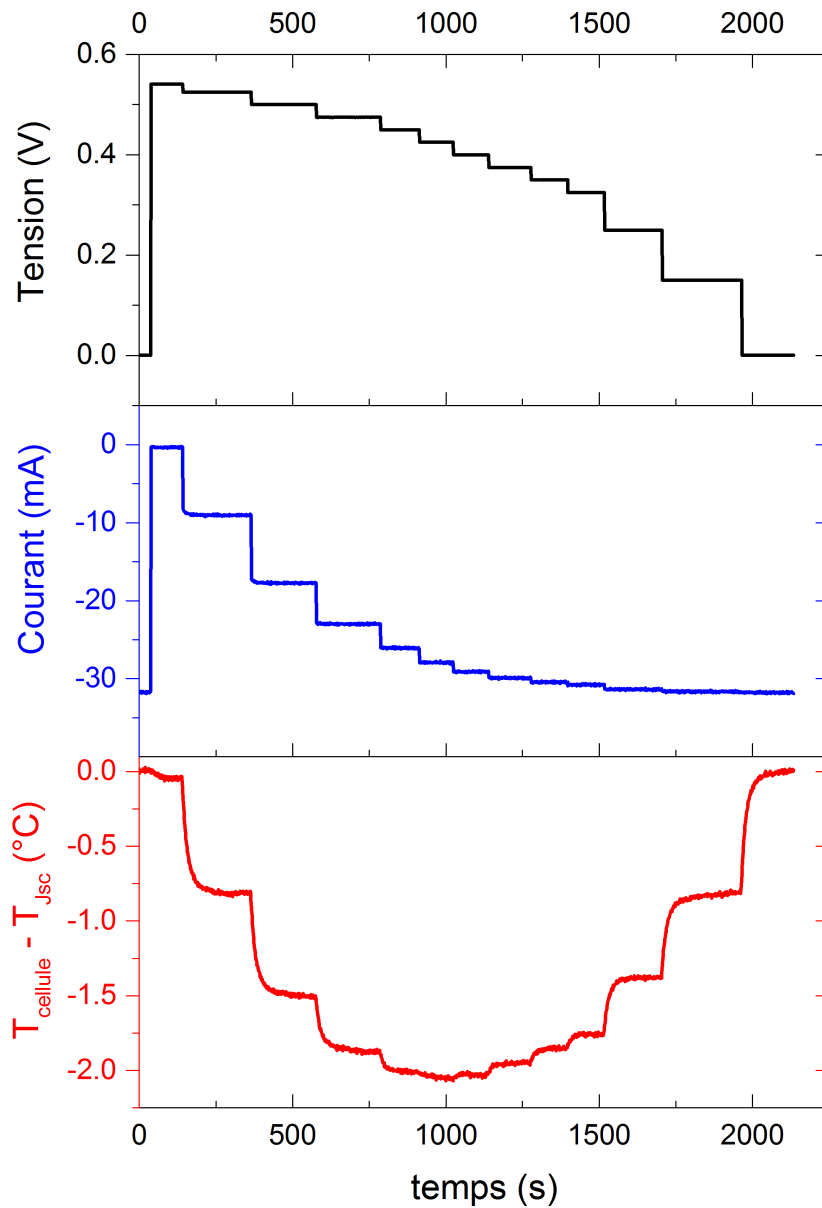


FIGURE 4.2 – Évolution temporelle du courant délivré par la cellule, de la tension appliquée à ses bornes et de sa température comparée à celle au J_{sc} ($T_{cellule} - T_{Jsc}$) pour pPERC1.

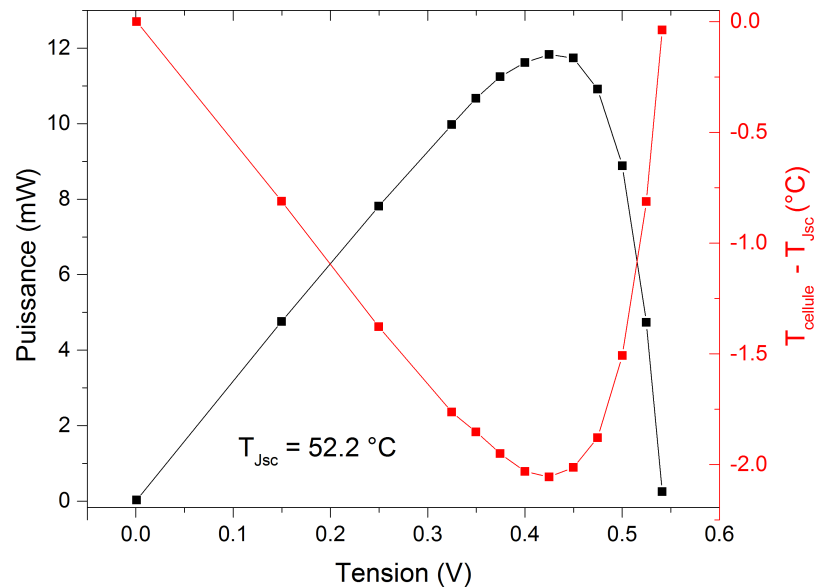


FIGURE 4.3 – Caractéristiques P-V et T-V de pPERC1 . La variation de la température avec la polarisation est calculée par rapport à $T_{J_{sc}}$.

atteint une température au J_{sc} , $T_{J_{sc}} = 52.2\text{ °C}$. Systématiquement, les caractéristiques P-V seront représentées en noir et les caractéristiques T-V en rouge.

D'un point de vue électrique, une baisse significative du rendement avec l'élévation de la température est observée, comme attendue par la théorie. D'un point de vue thermique, les résultats expérimentaux suivent des tendances identiques aux résultats obtenus par la modélisation :

- La température est maximale au J_{sc} et au V_{oc} . De plus, $T_{J_{sc}} \approx T_{V_{oc}}$. Sur la figure 4.3, une faible variation de température est observée entre le V_{oc} et le J_{sc} . Cet écart, inférieur à 0.05 °C , peut s'expliquer par la présence d'incertitudes sur les mesures, qui seront présentées dans le paragraphe 4.1.4.
- La température au M_{pp} est plus faible que celle au J_{sc} : on a $\Delta(T_{M_{pp}} - T_{J_{sc}}) = -2.06\text{ °C}$. Afin de mieux appréhender l'influence d'une telle fluctuation de la température avec la polarisation sur les performances électriques des cellules, nous avons tracé l'évolution de la puissance électrique dans le cas où la température est fixée à celle mesurée au J_{sc} et dans le cas où la variation de la température avec la polarisation est prise en compte. Lorsque la température est stabilisée au J_{sc} , une acquisition I-V rapide est réalisée. Elle consiste en une caractérisation classique d'une durée suffisamment faible pour s'assurer que la température est la même sur toute la caractéristique, comme la méthode présentée dans le paragraphe 2.2.1.3. Les résultats sont présentés sur la figure 4.4.

Dans le cas où la variation de la température de la cellule est prise en compte, la forte

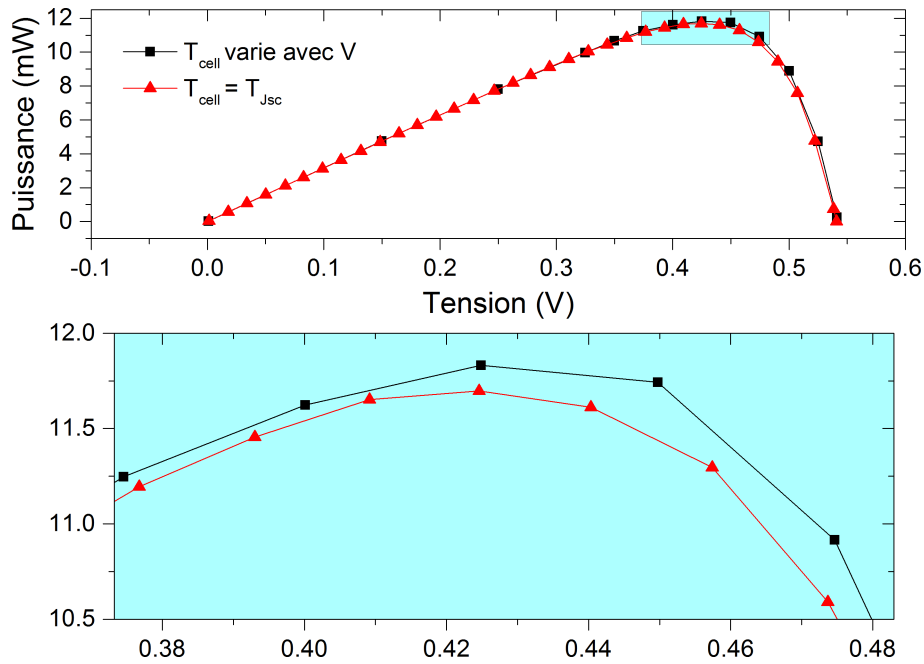


FIGURE 4.4 – Caractéristique P-V de pPERC1 avec et sans prise en compte de l'évolution de la température avec la polarisation. La figure inférieure représente un zoom autour du M_{pp} .

sensibilité de η avec la température entraîne un gain de rendement de +0.15 % en absolu par rapport au cas où la température au M_{pp} est supposée correspondre à la température mesurée au V_{oc} . De plus, un décalage du point de fonctionnement (V_{mpp}, I_{mpp}) est observé. Cette observation provient uniquement de la prise en compte de l'évolution de la température avec la polarisation : les phénomènes physiques régissant le fonctionnement des cellules étant fortement influencés par la température, il en résulte une évolution non négligeable de la caractéristique P-V. Les températures étant égales au J_{sc} et au V_{oc} , les caractéristiques se rejoignent pour ces deux points de polarisation.

4.1.3 Influence de la résistivité du substrat sur les caractéristiques P-V et T-V

L'importance du dopage de la base sur le bilan radiatif des cellules photovoltaïques a été soulignée dans le chapitre 1. Afin d'observer l'influence d'un tel paramètre sur le comportement thermo-électrique des cellules, nous avons réalisé des mesures P-V et T-V sur une cellule d'architecture PERC possédant une résistivité de $5.5 \Omega \cdot \text{cm}$, toujours sous un éclairage de 1 soleil. En suivant le même protocole de mesure, nous observons l'évolution de la température avec la tension de polarisation sur la figure [4.5](#).

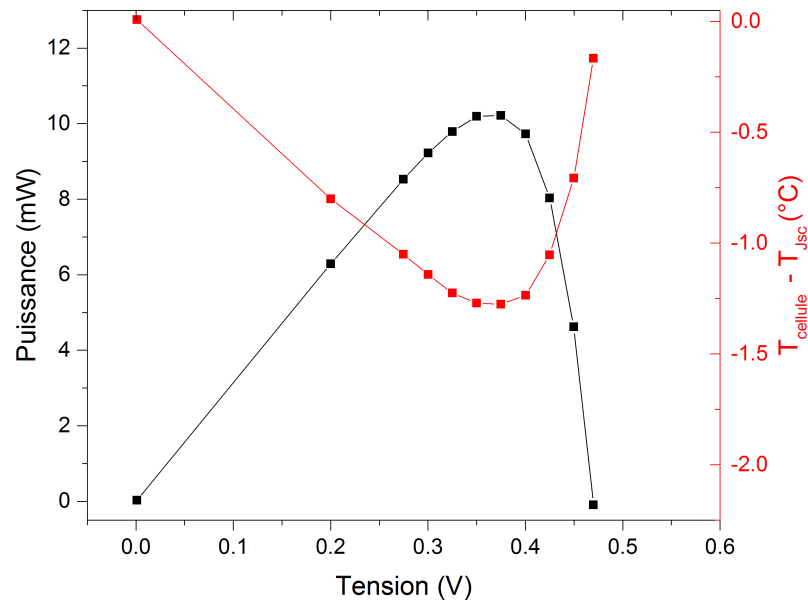


FIGURE 4.5 – Caractéristiques P-V et T-V de pPERC5.5.

On mesure $T_{J_{sc}} = 50.6^\circ\text{C}$ et $\Delta(T_{M_{pp}} - T_{J_{sc}}) = -1.28^\circ\text{C}$. Tout comme pPERC1, la température de la cellule suit une variation opposée à celle de la puissance électrique de la cellule. Néanmoins, pour pPERC1 et pPERC5.5, nous observons d'importantes divergences entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus par simulations, présentés sur la figure 1.6 :

- La température mesurée au J_{sc} est plus faible que celle prévue par le modèle physique (une température d'environ 90°C a été atteinte par simulation).
- La variation en température $\Delta T(J_{sc} \rightarrow M_{pp})$ est également plus faible que celle attendue (qui est de l'ordre d'une dizaine de degrés par simulation).

De plus, pour pPERC5.5, nous observons le phénomène suivant : alors que la puissance électrique extraite au V_{oc} et au J_{sc} est nulle, la température au V_{oc} est plus faible que celle au J_{sc} : $T_{V_{oc}} < T_{J_{sc}}$. Pour cet échantillon, on mesure $\Delta(T_{V_{oc}} - T_{J_{sc}}) = -0.16^\circ\text{C}$. Ce phénomène sera étudié plus en détail dans la prochaine section. Afin de s'assurer de la validité de cette mesure, il convient d'estimer les incertitudes présentes dans nos mesures.

4.1.4 Estimation des incertitudes de mesure

Étant donnés les faibles écarts de températures mesurés, il est crucial d'estimer les incertitudes de mesure. Nous distinguons principalement deux sources d'incertitudes : celles liées aux mesures de température et celles provenant des mesures électriques. Les mesures électriques sont entachées d'une erreur qui peut directement être estimée à partir des données constructeur du Keithley. Sur le calibre utilisé pour les mesures, l'erreur est évaluée à

± 0.5 mV. La mesure du V_{oc} est par conséquent entachée d'une incertitude de 0.5 mV.

Sur la mesure de la température de la cellule, nous identifions des erreurs systématiques ainsi que des erreurs aléatoires. Les erreurs systématiques sont intrinsèquement liées au thermocouple utilisé. Ces erreurs peuvent néanmoins être corrigées à l'aide d'une calibration (comme celle réalisée dans le chapitre 2). Les erreurs aléatoires proviennent quant à elles essentiellement des variations des conditions environnantes, de la méthode de mesure et de l'expérimentateur. Lors des différentes caractérisations, des fluctuations de la température de la salle et des parois peuvent entacher la mesure de température, tout comme la prise de contact du thermocouple en face arrière de la cellule.

Afin d'estimer ces erreurs aléatoires, nous avons réalisé une série de mesures P-V et T-V sur un même échantillon (pPERC5.5). La dispersion des mesures nous permet de remonter aux incertitudes de mesure de façon statistique. Ces erreurs ont pu être estimées à 0.05 °C. La température de cellule mesurée s'exprime donc telle que : $T_{cellule} = T_{mesurée} \pm 0.05$ °C. Par la suite, tous les résultats présentés seront accompagnés de barres d'erreur sur la mesure de température. L'écart de température entre le J_{sc} et le V_{oc} présenté sur la figure 4.3 pour pPERC1 est compris dans la barre d'erreur de mesure. En revanche, les incertitudes ne justifient pas l'écart observé sur la figure 4.5 pour pPERC5.5.

4.1.5 Retour sur le modèle physique

Afin d'identifier au mieux l'origine des disparités entre la simulation et les résultats expérimentaux, il nous paraît important de revenir sur le modèle physique et numérique et ces hypothèses. Nous avons retenu principalement six hypothèses pouvant expliquer les divergences observées, classées par ordre d'importance.

1) Calcul du facteur d'émission thermique : Le facteur d'émission thermique ε de la cellule est calculé à l'aide de la loi de Kirchhoff qui lie le facteur d'émission thermique et le coefficient d'absorption pour une longueur d'onde et une direction données (équation 1.16). Nous avons vu dans le premier chapitre que le coefficient d'absorption total pouvait s'écrire comme la somme des coefficients d'absorption provenant du réseau, des porteurs libres et de l'absorption inter bandes (équation 1.19). L'absorption par les porteurs libres dépend fortement de la concentration en porteurs libres (porteurs minoritaires et majoritaires) [39], comme en témoigne l'équation 1.18. Dans le modèle, l'hypothèse de faible injection est utilisée. Par conséquent, pour l'estimation de la concentration en porteurs libres, la concentration de porteurs minoritaires est négligée devant celle des porteurs majoritaires. $\alpha_{porteurs\ libres}$ est donc régi par les porteurs majoritaires uniquement.

II) Influence du BSF : Le modèle simule une simple jonction p-n, avec couche anti-reflet. L'influence du BSF ne peut être observée. D'après Riverola et al. [36], le facteur d'émission thermique de la cellule est fortement influencé par l'émetteur, mais aussi par le BSF, notamment grâce à l'augmentation de la concentration de porteurs libres provenant des différents dopages.

III) Approximation de la zone de charge d'espace : La jonction p-n est modélisée en réalisant l'approximation de la zone de déplétion. La densité de charges étant supposée être nulle dans les régions quasi-neutres, le champ électrique n'apparaît que dans la ZCE. Cette approximation remet en question l'estimation de la source thermique provenant de l'effet Joule. Puisque cette dernière est calculée à partir du produit scalaire entre le champ électrique et la densité de courant, elle est par conséquent nulle dans les régions quasi-neutres.

IV) Mouvements latéraux des porteurs de charge : La cellule est modélisée en une dimension. Les mouvements latéraux des porteurs de charge ne sont pas pris en compte. Les résistances induites par un tel déplacement sont négligées. Par ailleurs, les résistances série et parallèle sont respectivement supposées nulle et infinie dans le modèle.

V) Hypothèse de faible injection électrique : L'hypothèse de faible injection électrique est réalisée pour la résolution des équations de transport de charges. La densité de courant totale est obtenue par sommation des différentes contributions des régions quasi-neutres et de la ZCE. Cependant, le modèle ne permet pas de simuler des régimes de fortes injections.

VI) Influence de la texturation de surface : La texturation de surface n'est pas prise en considération dans les simulations numériques. Le refroidissement radiatif augmente fortement avec la texturation [35]. Une mesure réalisée sur une cellule non texturée a révélé une température de fonctionnement légèrement supérieure à celle d'une cellule dont la face avant est texturée, le facteur d'émission thermique d'une cellule texturée étant supérieure à celui d'une cellule non texturée.

Nous avons observé une variation de la température de la cellule entre le J_{sc} et le V_{oc} . Parmi les six hypothèses énumérées ci dessus, les hypothèses *II)* et *VI)* sont indépendantes de la tension appliquée, et n'ont pour conséquence que de surestimer la température de la cellule quelle que soit la polarisation. Les hypothèses *III)* et *IV)* n'ont en réalité que très peu d'influence sur le bilan thermique de la cellule. Cependant, l'hypothèse *I)*, qui est liée à l'hypothèse *V)*, est très affectée par l'évolution de la tension de polarisation, notamment

à cause de l'influence de cette dernière sur la concentration de porteurs libres. Dans la prochaine section, nous nous focalisons sur la validité de cette hypothèse.

4.2 Variation de la température de stabilisation entre le J_{sc} et le V_{oc}

L'une des principales hypothèses réalisées dans le modèle porte sur le calcul du facteur d'émission thermique de la cellule : les porteurs de charge minoritaires ne sont pas pris en compte lors de l'estimation du coefficient d'absorption. Dans cette section, nous cherchons à infirmer cette hypothèse. Les influences de la résistivité du substrat, de la concentration du rayonnement incident et de la pression dans l'enceinte sur le comportement thermique des cellules sont exposées.

4.2.1 Influence du dopage de la base

Les premiers résultats ont mis en avant une influence du dopage de la base sur la variation en température entre le J_{sc} et le V_{oc} , observable pour une structure pPERC réalisée sur un substrat ayant une résistivité de $5.5 \Omega \cdot \text{cm}$. Des mesures similaires ont été réalisées sur des structures Al-BSF. Nous présentons sur les figures [4.6a](#) et [4.6b](#) les évolutions des caractéristiques P-V et T-V pour deux cellules : pAl-BSF1 et pAl-BSF2.2. Les températures atteintes au J_{sc} valent :

- $T_{J_{sc}, pAl-BSF1} = 54.2 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_{J_{sc}, pAl-BSF2.2} = 52.9 \text{ }^\circ\text{C}$

Deux différences sont à noter : le dopage du substrat et la qualité du substrat (multicristallin ou monocristallin). Le fait que pAl-BSF1 soit réalisée sur un substrat multi-cristallin entraîne une réduction des performances électriques de la cellule notamment à cause d'une réflectance effective plus importante (du fait des multiples orientations des grains). On observe ainsi une baisse significative du J_{sc} , expliquant un plus faible rendement que celui de la cellule pAl-BSF2.2 à $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Une telle différence sur la face avant pourrait justifier la plus faible température au J_{sc} atteint par pAl-BSF2.2 que pour pAl-BSF1 du fait de l'impact de la réflectance sur le facteur d'émission thermique.

D'après la figure [4.6a](#), on a pour la cellule pAl-BSF1 $T_{J_{sc}} \approx T_{V_{oc}}$, aux incertitudes de mesures près. En revanche, pour pAl-BSF2.2, on a $\Delta(T_{V_{oc}} - T_{J_{sc}}) = -0.56 \text{ }^\circ\text{C}$. La figure [4.6b](#) montre également un décalage important entre la température minimale T_{min} et T_{Mpp} pour pAl-BSF2.2.

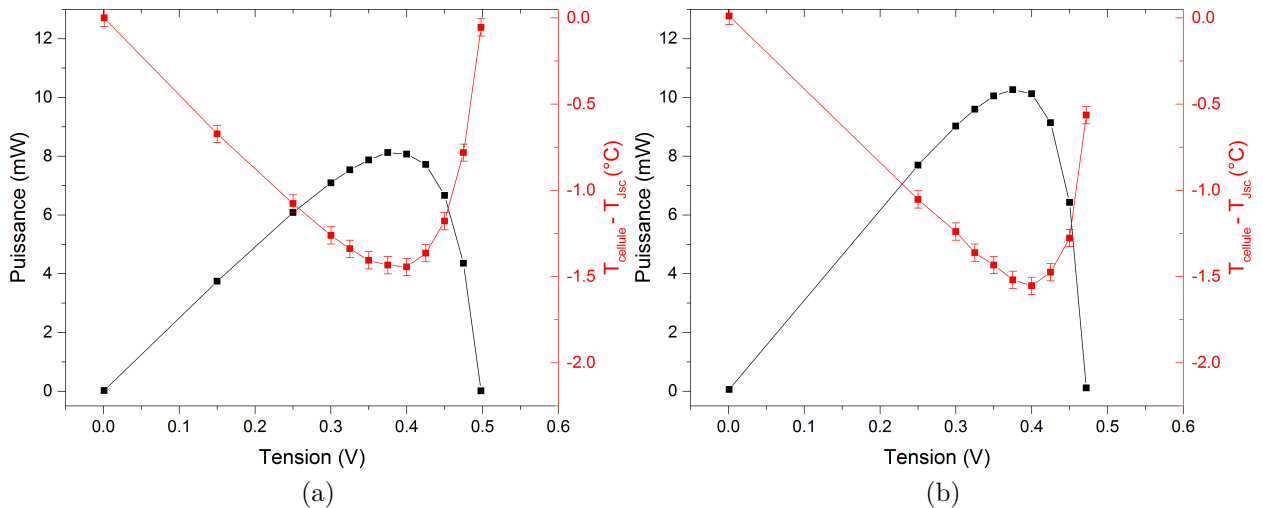


FIGURE 4.6 – Influence de la résistivité du substrat sur les caractéristiques P-V et T-V des cellules (a) pAl-BSF1 (b) pAl-BSF2.2 pour un éclairement de 1 soleil.

Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus dans la première section de ce chapitre. Nous pouvons émettre l'hypothèse suivante : l'écart de température entre le J_{sc} et le V_{oc} augmente avec la résistivité du substrat. Afin de s'affranchir de la qualité du substrat et pour confirmer l'hypothèse émise précédemment, nous avons étudié le comportement thermique de nombreuses cellules de différentes architectures et résistivités. Les résultats sont présentés dans le tableau 4.1. Les caractéristiques électriques (J_{sc} , V_{oc} , FF , η) des cellules sont données à 25 °C. Toutes les cellules possèdent des rendements compris entre 14.6 et 16.1 % (sauf pour les cellules à base de silicium multi-cristallin dont les rendements sont proches de 12 %).

Nous pouvons tracer sur la figure 4.7 l'évolution de l'écart entre $T_{V_{oc}}$ et $T_{J_{sc}}$ en fonction de la résistivité du substrat pour les différentes architectures de cellules. Le tableau 4.1 et la figure 4.7 confirment l'hypothèse réalisée auparavant : il existe une corrélation entre la résistivité du substrat et $\Delta(T_{V_{oc}} - T_{J_{sc}})$. L'architecture semble également influencer sur l'évolution de la température avec le J_{sc} et le V_{oc} . Les cellules Al-BSF sont les plus affectées : passer d'une résistivité de $1 \Omega \cdot \text{cm}$ à $2.2 \Omega \cdot \text{cm}$ est suffisant pour perturber l'équilibre thermique entre le J_{sc} et le V_{oc} . Les principales différences d'architectures entre les trois cellules présentées résident dans la face arrière. Cette divergence de comportement peut provenir du dopage du BSF (la différence de solubilité limite entre l'aluminium et le bore permet d'atteindre des niveaux de dopages plus élevés dans le cas d'un BSF dopé au bore) et de la présence de la couche passivante en face arrière. Pour finir, nous pouvons remarquer que les cellules PERC possèdent des températures de fonctionnement plus faibles que les cellules Al-BSF, ce qui est en accord avec les récents résultats de Vogt et al. [32].

Référence de la cellule	J_{sc} (mA · cm ⁻²)	V_{oc} (mV)	FF (%)	η (%)	$T_{J_{sc}}$ (°C)	$T_{V_{oc}} - T_{J_{sc}}$ (°C)
pPERT6.8	33.5	565.8	77.4	14.6	53.08±0.05	-0.8 ± 0.05
pPERT6.8	34.5	573.6	76.9	15.2	54.37±0.05	-0.82 ± 0.05
pAl-BSF1.9	35.5	579.7	74.9	15.4	52.57±0.05	-0.43 ± 0.05
pAl-BSF2.2	35.9	580	76.3	15.9	52.89±0.05	-0.56 ± 0.05
p mc Al-BSF1	28.9	595	71.8	12.4	54.21±0.05	0.00 ± 0.05
p mc Al-BSF1	28.2	597	71	12	52.71±0.05	0.00 ± 0.05
pPERC1	38	632.7	67	16.1	52.28±0.05	-0.03 ± 0.05
pPERC5.3	36.6	561.7	77	15.8	51.12±0.05	-0.19 ± 0.05
pPERC5.5	36.3	566	75.1	15.5	50.58±0.05	-0.28 ± 0.05
pPERC6.1	36.4	560.6	77.6	15.8	50.72±0.05	-0.38 ± 0.05

TABLE 4.1 – Variation de la température entre le J_{sc} et le V_{oc} pour des cellules d'architectures et de résistivités différentes. Les caractéristiques électriques (J_{sc} , V_{oc} , FF et η) sont données à 25 °C.

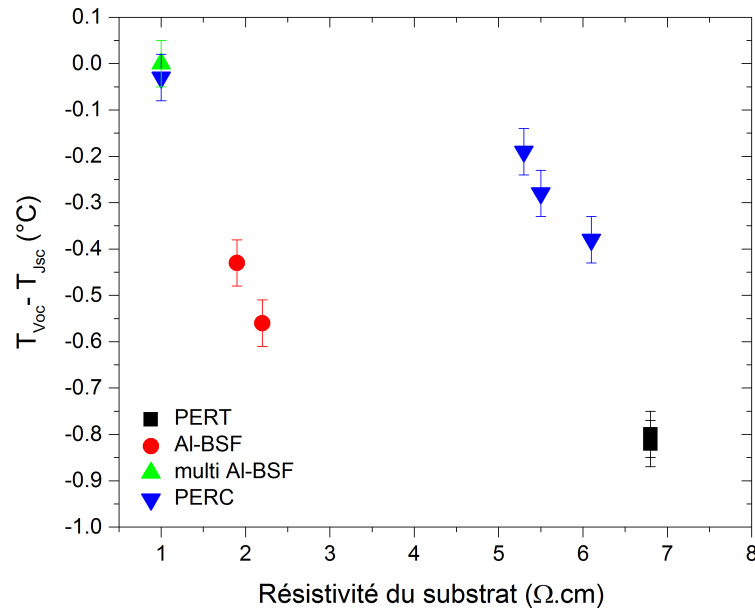


FIGURE 4.7 – Influence de la résistivité du substrat de la cellule sur la variation $T_{Voc} - T_{Jsc}$ pour différentes architectures de cellules.

4.2.2 Évolution du facteur d'émission thermique avec la polarisation

D'après les résultats obtenus dans le paragraphe précédent, la résistivité du substrat influence la variation en température $\Delta(T_{Voc} - T_{Jsc})$. À l'équilibre thermique, la loi de Kirchhoff assure l'égalité entre le coefficient d'absorption et le facteur d'émission thermique pour une longueur d'onde et une direction données. Le coefficient d'absorption total exprimé par l'équation 1.19 dépend fortement de la concentration en porteurs libres comme en témoigne l'équation 1.18. Nous avons vu dans le paragraphe 1.2.2.1 qu'un dopage de la base élevé favorise le refroidissement radiatif de la cellule. Cette hausse du facteur d'émission thermique provient de l'augmentation de la concentration de porteurs majoritaires dans la cellule et donc des porteurs libres.

Dans la cellule photovoltaïque, nous distinguons principalement trois zones : l'émetteur, la base et le BSF. Du fait du fort dopage de l'émetteur et du BSF (supérieur à 10^{19} cm^{-3}), la contribution des porteurs minoritaires à la concentration de porteurs libres dans ces zones peut être négligée. Cependant, dans la base, la résistivité est habituellement proche de $1.5 \Omega \cdot \text{cm}$; ce qui correspond à une concentration de dopants N_D de 10^{16} cm^{-3} . Sous éclairage et en polarisation directe, pour une cellule sur substrat de type p, la concentration d'électrons n_e dans la base s'écrit :

$$n_e = n_{e,0} + \Delta n_{e,inj}(ph) + \Delta n_{e,inj}(V) \quad (4.1)$$

Où $n_{e,0}$ représente la concentration d'électrons à l'équilibre, $\Delta n_{e,inj}(ph)$ la contribution des électrons injectés par photogénération et $\Delta n_{e,inj}(V)$ la contribution des électrons injectés par polarisation depuis l'émetteur vers la base.

$\Delta n_{e,inj}(V)$ croît avec la tension de polarisation et atteint sa valeur maximale au V_{oc} . La concentration de porteurs libres N définie dans l'équation [1.18](#) est de ce fait plus importante au V_{oc} qu'au J_{sc} . Au J_{sc} , la concentration de porteurs minoritaires est bien inférieure (de plusieurs ordres de grandeur) à la concentration de porteurs majoritaires. Étant donné que n_e croît avec la tension de polarisation, le ratio entre les minoritaires et les majoritaires augmente lorsque l'on se rapproche du V_{oc} . L'utilisation du logiciel de simulation de cellules photovoltaïques PC1D nous permet de comparer la concentration de porteurs minoritaires entre le J_{sc} et le V_{oc} . Les simulations ont montré que pour un substrat ayant une résistivité de $1 \Omega \cdot \text{cm}$, la concentration de porteurs minoritaires au V_{oc} est bien plus faible que celle des porteurs majoritaires. En revanche, pour un substrat ayant une résistivité de $5.5 \Omega \cdot \text{cm}$, ces concentrations au V_{oc} sont du même ordre de grandeur. Il en résulte que le coefficient d'absorption ne doit pas être calculé en ignorant la concentration de porteurs minoritaires.

Selon la valeur du dopage du substrat, cet effet sera plus ou moins important. Plus la résistivité du substrat est élevée, plus la concentration de porteurs majoritaires est faible, et plus n_e fluctue entre le J_{sc} et le V_{oc} du fait d'une plus importante contribution des porteurs minoritaires au coefficient d'absorption $\alpha_{\text{porteurs libres}}$. Dès lors que le coefficient d'absorption augmente avec la polarisation, le refroidissement radiatif de la cellule est favorisé. L'évolution de ε grâce à une augmentation de $\alpha_{\text{porteurs libres}}$ explique l'écart de température entre le J_{sc} et le V_{oc} , qui est d'autant plus important que la résistivité du substrat est grande. L'augmentation de ε avec la tension de polarisation est aussi responsable du décalage vers le V_{oc} de la température minimale qu'atteint la cellule sur sa caractéristique I-V.

L'évolution de la concentration de porteurs minoritaires avec la tension de polarisation peut être fortement réduite en travaillant sous des concentrations plus faibles. De même, en travaillant sous des concentrations plus élevées, cet effet peut être amplifié. C'est ce que nous nous proposons d'étudier dans le paragraphe suivant.

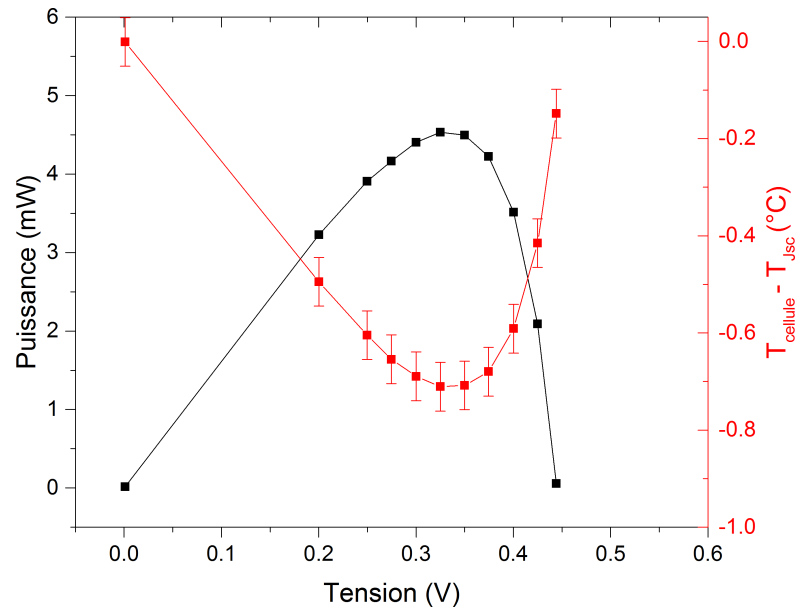


FIGURE 4.8 – Caractéristiques P-V et T-V de pAl-BSF2.2 sous un éclairement de 0.5 soleil.

4.2.3 Influence de la concentration du rayonnement incident pour différents dopages de base sur le comportement thermo-électrique des cellules

La lentille de Fresnel présentée dans le paragraphe [2.2.3](#) permet de concentrer le rayonnement incident. En contrôlant l'intensité de la lampe et la distance entre cette dernière et la cellule, nous pouvons atteindre une large plage de facteurs de concentration. Dans cette étude, nous avons choisi de comparer le comportement thermo-électrique des cellules pour 0.5, 1 et 3 soleils, correspondant à des éclairagements de 500 , 1000 et $3000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ respectivement.

4.2.3.1 Sous 0.5 soleil

Dans un premier temps, nous avons souhaité travailler sous un faible éclairement. Nous avons tracé sur la figure [4.8](#) l'évolution des caractéristiques P-V et T-V de pAl-BSF2.2 pour un éclairement de $500 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Les résultats sous 1 soleil ont déjà été présentés sur la figure [4.6b](#).

Du fait du plus faible éclairement, la cellule atteint une température au J_{sc} plus faible que sous 1 soleil. On mesure $T_{J_{sc},0.5 \text{ soleil}} = 41 \text{ }^\circ\text{C}$. D'après la figure [4.8](#), le V_{oc} mesuré dans ces conditions est inférieur à celui mesuré sous 1 soleil : on a $V_{oc,0.5 \text{ soleil}} = 444 \text{ mV}$ et $V_{oc,1 \text{ soleil}} = 472 \text{ mV}$. Le gain en V_{oc} provenant des plus faibles températures de fonctionnement atteintes

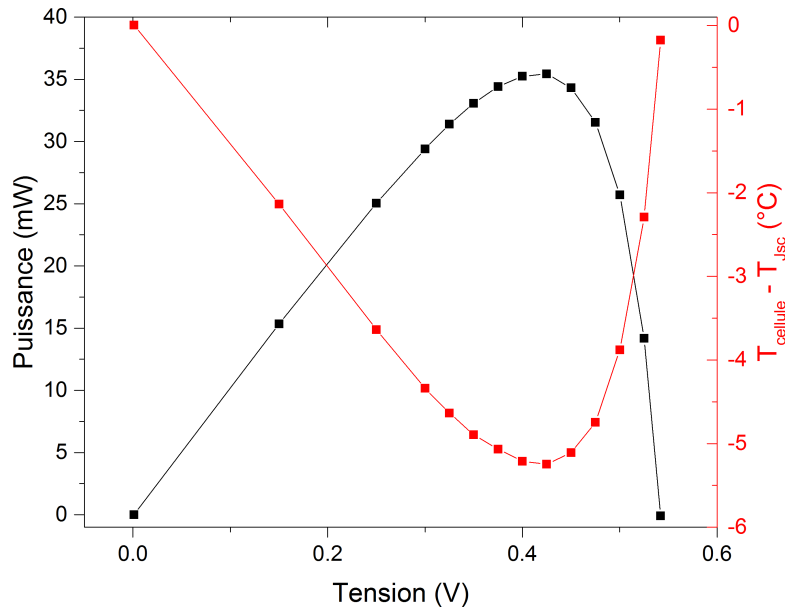


FIGURE 4.9 – Caractéristiques P-V et T-V de pPERC1 sous un éclairement de 3 soleils.

sous 0.5 soleil n'est pas suffisant pour contrebalancer la diminution du V_{oc} provenant du terme en $\ln(X)$, comme en témoigne l'équation [1.21](#).

Si l'on s'intéresse à l'écart de température entre le J_{sc} et le V_{oc} , nous mesurons $\Delta(T_{V_{oc}} - T_{J_{sc}})_{0.5 \text{ soleil}} = -0.17^\circ\text{C}$ contre -0.56°C sous un 1 soleil. Lorsque l'on abaisse l'éclairement, l'évolution de la concentration de porteurs minoritaires avec la polarisation diminue du fait d'une plus faible injection de porteurs par photogénération. Par conséquent, le coefficient $\alpha_{\text{porteurs libres}}$ est moins affecté lors du passage entre le J_{sc} et le V_{oc} . Il en résulte un plus faible écart entre $T_{J_{sc}}$ et $T_{V_{oc}}$ que celui mesuré sous 1 soleil.

4.2.3.2 Sous 3 soleils

Nous nous intéressons maintenant à des facteurs de concentration supérieurs à l'unité. Nous présentons sur la figure [4.9](#) l'évolution des caractéristiques P-V et T-V de pPERC1 pour un éclairement de $3000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Les résultats sous 1 soleil ont été présentés précédemment sur la figure [4.3](#).

Pour des éclairements plus élevés, nous atteignons naturellement des températures au J_{sc} plus importantes. On mesure $T_{J_{sc},3 \text{ soleils}} = 81.7^\circ\text{C}$. Alors que sous 1 soleil aucune variation de température entre le J_{sc} et le V_{oc} n'était observée pour pPERC1, nous mesurons sous 3 soleils $\Delta(T_{V_{oc}} - T_{J_{sc}})_{3 \text{ soleils}} = -0.2^\circ\text{C}$. Même si l'effet des porteurs minoritaires sur $\alpha_{\text{porteurs libres}}$ est visible lorsque l'on augmente l'éclairement, la variation de température entre le J_{sc} et le V_{oc} reste relativement faible. Ceci s'explique notamment par le dopage du substrat donnant

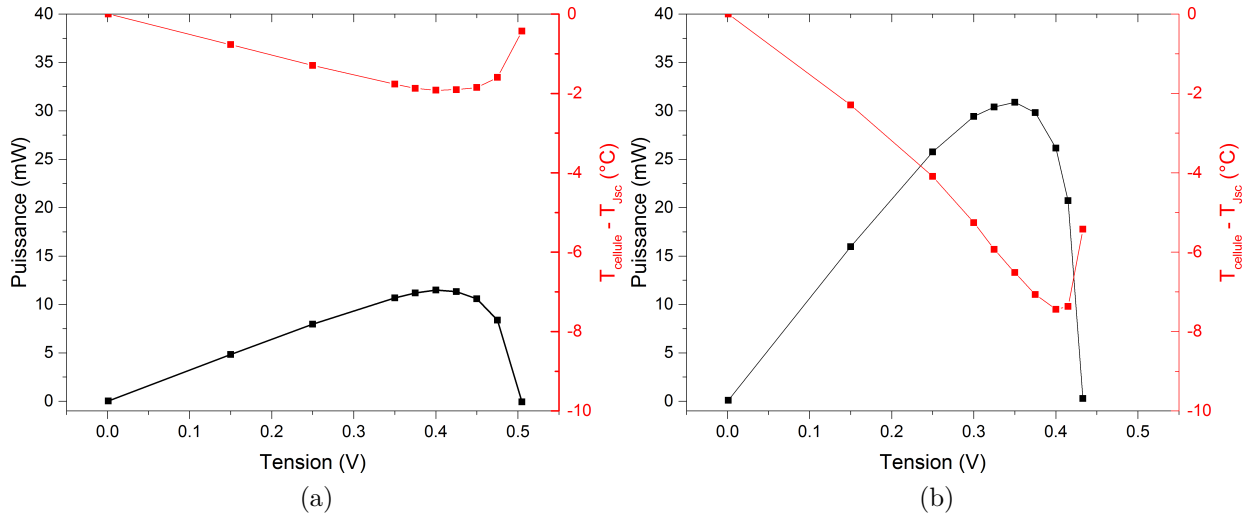


FIGURE 4.10 – Caractéristiques P-V et T-V de pAl-BSF1.9 sous un éclairement de (a) $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (b) $3000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

une concentration de porteurs majoritaires bien supérieure à celle des minoritaires, et ce même sous 3 soleils.

L'effet est cependant bien plus prononcé lorsque l'on considère une cellule ayant une résistivité plus élevée (et donc une concentration de porteurs majoritaires plus faible). La figure 4.10 présente les caractéristiques P-V et T-V pour pAl-BSF1.9 sous 1 puis 3 soleils. On mesure sous 1 et 3 soleils $T_{Jsc,1 \text{ soleil}} = 52.6^\circ\text{C}$ et $T_{Jsc,3 \text{ soleils}} = 93^\circ\text{C}$. On a :

- pour 1 soleil : $\Delta(T_{Voc} - T_{Jsc})_{1 \text{ soleil}} = -0.43^\circ\text{C}$,
- pour 3 soleils : $\Delta(T_{Voc} - T_{Jsc})_{3 \text{ soleils}} = -5.42^\circ\text{C}$.

Contrairement à pPERC1, l'évolution de la concentration de porteurs minoritaires avec la polarisation est suffisante pour modifier significativement $\alpha_{\text{porteurs libres}}$: la variation de la température avec la polarisation ne suit absolument plus la variation de la puissance électrique extraite.

Pour finir, des mesures réalisées sur pPERT6.8 (fabriquées selon un procédé légèrement différent de celui présenté dans le troisième chapitre) ont démontré les variations de la température entre le J_{sc} et le V_{oc} :

- pour 0.5 soleil : $\Delta(T_{Voc} - T_{Jsc})_{0.5 \text{ soleil}} = -0.05^\circ\text{C}$,
- pour 3 soleils : $\Delta(T_{Voc} - T_{Jsc})_{3 \text{ soleils}} = -6.2^\circ\text{C}$.

Les variations de température mesurées sous une concentration de 3 soleils peuvent atteindre plusieurs degrés celsius. Du fait de la forte sensibilité des performances électriques des cellules avec la température, de telles variations doivent être prises en compte lors de l'estimation de la température de fonctionnement de la cellule.

Les résultats présentés dans cette section confortent le modèle de l'évolution du facteur d'émission thermique avec la tension de polarisation appliquée aux bornes de la cellule : $\alpha_{\text{porteurs libres}}$ atteint sa valeur maximale au V_{oc} . Si l'éclairement est suffisamment faible, le coefficient d'absorption $\alpha_{\text{porteurs libres}}$ ne sera que très peu affecté par n_e . À l'inverse, en augmentant l'éclairement, la concentration de porteurs minoritaires augmente corrélativement et peut devenir du même ordre de grandeur que la concentration de porteurs majoritaires, même dans le cas d'un substrat d'une résistivité de $1 \Omega \cdot \text{cm}$.

Si l'hypothèse de la faible injection des porteurs utilisée pour le calcul de ε était déjà contestable sous 1 soleil, elle l'est d'autant plus lorsque l'éclairement incident augmente. Le facteur d'émission thermique ne peut plus être considéré comme étant constant avec la tension de polarisation : la contribution des porteurs minoritaires au calcul de $\alpha_{\text{porteurs libres}}$ doit être prise en compte pour les phénomènes thermiques.

4.2.4 Influence de la pression

Les transferts thermiques par convection diminuent avec la pression au profit des échanges radiatifs. Étudier la variation $\Delta(T_{\text{cellule}} - T_{Jsc})$ pour différentes pressions dans l'enceinte renseigne sur l'évolution du bilan radiatif avec la polarisation. Le dispositif actuel ne permet pas d'effectuer ces mesures à pression atmosphérique : la mesure de température en face arrière de la cellule serait biaisée du fait de la présence d'échanges convectifs. Par conséquent, nous avons choisi des pressions inférieures à celle utilisée pour l'obtention des résultats présentés dans les paragraphes précédents.

Les évolutions des caractéristiques P-V et T-V de pPERC1 pour deux pressions inférieures à 0.3 mbar sont présentées sur la figure 4.11. Pour 5×10^{-2} et 3×10^{-3} mbar, nous mesurons respectivement $T_{Jsc} = 64.8^\circ\text{C}$ et $T_{Jsc} = 75.8^\circ\text{C}$. Ces résultats sont en accord avec l'analyse réalisée dans le paragraphe 2.4.3.3 : pour des pressions inférieures à 0.3 mbar, T_{Jsc} croît lorsque la pression diminue.

L'augmentation de la température lorsque la pression diminue justifie les variations du V_{oc} visibles sur la figure 4.11. Bien que la puissance maximale au M_{pp} diminue avec la pression (à cause de l'élévation de la température), on observe une variation de la température $\Delta(T_{Mpp} - T_{Jsc})$ entre le M_{pp} et le J_{sc} , supérieure pour 3×10^{-3} mbar que pour 5×10^{-2} mbar. On a :

- Pour 3×10^{-1} mbar, $\Delta(T_{Mpp} - T_{Jsc})_{3 \times 10^{-1} \text{ mbar}} = -2.05^\circ\text{C}$
- Pour 5×10^{-2} mbar, $\Delta(T_{Mpp} - T_{Jsc})_{5 \times 10^{-2} \text{ mbar}} = -2.38^\circ\text{C}$,
- Pour 3×10^{-3} mbar, $\Delta(T_{Mpp} - T_{Jsc})_{3 \times 10^{-3} \text{ mbar}} = -2.85^\circ\text{C}$

Plus la pression sera faible plus l'évolution de la température de la cellule avec la tension de polarisation sera importante, traduisant ainsi un abaissement plus important de la tempé-

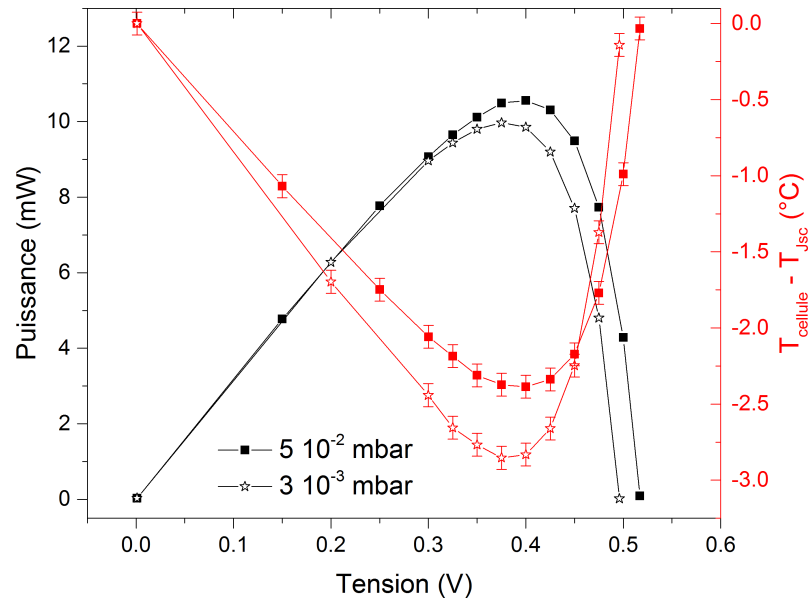


FIGURE 4.11 – Influence de la pression sur les caractéristiques P-V et T-V de pPERC1.

rature réelle de fonctionnement au M_{pp} , comparée à l'estimation réalisée au V_{oc} . Ce résultat prend d'autant plus d'importance pour les applications spatiales où les pressions atteintes sont bien plus faibles.

Une diminution de la pression affecte $\Delta(T_{V_{oc}} - T_{J_{sc}})$: l'écart en température n'est plus nul pour une pression de 3×10^{-3} mbar. Ce résultat est cohérent avec notre analyse. En effet, cet écart ayant pour origine une évolution de ε entre le J_{sc} et le V_{oc} , diminuer la pression favorise l'importance qu'a ε sur l'équilibre thermique atteint entre la cellule et son environnement.

4.3 Mesure du coefficient de dégradation en température du V_{oc} avec la concentration

Les rappels théoriques donnés dans le chapitre 1 ont permis de souligner l'importance du coefficient de dégradation en température du V_{oc} , $\beta_{V_{oc}}$, lorsque l'on s'intéresse à la dégradation des performances électriques des cellules avec la température. Les fluctuations du V_{oc} avec la température ($V_{oc} - T$) ainsi qu'avec le facteur de concentration ($V_{oc} - X$) diffèrent selon le dopage du substrat de la cellule considérée. De plus, dans la littérature, il est reporté que l'utilisation de cellules sur type n serait préférable pour des applications sous concentration [65, 62], l'amélioration du V_{oc} avec la concentration étant favorisée par un plus faible courant de saturation pour une cellule sur type n. Dans cette section, nous nous proposons d'étudier l'évolution du $\beta_{V_{oc}}$ avec la concentration et la température pour

des cellules PERT de résistivité et de type de dopage différents. Les cellules pPERT0.5, pPERT1.5, pPERT5.5 et nPERT3.5 seront utilisées dans cette section. Les caractéristiques électriques des cellules utilisées dans cette section ont été données dans le chapitre 3 à 25 °C et pour un éclairage de 1 soleil. Habituellement, les mesures de $\beta_{V_{oc}}$ sont réalisées entre 25 et 70 °C. Afin d'élargir notre étude, nous nous sommes intéressés à des valeurs de températures variant entre 0 et 90 °C dans le but de simuler le comportement des cellules dans des conditions environnementales extrêmes.

4.3.1 Contrôle de la température de la cellule par conduction avec une plaque de cuivre thermostatée

Pour étudier l'évolution du V_{oc} (et par conséquent du $\beta_{V_{oc}}$) d'une cellule photovoltaïque avec la température, celle-ci est généralement placée sur une plaque thermostatée et sa température est imposée par conduction thermique.

Des premières mesures ont été réalisées à l'aide du banc de caractérisation développé dans cette thèse. En plaçant la cellule sous éclairage, la température de stabilisation peut être modifiée en jouant sur la pression dans l'enceinte et sur la température de la paroi. Les premiers résultats ont néanmoins soulevé une difficulté majeure. La mesure de V_{oc} doit être réalisée à l'équilibre thermique, afin de s'assurer de la valeur de la température de la cellule. Chaque point de mesure de la caractéristique $V_{oc} - T$ est donc obtenu après des temps relativement longs (d'environ une heure). Souhaitant comparer les V_{oc} et les $\beta_{V_{oc}}$ de nombreux échantillons sous différents facteurs de concentration, on comprend assez vite que l'utilisation de ce banc de caractérisation est fastidieuse pour de telles mesures. De plus, même dans les conditions les plus favorables (température de paroi minimale), les températures de cellule inférieures à 30 °C ne peuvent être atteintes.

Afin de répondre au cahier des charges précisé auparavant et d'alléger considérablement la durée des mesures, nous avons utilisé un autre dispositif expérimental, qui est présenté sur la figure 4.12. Un module Peltier est placé entre deux blocs de cuivre. En injectant un courant dans le module Peltier, un gradient de température apparaît entre sa partie inférieure et sa partie supérieure. Le bloc de cuivre sur lequel est posé le module Peltier est relié à quatre radiateurs afin d'assurer une bonne dissipation du flux thermique. Le gradient de température peut être inversé en changeant le sens du courant. Le bon contact thermique entre le module Peltier et les blocs de cuivre est assuré par une pâte thermique. La cellule est placée sur le bloc de cuivre supérieur et le contact électrique est assuré par une pâte d'argent ; favorisant également le transfert thermique par conduction entre la cellule et le cuivre. Le module Peltier nous permet d'atteindre des températures inférieures à 0 °C et supérieures à 100 °C. Cependant, nous nous limiterons à 90 °C ; la pâte d'argent ne tenant

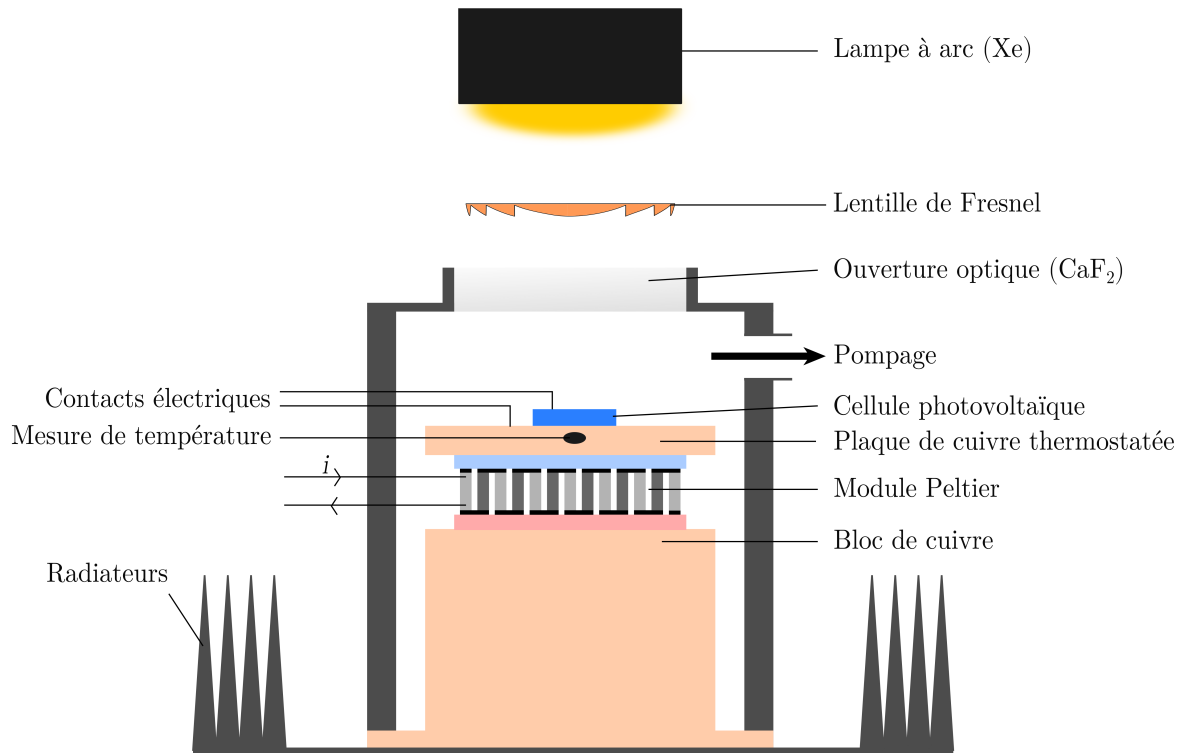


FIGURE 4.12 – Banc de caractérisation utilisé pour la mesure du V_{oc} de cellules photovoltaïques pour différentes températures.

pas à de trop hautes températures.

La température de la cellule est mesurée à l'aide d'une sonde calibrée, fixée dans le bloc de cuivre entre la cellule et le Peltier, en son centre. La position précise de ce dernier (sous l'échantillon) permet de s'affranchir d'un éventuel gradient de température entre le centre et le bord du cuivre ; le module Peltier ne recouvrant pas la totalité de la surface du bloc. Les grandeurs électriques sont obtenues grâce à un *sourcimeter* Keithley 2400 A. Dans cette étude, nous nous intéresserons uniquement aux mesures du J_{sc} et du V_{oc} . Dans ces conditions, l'utilisation d'une mesure deux pointes nous paraît suffisante.

L'éclairement est assuré par la même lampe à arc (Xe) que celle utilisée sur le dispositif présenté auparavant. Les mesures sont effectuées sous vide primaire (de l'ordre du 10^{-1} mbar) afin de diminuer les échanges thermiques par convection et d'assurer une bonne correspondance entre la température de la plaque de cuivre et celle de la cellule. Une lentille de Fresnel placée au-dessus de l'ouverture optique permet de travailler sous concentration.

Connaissant les caractéristiques électriques des cellules à 1 soleil, nous calibrons la hauteur et la puissance de la lampe en se référant à la valeur du J_{sc} à 25°C pour assurer la valeur de

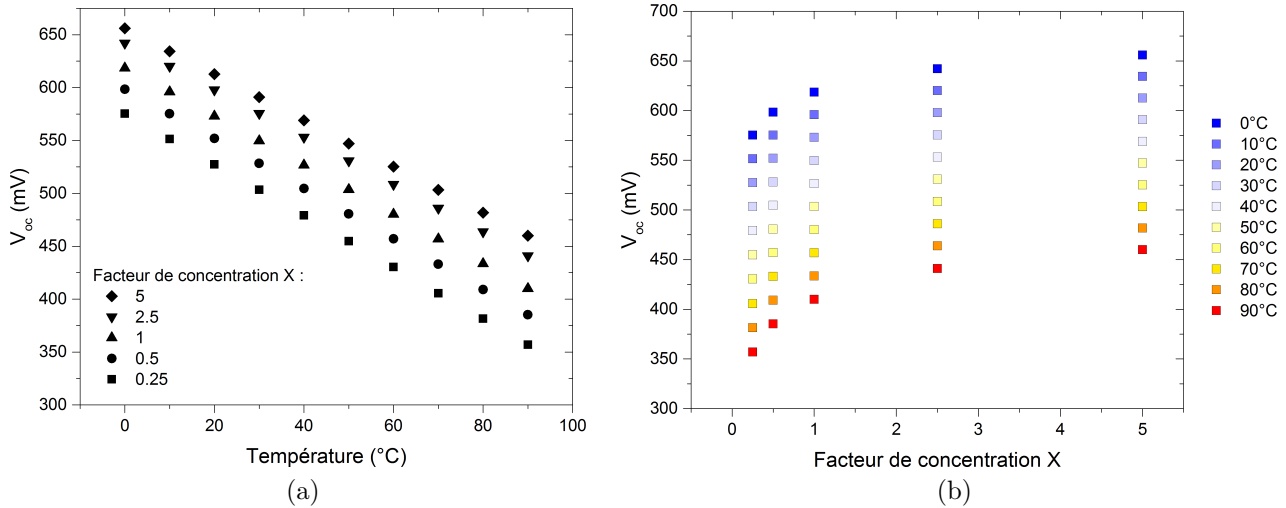


FIGURE 4.13 – Évolution du V_{oc} pour pPERT5.5 (a) avec la température, pour différents facteurs de concentration (b) avec le facteur de concentration, pour différentes températures.

l'éclairement. Pour travailler sous différents éclairagements, nous utiliserons la linéarité du J_{sc} avec le facteur de concentration (équation 1.20). Des facteurs de concentration variant entre 0.1 et 5 soleils peuvent être atteints dans ce dispositif.

4.3.2 Évolution du V_{oc} et du $\beta_{V_{oc}}$ avec la température et le facteur de concentration

4.3.2.1 Caractéristiques $V_{oc} - T$ et $V_{oc} - X$

Sous un éclairage de 1 soleil, nous pouvons mesurer l'évolution du V_{oc} avec la température. Après avoir fixé la cellule et avoir calibré l'éclairage, la plaque de cuivre est chauffée à 90°C à l'aide du module Peltier. La valeur du V_{oc} est relevée une fois la température stabilisée, puis l'opération est répétée pour différents paliers de température entre 90°C et 0°C. Pour la cellule pPERT5.5, l'évolution du V_{oc} avec la température pour différents facteurs de concentration est présentée sur la figure 4.13a. Simultanément, nous avons tracé sur la figure 4.13b l'évolution du V_{oc} avec le facteur de concentration et ce, pour différentes températures. Les facteurs de concentration varient entre 0.25 et 5 soleils. Les incertitudes sur la mesure du V_{oc} étant de l'ordre de 0.5 mV, elles ne sont pas représentées sur les figures suivantes. Il en va de même pour les incertitudes sur la mesure de température, qui sont de l'ordre de 0.1°C.

Deux remarques peuvent être tirées des figures 4.13a et 4.13b :

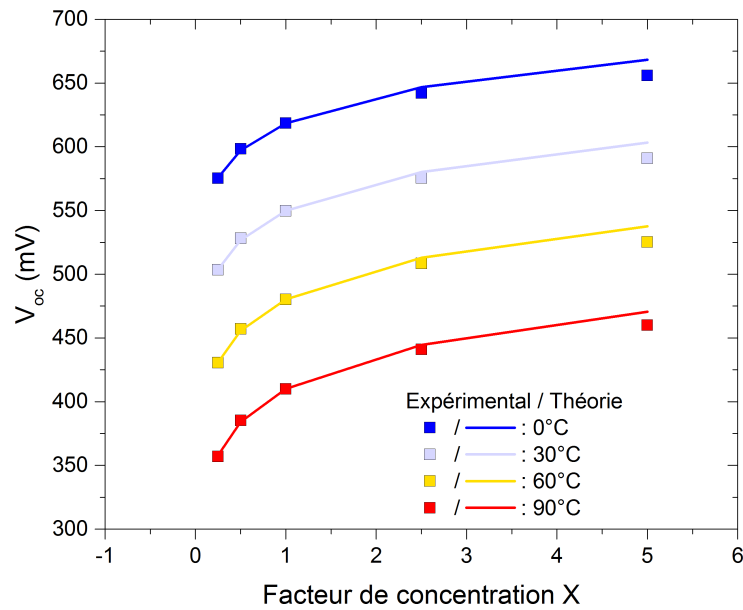


FIGURE 4.14 – Évolution du V_{oc} avec le facteur de concentration pour pPERT5.5 : comparaison des mesures expérimentales avec les variations prévues par la théorie pour différentes températures.

- Quel que soit le facteur de concentration, le V_{oc} diminue lorsque la température augmente. A première vue, la variation du V_{oc} avec la température semble linéaire.
- Pour une température donnée, le V_{oc} augmente de façon logarithmique avec le facteur de concentration.

Dans le chapitre 1, l'évolution du V_{oc} avec la concentration a été exposée. La forme la plus générale du V_{oc} présentée dans l'équation [1.21](#) ne tient pas compte du type de dopage, de la résistivité du substrat ou encore de la présence d'un BSF. Afin de remettre en cause la validité de cette équation, nous comparons pour différentes températures (0 °C, 30 °C, 60 °C, 90 °C) les caractéristiques $V_{oc} - X$ obtenues expérimentalement avec celles prévues par l'équation [1.21](#). Les résultats sont présentés sur la figure [4.14](#).

La caractéristique $V_{oc} - X$ théorique est obtenue par simulation en utilisant le V_{oc} mesuré à 1 soleil, combiné à l'équation [1.21](#). La légère dépendance du coefficient d'idéalité de la diode n avec la température [\[108\]](#) nous permet d'ajuster les simulations selon la température considérée. L'ajustement numérique du modèle a été réalisé à partir des points aux faibles éclairagements.

Sur la figure [4.14](#), nous observons une bonne concordance entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus par la théorie classique pour les faibles éclairagements. Cependant, à partir de 2.5 soleils, un écart est observé : le V_{oc} mesuré est plus faible que celui attendu par la

théorie. Pour expliquer cet écart, il nous faut revenir à la définition du V_{oc} . D'après l'équation [1.28](#) introduite dans le chapitre 1, le V_{oc} s'écrit en réalité comme la somme algébrique de trois tensions : V_j , V_{jbsf} et V_{base} . Aux faibles éclairagements, V_{jbsf} et V_{base} sont négligeables par rapport à V_j : le V_{oc} suit les variations données par l'équation [1.21](#). Lorsque le facteur de concentration augmente et que l'on sort du régime de faible injection, l'apparition de la tension V_{base} développée dans la base du fait de la différence de mobilité des porteurs vient s'opposer à V_j et V_{jbsf} . Par conséquent, la croissance du V_{oc} est ralentie par V_{base} . Cette observation est en accord avec l'équation [1.26](#) qui prend en compte l'influence de la tension de base sur l'évolution du V_{oc} avec le facteur de concentration. Cependant, le facteur de concentration atteint n'est pas suffisamment élevé pour suivre les variations définies par l'équation [1.26](#); on observe ainsi uniquement le début de la transition entre le régime défini par l'équation [1.21](#) et celui défini par l'équation [1.26](#).

Cette transition apparaît lorsque l'on sort du régime de faible injection. En effet, sous l'hypothèse de faible injection, la base est globalement neutre. Lorsque l'éclairement augmente, le régime de faible injection n'est plus valable, et la différence de mobilité des porteurs va entraîner l'apparition d'une tension de base V_{base} qui modifie fondamentalement l'expression du V_{oc} .

4.3.2.2 Caractéristiques $\beta_{V_{oc}} - T$ et $\beta_{V_{oc}} - X$

Après s'être intéressé aux caractéristiques $V_{oc} - T$ et $V_{oc} - X$, nous souhaitons étudier l'évolution du $\beta_{V_{oc}}$ avec la température et l'éclairement. Considérons trois points de mesures correspondant aux températures T_1 , T_2 et T_3 avec $T_1 < T_2 < T_3$. $\beta_{V_{oc}}(T_2)$ est obtenu par la relation suivante :

$$\beta_{V_{oc}}(T_2) = \frac{1}{V_{oc}(T_2)} \frac{V_{oc}(T_1) - V_{oc}(T_3)}{T_1 - T_3} \quad (4.2)$$

D'après l'équation [4.2](#), puisque $V_{oc}(T_1) > V_{oc}(T_3)$ et $T_1 < T_3$, il vient assez facilement que $\beta_{V_{oc}}(T_2) < 0$: lorsque la température augmente, le V_{oc} diminue. Pour pPERT5.5, les caractéristiques $\beta_{V_{oc}} - T$ et $\beta_{V_{oc}} - X$ sont présentées sur les figures [4.15a](#) et [4.15b](#).

L'incertitude sur la mesure de $\beta_{V_{oc}}$ est estimée par encadrement en prenant en compte l'incertitude sur le V_{oc} et sur la température. D'après les calculs, l'erreur sur la mesure de $\beta_{V_{oc}}$ vaut $\Delta\beta_{V_{oc}} = 0.01\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$. Les incertitudes sont présentées sur la figure [4.15a](#). Par souci de clarté, elles ne sont pas affichées sur la figure [4.15b](#).

La forte dépendance du $\beta_{V_{oc}}$ avec le V_{oc} est responsable de la variation du $\beta_{V_{oc}}$ observée sur la figure [4.15a](#) : lorsque la température augmente, le V_{oc} diminue, et de ce fait le $\beta_{V_{oc}}$

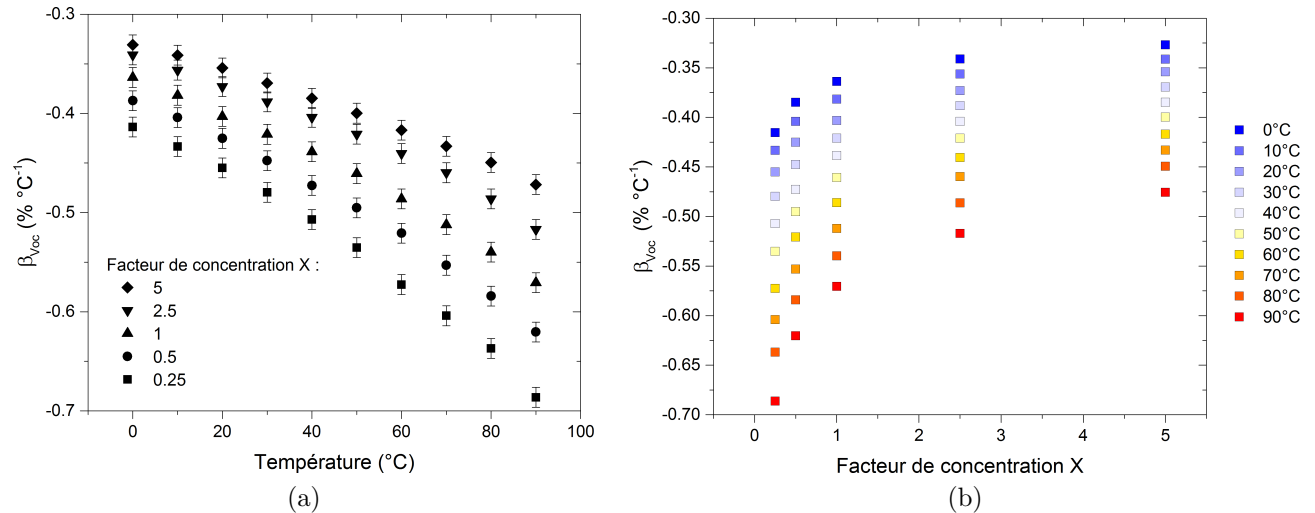


FIGURE 4.15 – Evolution du $\beta_{V_{oc}}$ pour pPERT5.5 (a) avec la température, pour différents facteurs de concentration (b) avec le facteur de concentration, pour différentes températures.

augmente en valeur absolue. D'après la figure 4.15b, cette variation n'est cependant pas constante pour les différents éclaircissements : la dépendance en température du $\beta_{V_{oc}}$ est d'autant plus forte que l'éclaircissement est faible. Plus généralement, la figure 4.15b démontre l'intérêt du travail sous concentration : plus l'éclaircissement est important, moins le V_{oc} est impacté par l'élévation de la température.

Ces observations ont déjà été notifiées dans la littérature [109, 110]. Cependant, notre étude permet de confirmer ce comportement sur une plus large plage de valeurs de températures (< 25 °C et > 70 °C). C'est un point important de notre analyse puisque dans certains cas, les cellules peuvent atteindre des températures extrêmes (par exemple lors de l'utilisation des cellules hors atmosphère ou dans des régions où l'éclaircissement ainsi que la température ambiante sont très faibles) [111].

Dans les prochains paragraphes, nous nous intéressons à l'influence de la résistivité et du type de dopage sur la dégradation des performances des cellules avec la température et l'éclaircissement.

4.3.3 Influence du dopage du substrat : comparaison de $\beta_{V_{oc}}$ pour différents dopages de substrat

L'influence du dopage du substrat sur le $\beta_{V_{oc}}$ a été présentée dans la section 1.2.2 du chapitre 1. D'après les simulations, $\beta_{V_{oc}}$ diminue en valeur absolue lorsque le dopage du substrat augmente.

Ici, nous comparons expérimentalement l'évolution du V_{oc} et du $\beta_{V_{oc}}$ avec la température

pour les cellules pPERT de trois résistivités différentes : $0.5 \Omega \cdot \text{cm}$, $1.5 \Omega \cdot \text{cm}$ et $5.5 \Omega \cdot \text{cm}$, soit des dopages de base de $3.3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $9.7 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ et $2.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ respectivement. Les résultats sont présentés pour trois facteurs de concentration : 0.25 soleil, 1 soleil et 5 soleils sur la figure [4.16](#).

D'après la figure [4.16](#), on observe qu'un faible dopage ($2.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) a un effet très défavorable sur le $\beta_{V_{oc}}$. Cette observation est vraie quelle que soit la température de la cellule ou le facteur de concentration, même lorsque le V_{oc} avoisine celui des cellules ayant un dopage plus élevé (à 0°C et sous 0.25 soleil notamment). De façon plus générale, les plus faibles valeurs de $\beta_{V_{oc}}$ pour les faibles dopages s'expliquent par des V_{oc} bien en deçà des V_{oc} des deux autres cellules.

Nous nous focalisons maintenant sur les cellules ayant des dopages de $3.3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ et $9.7 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Sur la figure [4.16](#), bien que les caractéristiques $V_{oc} - T$ soient similaires sous un éclairage de 1 soleil, on a $|\beta_{V_{oc},pPERT0.5}| > |\beta_{V_{oc},pPERT1.5}|$ pour des températures supérieures à 20°C . Sous un éclairage de 0.25 soleil, l'écart est fortement diminué aux faibles températures. À l'inverse, l'écart s'atténue pour des températures élevées sous un éclairage de 5 soleils. Ces observations s'opposent aux simulations présentées dans la section [1.2.2](#) qui préconisaient l'utilisation d'un substrat fortement dopé, tendant à diminuer la valeur absolue du $\beta_{V_{oc}}$. Des mesures sur une plus grande plage de températures et pour des facteurs de concentration plus élevés seraient utiles pour compléter cette analyse.

D'après Green [\[112\]](#), le dopage du substrat doit être rigoureusement choisi selon l'éclairage incident. Pour les forts éclairages, on favorisera des substrats fortement dopés, ces derniers ayant de meilleures performances électriques pour une température donnée. Cependant, il semblerait que ce choix ne soit pas si évident si l'on prend en considération les coefficients de dégradation thermique du V_{oc} . De plus, il est important de noter qu'un dopage de base trop élevé favorise les recombinaisons Auger. Des facteurs de concentration trop importants tendent également à amplifier ce type de recombinaisons [\[49\]](#).

Si l'on revient à la relation définie par l'équation [1.28](#), nous pouvons décomposer l'influence du dopage du substrat sur chaque composante du V_{oc} , à savoir V_j , V_{jbsf} et V_{base} . V_j augmente avec le niveau de dopage mais parallèlement, des diminutions de V_{jbsf} et V_{base} sont observées. Puisque les trois composantes du V_{oc} augmentent avec le facteur de concentration, l'amélioration du V_{oc} et du $\beta_{V_{oc}}$ avec la concentration sera moins prononcée pour les substrats fortement dopés.

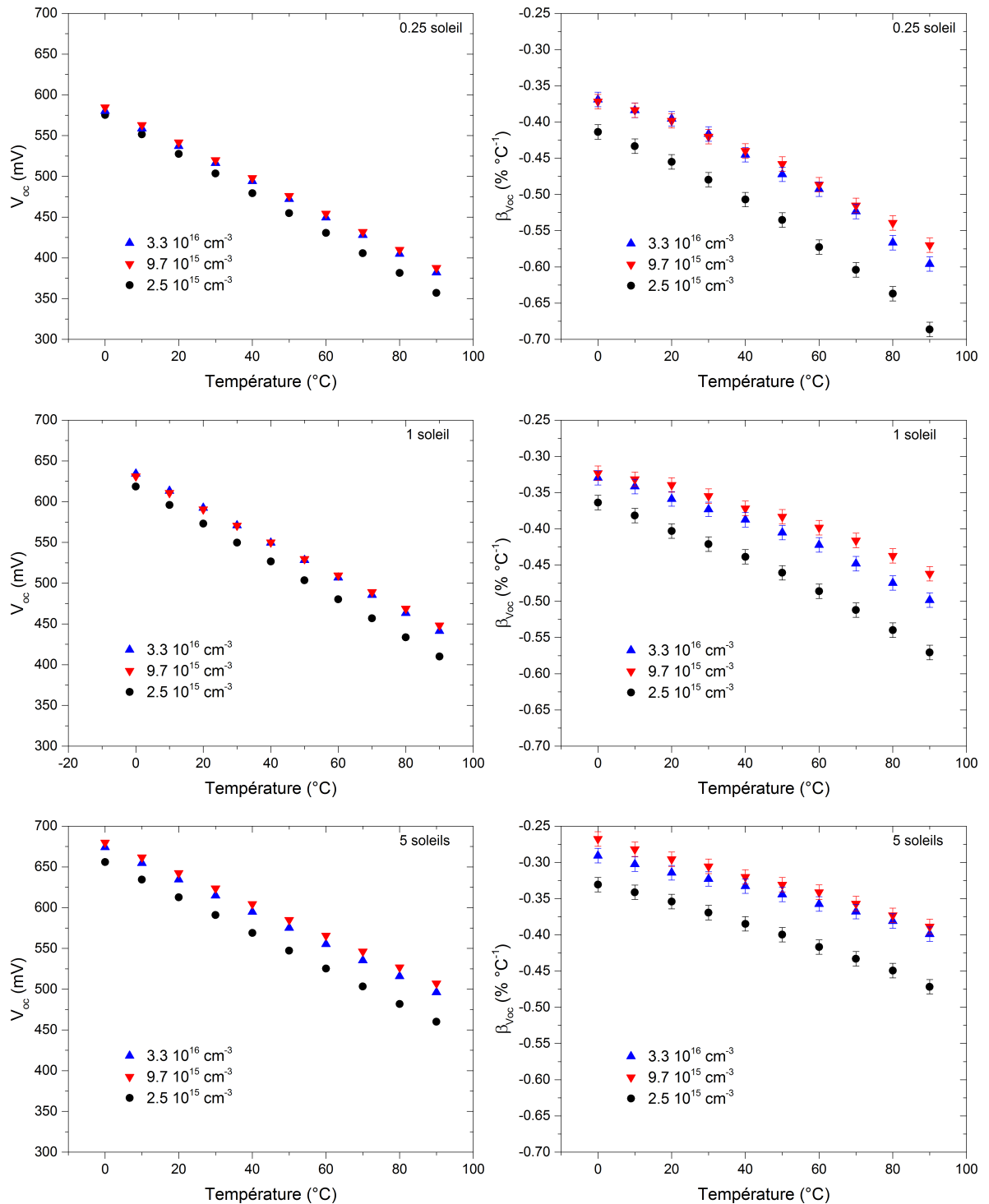


FIGURE 4.16 – Influence du dopage du substrat sur les caractéristiques $V_{oc} - T$ et $\beta_{V_{oc}} - T$, pour différents facteurs de concentration.

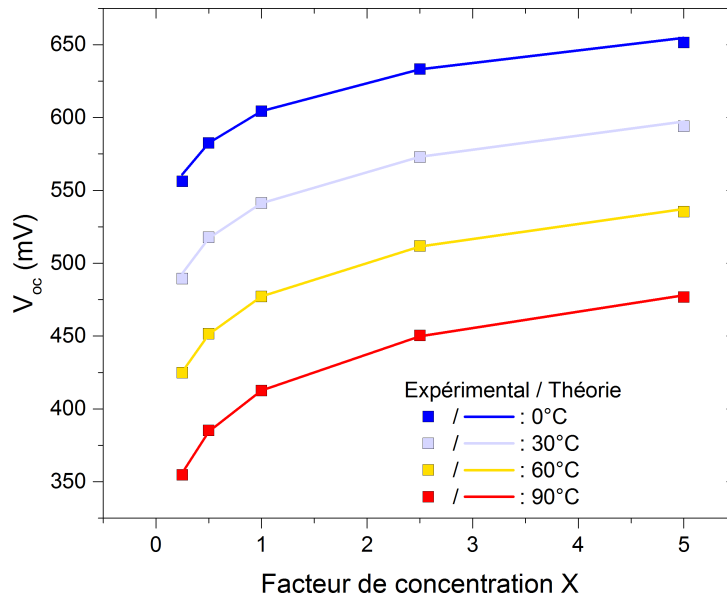


FIGURE 4.17 – Évolution du V_{oc} avec le facteur de concentration pour nPERT3.5 pour différentes températures : comparaison des mesures expérimentales avec les variations prévues par la théorie.

4.3.4 Influence du type de dopage sur $V_{oc} - X$ et $\beta_{V_{oc}} - X$

Pour une cellule de type p, nous avons vu dans les sections précédentes que l'augmentation du V_{oc} avec le facteur de concentration était plus faible que celle prévue par la théorie à partir d'une certaine valeur de concentration. D'après la théorie, ce phénomène dépend du type de dopage considéré. Afin d'observer l'influence du type de dopage, nous avons tracé sur la figure 4.17 l'évolution du V_{oc} avec le facteur de concentration pour une cellule de type n (nPERT3.5) qui possède la même concentration de dopants que pPERT5.5. Tout comme dans la sous-section 4.3.2.1, la caractéristique $V_{oc} - X$ est comparée à celle obtenue par la théorie classique définie par l'équation 1.21, et ce pour différentes températures.

Pour une cellule de type n, la figure 4.17 justifie une bonne concordance entre la théorie classique et les résultats expérimentaux quelle que soit la valeur du facteur de concentration. La littérature prévoit une transition différente entre le régime défini par l'équation 1.21 et celui défini par l'équation 1.26 selon le type de dopage considéré [57] : sur une cellule de type n, un facteur de concentration plus important est requis pour observer cette transition. De plus, d'après la littérature, l'amélioration du V_{oc} avec la concentration est plus importante pour une cellule de type n que pour une cellule de type p, du fait de l'importance de l'effet Dember. Notre dispositif ne permet cependant pas d'atteindre des facteurs de concentration supérieurs à 5 soleils. Néanmoins, sur type n, aucune saturation du V_{oc} est observée avec

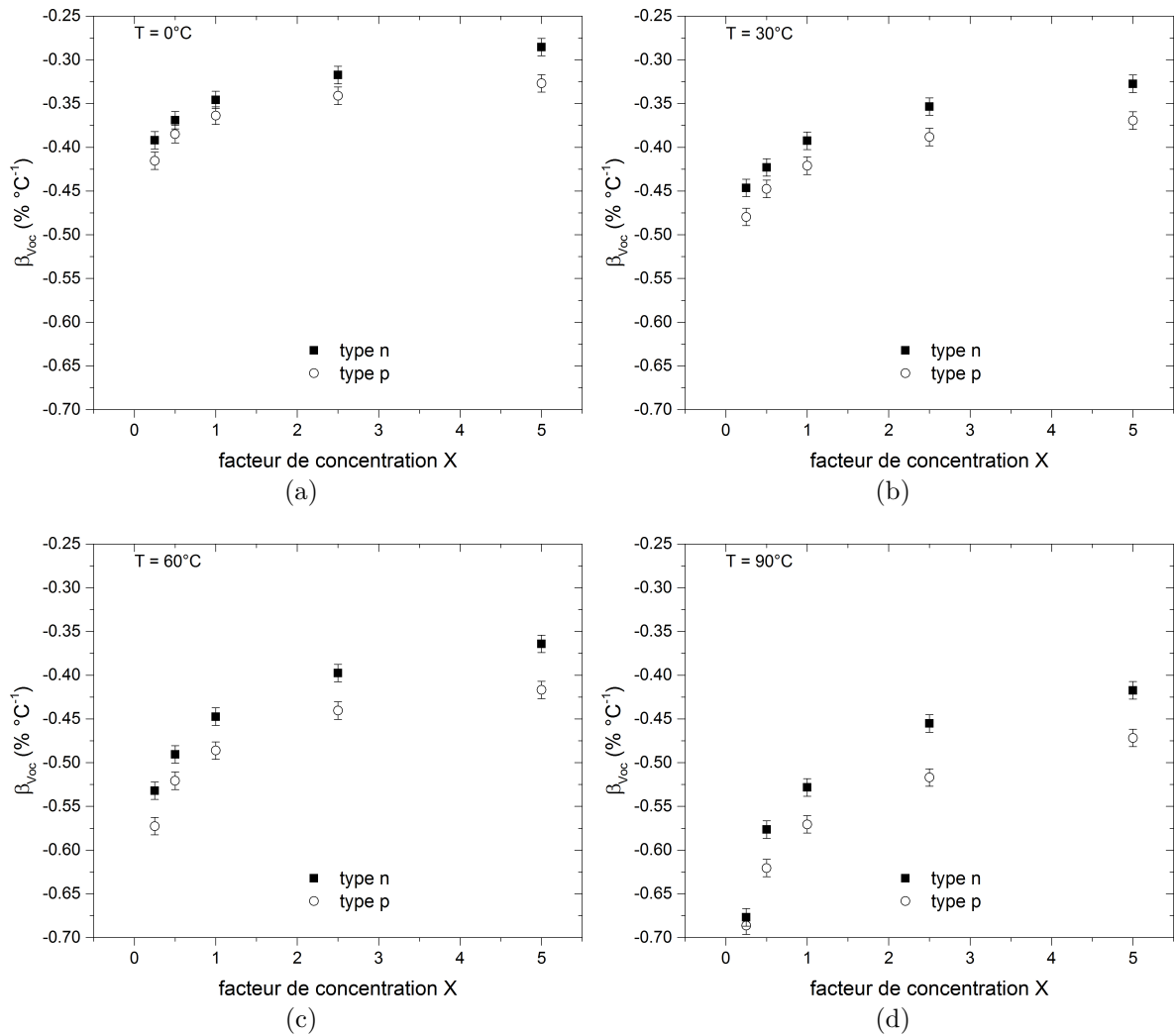


FIGURE 4.18 – Influence du type de dopage (n ou p) sur l'évolution du $\beta_{V_{oc}}$ avec le facteur de concentration à (a) 0°C (b) 30°C (c) 60°C (d) 90°C.

l'élévation de la concentration, ce qui est en accord avec les résultats présentés dans la littérature.

Dans le chapitre 1, l'influence du type de dopage sur le $\beta_{V_{oc}}$ a été présentée. Pour deux cellules ayant un dopage équivalent, l'utilisation d'un substrat de type n serait préférentielle à un substrat de type p d'un point de vue purement thermique. Sur la figure 4.18, les caractéristiques $\beta_{V_{oc}} - X$ de deux cellules (nPERT3.5 et pPERT5.5) sont comparées pour différentes températures.

Quelle que soit la température considérée, on observe systématiquement $|\beta_{V_{oc},n^+,X \text{ soleils}}| > |\beta_{V_{oc},p^+,X \text{ soleils}}|$: la dégradation en température du V_{oc} est moins importante sur une cellule de type n que sur type p. Les figures 4.18 dénotent également des fluctuations plus pro-

noncées du $\beta_{V_{oc}}$ avec la concentration pour une cellule de type n, comme en témoigne la caractéristique à 90°C. Ce comportement peut être assimilé à l'effet Dember qui accélère la décroissance de $|\beta_{V_{oc}}|$ dans le cas d'une cellule de type n (équation 1.30). De plus, les écarts de $\beta_{V_{oc}}$ entre les deux types de dopages se creusent lorsque la température augmente.

La principale source de dégradation du V_{oc} avec la température provient de la forte dépendance du courant de recombinaison avec la température [14]. Cependant, l'évolution du courant de recombinaison avec la température est différente si l'on considère un substrat de type n ou un substrat de type p (mobilités, diffusivités et longueurs de diffusion différentes). Par conséquent, l'évolution du $\beta_{V_{oc}}$ avec la température est différente selon le type de dopage de base considéré.

De plus, il nous paraît important de souligner que le dopage de la cellule de type n ($1.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) est légèrement inférieur à celui de la cellule de type p ($2.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$). De plus, dans le cas sous 1 soleil, on a $V_{oc,n} < V_{oc,p}$. Ces deux points ont été étudiés dans les sections précédentes : en valeur absolue, le $\beta_{V_{oc}}$ est d'autant plus faible que le dopage du substrat et le V_{oc} sont élevés. Malgré ces deux paramètres qui devraient jouer en faveur de la cellule sur type p, la cellule sur type n reste cependant la moins dégradée par l'élévation de la température.

4.4 Conclusion du chapitre 4

Au cours de ce chapitre, une analyse poussée du comportement thermo-électrique des cellules a été réalisée. Dans un premier temps, l'évolution de la température de la cellule selon la tension de polarisation appliquée aux bornes de la cellule a été expérimentalement observée grâce au banc de caractérisation développé dans cette thèse. Des divergences ont pu être remarquées entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus par simulation grâce au modèle physique présenté dans le premier chapitre. Alors que les simulations prévoient une température maximale et identique au J_{sc} et au V_{oc} , et minimale au M_{pp} , les résultats expérimentaux ont démontré une température plus faible au V_{oc} qu'au J_{sc} . Parmi les nombreuses hypothèses réalisées dans le modèle physique, l'hypothèse portant sur l'estimation du facteur d'émission nécessaire au calcul du rayonnement thermique a été notamment remise en question.

Le facteur d'émission thermique d'une cellule photovoltaïque, propriété fondamentale utilisée pour le calcul du bilan radiatif, est directement lié au coefficient d'absorption. Parmi les différents mécanismes d'absorption intervenant dans le silicium, l'absorption par les porteurs libres a été identifiée comme étant responsable de l'écart en température mesuré entre le J_{sc} et le V_{oc} . La concentration de porteurs libres est calculée en fonction de la concentration des porteurs majoritaires et des porteurs minoritaires. Avec l'augmentation de la tension de

polarisation, la concentration des porteurs minoritaires dans la base croît significativement, jusqu'à atteindre son maximum au V_{oc} . Par conséquent, le facteur d'absorption, et *de facto* le facteur d'émission thermique, sont minimums au J_{sc} et maximums au V_{oc} : le refroidissement radiatif de la cellule est favorisé lorsque la tension de polarisation approche le V_{oc} . Cet effet peut être amplifié soit en travaillant sur des substrats plus faiblement dopés, impliquant une évolution de la concentration de porteurs libres plus importante entre le J_{sc} et le V_{oc} , soit en travaillant sous un régime de haute injection de porteurs par photogénération. Ce phénomène a pu être observé pour différentes architectures de cellule.

Dans la dernière section, les coefficients de dégradation en température du V_{oc} déterminés sur de nombreuses cellules ont été comparés, pour différents facteurs de concentration. En contrôlant la température de la cellule à l'aide d'une plaque isotherme, l'évolution du V_{oc} avec la température et la concentration peut être observée entre 0 °C et 90 °C.

Pour un substrat de type p faiblement dopé, l'apparition d'une tension de base (effet Dember) tend à inhiber l'augmentation du V_{oc} avec la concentration, entraînant ainsi une saturation du V_{oc} et ce quelle que soit la température de la cellule. Le gain en V_{oc} provenant de l'éclairement n'est donc plus intéressant sous de trop fortes concentrations. Avec l'utilisation d'un substrat de type n, l'effet Dember est bénéfique au V_{oc} : la saturation avec l'éclairement n'est plus présente (au moins jusqu'à 5 soleils). D'un point de vue thermique, sous un même éclairement et pour une température donnée, les cellules sur un substrat de type n démontrent de plus faibles coefficients de dégradation en température du V_{oc} . Ces deux remarques rendent l'utilisation de substrat de type n plus favorable pour des applications sous concentration.

Pour finir, des cellules PERT de type p possédant des dopages de base différents ont été caractérisées. Alors que les simulations prévoient une diminution du $\beta_{V_{oc}}$ lorsque le dopage augmente, les résultats expérimentaux ont infirmé cette conclusion. De façon générale, le gain théorique du $\beta_{V_{oc}}$ avec le dopage de la base provient de l'augmentation du V_{oc} par augmentation de la tension de jonction V_j . Cependant, pour des V_{oc} identiques, les cellules ayant un dopage de $9.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ possèdent des coefficients $\beta_{V_{oc}}$ légèrement plus faibles que celles ayant un dopage de $3.3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

Conclusion générale

Ce travail de thèse avait pour objectif principal d'étudier le comportement thermo-électrique des cellules photovoltaïques en silicium cristallin pour des applications sous concentration grâce à la mise en place d'un banc de caractérisation innovant des cellules photovoltaïques. Les conséquences de l'élévation de la température des cellules sont dramatiques pour leur fonctionnement, entraînant d'importantes baisses de leurs performances électriques. Les recherches actuelles se focalisent principalement sur l'amélioration du rendement à 25 °C en accordant trop peu d'importance au comportement thermique des cellules. Or, en fonctionnement, les modules photovoltaïques atteignent des températures avoisinant les 60 °C. Dans cette thèse, nous nous sommes proposés d'approfondir la compréhension du comportement thermo-électrique des cellules photovoltaïques dans le but d'optimiser, par le biais de critères thermiques, leur fonctionnement dans des conditions environnementales réelles. Ainsi, deux voies d'améliorations étaient à étudier : la diminution de la température de fonctionnement des cellules grâce au refroidissement passif en utilisant les propriétés d'émission radiative des cellules ainsi que la réduction des dégradations de leurs performances subies lors de l'élévation de la température.

Pour mener à bien cette étude, il a fallu développer au cours de cette thèse un banc de caractérisation permettant d'étudier le comportement thermo-électrique d'une cellule photovoltaïque tout en contrôlant avec précision les conditions environnantes à celle-ci. En plaçant la cellule dans une enceinte dont la température des parois est imposée, sous un vide primaire d'environ 3×10^{-1} mbar, un équilibre thermique est atteint grâce aux échanges radiatifs entre la cellule et les différentes parties de l'enceinte. Un tel dispositif renseigne sur les propriétés radiatives des cellules photovoltaïques. Pour un environnement donné, les caractéristiques électriques ainsi que la température de la cellule sont mesurées. Les différents dispositifs de mesure (électrique et thermique) ont été calibrés et étalonnés et les limites du banc de caractérisation ont été testées. La présence de micro-fuites limite la pression d'étude : travailler à des pressions plus faibles permettrait de simuler des conditions s'approchant de celles atteintes hors atmosphère (applications spatiales). L'ajout d'une lentille de Fresnel dans l'enceinte rend possible l'étude du comportement thermo-électrique sous de faibles concentrations du rayonnement incident (3.7 soleils).

Le dopage de la base, le type de dopage ainsi que l'architecture de la cellule sont autant

de paramètres qui influent sur le comportement thermo-électrique. Plusieurs cellules Al-BSF et PERC ont été mises à disposition par le laboratoire. Afin de compléter notre étude, nous avons réalisé des cellules PERT de type n et de type p présentant différents dopages selon un procédé de fabrication détaillé. Dans ce procédé, une attention particulière a été portée sur la texturation de surface du fait de son influence sur le rendement électrique (par diminution de la réflectance effective) ainsi que sur le refroidissement radiatif des cellules (par augmentation du facteur d'émission thermique). L'utilisation d'un procédé de texturation par voie chimique à l'aide d'une solution de TMAH permet d'atteindre des réflectances effectives de 13.7% sur la gamme en longueur d'onde entre 400 nm et 1100 nm. La proximité des performances électriques des cellules utilisées dans cette thèse rend possible la comparaison de leur comportement thermo-électrique.

La température mesurée au V_{oc} est généralement supposée correspondre à la température de fonctionnement au M_{pp} . Grâce au banc de caractérisation, cette hypothèse a été infirmée : la température peut varier de plusieurs degrés avec la tension de polarisation et atteindre sa valeur minimale au M_{pp} . Sous certaines conditions, la température mesurée au V_{oc} est inférieure à celle au J_{sc} . Du fait de l'injection des porteurs minoritaires sous l'effet de la polarisation, le coefficient d'émission thermique évolue avec cette polarisation. Minimal au J_{sc} , il tend vers sa valeur maximale au V_{oc} , traduisant un refroidissement radiatif plus important au V_{oc} qu'au J_{sc} . Sous 3 soleils, un écart allant jusqu'à 6.2 °C a pu être mesuré entre $T_{J_{sc}}$ et $T_{V_{oc}}$ sur un échantillon.

Pour finir, l'influence du niveau ainsi que du type de dopage sur la dégradation en température du V_{oc} a été étudiée grâce à un second banc de caractérisation. Pour des applications sous concentration, l'utilisation de cellules de type n devrait être favorisée, les coefficients de dégradation du V_{oc} étant atténués lors de l'utilisation d'un substrat de ce type. Pour deux cellules de performances électriques équivalentes à 25 °C, sous 5 soleils et pour une température de 30 °C, on mesure $\beta_{V_{oc},type p} = -0.37\% \cdot ^\circ C^{-1}$ contre $\beta_{V_{oc},type n} = -0.33\% \cdot ^\circ C^{-1}$. L'influence du dopage de la base est également à prendre en considération. Dans notre étude, *i.e.* pour de faibles facteurs de concentration et sur une gamme de température donnée, le V_{oc} des cellules possédant des dopages de base proches de 10^{16} cm^{-3} semble moins affecté par l'élévation de la température. Un tel résultat préconise l'optimisation du niveau de dopage du substrat, à adapter selon l'application visée.

Dans ce travail de thèse, nous avons démontré l'importance des critères thermiques sur le fonctionnement des cellules photovoltaïques. Avec la prise en compte de ces critères thermiques, des gains conséquents sur les performances électriques des cellules seront obtenus, ce qui pourra contribuer à l'essor du photovoltaïque dans le monde. L'amélioration du refroidissement radiatif ainsi que l'atténuation de la dégradation en température du V_{oc} sont, entre autres, deux critères thermiques à ne pas négliger.

Perspectives

Durant cette thèse, les objectifs fixés au préalable ont pu être atteints. Il convient maintenant de présenter quelques perspectives de recherche afin de poursuivre l'étude entamée dans ce travail.

L'utilisation du banc de caractérisation a montré des résultats encourageants. L'étude présentée ici a été réalisée sur des cellules à base de silicium cristallin qui sont les plus couramment utilisées dans l'industrie (Al-BSF, PERC, PERT). Afin de compléter et d'étendre cette étude, d'autres cellules peuvent être caractérisées :

- les cellules à contacts arrières interdigités, qui sont particulièrement adaptées pour le travail sous concentration,
- les cellules à base de GaAs, qui possèdent un meilleur comportement en température sous 1 soleil que les cellules à base de silicium cristallin [113],
- les cellules tandems à base de InGaN, qui sont notamment utilisées pour des applications spatiales [114].

Il serait également intéressant de travailler sur des cellules possédant des performances électriques proches de l'état de l'art.

Concernant le banc de caractérisation développé, plusieurs perspectives d'étude sont envisageables. Par exemple, l'augmentation de la taille de l'enceinte et de la largeur du faisceau incident donneraient la possibilité de :

- caractériser des cellules de plus grandes dimensions,
- travailler sous des plus hauts facteurs de concentration pour les cellules de faibles dimensions.

D'autre part, l'ajout d'un système de filtres en amont de la lentille rendrait possible une analyse fréquentielle de l'absorption dans le matériau afin d'identifier et de quantifier les contributions des différentes parties de la cellule (émetteur, base, BSF, métallisation,...) sur le facteur d'émission thermique.

Pour aller plus loin, la caractérisation de cellules encapsulées est une piste à considérer, l'encapsulant ayant des conséquences non négligeables sur le facteur d'émission thermique des panneaux photovoltaïques. Cette étude permettrait de s'approcher encore plus du fonctionnement réel des panneaux photovoltaïques.

Pour compléter l'étude de la dégradation en température des cellules, les coefficients de

dégradation en température du FF et du J_{sc} doivent être mesurés. Ces mesures sont notamment nécessaires pour les fortes concentrations où l'étude seule de l'évolution du V_{oc} avec la température est insuffisante pour assurer une bonne compréhension de l'évolution du rendement avec la température. Un système de mesure quatre pointes permettant de s'affranchir de la résistance des fils devrait être ajouté au dispositif de mesure pour rendre possible ces mesures.

Les résultats expérimentaux ont permis de remettre en question certaines hypothèses effectuées dans le modèle physique et numérique. Un travail d'amélioration du modèle peut être réalisé afin de réduire les divergences entre les résultats obtenus par simulation et les résultats expérimentaux, notamment en intégrant la contribution des porteurs de charges minoritaires au calcul du rayonnement thermique. La modification du modèle numérique pour permettre de simuler le comportement thermo-électrique des cellules sous faibles et fortes concentrations pourrait également être envisagée.

Bibliographie

- [1] F. Birol. *Key World energy statistics*. IEA Publications, International Energy Agency, rue de la Federation, Paris, France, 2017.
- [2] Canadian Electronic Library (Firm). *Renewables 2018 : Global Status Report*. 2018. OCLC : 1001107309.
- [3] ISE Fraunhofer. Photovoltaics report. 2018.
- [4] M. A. Green, Y. Hishikawa, E. D. Dunlop, D. H. Levi, J. Hohl-Ebinger, and A. W. Y. Ho-Baillie. Solar cell efficiency tables (version 51). *Progress in Photovoltaics : Research and Applications*, 26(1) :3–12, 2018.
- [5] A. Richter, M. Hermle, and S. W. Glunz. Reassessment of the Limiting Efficiency for Crystalline Silicon Solar Cells. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 3(4) :1184–1191, 2013.
- [6] V. Fthenakis. Life Cycle Analysis of CPV Systems. *Handbook of Concentrator Photovoltaic Technology*, pages 685–704, 2016.
- [7] S. Dubey, J. N. Sarvaiya, and B. Seshadri. Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World - A Review. *Energy Procedia*, 33 :311–321, 2013.
- [8] U. Wurfel, A. Cuevas, and P. Wurfel. Charge Carrier Separation in Solar Cells. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 5(1) :461–469, 2015.
- [9] S. Sze. *Physics of Semiconductor Devices*. Wiley-Interscience publication. John Wiley & Sons, 1981.
- [10] M. Koehl, M. Heck, S. Wiesmeier, and J. Wirth. Modeling of the nominal operating cell temperature based on outdoor weathering. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(7) :1638–1646, 2011.
- [11] J. F. Sacadura. *Transferts thermiques : initiation et approfondissement*. Lavoisier : Tec & Doc, Paris, 2015.
- [12] ASTM Standard. G173-03. *Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- [13] K. Kawajiri, T. Oozeki, and Y. Genchi. Effect of Temperature on PV Potential in the World. *Environmental Science & Technology*, 45(20) :9030–9035, 2011.

- [14] J. J. Wysocki and P. Rappaport. Effect of temperature on photovoltaic solar energy conversion. *Journal of Applied Physics*, 31(3) :571–578, 1960.
- [15] A. Braun, E. A. Katz, and J. M. Gordon. Basic aspects of the temperature coefficients of concentrator solar cell performance parameters : Basic aspects of the temperature coefficients. *Progress in Photovoltaics : Research and Applications*, 2012.
- [16] M. A. Green. General temperature dependence of solar cell performance and implications for device modelling. *Progress in Photovoltaics : Research and Applications*, 11(5) :333–340, 2003.
- [17] Y. P. Varshni. Temperature dependence of the energy gap in semiconductors. *Physica*, 34 :149, 1967.
- [18] P. Singh and N. M. Ravindra. Temperature dependence of solar cell performance—an analysis. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 101 :36–45, 2012.
- [19] D. L. Evans. Simplified method for predicting photovoltaic array output. *Solar Energy*, 27(6) :555–560, 1981.
- [20] E. Skoplaki and J. A. Palyvos. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance : A review of efficiency/power correlations. *Solar Energy*, 83(5) :614–624, 2009.
- [21] P. Würfel. *P. Semiconductors, in Physics of Solar Cells : From Principles to New Concepts*. Weinheim, Germany, wiley-vch verlag gmbh edition.
- [22] J. C. C. Fan. Theoretical temperature dependence of solar cell parameters. *Solar cells*, 17(2-3) :309–315, 1986.
- [23] J. Zhao, A. Wang, S. J. Robinson, and M. A. Green. Reduced temperature coefficients for recent high-performance silicon solar cells. *Progress in Photovoltaics : Research and Applications*, 2(3) :221–225, 1994.
- [24] M. A. Green, A. W. Blakers, and C. R. Osterwald. Characterization of high efficiency silicon solar cells. *Journal of Applied Physics*, 58(11) :4402–4408, 1985.
- [25] M. A. Green, K. Emery, and A. W. Blakers. Silicon solar cells with reduced temperature sensitivity. *Electronic Letters*, 18 :97–98, 1982.
- [26] H. Steinkemper, I. Geisemeyer, M. C. Schubert, W. Warta, and S. W. Glunz. Temperature-Dependent Modeling of Silicon Solar Cells—Eg, n i, Recombination, and VOC. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 7(2) :450–457, 2017.
- [27] J. Haschke, J. P. Seif, Y. Riesen, A. Tomasi, Jean Cattin, L. Tous, P. Choulat, M. Aleman, E. Cornagliotti, A. Uruena, R. Russell, F. Duerinckx, J. Champlaud, J. Levrat, A. A. Abdallah, B. Aïssa, N. Tabet, N. Wyrsh, M. Despeisse, J. Szlufcik, S. De Wolf,

- and C. Ballif. The impact of silicon solar cell architecture and cell interconnection on energy yield in hot & sunny climates. *Energy Environ. Sci.*, 10(5) :1196–1206, 2017.
- [28] *International Technology Roadmap for Photovoltaic Ninth Edition*. 2018.
- [29] D.-H. Neuhaus and A. Münzer. Industrial Silicon Wafer Solar Cells. *Advances in OptoElectronics*, 2007 :1–15, 2007.
- [30] S. N. Singh and G. C. Jain. Effect of the back-surface field on the open-circuit voltages of p+-n-n+ and n+-p-p+ silicon solar cells. *Solar Cells*, 5(2) :143–172, 1982.
- [31] A. W. Blakers, A. Wang, A. M. Milne, J. Zhao, and M. A. Green. 22.8% efficient silicon solar cell. *Applied Physics Letters*, 55(13) :1363–1365, 1989.
- [32] M. R. Vogt, H. Schulte-Huxel, M. Offer, S. Blankemeyer, R. Witteck, M. Kontges, K. Bothe, and R. Brendel. Reduced Module Operating Temperature and Increased Yield of Modules With PERC Instead of Al-BSF Solar Cells. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 7(1) :44–50, 2017.
- [33] H. G. Teo, P. S. Lee, and M. N. A. Hawlader. An active cooling system for photovoltaic modules. *Applied Energy*, 90(1) :309–315, 2012.
- [34] S. Odeh and M. Behnia. Improving Photovoltaic Module Efficiency Using Water Cooling. *Heat Transfer Engineering*, 30(6) :499–505, 2009.
- [35] L. Zhu, A. Raman, K. X. Wang, M. A. Anoma, and Shanhui Fan. Radiative cooling of solar cells. *Optica*, 1(1) :32, 2014.
- [36] A. Riverola, A. Mellor, D. Alonso Alvarez, L. Ferre Llin, I. Guarracino, C. N. Markides, D. J. Paul, D. Chemisana, and N. Ekins-Daukes. Mid-infrared emissivity of crystalline silicon solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 174 :607–615, 2018.
- [37] Bhushan Sopori, W. Chen, J. Madjdpour, and N. M. Ravindra. Calculation of emissivity of Si wafers. *Journal of Electronic Materials*, 28(12) :1385–1389, 1999.
- [38] M. A. Green and M. J. Keevers. Optical properties of intrinsic silicon at 300 K. *Progress in Photovoltaics : Research and Applications*, 3(3) :189–192, 1995.
- [39] S. C. Baker-Finch, K. R. McIntosh, D. Yan, K. C. Fong, and T. C. Kho. Near-infrared free carrier absorption in heavily doped silicon. *Journal of Applied Physics*, 116(6) :063106, 2014.
- [40] R. Santbergen and R. J. C. van Zolingen. The absorption factor of crystalline silicon PV cells : A numerical and experimental study. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92(4) :432–444, 2008.
- [41] E. Skoplaki and J. A. Palyvos. Operating temperature of photovoltaic modules : A survey of pertinent correlations. *Renewable Energy*, 34(1) :23–29, 2009.

- [42] M. W. Davis, A. H. Fanney, and B. P. Dougherty. Prediction of Building Integrated Photovoltaic Cell Temperatures*. *Journal of Solar Energy Engineering*, 123(3) :200–210, 2001.
- [43] R. Couderc. *Etude du comportement thermique et électrique des cellules photovoltaïques en silicium cristallin sous concentration*. PhD Thesis, Lyon, INSA, 2015.
- [44] R. Couderc, M. Amara, and M. Lemiti. In-Depth Analysis of Heat Generation in Silicon Solar Cells. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 6(5) :1123–1131, 2016.
- [45] U. Lindefelt. Heat generation in semiconductor devices. *Journal of Applied Physics*, 75(2) :942–957, 1994.
- [46] D. K. Schroder. Carrier lifetimes in silicon. *IEEE transactions on Electron Devices*, 44(1) :160–170, 1997.
- [47] M. A. Green. Radiative efficiency of state-of-the-art photovoltaic cells : Radiative efficiency of photovoltaic cells. *Progress in Photovoltaics : Research and Applications*, 20(4) :472–476, 2012.
- [48] J. Brody, A. Rohatgi, and V. Yelundur. Bulk resistivity optimization for low-bulk-lifetime silicon solar cells. *Progress in Photovoltaics : Research and Applications*, 9(4) :273–285, 2001.
- [49] P. Campbell and M. A. Green. The limiting efficiency of silicon solar cells under concentrated sunlight. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 33(2) :234–239, 1986.
- [50] R. M. Swanson. The promise of concentrators. *Progress in Photovoltaics : Research and Applications*, 8(1) :93–111, 2000.
- [51] C. Kost, J. Mayer, J. Thomsen, N. Hartmann, C. Senkpiel, S. Philipps, S. Nold, S. Lude, N. Saad, and T. Schlegl. Levelized Cost of Electricity Renewable Energy Technologies. page 50.
- [52] Z. S. Judkins, K. W. Johnston, C. Almy, R. J Linderman, B. Wares, N. A. Barton, M. Dawson, and J. Peurach. Performance Results of a Low-Concentration Photovoltaic System Based on High Efficiency Back Contact Cells. page 11, 2010.
- [53] S. P. Philipps, A. W. Bett, K. Horowitz, and S. Kurtz. Current Status of Concentrator Photovoltaic (CPV) Technology. Technical Report NREL/TP-5J00-65130, 1351597, 2015.
- [54] A. Luque and V. M. Andreev, editors. *Concentrator photovoltaics*. Number v.130 in Springer series in optical sciences. Springer, Berlin, 2007. OCLC : ocm78989788.
- [55] M. Ebert, T. Fellmeth, T. Dörsam, F. Clement, D. Biro, M. Wiesenfarth, and U. Eitner. A low concentrating cell and receiver concept based on low cost silicon solar cells. page 110001, 2015.

- [56] M. A. Green and S. R. Wenham. Novel parallel multijunction solar cell. *Applied Physics Letters*, 65(23) :2907–2909, 1994.
- [57] J. G. Fossum and F. A. Lindholm. The dependence of open-circuit voltage on illumination level in p-n junction solar cells. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 24(4) :325–329, 1977.
- [58] A. Royne, C. Dey, and D. Mills. Cooling of photovoltaic cells under concentrated illumination : a critical review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 86(4) :451–483, 2005.
- [59] K. Ryu, J.-G. Rhee, K.-M. Park, and J. Kim. Concept and design of modular Fresnel lenses for concentration solar PV system. *Solar Energy*, 80(12) :1580–1587, 2006.
- [60] J. Nelson. *The Physics of Solar Cells*. World Scientific Publishing Co Inc, 2003.
- [61] M. Grundmann. *The physics of semiconductors : an introduction including nanophysics and applications*. Graduate texts in physics. Springer-Verlag, Berlin ; New York, 2nd ed edition, 2010. OCLC : ocn646113868.
- [62] J. G. Fossum, E. L. Burgess, and F. A. Lindholm. Silicon solar cell designs based on physical behavior in concentrated sunlight. *Solid-State Electronics*, 21(5) :729–737, 1978.
- [63] P. E. Gray. The saturated photovoltage of a pn junction. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 16(5) :424–427, 1969.
- [64] H. J. Hovel. Semiconductors and semimetals. Volume 11. Solar cells. 1975.
- [65] C.-Y. Wu and W.-Z. Shen. The open-circuit voltage of back-surface-field (BSF) pn junction solar cells in concentrated sunlight. *Solid-State Electronics*, 23(3) :209–216, 1980.
- [66] J. W. Stultz and L. C. Wen. Thermal performance testing and analysis of photovoltaic modules in natural sunlight. DOE/JPL LSA task report 5101-31, 1977.
- [67] K. Agroui. Indoor and Outdoor Characterizations of Photovoltaic Module Based on Multicrystalline Solar Cells. *Energy Procedia*, 18 :857–866, 2012.
- [68] B. J. Huang, P. E. Yang, Y. P. Lin, B. Y. Lin, H. J. Chen, R. C. Lai, and J. S. Cheng. Solar cell junction temperature measurement of PV module. *Solar Energy*, 85(2) :388–392, 2011.
- [69] F. P. Incropera, editor. *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley, Hoboken, NJ, 6th ed edition, 2007.
- [70] V. Kumar, R. L. Shrivastava, and S. P. Untawale. Fresnel lens : A promising alternative of reflectors in concentrated solar power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44 :376–390, 2015.

- [71] F. Schubert and D. Spinner. Solar Simulator Spectrum and Measurement Uncertainties. *Energy Procedia*, 92 :205–210, 2016.
- [72] D. Bertrand, S. Manuel, M. Pirot, A. Kaminski-Cachopo, and Y. Veschetti. Modeling of Edge Losses in Al-BSF Silicon Solar Cells. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 7(1) :78–84, 2017.
- [73] A. Bejan. *Convection heat transfer*. John wiley & sons, 2013.
- [74] A. Wang. *High efficiency PERC and PERL silicon solar cells*. University of New South Wales. Electrical Engineering & Telecommunications, 1992.
- [75] J. L. Murray and A. J. McAlister. The Al-Si (Aluminum-Silicon) system. *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, 5(1) :74–84, 1984.
- [76] A. Wang, J. Zhao, and M. A. Green. 24% efficient silicon solar cells. *Applied Physics Letters*, 57(6) :602–604, 1990.
- [77] J. Zhao, A. Wang, P. P. Altermatt, M. A. Green, J. P. Rakotoniaina, and O. Breitenstein. High efficiency PERT cells on n-type silicon substrates. pages 218–221. IEEE, 2002.
- [78] L. Tous, M. Aleman, R. Russell, E. Cornagliotti, P. Choulat, A. Uruena, S. Singh, J. John, F. Duerinckx, J. Poortmans, and R. Mertens. Evaluation of advanced p-PERL and n-PERT large area silicon solar cells with 20.5% energy conversion efficiencies : Evaluation of advanced p-PERL and n-PERT silicon solar cells. *Progress in Photovoltaics : Research and Applications*, 23(5) :660–670, 2015.
- [79] J.-F. Lerat, T. Desrues, J. Le Perchec, M. Coig, F. Milesi, F. Mazen, T. Michel, L. Roux, Y. Veschetti, and S. Dubois. Boron Emitter Formation by Plasma Immersion Ion Implantation in n-type PERT Silicon Solar Cells. *Energy Procedia*, 92 :697–701, 2016.
- [80] P. Basnyat, B. Sopori, S. Devayajanam, S. Shet, J. Binns, J. Appel, and N. M. Ravindra. Experimental study to separate surface and bulk contributions of light-induced degradation in crystalline silicon solar cells. *Emerging Materials Research*, 4(2) :239–246, 2015.
- [81] J. Coello, M. Castro, I. Antón, G. Sala, and M. A. Vázquez. Conversion of commercial si solar cells to keep their efficient performance at 15 suns. *Progress in Photovoltaics : Research and Applications*, 12(5) :323–331, 2004.
- [82] A. Lanterne. *Étude, réalisation et caractérisation de dopages par implantation ionique pour une application aux cellules solaires en silicium*. PhD thesis, 2014.
- [83] J.-F. Lelievre. Elaboration de SiNx : H par PECVD : optimisation des propriétés optiques, passivantes et structurales pour applications photovoltaïques. *Thesis of INSA Lyon*, 2007.

- [84] J. Dupuis, E. Fourmond, O. Nichiporuk, F. Gibaja, and M. Lemiti. Rear passivation schemes for industrial silicon solar cells. In *Proc. of 23rd European PVSC*, page 4, 2008.
- [85] Z. C. Holman, M. Filipič, B. Lipovšek, S. De Wolf, F. Smole, M. Topič, and C. Ballif. Parasitic absorption in the rear reflector of a silicon solar cell : Simulation and measurement of the sub-bandgap reflectance for common dielectric/metal reflectors. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 120 :426–430, 2014.
- [86] F. Gérenton. *Procédés innovants adaptés aux cellules photovoltaïques PERC en couches minces de silicium cristallin*. PhD Thesis, Université de Lyon, 2016.
- [87] S. Ranjan, C. Edwards, and B. E. Ydstie. Surface texturization of silicon wafers : A comparative experimental investigation for bulk, industrial application. pages 2157–2161. IEEE, 2013.
- [88] H. Seidel. Anisotropic Etching of Crystalline Silicon in Alkaline Solutions. *J. Electrochem. Soc.*, 137(11) :15, 1990.
- [89] P. Papet. *Nouveaux concepts pour la réalisation de cellules photovoltaïques à contacts interdigités sur substrats minces en silicium cristallin*. PhD Thesis, INSA de Lyon, 2007.
- [90] J. T. L. Thong, W. K. Choi, and C. W. Chong. TMAH etching of silicon and the interaction of etching parameters. *Sensors and Actuators A : Physical*, 63(3) :243–249, 1997.
- [91] J. S. You, D. Kim, J. Y. Huh, H. J. Park, J. J. Pak, and C. S. Kang. Experiments on anisotropic etching of Si in TMAH. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 66(1–4) :37–44, 2001.
- [92] K. Tokoro, D. Uchikawa, M. Shikida, and K. Sato. Anisotropic etching properties of silicon in KOH and TMAH solutions. In *Micromechatronics and Human Science, 1998. MHS'98. Proceedings of the 1998 International Symposium on*, pages 65–70. IEEE, 1998.
- [93] K. B. Sundaram, A. Vijayakumar, and G. Subramanian. Smooth etching of silicon using TMAH and isopropyl alcohol for MEMS applications. *Microelectronic Engineering*, 77(3–4) :230–241, 2005.
- [94] A. Merlos, M. Acero, M. H. Bao, J. Bausells, and J. Esteve. TMAH/IPA anisotropic etching characteristics. *Sensors and Actuators A : Physical*, 37 :737–743, 1993.
- [95] O. Weiyang, Z. Yao, L. Hailing, Z. Lei, Zhou Chunlan, D. Hongwei, L. Min, L. Weiming, Z. Jun, and W. Wenjing. Texturization of mono-crystalline silicon solar cells in TMAH without the addition of surfactant. *Journal of Semiconductors*, 31(10) :106002, 2010.

- [96] D. Iencinella, E. Centurioni, R. Rizzoli, and F. Zignani. An optimized texturing process for silicon solar cell substrates using TMAH. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 87(1-4) :725–732, 2005.
- [97] P. Papet, O. Nichiporuk, A. Kaminski, Y. Rozier, J. Kraiem, J.-F. Lelievre, A. Chau-martin, A. Fave, and M. Lemiti. Pyramidal texturing of silicon solar cell with TMAH chemical anisotropic etching. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90(15) :2319–2328, 2006.
- [98] L. Wang, F. Wang, X. Zhang, N. Wang, Y. Jiang, Q. Hao, and Y. Zhao. Improving efficiency of silicon heterojunction solar cells by surface texturing of silicon wafers using tetramethylammonium hydroxide. *Journal of Power Sources*, 268 :619–624, 2014.
- [99] R. Charavel, J. Laconte, and J. P. Raskin. Advantages of p++ polysilicon etch stop layer versus p++ silicon. page 699, 2003.
- [100] O. Tabata, R. Asahl, H. Funabashi, K. Shimaoka, and S. Sugfyama. Anisotropic etching of silicon in TMAH solutions. page 7, 1992.
- [101] P.-H. Chen, H.-Y. Peng, C.-M. Hsieh, and M. K. Chyu. The characteristic behavior of TMAH water solution for anisotropic etching on both Silicon substrate and SiO₂ layer. *Sensors and Actuators A : Physical*, 93(2) :132–137, 2001.
- [102] R. A. Sinton and A. Cuevas. A Quasi-Steady-State open-circuit voltage method for solar cell characterization. *Proc. 16th Eur. Photovolt. Specialist's Conf*, 2000.
- [103] S. W. Glunz, S. Rein, J. Y. Lee, and W. Warta. Minority carrier lifetime degradation in boron-doped Czochralski silicon. *Journal of Applied Physics*, 90(5) :2397–2404, 2001.
- [104] D. K. Schroder. *Semiconductor material and device characterization*. IEEE Press ; Wiley, [Piscataway, NJ] : Hoboken, N.J, 3rd ed edition, 2006.
- [105] R. Janoch, A. M. Gabor, A. Anselmo, and C. E. Dube. Contact resistance measurement - observations on technique and test parameters. pages 1–6. IEEE, 2015.
- [106] B. Willsch, P. Kumar, Z. Aabdin, N. Peranio, and O. Eibl. Series and Contact Resistance Measurements between 80k and Room Temperature for Industrial Solar Cells. *Energy Procedia*, 67 :49–63, 2015.
- [107] N. E. Grant, V. P. Markevich, J. Mullins, A. R. Peaker, F. Rougieux, and D. Macdonald. Thermal activation and deactivation of grown-in defects limiting the lifetime of float-zone silicon. *physica status solidi (RRL) - Rapid Research Letters*, 10(6) :443–447, 2016.
- [108] P. Choi, H. Kim, D. Baek, and B. Choi. A study on the electrical characteristic analysis of c-Si solar cell diodes. *Journal of Semiconductor Technology and Science*, 12(1) :59–65, 2012.

-
- [109] N. D. Arora and J. R. Hauser. Temperature dependence of silicon solar cell characteristics. *Solar Energy Materials*, 6(2) :151–158, 1982.
- [110] S. Yoon and V. Garboushian. Reduced temperature dependence of high-concentration photovoltaic solar cell open-circuit voltage (Voc) at high concentration levels. volume 2, pages 1500–1504. IEEE, 1994.
- [111] G. Makrides, B. Zinsser, M. Norton, and G. E. Georghiou. Performance of photovoltaics under actual operating conditions. In *Third generation photovoltaics*. InTech, 2012.
- [112] M. A. Green, Z. Jianhua, A. W. Blakers, M. Taouk, and S. Narayanan. 25-percent efficient low-resistivity silicon concentrator solar cells. *IEEE Electron Device Letters*, 7(10) :583–585, 1986.
- [113] R. Feist, M. Mills, K. Thompson, and N. Ramesh. Comparison of solar cell device thermal degradation and low-irradiance performance. In *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2011 37th IEEE*, pages 002301–002304. IEEE, 2011.
- [114] Y. Zhao, X. Huang, H. Fu, H. Chen, Z. Lu, J. Montes, and I. Baranowski. InGaN-based solar cells for space applications. In *2017 IEEE 60th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*, pages 954–957, Boston, MA, USA, 2017. IEEE.

Publications de l'auteur

Journaux internationaux avec comité de lecture

1. Guillo Lohan B., Amara M., Kaminski-Cachopo A., Lemiti M., *Innovative experimental setup for thermal and electrical characterization of silicon solar cells under controlled environmental conditions*. Solar Energy Materials and Solar Cells 2018 ; 185 : 300–306.

Conférences internationales

1. Guillo Lohan B., Amara M., Couderc R., Kaminski-Cachopo A., Lemiti M., *Development Of A New Experimental Set-Up For Both Thermal And Electrical Characterizations Of Solar Cells*, The 5th International Education Forum on Environment and Energy Science, San Diego, CA, 2016. Présentation Orale.
2. Guillo Lohan B., Amara M., Couderc R., Kaminski-Cachopo A., Lemiti M., *Development of a New Experimental Set-up Allowing Electro-thermal Characterization of Silicon-based Solar Cells*, SiliconPV, Freiburg, Allemagne, 2017. Présentation poster.

Conférences nationales

1. Guillo Lohan B., Amara M., Couderc R., Kaminski-Cachopo A., Lemiti M., *Nouveau dispositif de caractérisations électrique et thermique de cellules photovoltaïques*, JNES, Perpignan, 2016. Présentation poster.
2. Guillo Lohan B., Amara M., Couderc R., Kaminski-Cachopo A., Lemiti M., *Nouveau dispositif de caractérisations électrique et thermique de cellules photovoltaïques*, JNPV, Dourdan, 2016. Présentation poster.
3. Guillo Lohan B., Amara M., Couderc R., Kaminski-Cachopo A., Lemiti M., *Study Of Electro-Thermal Behaviour of Silicon-Based Solar Cells Under Controlled Environmental Conditions*, PVTC, Marseille, 2017. Présentation poster.
4. Guillo Lohan B., Amara M., Couderc R., Kaminski-Cachopo A., Lemiti M., *Electro-thermal behaviour of different Silicon-Based Solar Cell Architectures under Controlled Environmental Conditions*, E-MRS, Strasbourg, 2017. Présentation poster.

5. Guillo Lohan B., Amara M., Couderc R., Kaminski-Cachopo A., Lemiti M., *Caractérisation avancée du comportement thermique et électrique des cellules photovoltaïques à base de silicium*, JNPV, Dourdan, 2017. Présentation poster.



FOLIO ADMINISTRATIF

THESE DE L'UNIVERSITE DE LYON OPEREE AU SEIN DE L'INSA LYON

NOM : GUILLO LOHAN

DATE de SOUTENANCE :

Prénoms : Benoit, Marie

TITRE : Modélisation, élaboration et caractérisation de cellules photovoltaïques à base de silicium cristallin pour des applications sous concentration

NATURE : Doctorat

Numéro d'ordre : 2018LYSEI093

Ecole doctorale : EEA

Spécialité : Electronique, Micro et Nanoélectronique, Optique et Laser

RESUME :

Les performances électriques des cellules photovoltaïques à base de silicium sont fortement dégradées lorsque leur température augmente. Cette problématique, pourtant bien connue, n'est pas suffisamment prise en considération dans l'industrie du photovoltaïque. Pour parer à cette dégradation, deux voies d'améliorations peuvent être explorées : diminuer la température de fonctionnement des cellules ou réduire leurs coefficients de dégradation en température. Cette étude est d'autant plus importante pour les applications sous concentrations, un éclairage élevé favorisant l'échauffement des cellules. Pour les facteurs de concentration élevés, l'utilisation de systèmes de refroidissement actifs réduit drastiquement la température de fonctionnement. Pour les faibles éclairages, le refroidissement passif est préféré, bien moins coûteux en énergie. Ce travail de thèse est focalisé sur l'étude du comportement thermo-électrique des cellules sous faible concentration du rayonnement incident.

Un banc de caractérisation innovant développé dans cette thèse a rendu possible la quantification des variations de la température de la cellule avec la tension de polarisation sous différents facteurs de concentration. Avec l'augmentation de la polarisation, une évolution du facteur d'émission thermique est observée du fait des variations de la concentration de porteurs de charge minoritaires. Le refroidissement radiatif est minimal au courant de court-circuit et est maximal à la tension de circuit ouvert : la température atteinte au point de court-circuit est supérieure à celle atteinte en circuit ouvert. Pour une cellule donnée, sous un éclairage de 3 soleils, un écart de température de 6.2 °C a pu être mesuré entre ces deux points. La fabrication de cellules avec des propriétés différentes nous a permis de confirmer l'importance du dopage de la base et de l'architecture sur l'augmentation du refroidissement radiatif avec la polarisation. De plus, la comparaison du comportement thermo-électrique des cellules de type de dopages différents a mis en avant de plus faibles coefficients de dégradation en température de la tension en circuit ouvert pour les cellules ayant un substrat de type n. Par exemple, pour une température de et sous un éclairage de 1 soleil, un coefficient de dégradation en température du V_{oc} de $-0.45 \% \cdot ^\circ C^{-1}$ a été mesuré sur une cellule de type n contre $-0.49 \% \cdot ^\circ C^{-1}$ pour une cellule de type p.

MOTS-CLÉS : Cellule photovoltaïque, comportement thermo-électrique, émissivité, refroidissement radiatif, caractérisation avancée

Laboratoire (s) de recherche : Institut des Nanotechnologies de Lyon (INL), Centre d'Energétique et de Thermique de Lyon (CETHIL), Institut de Microélectronique Electromagnétisme et Photonique et Laboratoire d'Hyperfréquences et de Caractérisation (IMEP-LaHC)

Directeur de thèse: LEMITI Mustapha

Co-encadrant de thèse : AMARA Mohamed

Président de jury :

Composition du jury : GOURBILLEAU Fabrice, DUBOIS Sébastien, CLERC Raphaël, KAMINSKI-CACHOPO Anne, AMARA Mohamed, LEMITI Mustapha