



HAL
open science

Développement de cellules multijonctions submillimétriques pour le photovoltaïque à concentration (micro-CPV) et évaluation de leur robustesse

Pierre Albert

► **To cite this version:**

Pierre Albert. Développement de cellules multijonctions submillimétriques pour le photovoltaïque à concentration (micro-CPV) et évaluation de leur robustesse. Electronique. Université de Bordeaux; Université de Sherbrooke (Québec, Canada), 2020. Français. NNT : 2020BORD0209 . tel-03121153

HAL Id: tel-03121153

<https://theses.hal.science/tel-03121153>

Submitted on 26 Jan 2021

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.



UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

université
de **BORDEAUX**

THÈSE EN COTUTELLE PRÉSENTÉE

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

DE L'UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE ET DE L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX EN ÉLECTRONIQUE

FACULTÉ DE GÉNIE, DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET INFORMATIQUE

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGÉNIEUR

Par Pierre ALBERT

**Développement de cellules multijonctions submillimétriques
pour le photovoltaïque à concentration (micro-CPV)
et évaluation de leur robustesse**

Soutenue le 26 novembre 2020

Devant le jury composé de:

Alain DOLLET	Directeur de recherche	PROMES – UPR CNRS – France	Président et rapporteur
César DOMINGUEZ	Professeur associé	Universidad Politécnica de Madrid – Espagne	Rapporteur
Vincent AIMEZ	Professeur	Université de Sherbrooke – Canada	Co-directeur
Laurent BÉCHOU	Professeur	Université de Bordeaux – France	Co-directeur
Christian DUBUC	PhD	STACE – Canada	Examineur
Maxime DARNON	Professeur associé	Université de Sherbrooke – Canada	Examineur
Yannick DESHAYES	Maître de conférences	Université de Bordeaux – France	Invité
Abdelatif JAOUAD	Professeur associé	Université de Sherbrooke – Canada	Invité

Titre : Développement de cellules multijonctions submillimétriques pour le photovoltaïque à concentration (micro-CPV) et évaluation de leur robustesse

Résumé : Les dispositifs photovoltaïques, dominés par les panneaux en silicium, ont su évoluer pour proposer aujourd'hui des coûts d'électricité concurrentiels aux sources fossiles. Parmi les technologies émergentes, le photovoltaïque à concentration (CPV pour Concentrator Photovoltaics) repose sur l'utilisation de systèmes optiques (miroirs ou lentilles) qui concentrent la lumière sur des cellules de faibles dimensions ($< \text{cm}^2$) mais très efficaces ($> 40\%$). Malgré les performances élevées des modules CPV, cette technologie n'a pas su s'imposer en raison d'un coût élevé découlant de limitations technologiques (gestion thermique, pertes résistives...). Le micro-CPV promet de répondre à ces limitations en se basant sur l'utilisation de microcellules ($< \text{mm}^2$). Cependant, des défis restent à relever : les procédés de fabrication et d'assemblage des microcellules doivent être adaptés, en s'inspirant de la microélectronique notamment, pour permettre de fortes efficacités et un coût restreint. Aussi, la fiabilité de ce nouveau type de dispositifs n'est pas connue. Ce mémoire de thèse a l'ambition de traiter de ces sujets, en se focalisant particulièrement sur les procédés de fabrication critiques.

Mots-clés : Photovoltaïque à concentration (CPV), microfabrication, cellules solaires à multijonctions, fiabilité

Title : Development of submillimeter multijunction cells for Concentrator Photovoltaics (micro-CPV) and assessment of their robustness

Abstract : Photovoltaic systems, dominated by silicon panels, have evolved to propose competitive electricity costs compared to fossil sources. Among emerging technologies, Concentrator Photovoltaics relies on the use of optical systems (mirrors or lenses) that concentrate sunlight onto small ($< \text{cm}^2$) solar cells with high efficiency ($> 40\%$). Whereas high efficiency is achievable by CPV modules, this technology has not been widely adopted due to its high cost arising from technological limitations (thermal management, resistive losses...). Micro-CPV promises to tackle these limitations using microcells ($< \text{mm}^2$). However, challenges remain ahead: fabrication processes and assembly of microcells must be adapted, by learning from microelectronics for example, to allow high performance at a restrained cost. Moreover, reliability of such novel devices is not known. This thesis deals with these topics, by particularly assessing critical fabrication processes.

Keywords : Concentrator photovoltaics (CPV), microfabrication, multijunction solar cells, reliability

Unités de recherche

Laboratoire Nanotechnologies et Nanosystèmes (LN2), CNRS UMI n°3463,
Université de Sherbrooke, 3000 Boul. de l'Université, Sherbrooke QC, J1K 0A5, Canada

Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système (IMS), CNRS UMR n°5218,
Université de Bordeaux, 351 Cours de la Libération, 33405 Talence, France

Résumé

MOTS-CLÉS : photovoltaïque, multijonctions, micro-CPV, microcellules, microfabrication, MIM, robustesse, vieillissement accéléré.

La technologie micro-CPV (*Concentrator Photovoltaics*) a émergé dans le domaine de l'énergie solaire avec la promesse de réduire les coûts de production d'électricité. Le micro-CPV est basé sur l'utilisation de cellules submillimétriques à haut rendement ($\eta > 40\%$), avec lesquelles plusieurs défis restent à relever pour leur exploitation à grande échelle. Parmi ces défis, on retrouve la nécessité de développer des procédés de microfabrication adaptés, de repenser l'assemblage et d'évaluer la fiabilité de ces dispositifs innovants tout en les comparant à l'état de l'art du domaine.

Basé sur des techniques de microfabrication issues de la microélectronique, un procédé de fabrication complet et optimisé est proposé pour la fabrication de microcellules triple jonctions InGaP/InGaAs/Ge performantes. Des cellules de différentes géométries (rectangulaires, circulaires, hexagonales) dont la surface varie de 0.068 mm^2 à 12.25 mm^2 ont été réalisées et caractérisées. Ceci a été rendu possible grâce à l'utilisation d'étapes de gravure plasma, qui a également permis de fabriquer des cellules possédant leurs deux contacts sur la face avant. Il a été mis en évidence que les recombinaisons de périmètre limitent les performances des plus petites cellules. Cependant, un procédé de passivation a permis de restreindre leur impact. Au final, les performances des cellules fabriquées ont été mesurées sous concentration, et bien que l'efficacité maximale des cellules de 0.076 mm^2 soit inférieure de 0.6% à celle d'une cellule de 1 mm^2 , nous avons montré que l'effet résistif n'est pas limitant. Dans ce contexte, il est attendu que les performances des plus petites cellules soient les plus élevées sous très haute concentration (*e.g.* $C_g > 500 \text{ X}$).

Les cellules ayant leurs contacts en face avant ont été utilisées comme briques de base pour des intégrations en MIM (*Monolithic Interconnected Modules*). Ce type de dispositif, adapté aux forts flux lumineux tels que ceux rencontrés dans le CPV (plusieurs dizaines de W/cm^2), permet de générer de fortes tensions de sortie tout en travaillant à bas courant, grâce à l'interconnexion en série des cellules qui le composent. Les procédés de fabrication d'un MIM triple jonction, qui à notre connaissance est une première au regard des résultats publiés dans la littérature, ont été développés. Ceux-ci offrent une grande versatilité dans le design (rectangulaire, circulaire, hexagonale), le nombre de cellules (de 2 à 9) et leur taille (de 1 mm à 3 mm de côté). L'optimisation de la surface utilisée est primordiale et a été discutée. Finalement, les prototypes fabriqués démontrent de très bonnes performances avec une efficacité certifiée de 35.1% sous 798 X pour un MIM constitué de 4 cellules, qui apparaît comme le record d'efficacité obtenue à ce jour, toutes technologies de MIM confondues.

Des essais de vieillissement accéléré ont été mis en place pour évaluer la robustesse de microcellules fabriquées et la comparer aux cellules CPV de plus grande taille, et pour lesquelles quelques études de fiabilité ont été rapportées dans la littérature. Deux types de tests à contrainte échelonnée sont développés en s'appuyant sur les résultats de bibliographie et prenant en compte les besoins du micro-CPV : le PSSAT (*Passive Step Stress Accelerated Test*, contrainte = température de 85°C à 185°C) et le ASSAT (*Active Step Stress Accelerated Test*, contraintes = température de 65°C à 185°C + courant équivalent à un fonctionnement sous 1000 X). Les résultats des tests ont été discutés et montrent la complémentarité des deux techniques de vieillissement accélérés étudiées. L'étude de robustesse a démontré des résultats similaires entre les microcellules et les cellules de plus grande taille, ce qui suggère que des niveaux de fiabilité du micro-CPV comparables à ceux du CPV conventionnel peuvent être attendus à ce stade.

Table des matières

TABLE DES MATIERES.....	I
LISTE DES FIGURES	V
LISTE DES TABLEAUX.....	IX
LISTE DES ACRONYMES.....	XI
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE 1: CONTEXTE, ÉTAT DE L'ART ET APPROCHE DU PROJET.....	5
1.1 CONTEXTE ÉNERGÉTIQUE.....	6
1.1.1 <i>Le marché du photovoltaïque.....</i>	<i>6</i>
1.1.2 <i>Technologies sur le marché.....</i>	<i>6</i>
1.2 GÉNÉRALITÉS SUR LES CELLULES SOLAIRES.....	7
1.2.1 <i>Énergie solaire.....</i>	<i>7</i>
1.2.2 <i>Effet photoélectrique.....</i>	<i>8</i>
1.2.3 <i>Caractéristiques électriques.....</i>	<i>9</i>
1.2.4 <i>Limitations intrinsèques.....</i>	<i>10</i>
1.3 CELLULES MULTIJONCTIONS.....	11
1.3.1 <i>Intérêt d'une structure multijonctions.....</i>	<i>11</i>
1.3.2 <i>Structures de cellules multijonctions.....</i>	<i>12</i>
1.3.3 <i>Performances de cellules multijonctions.....</i>	<i>14</i>
1.4 PHOTOVOLTAÏQUE À CONCENTRATION.....	14
1.4.1 <i>Effet de la concentration solaire.....</i>	<i>15</i>
1.4.2 <i>Limitations du CPV.....</i>	<i>19</i>
1.5 MICRO-CPV.....	22
1.5.1 <i>Réponses aux limitations du CPV.....</i>	<i>22</i>
1.5.2 <i>État de l'art sur le micro-CPV.....</i>	<i>26</i>
CONCLUSION DU CHAPITRE 1.....	32
CHAPITRE 2: DÉVELOPPEMENT DE MICROCELLULES PERFORMANTES.....	33
2.1 MÉTHODOLOGIE DE DÉVELOPPEMENT DE MICROCELLULES MULTIJONCTIONS.....	34
2.1.1 <i>Fabrication et caractérisation de cellules multijonctions standards.....</i>	<i>34</i>
2.1.2 <i>Principaux défis technologiques pour la fabrication et la caractérisation de microcellules.....</i>	<i>36</i>
2.1.3 <i>Axes proposés pour la fabrication de microcellules performantes.....</i>	<i>38</i>
2.2 ISOLATION ÉLECTRIQUE DES MICROCELLULES.....	38
2.2.1 <i>Techniques d'isolation électrique envisagées.....</i>	<i>39</i>
2.2.2 <i>Technique d'isolation électrique par gravure plasma retenue.....</i>	<i>43</i>
2.2.3 <i>Caractérisation de microcellules isolées par gravure plasma.....</i>	<i>44</i>
2.3 EFFET DES RECOMBINAISONS DE PÉRIMÈTRE DANS LES MICROCELLULES.....	46
2.3.1 <i>Modélisation pour l'identification des recombinaisons de périmètre.....</i>	<i>46</i>
2.3.2 <i>Caractérisation électrique des effets de recombinaisons de périmètre.....</i>	<i>48</i>
2.3.3 <i>Passivation des microcellules.....</i>	<i>49</i>
2.3.4 <i>Effet de la concentration solaire sur les performances électriques des microcellules.....</i>	<i>53</i>
2.4 CONTACTS ÉLECTRIQUES DES MICROCELLULES.....	54
2.4.1 <i>Contacts d'émetteur sur les cellules.....</i>	<i>54</i>

Table des matières

2.4.2	Contacts de base	56
2.5	SINGULATION DES MICROCELLULES	61
2.5.1	Techniques de singulation envisagées.....	61
2.5.2	Technique de singulation retenue par gravure plasma	65
2.6	CARACTÉRISATION CERTIFIÉE DES MICROCELLULES EN FONCTION DE LA CONCENTRATION	66
CONCLUSION DU CHAPITRE 2		69
CHAPITRE 3: MICRO-ASSEMBLAGE MONOLITHIQUE DE CELLULES		71
3.1	MODULES MICRO-INTÉGRÉS (MIM)	72
3.1.1	Pertes Joule dans un MIM.....	72
3.1.2	Architecture type.....	73
3.1.3	Défis technologiques.....	74
3.2	ÉTAT DE L'ART SUR LES MIM	74
3.2.1	MIM monojonctions basés sur silicium	75
3.2.2	MIM monojonctions basés sur matériaux III-V.....	76
3.2.3	MIM multijonctions.....	78
3.2.4	Bilan de l'état de l'art sur les MIM.....	80
3.3	FABRICATION DE MIM À TRIPLE JONCTION.....	80
3.3.1	Isolation par remplissage des tranchées de singulation.....	81
3.3.2	Contrainte sur l'épaisseur maximale de l'interconnexion.....	82
3.3.3	Planarisation pour l'interconnexion	83
3.3.4	Métallisation d'interconnexion	87
3.3.5	Optimisation de la surface des MIM à triple jonction.....	89
3.3.6	Bilan sur la fabrication des MIM.....	93
3.4	CARACTÉRISATION DES MIM À TRIPLE JONCTION	94
3.4.1	Mesures électriques sous illumination « un soleil ».....	94
3.4.2	Mesures électriques certifiées en fonction de la concentration.....	96
CONCLUSION DU CHAPITRE 3		98
CHAPITRE 4: ESSAIS DE VIEILLISSEMENT ACCÉLÉRÉ POUR L'ÉVALUATION DE LA ROBUSTESSE DES MICROCELLULES.....		100
4.1	ROBUSTESSE DANS LE CPV.....	101
4.1.1	Définitions.....	101
4.1.2	Vieillissement accéléré	102
4.1.3	Vieillisements accélérés dans le CPV	104
4.2	MÉTHODOLOGIE POUR LES TESTS DE VIEILLISSEMENT ACCÉLÉRÉ DE MICROCELLULES	108
4.2.1	Conception des tests de vieillissement accéléré.....	108
4.2.2	Dispositifs testés.....	110
4.2.3	Suivi des performances.....	113
4.2.4	Bilan sur la méthodologie pour le vieillissement accéléré.....	114
4.3	VARIATIONS DES PERFORMANCES DES MICROCELLULES SOUS VIEILLISSEMENT ACCÉLÉRÉ.....	115
4.3.1	Variations des performances des microcellules sans ARC sous PSSAT	115
4.3.2	Variations des performances de microcellules avec ARC sous PSSAT	116
4.3.3	Variations des performances de microcellules avec ARC sous ASSAT.....	117
4.3.4	Synthèse sur les résultats des tests de vieillissement accéléré	118
4.4	ANALYSE DES RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	118
4.4.1	Discussion sur l'impact de la présence ou non de l'ARC passivant.....	118
4.4.2	Comparaison du type de tests de vieillissement accéléré (passif vs actif).....	120
CONCLUSION DU CHAPITRE 4		122

CONCLUSION GENERALE.....	123
PERSPECTIVES.....	127
LISTE DES PUBLICATIONS.....	129
LISTE DES COMMUNICATIONS	129
BIBLIOGRAPHIE.....	133
ANNEXE: PROCEDES DE FABRICATION DETAILLES.....	141

Liste des figures

CHAPITRE 1: CONTEXTE, ÉTAT DE L'ART ET APPROCHE DU PROJET

Figure 1-1: Spectres d'illumination solaire AM1.5 global, AM1.5 direct et AM0 [9]	8
Figure 1-2: Processus d'absorption de photon dans un matériau semiconducteur	9
Figure 1-3 : Schéma de base d'une cellule solaire en silicium et principe de photogénération [10]	9
Figure 1-4 : Caractéristiques $I-V$ et $P-V$ d'une cellule et paramètres électriques associés	10
Figure 1-5 : Puissance utile et mécanismes principaux de pertes dans une cellule en fonction du <i>bandgap</i> d'une cellule [12]	11
Figure 1-6 : Spectre AM1.5g et part de celui-ci absorbé par (a) une cellule en Si et (b) une cellule InGaP/InGaAs/Ge [16]	12
Figure 1-7 : <i>Bandgap</i> d'un matériau en fonction de son paramètre de maille [16]	12
Figure 1-8 : Structure de cellule (a) triple jonction InGaP/InGaAs/Ge [12] et (b) à six jonctions (AlGaInP/AlGaAs/GaAs/GaInAs/GaInAs/GaInAs) [18]	13
Figure 1-9 : Records d'efficacité de cellules multijonctions obtenus en laboratoire, et classés par technologie, de 2005 à 2020 [19].	14
Figure 1-10 : Évolution typique des paramètres électriques d'une cellule sous concentration [12]	15
Figure 1-11 : Exemples d'optique de concentration avec (a) une lentille de Fresnel associée à une lentille secondaire et (b) un système de miroir dit Cassegrain [27]	17
Figure 1-12 : Illustrations de la technologie CPV à récepteurs denses avec (a) un récepteur dense commercialisé par Azur Space, composé de 48 cellules [29], (b) un système Raygen [30] et (c) un système CPV à l'Université de Sherbrooke	18
Figure 1-13 : Illustrations de la technologie CPV à récepteur individuel avec (a) un récepteur utilisant une cellule de 3 mm et (b) un système STACE installé à l'Université de Sherbrooke	18
Figure 1-14 : Composantes principales de la résistance série dans une cellule InGaP/InGaAs/Ge [35]	21
Figure 1-15 : Carte mondiale de l'ensoleillement direct (DNI) [39]	22
Figure 1-16 : Différence de température entre l'air ambiant et la jonction d'une cellule en fonction de sa taille. Elle est considérée comme fonctionnant sous 625 X et assemblée sur un circuit imprimé [46]	23
Figure 1-17: <i>Fill factor</i> calculé de cellules à triple jonctions en fonction de la concentration pour différentes surfaces de cellule [45]	24
Figure 1-18 : Techniques de placement de cellules alternatifs avec (a) le <i>transfer printing</i> proposé par Semprius [47] et (b) l'auto-alignement fluide proposé par Panasonic [48] ...	25
Figure 1-19 : Illustration du micro-tracking adopté par Insolight [55]	26
Figure 1-20 : Images de microcellules de 600 μm de côté développées par Semprius avec (a) une cellule nue [47] et (b) une cellule assemblée sur son récepteur individuel [61]	26
Figure 1-21 : Schéma du <i>transfer printing</i> d'une cellule 3J sur 2J à quatre terminaux [64]	27
Figure 1-22 : Illustrations des travaux développés dans avec (a) le micromodule de 25 cellules, (b) un schéma en coupe de la cellule avec contacts en face arrière, assemblée sur circuit imprimé et (c) des cellules de 600 \times 600 μm^2 [44]	28
Figure 1-23 : Image MEB en coupe de la cellule utilisant les contacts en face arrière [66]	28
Figure 1-24 : Illustrations des travaux de [67] avec (a) une image au microscope d'une cellule de 0.97 \times 0.97 mm^2 avec les contacts en face avant et (b) un schéma en coupe de la cellule.	28

Liste des figures

Figure 1-25 : Illustrations des technologies développées dans [68] avec (a) une image au microscope d'une cellule de $600 \times 600 \mu\text{m}^2$ avec contact en face avant et (b) un schéma de l'assemblage du micromodule en coupe	29
Figure 1-26 : Illustrations des travaux développées dans [69] avec (a) un schéma en coupe de la cellule assemblée telle un CMS et (b) un schéma du micromodule complet.....	29
Figure 1-27 : Schéma de principe du module micro-CPV/Si proposé dans [71].....	30
Figure 1-28 : Illustrations de la technologie utilisée dans [73] avec (a) le schéma de principe du micromodule développé, (b) le substrat-cellule Si avec des cavités gravées, (c) une image au microscope d'une cellule InGaP/GaAs fabriquée et (d) le parquet de lentilles monobloc en PDMS.....	31
Figure 1-29: Axes d'étude suivis dans cette thèse et sous-objectifs associés	32

CHAPITRE 2: DÉVELOPPEMENT DE MICROCELLULES PERFORMANTES

Figure 2-1: Schéma d'une cellule CPV complète	35
Figure 2-2 Axes d'études proposés pour la fabrication de microcellules performantes	38
Figure 2-3: Images MEB en perspective de cellules triple jonction isolée par découpe partielle avec (a) les lignes de passage de la scie qui forment des <i>mesas</i> et (b) une vue rapprochée sur les défauts générés dans l'hétérostructure III-V	40
Figure 2-4: Images MEB en coupe des deux côtés d'un <i>mesa</i> gravé chimiquement avec (a) une pente positive et (b) une pente négative selon le côté du <i>mesa</i>	41
Figure 2-5: Image MEB en perspective d'un <i>mesa</i> formé par gravure plasma.....	42
Figure 2-6: Émission optique correspondant au germanium, à l'indium et au gallium en fonction du temps de gravure des <i>mesas</i> et couches de la structure associées	44
Figure 2-7: Densité de courant en fonction de la tension pour des cellules rectangulaires de 12.25 mm^2 à 0.076 mm^2	45
Figure 2-8: Modèle simple à deux diodes d'une cellule solaire	47
Figure 2-9: Tension de circuit ouvert en fonction du rapport périmètre/aire pour différentes formes de cellules.....	48
Figure 2-10: Densité de courant d'obscurité linéaire de cellules de 0.076 mm^2 , 0.25 mm^2 et 1 mm^2	49
Figure 2-11: Densité de courant en fonction de la tension de cellules de 12.25 mm^2 et de 0.076 mm^2 sans et avec ARC	51
Figure 2-12: Tension de circuit ouvert en fonction du rapport périmètre/aire pour des cellules rectangulaires sans et avec ARC	52
Figure 2-13: Tension de circuit ouvert en fonction de la concentration pour une cellule de 1 mm^2 et pour une cellule de 0.25 mm^2	53
Figure 2-14: Impact du pas de la grille optimisé sur l'efficacité en fonction de la concentration (modélisation réalisée par Christopher E. Valdivia, SUNLAB, U.Ottawa)	55
Figure 2-15: Designs de contacts émetteurs développés dans ce projet	56
Figure 2-16: Cellule carrée de $500 \mu\text{m}$ de côté avec un contact de base en face avant de $200 \mu\text{m}$ de large sur les quatre côtés	57
Figure 2-17: Densités de courant en fonction de la tension de cellules de 9 mm^2 et de 0.25 mm^2 avec leur contact de base en face arrière ou en face avant. Le tableau inséré montre les paramètres électriques issus de ces caractéristiques.	58
Figure 2-18: <i>Fill factor</i> en fonction de la largeur du contact de base en face avant pour des cellules de 0.25 mm^2 mesurées sous une illumination correspondant à 699 X	59

Figure 2-19: Caractéristiques $J-V$ de cellules de 0.25 mm^2 ayant différentes formes de contacts de base (sur 4, 3, 2 ou 1 côtés de la cellule)	60
Figure 2-20: Techniques de singulation par laser avec (a) le principe de la singulation par focalisation sub-surface (haut) et la surface du <i>wafer</i> après découpe (bas) et (b) le principe de la singulation par ablation (haut) et la surface du <i>wafer</i> après découpe (b) [98]	62
Figure 2-21: Tranchées de $5 \mu\text{m}$ gravées dans un <i>wafer</i> de germanium [101]	63
Figure 2-22: Rendement du <i>wafer</i> (surface active/surface totale) en fonction des dimensions d'une cellule pour différentes techniques de singulation	65
Figure 2-23: Cellules de dimensions et de géométries variables, avec (a) contacts standards et (b) contacts en face avant.....	66
Figure 2-24: Caractéristiques $J-V$ sous différents facteurs de concentration d'une cellule de (a) 1 mm^2 et (b) 0.25 mm^2	67
Figure 2-25: Paramètres électriques (haut: V_{OC} , milieu: FF et bas: efficacité) de cellules de 1 mm^2 et de 0.25 mm^2 en fonction de la concentration.....	68

CHAPITRE 3: MICRO-ASSEMBLAGE MONOLITHIQUE DE CELLULES

Figure 3-1: Schéma d'un MIM fait de quatre cellules assemblées en série.....	71
Figure 3-2: Receveur CPV avec quatre MIM monojonctions basés sur GaAs et constitués de 23 cellules longitudinales chacun [103]	72
Figure 3-3: Schéma de principe d'un MIM sur substrat semi-isolant [104].....	74
Figure 3-4: Exemples de designs de MIM basés sur silicium	75
Figure 3-5: Exemples de designs de MIM basé sur matériaux III-V	76
Figure 3-6: Design de MIM en camembert et image MEB du dispositif associé [117].....	77
Figure 3-7: Exemple de design de MIM double jonction basé sur matériaux III-V.....	78
Figure 3-8: Images MEB de microsection d'une tranchée d'une interconnexion réalisée par : a) gravure humide et b) gravure sèche [121].....	79
Figure 3-9: Design d'un MIM triple jonction proposé par Spectrolab [106].....	80
Figure 3-10: Vue en coupe de cellules avec contacts en face avant, singulées sur un substrat Si	81
Figure 3-11: Remplissage de tranchées d'un substrat avec un matériau à viscosité a) trop faible, b) idéale et c) trop élevée	82
Figure 3-12: Schéma d'interconnexion typique entre deux cellules avec matériau planarisant	83
Figure 3-13: Images MEB en perspective de tests de planarisation avec de la SU-8 pour différents paramètres. Les paramètres d'étalement sont : a. monocouche de SU-8 2015 (60 s à 4000 tr/min), b. tricouche de SU-8 2005 (3 x 60 s à 3500 tr/min) et c. bicouche de SU-8 2005 (2 x 60 s à 2500 tr/min).....	85
Figure 3-14: Profilométrie en coupe (a) et schéma en coupe associé (b) d'une planarisation bicouche de SU-8 2005 (2 x 60 s à 2500 tr/min) entre deux cellules élémentaires	86
Figure 3-15: Images d'une interconnexion de $100 \mu\text{m}$ entre deux cellules avec a) une vue de dessus obtenue au microscope optique et b) une vue en perspective obtenue au MEB.	89
Figure 3-16: Rendement de surface d'un MIM carré en fonction de ses dimensions, du nombre de cellules élémentaires qui le compose et la part de surface du contact de base en face avant. Une singulation par plasma avec une largeur de ligne de découpe de $15 \mu\text{m}$ est considérée..	91
Figure 3-17: Rendement de surface d'un dispositif carré selon ses dimensions et le nombre de cellules élémentaires qui le compose. Une singulation par plasma avec une largeur de ligne de découpe de $15 \mu\text{m}$ est considérée.....	92

Liste des figures

Figure 3-18: <i>Layout</i> du photomasque montrant les différents designs MIM proposés.....	92
Figure 3-19: Exemple de prototypes de MIM triple jonction fabriqués avec a) un MIM carré de 4 cellules, b) un MIM carré de 9 cellules, c) un MIM hexagonal de 7 cellules et d) un MIM circulaire de 2 cellules.....	93
Figure 3-20 : Caractéristiques J-V mesurées sous un soleil des MIM et d'une cellule simple. Seule une série de 5 cellules du MIM hexagonal est mesurée en raison d'une interconnexion défectueuse.....	94
Figure 3-21: Caractéristiques électriques (V_{OC} , FF et efficacité) d'un MIM de 4 cellules en fonction de la concentration.....	97

CHAPITRE 4: ESSAIS DE VIEILLISSEMENT ACCÉLÉRÉ POUR L'ÉVALUATION DE LA ROBUSTESSE DES MICROCELLULES

Figure 4-1: Modèle standard de vie accélérée.....	102
Figure 4-2: Modèle à une diode d'une cellule (a) en convention photogénération et (b) en convention polarisation directe.....	105
Figure 4-3: Profil de température de stockage et périodicité des mesures $I-V$ dans le cas des tests à stress échelonné passif.....	109
Figure 4-4 : Profil de température de stockage et périodicité des mesures $I-V$ dans le cas du test à stress échelonné actif.....	110
Figure 4-5: Échantillon constitué de cellules non-singulées avec ARC assemblées sur un support FR4 avec cuivre via une brasure à l'indium.....	111
Figure 4-6: Cellule de 0.076 mm ² assemblée sur un support en aluminium verni via wirebonding et pâte à braser SAC 305.....	112
Figure 4-7: Setup pour le test accéléré actif de 15 cellules sous polarisation en courant dans une étuve HERAEUS.....	113
Figure 4-8: Évolution des performances des cellules sous test en fonction de la température avec a., b.: les cellules sans ARC sous PSSAT, c., d.: les cellules avec ARC sous PSSAT et e., f.: les cellules avec ARC sous ASSAT. Les paramètres suivis sont: a., c., e.: P_{MPP} en fonction de la valeur initiale P_{MPP0} et b., d., f.: V_{OC} en fonction de la valeur initiale V_{OC0}	116
Figure 4-9: Cartographie en couleur des densités de courant dans la sous-cellule supérieure d'une cellule InGaP/InGaAs/Ge (a) en photogénération sous 820 X et (b) en polarisation directe avec un courant équivalent à un fonctionnement sous 820 X [151].....	121

Liste des tableaux

CHAPITRE 1: CONTEXTE, ÉTAT DE L'ART ET APPROCHE DU PROJET

Tableau 1-1 : Prototypes et micromodules commerciaux dans le micro-CPV.....	31
---	----

CHAPITRE 2: DÉVELOPPEMENT DE MICROCELLULES PERFORMANTES

Tableau 2-1 : Procédés pour la fabrication de cellules multijonctions.....	34
Tableau 2-2: Caractéristiques des techniques d'isolation électriques envisagées.....	43
Tableau 2-3: Paramètres de la gravure plasma pour l'isolation électrique	43
Tableau 2-4: Paramètres électriques des cellules fabriquées et effets de la réduction de leurs dimensions.....	46
Tableau 2-5 : Tension de circuit ouvert en fonction de la présence de l'ARC sur des cellules de 12.25 mm ² et de 0.076 mm ²	51
Tableau 2-6: Caractéristiques des techniques de singulation envisagées	64
Tableau 2-7: Paramètres de la singulation par plasma.....	65

CHAPITRE 3: MICRO-ASSEMBLAGE MONOLITHIQUE DE CELLULES

Tableau 3-1: Résumé des travaux principaux pour les MIM dédiés à la conversion solaire.....	80
Tableau 3-2: Avantages et inconvénients des matériaux planarisants	84
Tableau 3-3: Résumé des paramètres de fabrication utilisés pour la planarisation	86
Tableau 3-4 : Paramètres électriques mesurés et espérés sous un soleil des MIM fabriqués et paramètres électriques d'une cellule simple de 800 µm de côté. Seule une série de 5 cellules sur le MIM hexagonal a été mesurée en raison d'une interconnexion défailante.	95

CHAPITRE 4: ESSAIS DE VIEILLISSEMENT ACCÉLÉRÉ POUR L'ÉVALUATION DE LA ROBUSTESSE DES MICROCELLULES

Tableau 4-1: Paramètres des tests de vieillissement accéléré.....	114
Tableau 4-2: Synthèse sur les résultats des tests de vieillissement accéléré, la comparaison de ceux-ci et les pistes d'interprétation proposées.....	118

Liste des acronymes

Acronyme	Signification	Acronyme	Signification
AIME	Atelier Interuniversitaire de Micro-nano Électronique	LPC	<i>Laser Power Conversion</i>
AF	<i>Acceleration Factor</i>	MEB	Microscopie Électronique à Balayage
ALD	<i>Atomic Layer Deposition</i>	MIM	<i>Monolithic Interconnected Module</i>
ARC	<i>AntiReflective Coating</i>	NTC	<i>Negative Temperature Coefficient</i>
ASSAT	<i>Active Step Stress Accelerated Test</i>	PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
CCL	Couche de Conduction Latérale	PDMS	PolyDiMéthylSiloxane
CMS	Composants Montés en Surface	PECVD	<i>Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition</i>
CPV	<i>Concentrator Photovoltaics</i>	PSSAT	<i>Passive Step Stress Accelerated Test</i>
CSTC	<i>Concentrator Standard Test Conditions</i>	PV	PhotoVoltaire
DNI	<i>Direct Normal Irradiance</i>	RH	<i>Relative Humidity</i>
EDX	<i>Energy Dispersive X-rays</i>	RIE	<i>Reactive Ion Etching</i>
EQE	<i>External Quantum Efficiency</i>	RTA	<i>Rapid Thermal Annealing</i>
GOI	<i>Germanium On Insulator</i>	SAC	SnAgCu
HAZ	<i>Heat-Affected Zone</i>	SI	Semi-Isolant
ICP	<i>Inductively-Coupled Plasma</i>	SMT	<i>Surface Mount Technology</i>
IMS	(laboratoire de l')Intégration du Matériau au Système	SOG	<i>Silicone On Glass</i>
IQE	<i>Internal Quantum Efficiency</i>	SOI	<i>Silicon On Insulator</i>
LBIC	<i>Light Beam-Induced Current</i>	TCAD	<i>Technology Computer-Aided Design</i>
LBIV	<i>Light Beam-Induced Voltage</i>	TLM	<i>Transmission Line Measurement</i>
LCL	<i>Lateral Conduction Layer</i>	TPV	<i>Thermo-PhotoVoltaics</i>
LCOE	<i>Levelized Cost of Electricity</i>	UV	UltraViolets
LN2	Laboratoire Nanosystèmes & Nanotechnologies		

Introduction générale

Dans un contexte d'augmentation de la consommation énergétique globale et de la limitation des gaz à effet de serre, le besoin de s'affranchir des énergies fossiles est grandissant. Depuis ses premières installations sur le marché dans les années 90, la technologie photovoltaïque a su évoluer pour permettre aujourd'hui de proposer des coûts d'électricité concurrentiels avec un LCOE (Levelized Cost Of Electricity) ≈ 51 \$/MWh en moyenne. Le marché du photovoltaïque est dominé par la filière silicium, dans laquelle les cellules peuvent être fabriquées à moindre coût (~ 2.25 ¢/cm² pour des wafers 6 po bruts) mais dont l'efficacité de conversion est limitée à une vingtaine de pourcents. En marge de cette technologie, le photovoltaïque à concentration (CPV, pour *concentrator photovoltaics*) a été proposé pour répondre à la limitation d'efficacité due aux propriétés du silicium. Le CPV repose sur l'utilisation de cellules solaires plus complexes (*i.e.* multijonctions à base de matériaux III-V, telles que InGaP/InGaAs/Ge), généralement issues des technologies pour le spatial et dont le coût est plus élevé que les structures à base de Si (environ 365 fois plus). Pour compenser le surcoût de ces cellules, celles-ci sont couplées avec des systèmes optiques de concentration (*i.e.* lentilles ou miroirs) et ceci permet de réduire la surface du semiconducteur, tout en gardant une large surface de collection de lumière. Cependant, le CPV conventionnel (*i.e.* matrices de cellules de quelques mm² au cm², facteur de concentration de quelques centaines) n'a pas été adopté à grande échelle en raison du coût de l'électricité générée trop élevé. Ceci est en partie dû à des limitations technologiques telles que les pertes résistives ou la dissipation thermique sous fort flux lumineux. En réponse à ces limitations, le micro-CPV, qui repose sur l'utilisation de cellules submillimétriques (ou microcellules), a été récemment proposé et promet ainsi de réduire les coûts de l'électricité générée. Néanmoins, les procédés de fabrication voire l'assemblage de ce type de microcellules doivent être adaptés à cette miniaturisation, tout en assurant de bonnes performances électriques. Aussi, en raison de leur faible maturité, la fiabilité des microcellules par rapport aux cellules standards reste à déterminer.

Dans un tel contexte, des questions se posent : Est-il possible de fabriquer des microcellules sur une structure InGaP/InGaAs/Ge avec des performances et une robustesse similaires aux cellules de l'état de l'art ? Une architecture alternative d'assemblage peut-elle être proposée ?

Pour répondre à ces questions et dans le cadre de cette thèse, plusieurs objectifs ont été définis et les contributions associées sont décrites ci-après :

- Développement de procédés de fabrication adaptés aux microcellules :
 - *Utilisation de procédés issus de la microélectronique, adaptés à la fabrication de dispositifs basés sur III-V et de très faibles dimensions.*
 - *Fabrication complète de la plus petite cellule InGaP/InGaAs/Ge (record mondial avec 0.089 mm²).*
- Compréhension des effets limitants les performances des microcellules et proposition d'éléments de réponse à ces derniers :
 - *Identification des recombinaisons de périmètre comme étant limitantes des performances des cellules submillimétriques.*
 - *Passivation des flancs des cellules pour limiter les recombinaisons et regain de performances.*

Introduction générale

- Proposition d'une architecture innovante de cellules pour un assemblage alternatif et réalisation de l'assemblage :
 - *Développement de cellules avec contacts alternatifs, en face avant, ayant les mêmes performances que les cellules à contacts standards.*
 - *Développement d'un procédé d'assemblage des cellules en MIM (Monolithic Interconnected Modules), démonstration du premier MIM triple jonction.*
- Validation des performances des différents dispositifs fabriqués en se basant sur l'état de l'art :
 - *Plusieurs mesures certifiées par ISE Fraunhofer.*
 - *Performances plus élevées pour les microcellules que pour les cellules standards attendues sous très haute concentration.*
 - *Record d'efficacité pour un MIM (35.1% sous 798 X).*
- Développement d'une méthodologie pour l'évaluation de la robustesse des microcellules :
 - *Mise en place d'essais de vieillissements accélérés adaptés aux cellules CPV et discussion sur leurs résultats.*
 - *Démonstration de la robustesse des microcellules fabriquées.*

Les travaux ont été réalisés grâce à la collaboration de trois laboratoires, largement reconnus internationalement pour leur expertise respective. Ainsi la partie microfabrication des cellules CPV a été menée au Laboratoire Nanotechnologies et Nanosystèmes (LN2), basé à l'Institut Interdisciplinaire de Technologie de l'Université de Sherbrooke, Québec, Canada. Ce projet de doctorat a été effectué en cotutelle avec le Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système (IMS) de l'Université de Bordeaux, France, où la partie robustesse a été traitée. Enfin, une collaboration avec le laboratoire SUNLAB de l'Université d'Ottawa, Ontario, Canada a permis de d'effectuer la caractérisation électro-optique sous forte concentration des microcellules développées.

Ce document s'articule autour de quatre chapitres pour décrire comment les objectifs de ce projet ont été atteints.

Le premier chapitre introduit les travaux de cette thèse avec une mise en contexte sur la technologie photovoltaïque puis sur le photovoltaïque à concentration. Les limitations du CPV et les réponses à ces dernières par le micro-CPV sont traitées par la suite avec un état de l'art de cette technologie innovante. Le deuxième chapitre traite du développement des microcellules performantes. Pour cela, les enjeux liés à la fabrication et à la caractérisation de microcellules pour le CPV sont introduits. Ensuite, le développement des différentes étapes de la microfabrication des microcellules est décrit. Celui-ci inclut les microcellules à contacts alternatifs et les mesures électriques permettant de valider les procédés. L'effet de la diminution des performances, due aux recombinaisons de périmètre, avec la miniaturisation des cellules, est également analysé. Le troisième chapitre expose les travaux réalisés pour développer les premiers MIM triple jonctions. Un état de l'art sur ce type de dispositif est présenté avant d'aborder le développement des procédés de fabrication. Une discussion sur les optimisations possibles est proposée puis les dispositifs fabriqués sont caractérisés. Le dernier chapitre présente les tâches effectuées pour l'étude de robustesse des microcellules. Après avoir rappelé les définitions et le contexte théorique de cette étude, un état de l'art sur les vieillissements accélérés pour les cellules CPV est dressé. Par la suite, les tests de vieillissement accéléré mis en place dans cette thèse sont décrits avant que les résultats de

l'évaluation de la robustesse des microcellules soient discutés. Finalement, une conclusion générale sur les réalisations de ce projet, et les perspectives qui en découlent, sont exposées.

Chapitre 1: Contexte, état de l'art et approche du projet

L'énergie solaire est une source immense ($\sim 1.5 \times 10^9$ TWh/an reçus sur Terre, ~ 66000 fois la consommation électrique globale de 2016) et inépuisable qui peut être exploitée par la technologie photovoltaïque. En raison du contexte environnemental, le photovoltaïque évolue rapidement et en particulier le photovoltaïque à concentration (CPV), pour lequel une miniaturisation de ses dimensions semble être une alternative économiquement viable dans le domaine, en réponse aux limitations du CPV standard. Cette section présente les enjeux en matière d'énergie solaire, l'effet et les dispositifs photovoltaïques dans un premier temps. Par la suite, le photovoltaïque à concentration, ses particularités et ses limitations sont décrits. Un état de l'art sur le micro-CPV et les défis qui découlent de cette technologie sont ensuite exposés avant de définir les axes d'étude de cette thèse.

1.1 Contexte énergétique

Depuis ses premières installations dans les années 1990, principalement aux États-Unis, le secteur du photovoltaïque a connu une croissance exponentielle dans le domaine de l'énergie. En 2019, 72% des nouveaux projets en énergie étaient « verts » selon l'IRENA (International Renewable Energy Agency) [1]. Parmi ceux-ci, 55% reposaient sur le photovoltaïque (PV), sous ses diverses formes. Ceci a été possible grâce à la réduction des coûts de cette technologie, associée à une durée de vie accrue des modules.

1.1.1 Le marché du photovoltaïque

La capacité cumulée de PV a atteint 580 GW_p en 2019, ce qui représente environ 3% de la demande mondiale en électricité avec un objectif de 40% d'ici à 2040 [1]–[3]. Cette augmentation est liée au fait que les énergies renouvelables sont devenues compétitives face aux sources fossiles, et leur coût de production continue de chuter. Un indicateur souvent utilisé pour comparer des sources d'énergie est le coût de l'énergie actualisé ou LCOE (*Levelized Cost Of Electricity*). Ce dernier correspond au rapport entre le coût d'une technologie (installation et maintenance) et l'énergie qu'elle produit tout au long de sa vie. Selon Bloomberg New Energy Finance (BNEF), le LCOE du PV a chuté de 11% entre fin 2018 et fin 2019 pour atteindre un coût moyen de 51 \$/MWh [4]. Ainsi, deux tiers de la population terrestre vit dans des pays où l'énergie PV ou éolienne est moins chère que l'énergie produite par des centrales à charbon ou au gaz. À titre d'exemple, le coût de production du nucléaire en France est compris entre 36 \$/MWh et 73 \$/MWh, la valeur haute de la fourchette intégrant le démantèlement des centrales et le traitement des déchets nucléaires [5].

Ainsi, le PV a réussi à s'intégrer à grande échelle dans le marché de la production d'énergie grâce à son *LCOE* modéré et en constante diminution. Ceci est dû à un coût d'installation et d'entretien faible mais aussi grâce à l'augmentation de la durée de vie des systèmes photovoltaïques à plusieurs dizaines d'années, avec des garanties de fonctionnement de 25 ans minimum offertes par les fabricants.

1.1.2 Technologies sur le marché

Le marché du photovoltaïque repose sur la technologie silicium et dans une moindre mesure, le photovoltaïque à couches minces. Le photovoltaïque à concentration (CPV) est apparu plus récemment comme technologie émergente.

a) Photovoltaïque à base de silicium

La technologie silicium (monojonction) est celle qui domine actuellement le marché du PV avec 97% de la production en 2019. Dans cette filière, on retrouve le silicium monocristallin et le silicium polycristallin. Les cellules monocristallines sont fabriquées à partir d'un monocristal de silicium, et atteignent des efficacités commerciales de plus de 20%. À titre d'exemple, le groupe SunPower utilise cette technologie et commercialise le module en silicium le plus performant avec une efficacité normalisée de 22.8% [6]. Le silicium monocristallin est plus coûteux que le silicium polycristallin, qui n'utilise que des agglomérats de cristaux et qui offre des efficacités commerciales de 17-20%. Cependant, le silicium monocristallin est celui qui

1.2 Généralités sur les cellules solaires

produit la plus grande part d'électricité photovoltaïque, avec 65.6% de la production totale en 2019 [7].

b) Photovoltaïque à base de couches minces

Les couches minces utilisées en PV sont formées par le dépôt de film sur des substrats tels que du verre, du plastique ou de l'acier. Les performances atteintes par les cellules utilisant des couches minces sont moins élevées que celles du silicium. Cependant le prix de ces cellules est potentiellement plus faible grâce à un procédé de fabrication simplifié. Dans cette filière on trouve les cellules en CdTe, en CI(G)S et silicium amorphe, qui représentent moins de 3% de la production du PV.

c) Photovoltaïque à concentration (CPV)

La technologie CPV consiste à concentrer la lumière sur des cellules de haute efficacité (*i.e.* multijonctions), lesquelles seraient trop chères si utilisées autrement. Malgré des efficacités de modules comprises entre 30% et 40%, le CPV ne s'est pas imposé sur le marché du PV et représente aujourd'hui moins de 0.2% du marché. Cette technologie récente possède cependant un grand potentiel, qui sera montré §1.4. Aujourd'hui, la tendance est à la miniaturisation des modules (micro-CPV) pour les nombreux avantages que cela représente, lesquels seront présentés dans ce chapitre.

1.2 Généralités sur les cellules solaires

Dans cette section, il est décrit comment l'énergie qui parvient du Soleil peut être convertie en électricité grâce à l'effet photoélectrique. Celui-ci prend place dans des dispositifs électroniques : les cellules solaires, lesquelles seront présentées en partant de leur « carburant » qu'est l'énergie solaire jusqu'à leurs limitations.

1.2.1 Énergie solaire

L'énergie solaire nous parvient sous forme de photons (ou d'ondes électromagnétiques) sur un large spectre de longueurs d'onde, tel que montré sur la Figure 1-1 et l'énergie solaire totale correspond à l'aire sous la courbe de cette figure. Ces photons ont une énergie E_{ph} (J) qui dépend de la longueur d'onde λ (m) telle que :

$$E_{ph} = \frac{hc}{\lambda} \quad (1-1)$$

avec h la constante de Planck, égale à $6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s et c la vitesse de la lumière, égale à $2,998 \cdot 10^8$ m/s. Or, l'énergie en physique s'exprime souvent en eV, qui est l'énergie acquise par un électron lorsqu'il est soumis à un potentiel de 1 V ($1,602 \cdot 10^{-19}$ J), et qui permet de faire le lien avec les matériaux utilisés dans la conversion photovoltaïque. De ce fait, E_{ph} en eV peut s'écrire en fonction de la longueur d'onde en μm de la façon suivante :

$$E_{ph} \approx \frac{1.24}{\lambda} \quad (1-2)$$

Les photons sont affectés par les gaz qui composent l'atmosphère. Ainsi, on définit une variable AM (*Air Mass*) dont le coefficient varie en fonction de la masse d'air traversée par les rayons lumineux (AM0 : hors atmosphère, AM1.5 : épaisseur de 1.5 fois l'atmosphère, correspondant à un angle de zénith de 48.2°). La figure 1-1 montre les spectres solaires sous AM0, AM1.5g (global, rayons directs et diffus) et AM1.5d (direct, rayons directs seulement) [8].

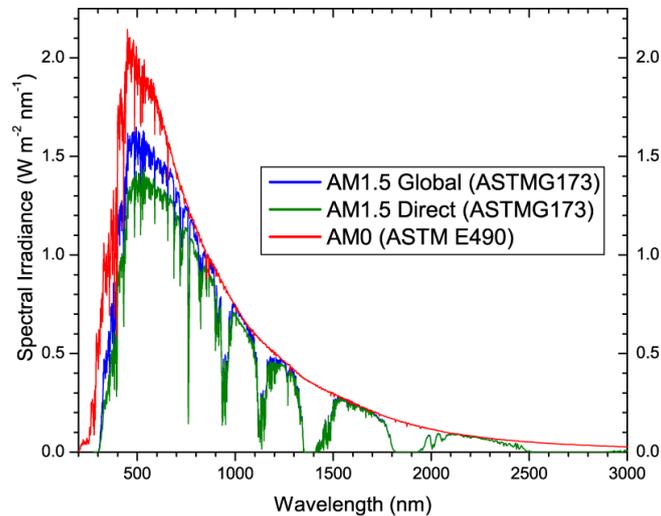


Figure 1-1: Spectres d'illumination solaire AM1.5 global, AM1.5 direct et AM0 [9]

Cette énergie solaire peut être convertie en énergie électrique par l'effet photoélectrique, présenté dans le paragraphe suivant.

1.2.2 Effet photoélectrique

L'effet photoélectrique se caractérise par deux effets physiques : l'absorption de lumière puis la collection des charges générées. La figure 1-2 illustre le processus d'absorption de photons dans un matériau semiconducteur.

- Si l'énergie d'un photon incident à la cellule est inférieure au *bandgap* ($E_{ph} < E_g$), le photon traverse la cellule et n'est pas converti. La cellule est dite « transparente ».
- Si l'énergie du photon incident à la cellule est égale au *bandgap* ($E_{ph} = E_g$), le photon est absorbé par la cellule et est suffisamment énergétique pour générer une paire électron-trou.
- Si l'énergie du photon incident à la cellule est supérieure au *bandgap* ($E_{ph} > E_g$), le photon est absorbé par la cellule pour générer une paire électron-trou mais l'excès d'énergie devra être dissipé principalement par thermalisation lorsque l'électron (le trou) rejoindra le bord de la bande de conduction (de valence).

1.2 Généralités sur les cellules solaires

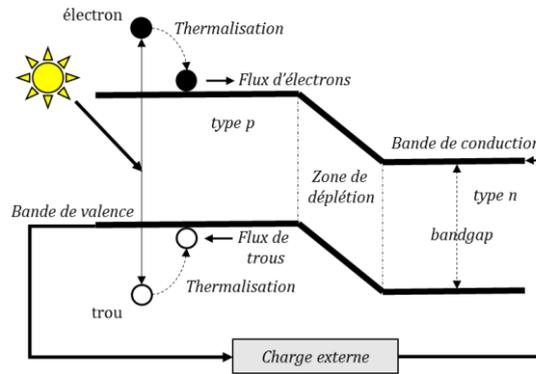


Figure 1-2: Processus d'absorption de photon dans un matériau semiconducteur

Ainsi, par l'absorption d'un photon, une paire électron-trou est créée, qui peut être exploitée par la collection des charges.

Pour cela, un champ électrique, généré dans la zone de déplétion par une jonction pn formée dans le matériau semiconducteur, va permettre de séparer la paire électron-trou pour en extraire les porteurs. Cette jonction est symbolisée par la courbure des bandes d'énergie dans la figure 1-2. Les porteurs sont ensuite diffusés dans les zones neutres puis captés par des contacts métalliques qui permettent de les acheminer vers une charge externe (élément consommant de l'énergie électrique). Ce type de dispositif ainsi créé est une cellule solaire, dont le schéma de base (exemple de cellule basée sur p-Si) est montré en figure 1-3 [9].

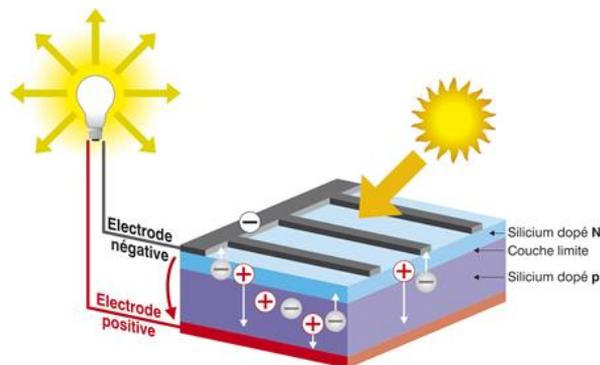


Figure 1-3 : Schéma de base d'une cellule solaire en silicium et principe de photogénération [10]

Les cellules sous illumination fournissent une puissance électrique à une charge externe avec des caractéristiques courant-tension que l'on précisera dans la prochaine partie.

1.2.3 Caractéristiques électriques

Les caractéristiques électriques d'une cellule solaire sous illumination peuvent être décrites par une courbe courant-tension « $I-V$ ». La figure 1-4 illustre une courbe $I-V$ typique, en convention générateur, avec ses principaux paramètres électriques associés :

- Le courant de court-circuit (I_{SC}) est le courant produit lorsque la tension est nulle, c'est-à-dire que la charge a une résistance nulle et correspond à un court-circuit.
- La tension de circuit ouvert (V_{OC}) est la tension produite lorsque le courant est nul avec une charge de résistance infinie, qui correspond à un circuit ouvert.

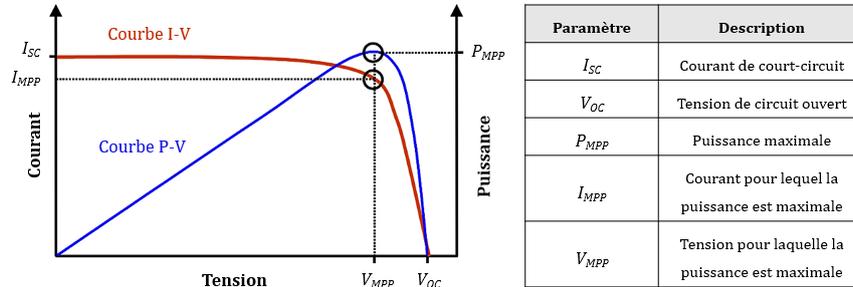


Figure 1-4 : Caractéristiques $I-V$ et $P-V$ d'une cellule et paramètres électriques associés

Plus le *bandgap* d'une cellule est grand et plus le V_{OC} est important mais plus le I_{SC} sera faible en raison du plus petit nombre de photons absorbés [10]. De la courbe $I-V$, il est possible de tracer la courbe de puissance « $P-V$ » en fonction de la tension sur la figure 1-4. Sur celle-ci, apparaît un point de puissance électrique maximale (P_{MPP}) associé à un couple courant et tension de puissance maximale (I_{MPP} et V_{MPP}). Du point P_{MPP} peut être calculée l'efficacité, définie comme le rapport entre la puissance électrique maximale de la cellule et la puissance lumineuse reçue par celle-ci.

Enfin, on définit le *fill factor* (FF ou facteur de remplissage) par :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{OC} \times I_{SC}} \quad (1-3)$$

Les effets résistifs parasites affectent le FF . En effet, la pente de la courbe $I-V$ entre 0 et V_{MPP} dépend de la résistance shunt R_{sh} et la pente entre V_{MPP} et V_{OC} dépend de la résistance série R_s (pertes par effet Joule). Plus les effets des résistances parasites sont importants (*i.e.* R_{sh} est faible et R_s est grand), moins la courbe $I-V$ revêt une forme « rectangulaire », ce qui se traduit par une réduction du FF .

Cependant, les pertes d'une cellule ne sont pas uniquement électriques. Des pertes intrinsèques limitent également leurs performances.

1.2.4 Limitations intrinsèques

La limite thermodynamique d'efficacité ou limite de Shockley-Queisser, pour la conversion photovoltaïque d'un spectre solaire AM1.5g d'une cellule monojonction pn , est de 30,1% [11]. Les principales sources de pertes intrinsèques dans une cellule solaire sont les suivantes :

- Les pertes d'absorption : les photons possédant une énergie inférieure au *bandgap* de la cellule, ne sont pas absorbés (infrarouges qui contribuent à l'échauffement de la cellule);

1.3 Cellules multijonctions

- Les pertes par thermalisation : les photons avec une énergie supérieure au *bandgap* de la cellule génèrent des porteurs qui échauffent la cellule par la génération de phonons.

La figure 1-5 illustre la part de la puissance utile et des mécanismes de pertes fondamentales dans une cellule de *bandgap* optimal ($E_g = 1.3$ eV) [12]. En ne considérant que ces limitations intrinsèques de la cellule, les pertes par thermalisation (*Thermalization losses* dans la figure 1-5) et celles par absorption (ou pertes dues à la trop faible énergie des photons, *Below bandgap losses* dans la figure 1-5) représentent 54% de l'énergie incidente. Ces pertes sont dues au fait, que même dans un cas optimal où $E_g = 1.3$ eV, une cellule à simple *bandgap* ou jonction ne peut pas convertir la totalité du rayonnement solaire avec une grande efficacité. Cependant, elle est particulièrement bien adaptée à une source monochromatique choisie en offrant une efficacité de conversion proche de 100% théoriquement [13].

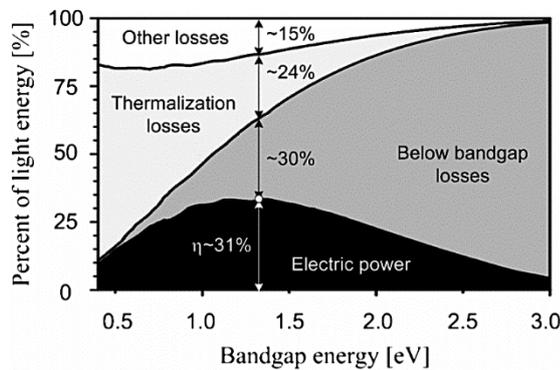


Figure 1-5 : Puissance utile et mécanismes principaux de pertes dans une cellule en fonction du *bandgap* d'une cellule [12]

Ceci permet de comprendre le choix du silicium pour les cellules monojonctions à bas coût, en raison de son abondance et de son $E_g = 1.12$ eV, proche du *bandgap* optimal. Mais cela a également motivé développement de cellules avec plusieurs jonctions (*i.e.* cellules multijonctions), qui permettent d'aller au-delà de la limite thermodynamique de Shockley-Queisser. La partie suivante présentera ce type de dispositifs.

1.3 Cellules multijonctions

Des cellules solaires permettent d'atteindre une efficacité de conversion plus grande : ce sont les cellules multijonctions. Dans cette partie, l'augmentation du nombre de jonctions est discutée, puis des structures de cellules et leurs performances sont présentées.

1.3.1 Intérêt d'une structure multijonctions

Si on découpe le spectre solaire en une infinité de sources monochromatiques, on imagine qu'une cellule possédant une infinité de *bandgaps* pourrait se rapprocher des 100% d'efficacité de conversion. En réalité, ces cellules multijonctions ont une efficacité maximale théorique de 86,2% [14]. La figure 1-6.a) illustre la part du spectre solaire (AM1.5g) absorbée par une cellule Si [15]. La figure 1-6.b) montre comment ce même spectre d'irradiance est absorbé par une cellule à trois jonctions en GaInP, GaInAs et Ge. L'augmentation du nombre de jonctions permet

à la fois d'absorber une plus grande partie du spectre solaire et de convertir plus efficacement (cf. §1.2.4).

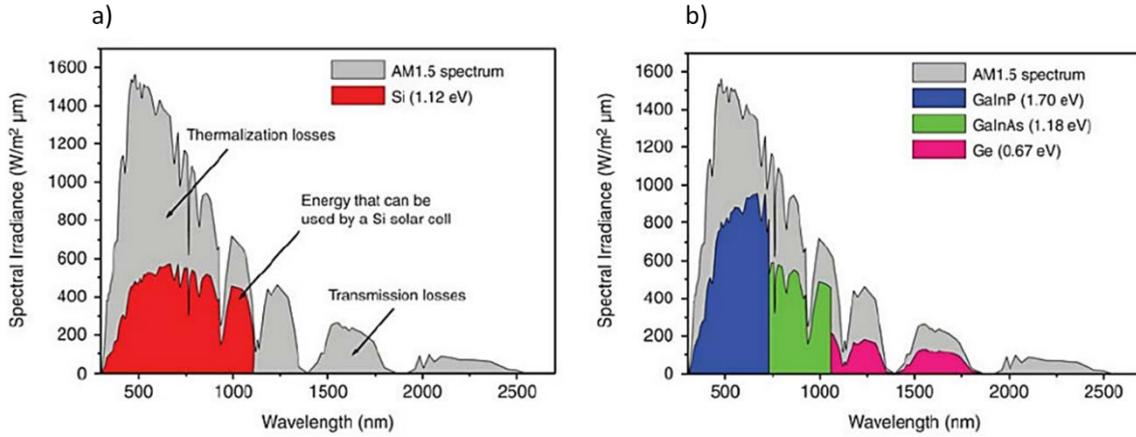


Figure 1-6 : Spectre AM1.5g et part de celui-ci absorbé par (a) une cellule en Si et (b) une cellule InGaP/InGaAs/Ge [16]

La partie suivante détaille la fabrication et la caractérisation de ces cellules multijonctions.

1.3.2 Structures de cellules multijonctions

Les cellules multijonctions constituent une alternative aux cellules monojonctions mais leur architecture est évidemment plus complexe. Elles consistent en un empilement de sous-cellules connectées en série avec des bandgaps différents, pour absorber chaque partie du spectre solaire. Ces matériaux sont optimisés sur leur bandgap mais aussi sur le paramètre de maille puisqu'ils sont cristallins. L'augmentation du nombre de jonction ne peut se faire de manière infinie pour des raisons de compatibilité de matériaux. En effet, les matériaux constituant les sous-cellules sont crus par épitaxie et doivent avoir un paramètre de maille similaire ou proche pour limiter la génération de défauts tels que les dislocations. La figure 1-7 illustre la relation entre bandgap et paramètre de maille (*lattice constant*) pour différents matériaux et alliages binaires [16]. Les matériaux reliés par une ligne pleine représentent ceux dont des alliages ternaires sont réalisables pour atteindre le bandgap recherché.

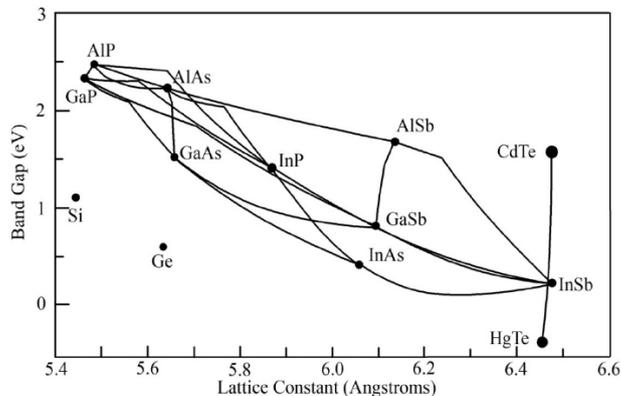


Figure 1-7 : Bandgap d'un matériau en fonction de son paramètre de maille [16]

1.3 Cellules multijonctions

Une structure communément utilisée en photovoltaïque est l'architecture InGaP/InGaAs/Ge (ou GaInP/GaInAs/Ge). En observant la figure 1-7, on comprend l'intérêt d'une telle structure en observant que les matériaux qui la composent ont un paramètre de maille proche (peu de défauts lors de la croissance de jonctions) [12]. La figure 1-6(b) montre la capacité de cet empilement à bien couvrir le spectre solaire (pour une meilleure efficacité).

La figure 1-8(a) présente une structure générique de cellule à triple jonction en InGaP/InGaAs/Ge [12]. Elle consiste en un empilement des trois jonctions, avec leur différents bandgaps, avec le Ge jouant à la fois le rôle de sous-cellule inférieure et de substrat. Les sous-cellules sont reliées entre elles par des jonctions tunnel. Ces dernières permettent d'interconnecter électriquement le sous-cellules avec le moins de pertes électriques et optiques possibles. Les sous-cellules sont organisées de manière à ce que leur bandgap soit décroissant pour que chaque gamme d'énergie des photons soit absorbée efficacement. En effet, il convient que les photons de plus haute énergie soient absorbés par des cellules à haut *bandgap* afin de limiter les pertes par thermalisation et transmission (*cf.* §1.2.4) La structure montrée sur la figure 1-8(a) inclut le contact d'émetteur (dénomé « *Grid* ») et de base (dénomé « *Back contact* ») pour l'extraction des charges. De plus, une couche antireflet (*ARC* pour *Antireflective Coating*) permet d'augmenter significativement l'absorption optique de la cellule (augmentation du I_{sc} de l'ordre de 25% dans [17]).

La figure 1-8(b) montre une structure de cellule à six jonctions AlGaInP/AlGaAs/GaAs/GaInAs/GaInAs/GaInAs développée par NREL [18]. Cette architecture est réalisée en croissance inversée, où la jonction supérieure est crûe sur le substrat GaAs. Ce substrat est ensuite retiré pour former la cellule solaire complète. Le schéma inclut l'information sur le paramètre de maille qui augmente pour les différents alliages de GaInAs des jonctions inférieures. Cette différence de paramètre de maille rend l'épitaxie complexe, et augmente la concentration de défauts de croissance, qui limitent les performances de la cellule. Malgré la présence de défauts, cette cellule est celle qui détient le record d'efficacité de conversion avec 47.1% et dont les performances sont comparées dans la section suivante.

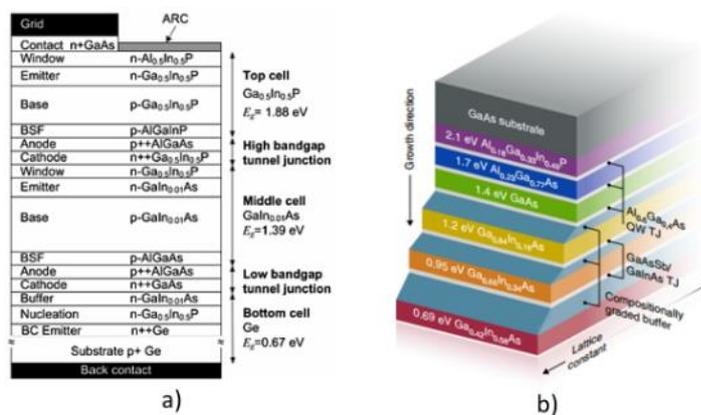


Figure 1-8 : Structure de cellule (a) triple jonction InGaP/InGaAs/Ge [12] et (b) à six jonctions (AlGaInP/AlGaAs/GaAs/GaInAs/GaInAs/GaInAs) [18]

1.3.3 Performances de cellules multijonctions

La figure 1-9 présente les records d'efficacité de cellules multijonctions obtenus en laboratoire, et classés par technologie, de 2005 à 2020 [19]. Dans ce graphe, seules les plus hautes efficacités obtenues sont mises en lumière. Dans ce cadre, on identifie le record ultime à 47.1% atteint sous 143 X par la cellule à six jonctions du NREL dont la structure correspond à la figure 1-8(b). En comparaison, une efficacité record de 44.4% sous 302 X a été mesurée pour une cellule triple jonction avec une structure GaInP/GaAs/GaInAs développée par Sharp [20]. Des cellules triple jonction utilisant la structure GaInP/GaInAs/Ge, similaires à celle présentée dans la figure 1-8(a) sont commercialisées par Azur Space avec une efficacité maximale de 44.0% sous 250 X[21]. La figure 1-9 montre également que les efficacités les plus importantes ne sont pas atteintes sous un soleil mais sous un flux lumineux (concentration) plus élevé. En effet, on remarque notamment que la cellule à six jonctions détient le record ultime sous une concentration de 143 X ; l'efficacité de cette même cellule sous une illumination 1 soleil n'étant « que » de 39.2%. L'utilisation de la concentration permet donc une augmentation d'efficacité relative de 20.1%. Cette augmentation des performances dues à la concentration solaire a légitimement conduit à la technologie du photovoltaïque à concentration, présentée dans la partie suivante.

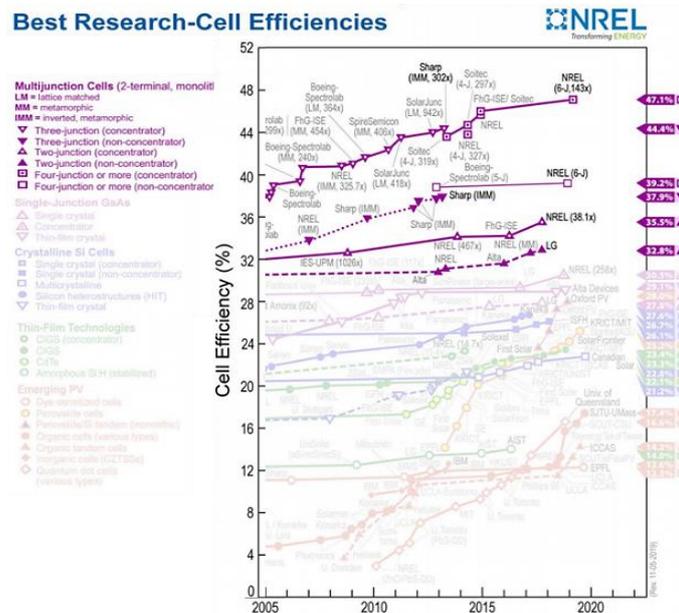


Figure 1-9 : Records d'efficacité de cellules multijonctions obtenus en laboratoire, et classés par technologie, de 2005 à 2020 [19].

1.4 Photovoltaïque à concentration

Les structure de cellules à multijonctions sont celles qui offrent les meilleures performances. C'est ce type de cellules qui est typiquement utilisé dans le photovoltaïque à concentration (CPV) pour permettre un équilibre du coût du système. Dans cette partie, le CPV est introduit : après avoir montré les effets de la concentration solaire sur les caractéristiques des cellules,

1.4 Photovoltaïque à concentration

des systèmes seront présentés, avec leur potentiel dans le marché du photovoltaïque et leurs limitations.

1.4.1 Effet de la concentration solaire

L'augmentation de l'efficacité des cellules est généralement observée lorsque celles-ci sont éclairées d'un fort flux lumineux ou sous concentration. Ceci est dû au fait que les paramètres électriques J_{SC} , V_{OC} et FF sont affectés par la concentration solaire.

La densité de courant de court-circuit, obtenu sous une concentration C de X soleils, s'écrit :

$$J_{SC}^{X\ suns} = C \cdot J_{SC}^{1\ sun} \quad (1-4)$$

où $J_{SC}^{1\ sun}$ est la densité de courant de court-circuit générée sous 1 soleil.

Le gain du V_{OC} se justifie par l'augmentation du quasi-niveau de Fermi due à une plus grande concentration de porteurs excités avec l'illumination croissante [22]. Une approximation du V_{OC} en fonction de la concentration, largement admise au sein de la communauté scientifique, est donnée par :

$$V_{OC}^{X\ suns} \approx V_{OC}^{1\ sun} + n \frac{kT}{q} \ln C \quad (1-5)$$

où $V_{OC}^{1\ sun}$ est le V_{OC} sous un soleil, n est le facteur d'idéalité de la cellule solaire (dans le cas d'une cellule multijonction, le n est la somme des facteurs d'idéalité de chaque sous-cellule), k est la constante de Boltzmann, T est la température et q est la charge élémentaire. Cette croissance logarithmique du V_{OC} peut être observée sur la figure 1-10.

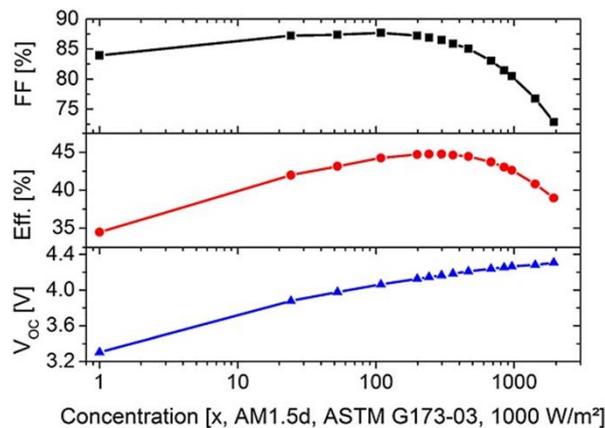


Figure 1-10 : Évolution typique des paramètres électriques d'une cellule sous concentration [12]

Enfin, le gain de l'efficacité provient également d'une augmentation du FF , dans une certaine mesure. En effet, la figure 1-10 montre une croissance du FF liée à la croissance du V_{OC} entre 1 et ~ 100 X. En effet, d'après [23], lorsque le niveau de concentration solaire permet de négliger les effets résistifs, le *fill factor* FF_0 peut s'écrire :

$$FF_0 \approx \frac{V_{oc} - \ln(V_{oc} + 0.72)}{V_{oc} + 1} \quad (1-6)$$

Cependant, dans le cas des concentrations plus élevées, soit à partir de ~ 100 X dans la figure 1-10, les effets résistifs, notamment dus à la résistance série ne sont plus négligeables. Ceci marque l'inflexion du FF , qui chute avec l'accroissement de la concentration. L'augmentation logarithmique du V_{oc} permet de compenser cette chute de FF jusqu'au point d'efficacité maximale, soit à 297 X dans le cas de la figure 1-10. Au-delà de ce point, le gain en V_{oc} avec la concentration ne permet plus de compenser la chute du FF , ce qui se répercute sur l'efficacité qui chute également.

Dans un module CPV, le facteur de concentration est donc un paramètre qui influence de manière significative ses performances.

a) Définition du facteur de concentration

En considérant que la concentration solaire est typiquement réalisée par des lentilles (cf. §1.4.1c)), le facteur de concentration géométrique C_g est défini par :

$$C_g = \frac{A_{lentille}}{A_{cellule}} \quad (1-7)$$

où $A_{lentille}$ est la surface de la lentille et $A_{cellule}$ est la surface de la cellule. Ainsi, on peut imaginer que pour un facteur de concentration donné de 1000 X, le côté de la lentille sera environ 32 fois celui de la cellule. Ainsi, une cellule de 1 cm² de côté aura une lentille associée de 32×32 cm² tandis qu'une cellule de 1 mm² aura une lentille associée de 3.2×3.2 cm². Il est peu envisageable de fabriquer des modules constitués de lentilles efficaces de 32x32 cm². Cependant, des facteurs de concentration aussi élevés sont facilement accessibles pour des cellules de faibles dimensions. Ceci a pour effet direct de réduire le coût de la cellule en raison de la plus faible surface de semiconducteur nécessaire pour une même surface de collection.

b) Effet de la concentration sur le prix des modules CPV

Les cellules multijonctions, par leur complexité de fabrication, sont coûteuses. Une architecture proposant un bon compromis prix-efficacité-maturité est celle utilisant une structure GaInP/GaInAs/Ge, présentée sur la figure 1-8(a). Cependant, le coût de celle-ci reste élevé comparativement aux standards cellules en silicium. En effet un *wafer* 6 pouces d'une structure triple jonction GaInP/GaInAs/Ge coûte environ 1500 \$US (8.22 \$US/cm²) tandis qu'un *wafer* 6 pouces en silicium monocristallin coûte environ 0.41 \$ (2.25 ¢/cm²), soit près de 365 fois moins cher [24]. C'est pourquoi les cellules multijonctions ont été initialement utilisées pour des applications spatiales, domaine dans lequel le coût élevé d'une technologie n'est pas une limite absolue. Pour que ce type de technologie soit économiquement envisageable dans le cadre de technologies dites « grand public », il convient donc de ne pas utiliser des *wafers* complets comme cellules, comme c'est le cas pour les applications spatiales.

L'utilisation de cellules de faibles dimensions couplées à des optiques de concentration devient par ailleurs envisageable. Cette technologie de production d'énergie est le photovoltaïque à concentration (CPV), présentée dans la prochaine partie.

1.4 Photovoltaïque à concentration

c) Caractéristiques du photovoltaïque à concentration

Les systèmes photovoltaïques à concentration sont caractérisés par les éléments qui les composent : les systèmes optiques de concentration, les *trackers* et les récepteurs photovoltaïques à haut rendement.

- Optiques de concentration

Une technologie d'optique de concentration largement utilisée est la lentille de Fresnel, qui permet d'avoir un design compact, en comparaison d'une lentille convexe. Ces lentilles, dont une coupe verticale est présentée en figure 1-11(a), sont typiquement faites de SOG (*Silicone-On-Glass*, silicone sur verre), matériau réputé pour sa durabilité dans des conditions d'opération typiques du photovoltaïque (exposition aux UV, variations de température importantes, présence d'humidité, durée de mission longue,...), et permettent d'atteindre une efficacité optique d'environ 90% [25], [26]. Ces optiques primaires peuvent être couplées à une optique secondaire qui permet d'homogénéiser le flux lumineux sur la cellule et d'augmenter le facteur de concentration [26].

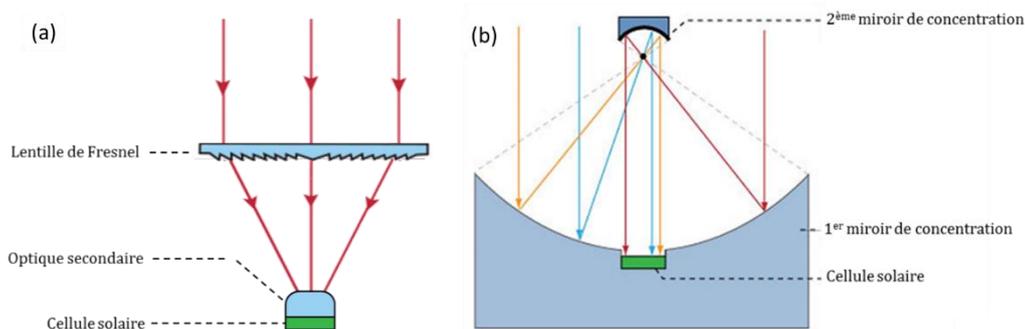


Figure 1-11 : Exemples d'optique de concentration avec (a) une lentille de Fresnel associée à une lentille secondaire et (b) un système de miroir dit Cassegrain [27]

Des optiques réfléchives (miroirs) peuvent également être utilisées. Ces miroirs sont généralement en aluminium recouvert d'un film en argent et permettent d'atteindre des efficacités optiques de l'ordre de 95% [26]. Une optique réfléchive typiquement utilisée en CPV est le miroir de Cassegrain, qui repose sur l'utilisation de deux étages de miroirs, comme illustré sur la figure 1-11(b) [27].

Toutefois, l'utilisation d'optiques de concentration ne permet pas de capter toute la lumière car seule l'illumination directe passant par le système optique atteint la cellule.

- Tracking 2 axes

Du fait de l'utilisation d'optiques de concentration, un *tracker* ou système de suivi de l'illumination directe du soleil est requis pour un système CPV. Pour les concentrations typiquement utilisées dans le CPV (300-1000 X), la mise en œuvre de *trackers* à deux axes, ayant une précision $< 1^\circ$ en déviation angulaire, est essentielle [28].

d) Récepteurs et modules

Les récepteurs CPV peuvent être séparés en deux catégories menant à différentes technologies: les récepteurs denses et les récepteurs individuels. Tous les récepteurs présentés dans cette section utilisent des cellules GaInP/GaInAs/Ge de quelques mm² à quelques cm².

- Modules à récepteurs denses

Les récepteurs denses sont composés de plusieurs cellules interconnectées. La figure 1-12(a) montre une photographie d'un récepteur dense de 17.8×12.7 cm², composé de 48 cellules interconnectées et commercialisé par Azur Space [29]. Un système Raygen utilisant un récepteur dense situé en haut d'une tour est montré en figure 1-12(b). Dans ce cas, la lumière est concentrée pour former une tâche focale ($C_g \approx 650 X$) sur le récepteur dense par le biais d'un ensemble de miroirs montés sur *trackers* [30]. Ce type de récepteurs peut être également couplé au système de concentration optique directement sur le *trackers* comme c'est le cas du système présent à l'Université de Sherbrooke ($C_g \approx 1000 X$), montré sur la figure 1-12(c).

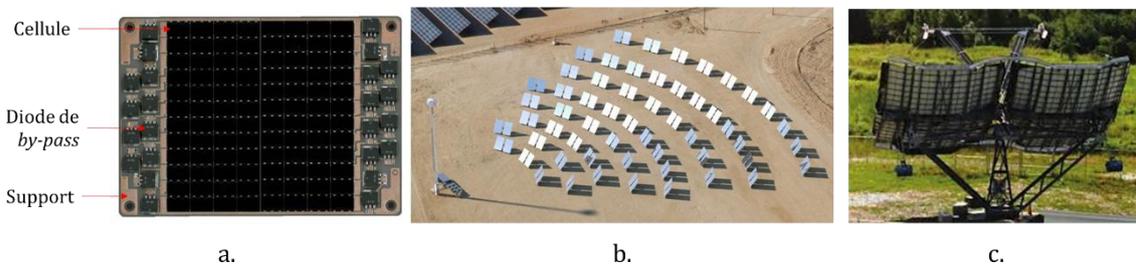


Figure 1-12 : Illustrations de la technologie CPV à récepteurs denses avec (a) un récepteur dense commercialisé par Azur Space, composé de 48 cellules [29], (b) un système Raygen [30] et (c) un système CPV à l'Université de Sherbrooke

- Modules à récepteurs individuels

À la différence des récepteurs denses, les récepteurs individuels (utilisant la configuration *point-focus*) sont utilisés dans des panneaux en suivant le schéma « paire cellule-optique ». Ce schéma est plus largement utilisé que celui du récepteur dense. Sur la figure 1-13 (a), un récepteur individuel de Stace constitué d'une cellule de 3 mm de côté, assemblée sur un support métallique est montré. La cellule est reliée au support via une brasure pour le contact de la face arrière (contact de base) et des fils de microcâblage (*wirebonding*) pour la face avant (contact d'émetteur). Ce récepteur à cellule individuelle est interconnecté aux autres récepteurs du module via le câblage sur la partie inférieure de la figure 1-13 (a), pour former des modules sur *trackers* tels que celui illustré en figure 1-13 (b).

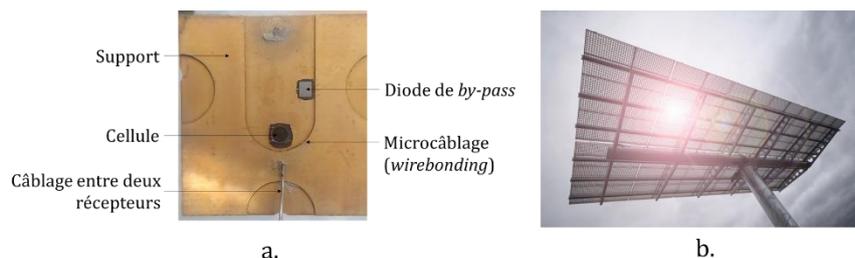


Figure 1-13 : Illustrations de la technologie CPV à récepteur individuel avec (a) un récepteur utilisant une cellule de 3 mm et (b) un système STACE installé à l'Université de Sherbrooke

1.4.2 Limitations du CPV

Plusieurs limitations sont propres aux éléments qui composent la technologie CPV impactant le déploiement de cette technologie à grande échelle. L'utilisation de facteurs de concentration solaire élevés sur des cellules de quelques mm² à quelques cm² génère également des effets thermiques et résistifs. Ces derniers augmentent indirectement le coût d'intégration des cellules et limite leurs performances. À cela s'ajoutent des limitations liées aux optiques de concentration et au *tracking*.

a) Impact de la température

Les forts flux lumineux incidents à la cellule génèrent une élévation de la température de celle-ci, laquelle va avoir un impact sur les performances et potentiellement sur la fiabilité du système.

- L'impact de la température sur les performances des cellules se mesure en termes de coefficients de température. À titre d'exemple, une cellule d'Azur Space a un coefficient de température $\frac{\Delta\eta}{\Delta T} = -0.046 \text{ \%}_{abs}/K$, et ainsi, lorsque la température de celle-ci augmente de 25°C à 80°C, son efficacité passe de 44.0% à 41.5% [21].
- La température joue un rôle dans la plupart des phénomènes de dégradation et de ce fait, une augmentation de celle-ci peut conduire à des défaillances des dispositifs [31]. Pour cette raison, la température est souvent utilisée comme contrainte environnementale pour réaliser des campagnes de vieillissement accéléré sur les composants. De plus, l'élévation de la température d'un assemblage génère un stress thermomécanique aux interfaces des différents matériaux qui le composent en raison de la différence de leur coefficient d'expansion thermique [32].

Pour ces raisons, on comprend l'intérêt de garder la température des cellules la plus basse possible au-dessus de la température ambiante. Comme dans une puce microélectronique, la dissipation thermique du dispositif est principalement réalisée par conduction dans l'assemblage et par convection.

b) Dissipation thermique

Les récepteurs présentés sur les figure 1-12 (récepteur dense) et figure 1-13 (récepteur individuel) utilisent des techniques de dissipation thermique différentes.

Dans le cas des récepteurs denses, la densité de puissance à dissiper est concentrée au niveau de la tâche focale (144 cm² dans le cas de la figure 1-12.a) du récepteur unique. Cet agencement de cellules requiert généralement une dissipation thermique active (passage d'un liquide de refroidissement dans le support du récepteur), ce qui complexifie le système CPV, et peut réduire son rendement global. Cependant, le système développé par Raygen, présenté figure 1-12.b, convertit la chaleur du liquide caloporteur en électricité. Avec cette technologie CPV+T (T pour *Thermal*), ce système a pu atteindre une efficacité de conversion de 40.4% [33].

Dans le cas des récepteurs individuels, tels que celui montré sur la figure 1-13.a, une dissipation thermique active n'est généralement pas requise. Ceci est dû au fait que les cellules sont de petites dimensions et associées à un support unique. La densité de puissance du module est ainsi réparti sur tout le panneau (figure 1-13.b) et la surface de dissipation devient

bien plus grande, augmentant les échanges par convection. Les récepteurs peuvent être composés d'un support métallique, comme montré sur la figure 1-13.a avec une plaque d'aluminium de 50×50 mm² mais peuvent requérir un dissipateur thermique de grande surface selon la taille de la cellule et le facteur de concentration [34].

L'utilisation de fort flux de lumière dans le CPV et corolairement la température atteinte dans les cellules, imposent une gestion thermique, nécessaire pour limiter son impact sur les performances électriques et la fiabilité des dispositifs. Ces forts flux traités ont aussi un impact direct sur les pertes électriques des cellules comme montré dans la partie suivante.

c) Pertes Joule

En plus de la lumière non convertie par la cellule qui devient de la chaleur à dissiper, les pertes Joule constituent aussi un surplus de chaleur. Cependant, celles-ci impactent majoritairement la puissance électrique générée par une cellule.

Les pertes par effet Joule s'écrivent :

$$P_J = R_S \times I^2 \quad (1-8)$$

où R_S est la résistance série d'un élément traversé par un courant I . Ainsi les pertes Joule sont dues à la résistance série de la cellule et à la densité de courant qu'elle génère. La résistance shunt R_{Sh} a un effet négligeable sur les pertes Joule. L'implication de ces deux termes est traitée dans cette partie.

- Effet de la résistance série R_S sur les pertes Joule

Une cellule photovoltaïque est un dispositif sujet à l'effet de la résistance série. Cette valeur varie en fonction de la quantité de lumière présente sur la cellule ce qui la rend difficile à évaluer. La figure 1-14 illustre schématiquement ses principales composantes de la résistance série dans une cellule InGaP/InGaAs/Ge, découlant de travaux focalisés sur une évaluation judicieuse de cette résistance (figure adaptée de [35]). Il peut être observé que les effets résistifs se répartissent dans la structure de la cellule et dans le contact émetteur. C'est dans ce contact que la majeure composante de la résistance série se trouve [39]. Pour cette raison, de nombreux travaux ont été réalisés pour optimiser les contacts par le biais de modèles 3D distribués notamment [35]–[38]. L'optimisation du contact émetteur passe par l'amélioration de la résistance de contact spécifique ρ_c et l'amélioration de la résistance du métal R_M dans l'électrode (doigts), qui doivent être les plus basses possibles [38]. La résistance de contact spécifique ρ_c dépend de la qualité du contact ohmique sur le semiconducteur (au niveau de la couche contact). Il est généralement admis qu'une valeur admissible de ρ_c est de l'ordre de $10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^{-2}$ ou inférieure pour ne pas générer d'effet résistif trop important, et en particulier sous une concentration de 1000 X. S'agissant de R_M , il convient de la maintenir sous une valeur de $10^{-3} \Omega/\square$ pour des conditions d'opération similaires [38].

1.4 Photovoltaïque à concentration

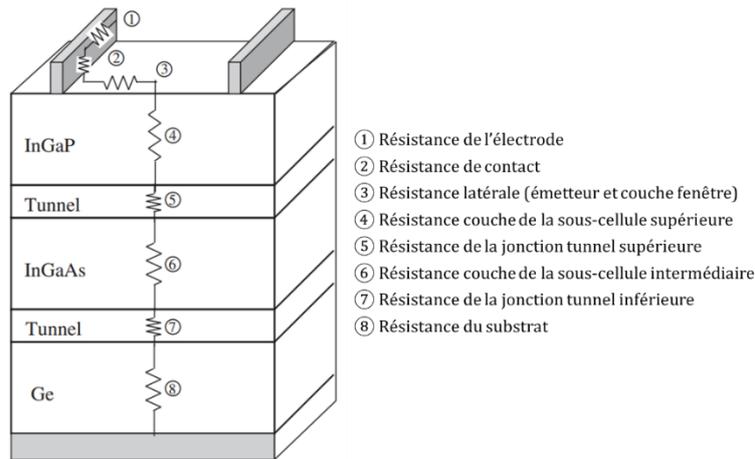


Figure 1-14 : Composantes principales de la résistance série dans une cellule InGaP/InGaAs/Ge [35]

- Effet du courant photogénéré sur les pertes Joule

Les cellules multijonctions utilisées dans le CPV sont constituées de sous-cellules placées en série pour bénéficier de l'effet « forte tension – bas courant ». Ce dernier permet ainsi de limiter l'impact des pertes Joule. Or, comme montré §1.4.1, la densité de courant photogénéré J augmente de manière proportionnelle avec le facteur de concentration solaire. Aussi, au premier ordre et pour une taille de cellule donnée, les pertes Joule augmentent avec le carré de la concentration. Elles sont donc responsables de la chute de FF observée aux alentours de 120 X sur la figure 1-10, elle-même responsable de la chute d'efficacité observée à partir de 297 X.

La chute d'efficacité sous concentration est donc due aux pertes Joule et on comprend aisément que la limitation de celles-ci représente un des enjeux majeurs pour un plus grand déploiement du CPV. Toutefois, d'autres limitations inférées au CPV sont directement liées aux éléments propres à la technologie : les optiques et le *tracker*.

d) Limitations des optiques de concentration et du tracking

L'utilisation d'optiques de concentration a pour conséquence de ne convertir que le rayonnement direct du soleil (spectre direct de la figure 1-1). Aussi, le CPV est plus adapté aux régions où la radiation normale directe DNI (*Direct Normal Irradiation*, illumination directe normale) est élevée (*i.e.* $DNI \geq 2000 \text{ kWh/m}^2\text{a}$), dont la carte mondiale est présentée sur la Figure 1-15 [39]. L'utilisation d'optiques de concentration engendre également un angle d'acceptance des modules. Il est défini comme l'angle d'inclinaison maximal pour lequel, théoriquement, 90% des rayons incidents au système optique vont atteindre la cellule. Les systèmes optiques utilisés dans le CPV ont généralement un facteur de concentration compris entre 300 X et 1000 X, or plus le facteur de concentration est grand et plus l'angle d'acceptance est faible. Par exemple, il a été montré que dépendamment des types d'optique utilisés, l'angle d'acceptance peut varier entre 0.36° (optique simple de Fresnel) et 2° (miroir) pour un facteur de concentration de 800 X [26]. La valeur de l'angle d'acceptance se répercute directement sur la précision du *tracker* de soleil. En effet, celui-ci devra être capable de démontrer une précision de suivi inférieure à l'angle d'acceptance pour que 90% des rayons lumineux parviennent à la

cellule. Enfin, il faut indiquer que l'utilisation de *trackers* de haute précision impose une maintenance régulière [28].

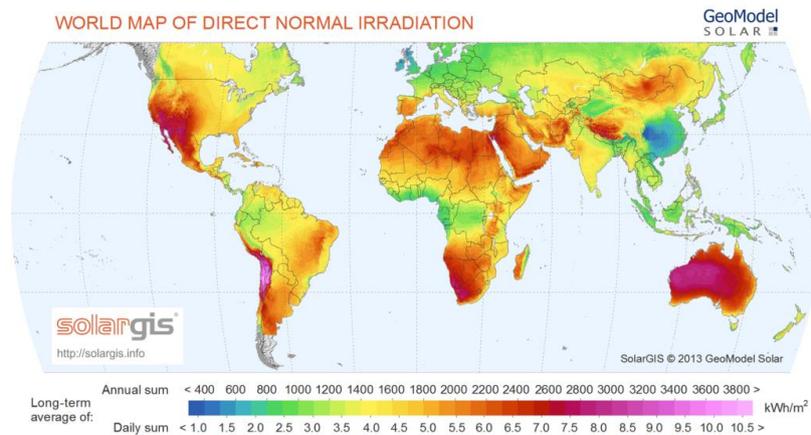


Figure 1-15 : Carte mondiale de l'ensoleillement direct (DNI) [39]

Malgré des performances électriques élevées (record d'efficacité de 38.9% pour un module[40]), le CPV n'a pas su s'imposer comme compétiteur face aux conventionnels panneaux en silicium. Cette section a montré qu'il n'existait pas de technologie CPV unifiée en raison des nombreux éléments qui composent un système. Ce grand nombre d'éléments, leurs limitations associées (en particulier celles liées à l'utilisation d'optiques de concentration et du tracking) et leurs dimensions plus élevées que celles du PV conventionnel impactent fortement le coût de la technologie ($90 \text{ \$/MWh} < LCOE < 168 \text{ \$/MWh}$).

Une approche alternative appelée micro-CPV, a pour objectif de réduire ce coût en miniaturisant les modules et en repensant les procédés de fabrication et d'assemblage. Elle permet de répondre aux limitations technologiques du CPV conventionnelles telles que l'élévation de la température des cellules, les pertes résistives dans celles-ci ou les complications liées aux optiques de concentration et au *tracking*. La technologie micro-CPV est présentée dans la partie suivante.

1.5 Micro-CPV

« Micro-CPV » est le terme générique adopté pour désigner la technologie CPV utilisant des cellules submillimétriques (1-999 μm de côté). Dans cette section, il est présenté comment l'approche micro-CPV permet de répondre à plusieurs des limitations techniques du CPV précédemment mises en lumière. L'état de l'art des prototypes utilisant des microcellules, qui ont pu voir le jour depuis le début des années 2010, sera ensuite dressé.

1.5.1 Réponses aux limitations du CPV

Le micro-CPV a été introduit pour répondre aux limitations technologiques qui font que le CPV conventionnel n'a pas été largement adopté en raison de son coût trop élevé. Ainsi, le micro-CPV promet une dissipation thermique simplifiée, des pertes Joule réduites et des techniques d'assemblage repensées. Ces avantages du micro-CPV sont présentés dans cette partie.

1.5 Micro-CPV

a) Dissipation thermique dans le micro-CPV

Avec la miniaturisation des cellules, la surface de collection des lentilles diminue également et la quantité de chaleur concentrée sur les cellules est amoindrie, permettant une répartition plus homogène de la température sur leur support [41], [42]. De plus une microcellule possède un rapport surface/volume plus grand que celui des cellules CPV standards ($> \text{mm}^2$) [43]. En conséquence, la gestion thermique de microcellules est grandement simplifiée par rapport à celle de cellules CPV standards, en permettant une dissipation accrue par leurs flancs. Ainsi, des supports tels que des circuits imprimés (PCB, *Printed Circuit Board*) peuvent être utilisés pour efficacement dissiper la chaleur, sans que des radiateurs avec des géométries complexes soient nécessaires [42]. A ce titre, Arase *et al* ont montré que, sous une concentration de 625 X, l'élévation de la température de cellules submillimétriques fixées sur un circuit imprimé à base d'époxy n'était que de 3°C par rapport à la température ambiante (figure 1-16) [44].

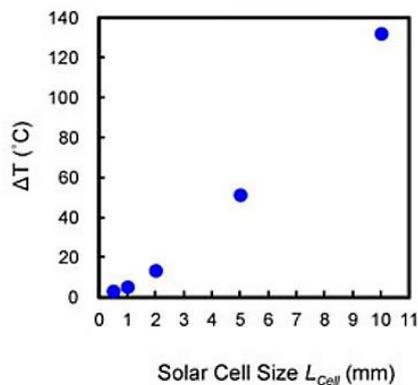


Figure 1-16 : Différence de température entre l'air ambiant et la jonction d'une cellule en fonction de sa taille. Elle est considérée comme fonctionnant sous 625 X et assemblée sur un circuit imprimé [46]

La diminution de la taille des modules CPV permet une gestion thermique grandement simplifiée. Elle a également un impact majeur sur les pertes Joule comme montré par la suite.

b) Pertes Joule dans le micro-CPV

En 2011, Vossier *et al.* a étudié de manière théorique l'impact de la miniaturisation des cellules sur leurs performances [45]. Ils montrent notamment l'évolution du FF pour différentes surfaces de cellule, tel qu'illustré sur la figure 1-17. La variation du FF en fonction de la diminution de la taille de la cellule (de 10 mm à 1 mm) pour un facteur de concentration supérieur à 100 X est présentée. Il peut être observé que, dans une certaine mesure, la diminution de la taille des cellules mène à un gain de FF . Ce gain devient négligeable lorsque le côté de la cellule passe sous le mm. Ceci indique que les contributions de la résistance latérale, qui dépendent de la taille de la cellule, deviennent négligeables pour les cellules de moins de 1 mm de côté. La résistance série du *bulk* ou celle induite par les jonctions tunnel devient prédominante dans la résistance série totale, d'où la chute de FF similaire observée sur les plus petites cellules.

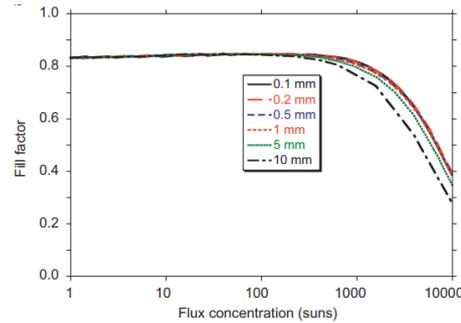


Figure 1-17: Fill factor calculé de cellules à triple jonctions en fonction de la concentration pour différentes surfaces de cellule [45]

Le micro-CPV permet aussi de répondre à la limitation due aux pertes résistives d'interconnexion des cellules dans le CPV conventionnel. Le grand nombre de cellules générant un faible courant permet potentiellement des modules à très forte tension – bas courant, pour lesquels des interconnexions à bas coût peuvent être développées [42]. L'assemblage des micromodules peut donc également être repensé. Ainsi, la partie suivante traite de l'assemblage parallèle de microcellules.

c) Techniques d'assemblage parallèle pour le micro-CPV

Un des défis du micro-CPV est l'assemblage à bas coût de nombreuses cellules submillimétriques [42]. L'état de l'art est la technique *pick-n-place* largement utilisée en microélectronique. Bien que rapide, cette technique est sérielle et démontre un compromis rapidité/précision. Il a été évalué un coût de 0,5 \$/composant, ce qui porte le coût d'assemblage à 5\$/W pour des cellules de 500 μm sous 1000 X [42], [46].

Ainsi, des techniques de placement parallèle semblent nécessaires pour le développement du micro-CPV. Deux techniques, proposées par Semprius et Panasonic, le *transfer printing* et l'auto-alignement fluïdique, sont présentées respectivement sur la figure 1-18(a) et figure 1-18(b) [47], [48].

Le *transfer printing* consiste à reporter un ensemble de cellules d'un *wafer* source à un support receveur via un tampon de transfert en utilisant la force de van der Waals [47], [49] (figure 1-18(a)). Pour cela, le *wafer* source doit disposer d'une couche sacrificielle et permettre la libération des cellules. Bien que nécessitant un outil de placement précis, un grand nombre de cellules peut être assemblé à chaque cycle.

1.5 Micro-CPV

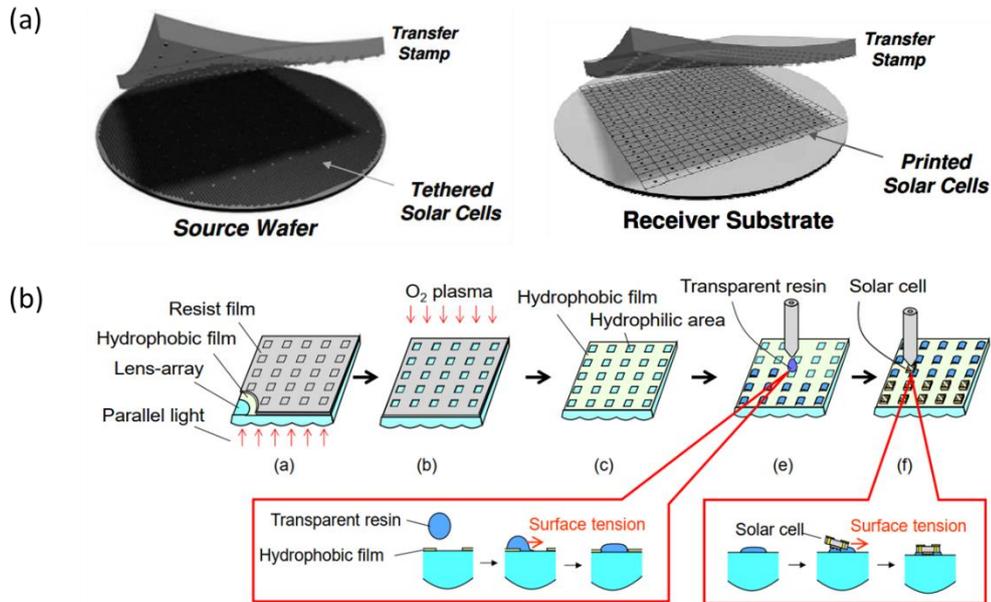


Figure 1-18 : Techniques de placement de cellules alternatives avec (a) le *transfer printing* proposé par Semprius [47] et (b) l'auto-alignement fluide proposé par Panasonic [48]

L'auto-alignement fluide, qui permet une précision d'alignement submicronique sans utiliser d'outil de placement très perfectionné, a également été utilisé dans le micro-CPV [44], [48], [50] (figure 1-18(b)). Il consiste à préparer le support receveur avec des zones hydrophiles (lieux où les cellules doivent être alignées) et des zones hydrophobes (lieux où les cellules ne doivent pas être alignées). En déposant un fluide sur le support, des gouttelettes se forment sur les zones hydrophiles par tension de surface. Cette même force est réutilisée lorsque les cellules sont grossièrement déposées sur les gouttelettes avant de s'aligner avec précision.

Le micro-CPV peut bénéficier de méthodes d'assemblage parallèle innovantes. Il permet également de profiter d'autres avantages, liés aux optiques et au tracking.

d) Autres avantages du micro-CPV

La diminution de la taille des optiques, associée à la réduction de celle des cellules, ouvre la voie à des efficacités optiques plus importantes que celles du CPV conventionnel [42]. De plus, la production de masse de ces systèmes de concentration à bas coût tels que le *roll-to-roll* ou le moulage de ceux-ci est réalisable [51]–[53] et la réduction de la distance focale des lentilles permet d'augmenter la compacité des modules [26]. L'installation et la logistique de micromodules devient simplifiée, limitant leur empreinte énergétique [54]. Cette compacité peut aussi s'appliquer au niveau du *tracking* comme l'a montré Insolight avec le *micro-tracking*, dont le schéma de principe est décrit en figure 1-19 [55]. Cette technique, qui repose sur un *tracking* planaire, avait déjà été proposée par Price *et al.* à partir de 2015 [56], [57].

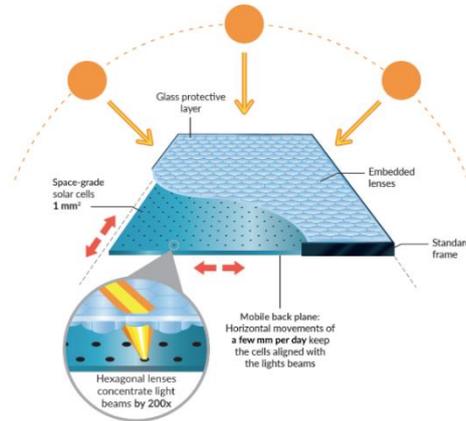


Figure 1-19 : Illustration du micro-tracking adopté par Insolight [55]

1.5.2 État de l'art sur le micro-CPV

Le micro-CPV a été introduit par Yoon *et al.* en technologie silicium en 2008 [58] et l'arrivée de micromodules utilisant des cellules multijonctions a suivi peu de temps après. Depuis, la technologie a beaucoup évolué et a montré un fort potentiel comme en témoigne la création du programme MOSAIC (Micro-scale Optimized Solar-cell Arrays with Integrated Concentration), financé par l'ARPA-E aux États-Unis en 2015 [59], [60].

a) Micro-CPV utilisant le transfer printing

En 2010, Furman *et al.* puis Burroughs *et al.* proposent l'utilisation de *transfer printing*, présentée §1.5.1c) pour l'assemblage à grande échelle de cellules double jonctions de 600 μm de côté, comme présenté en figure 1-20.a [47], [49]. Ces développements réalisés par Sempruis et l'Université d'Illinois à Urbana-Champaign (UIUC), permettent à l'entreprise de commercialiser leurs premiers modules à partir de 2012. Le module SM-U01 utilise des cellules triple jonction de 600 μm de côté (structure non spécifiée) qui sont utilisées sous un facteur de concentration de 1111 X dont un récepteur est montré sur la figure 1-20.b [61]. Une efficacité moyenne des modules fabriqués industriellement de 34.9% a été démontrée en 2016, après 3 ans d'optimisation des procédés de production (+ 2.7%) [62].

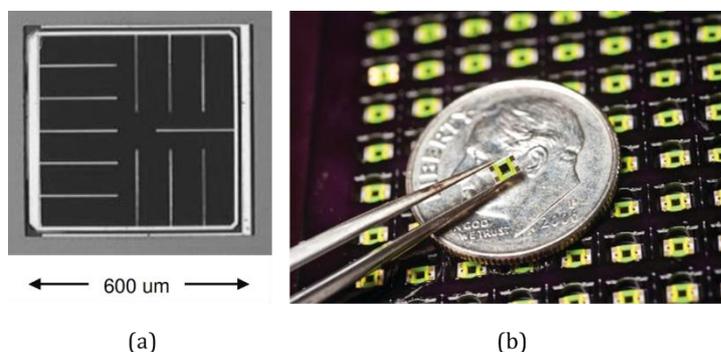


Figure 1-20 : Images de microcellules de 600 μm de côté développées par Sempruis avec (a) une cellule nue [47] et (b) une cellule assemblée sur son récepteur individuel [61]

1.5 Micro-CPV

La technique de *transfer printing* a également permis d'assembler des cellules à quadruple jonction de $0.6 \times 0.6 \text{ mm}^2$ (InGaP/GaAs/InGaAsNSb//Ge) à quatre terminaux pour fabriquer un micromodule démontrant une efficacité de 36.5% sous 1000 X [63]. Le même groupe, dont le US Naval Research Laboratory (NRL) est devenu un acteur majoritaire sous le programme MOSAIC, développera en 2015 le *transfer printing* de cellules à cinq jonctions de $0.6 \times 0.6 \text{ mm}^2$ (InGaP/GaAs/InGaAsNSb sur GaSb/InGaAsSb) à quatre terminaux dont la structure est décrite en figure 1-21 [64]. Le micromodule qui utilise cette technologie, possède aujourd'hui le record d'efficacité pour un micromodule CPV avec 41.2% de conversion. Un autre acteur industriel, Panasonic, est très impliqué dans le développement d'architecture de micromodules dont les travaux sont présentés dans la prochaine partie.

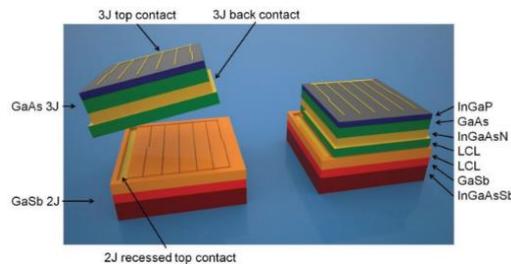


Figure 1-21 : Schéma du *transfer printing* d'une cellule 3J sur 2J à quatre terminaux [64]

b) Micro-CPV développé par Panasonic

Depuis 2014 Panasonic, a proposé en collaboration avec Solar Junction, des prototypes de micromodules avec des efficacités supérieures à 30%, parfois 35%, [44], [48], [65]–[70]. Ceux-ci reposent tous sur des microcellules à triple jonction InGaP/GaAs/GaInAsSb sur substrat semi-isolant en GaAs, assemblées par la technique d'auto-alignement fluïdique, présentée au §1.5.1c).

En 2014, Arase *et al.* et Itou *et al.* ont publié les premiers articles sur un micromodule Panasonic [44], [65]. Les articles suivants ont porté sur les modifications des paramètres de l'assemblage et des dimensions des dispositifs, effectuées sur le micromodule initial. Une photographie illustre le module complet figure 1-22.a. Il consiste en une matrice de 5×5 couples cellules-lentilles convergentes ($C_g = 277 \text{ X}$) assemblée sur un circuit imprimé. Le module ainsi fabriqué démontre une grande compacité avec une épaisseur de 20 mm seulement (contre 66 mm pour le module Semprius présenté dans la partie a)). L'architecture de cellule utilisée (figure 1-22.b), permet d'avoir les deux contacts électriques en face arrière, pour un assemblage simplifié sur le circuit imprimé. Ceci a été rendu possible grâce à l'utilisation d'un substrat GaAs semi-isolant dans lequel des *vias* ont été formés pour reporter les contacts de la face avant vers la face arrière de la cellule. Le contact de base est pris sur une couche de conduction latérale (*Lateral Conduction Layer* ou *Contact Layer* sur la figure 1-22.b). Le contact d'émetteur est pris sur le *busbar* en prenant soin de ne pas court-circuiter les sous-cellules grâce à l'utilisation d'un matériau isolant (nature non précisée dans cet article). Les cellules de $0.6 \times 0.6 \text{ mm}^2$ ainsi fabriquées sont montrées sur la figure 1-22.c, sur laquelle on peut remarquer les contacts présents en face avant et en face arrière, ainsi que les *vias* permettant cette architecture.

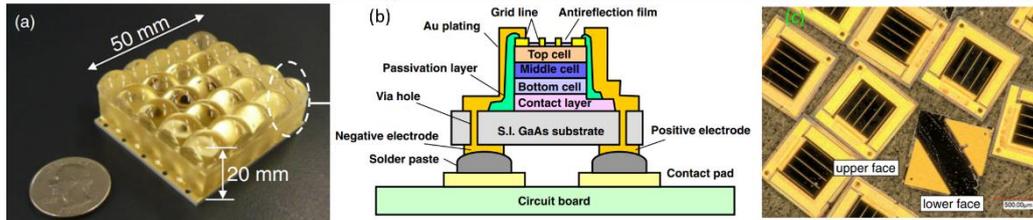


Figure 1-22 : Illustrations des travaux développés dans avec (a) le micromodule de 25 cellules, (b) un schéma en coupe de la cellule avec contacts en face arrière, assemblée sur circuit imprimé et (c) des cellules de $600 \times 600 \mu\text{m}^2$ [44]

Les performances du module fabriqué ont été mesurées en extérieur. Il a été montré que la température de la face arrière du module ne dépasse pas 30.5°C pour une température ambiante de 28.9°C , assurant une température de cellule restreinte selon les calculs effectués par le groupe. Le module complet a démontré une efficacité de 34.7% sous illumination extérieure [44].

Quelques mois plus tard, Fidaner *et al.* ont publié des résultats très proches avec des informations complémentaires sur le matériau isolant utilisé pour l'isolation électrique du contact d'émetteur, qui est un polymère photosensible Megaposit SPR 220-7 [66]. Une vue en coupe de la cellule prise au microscope électronique à balayage (MEB) peut être observée en figure 1-23 et notamment le métal permettant de reporter le contact émetteur (*Interconnect Metal*) en face arrière déposé sur la matériau isolant (*Organic Polymer*).

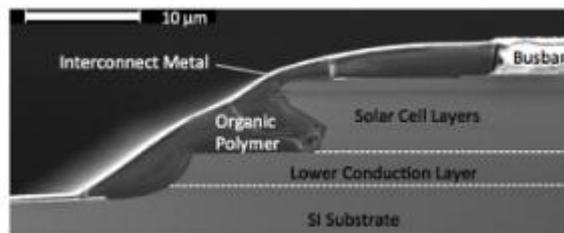


Figure 1-23 : Image MEB en coupe de la cellule utilisant les contacts en face arrière [66]

En 2015, de nouveaux résultats sur un module micro-CPV ont été proposés par Hayashi *et al.* [67]. Celui-ci utilise des cellules de plus grande taille ($0.97 \times 0.97 \text{ mm}^2$) telles que celle montrée sur la figure 1-24(a) sans que les dimensions du micromodule soient très affectées par rapport aux versions préalablement présentées (réduction de 1 mm d'épaisseur soit un module de

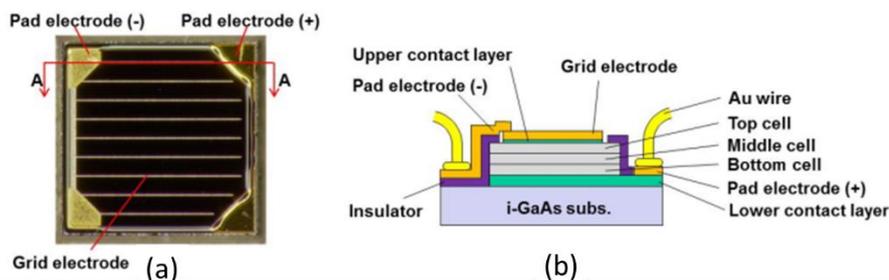


Figure 1-24 : Illustrations des travaux de [67] avec (a) une image au microscope d'une cellule de $0.97 \times 0.97 \text{ mm}^2$ avec les contacts en face avant et (b) un schéma en coupe de la cellule.

1.5 Micro-CPV

50×50×19 mm³). Cependant, un changement majeur a eu lieu sur l'architecture de cellules utilisées, laquelle n'utilise plus les contacts en face arrière mais ceux en face avant uniquement. La figure 1-24(b) illustre cette architecture alternative, qui utilise le conventionnel microcâblage (*wirebonding*) pour réaliser l'interconnexion des contacts électriques. Cette nouvelle approche a permis au micromodule d'atteindre une efficacité de conversion maximale de 37.1% pour un C_g de 150 X environ.

L'année suivante, en 2016, Panasonic propose un nouveau design de cellule (surface active = 0.55×0.55 mm²), montrée sur la figure 1-25(a), qui permet une méthode d'assemblage alternative dont une vue en coupe est schématisé sur la figure 1-25(b) [68]. Dans cette nouvelle méthode, des cellules à contacts en face avant sont à nouveau utilisées et sont assemblées d'une façon similaire à la technique *flip-chip* utilisée dans l'industrie microélectronique. Pour que cela soit réalisable, le substrat est transparent au niveau de la zone exposée de la cellule et inclut la circuiterie (pâte d'argent, *silver paste*) au niveau de ses contacts. L'interconnexion entre les cellules est réalisée avec une connexion Pb (*lead wire*) pour ce prototype. La dissipation thermique est réalisée par une plaque de cuivre (*copper plate*) en face arrière du module, reliée aux cellules par de la graisse thermique (*thermal grease*). L'efficacité maximale mesurée du micromodule est finalement de 35.9% ($C_g = 330 X$).

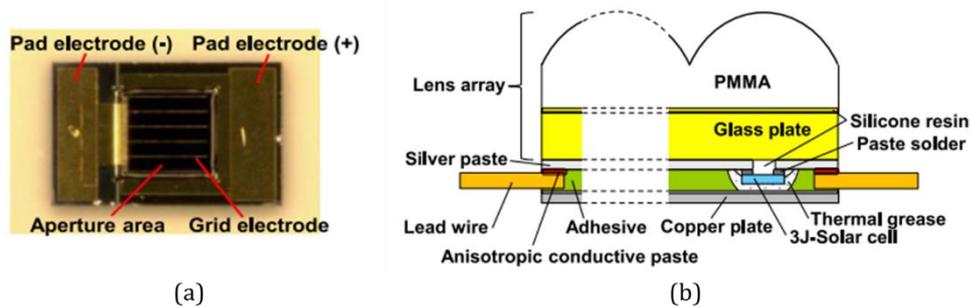


Figure 1-25 : Illustrations des technologies développées dans [68] avec (a) une image au microscope d'une cellule de 600×600 μm² avec contact en face avant et (b) un schéma de l'assemblage du micromodule en coupe

En 2017, la méthode d'assemblage est simplifiée avec une circuiterie directement imprimée sur le support en verre comme montré sur la figure 1-26 (*circuit board (glass)*) [69]. Les auteurs peuvent ainsi utiliser des techniques qui sont largement répandues dans l'industrie microélectronique, la sérigraphie (*screen printing*) et la technologie CMS (composant monté en surface, *surface-mounting technology (SMT)*). Les cellules utilisées dans ce cas ont une surface

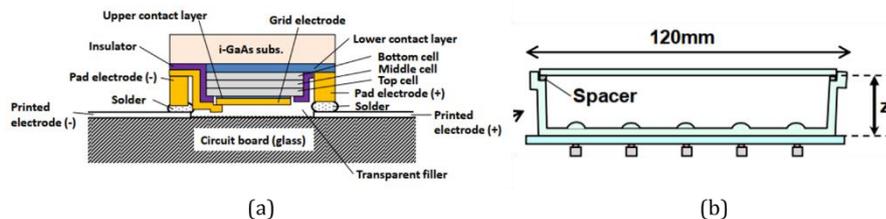


Figure 1-26 : Illustrations des travaux développées dans [69] avec (a) un schéma en coupe de la cellule assemblée telle un CMS et (b) un schéma du micromodule complet

inférieure au mm^2 , en reprenant le design présenté en figure 1-24(a). Les optiques intégrées sont également modifiées pour des lentilles de Fresnel et des optiques secondaires qui offrent un facteur de concentration C_g de 480 X (cf. figure 1-26(b)). On remarque également la présence d'un dissipateur thermique individuel pour chaque cellule. L'efficacité maximale atteinte mesurée est de 30.4% avec ce nouveau module.

En 2018, des modifications ont été apportées à la structure du module pour que son poids soit réduit de 24% et son coût (objectif : $LCOE < 56 \text{ \$/MWh}$ en 2030) [70]. L'efficacité finalement mesurée sur ce nouveau module est de 31.5%.

Ainsi, de 2014 à 2018, Panasonic a démontré la fabrication de micromodules CPV utilisant des approches originales et inspirées de la microélectronique. Ces travaux ont permis d'atteindre une efficacité maximale de 37.1% de conversion au niveau du module. Cependant, l'objectif principal pour la commercialisation de ces produits reste la diminution du $LCOE$. D'autres approches du micro-CPV peuvent être développées pour répondre à cet objectif, telle que l'intégration d'une cellule de silicium comme substrat de micromodule CPV.

c) Micro-CPV basé sur l'intégration hétérogène sur silicium

Une limitation de la technologie CPV conventionnelle est le fait de ne convertir que l'illumination directe. Un micromodule CPV utilisant une cellule en silicium comme substrat permet de convertir le spectre global. En effet, dans cette approche, la composante directe de l'illumination est convertie par les cellules à base de matériaux III-V (sous les optiques de concentration) tandis que la composante diffuse est convertie par la cellule en silicium qui sert de substrat.

Cette type de module a été proposé par le groupe NRL/UIUC/Semprius à partir de 2016 [71], [72]. La figure 1-27 schématise cette approche, où le substrat est composé de cellule en silicium. Il a été montré qu'un gain d'efficacité compris entre 1.02% et 8.45% pouvait être mesuré, dépendamment du rapport entre la composante directe et la composante globale de l'illumination.

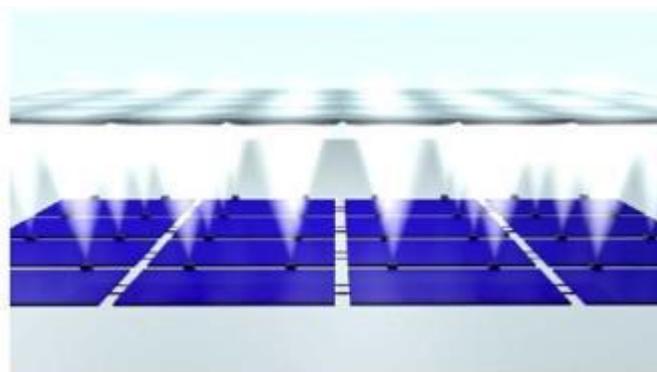


Figure 1-27 : Schéma de principe du module micro-CPV/Si proposé dans [71]

Une approche similaire a été proposée par un groupe du Massachusetts Institute of Technology, Sandia et l'Université du Delaware [73], [74]. Sur la figure 1-28(a), une vue schématique du concept est présentée, basée sur une cellule-substrat en silicium (111) dans

1.5 Micro-CPV

lequel des cavités sont gravées (cf. figure 1-28(b)). Au fond de ces cavités sont placées des cellules III-V telle que la cellule InGaP/GaAs de 200 μm de côté de la figure 1-28(c). Sur cette cellule, les contacts électriques sur la face avant de celles-ci permettent de les interconnecter directement sur la face arrière du substrat en silicium, suivant un assemblage de type *flip chip*. Le prototype complet est montré sur la figure 1-28(d). Il est envisagé que celui-ci intègre des microcellules à quatre jonctions pour démontrer une efficacité plus importante (à ce jour, aucun autre ne semble avoir été démontré en ce sens).

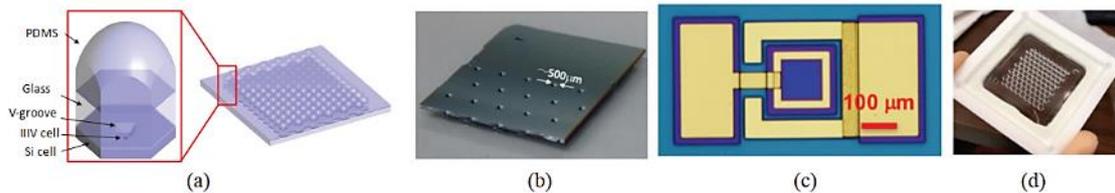


Figure 1-28 : Illustrations de la technologie utilisée dans [73] avec (a) le schéma de principe du micromodule développé, (b) le substrat-celle Si avec des cavités gravées, (c) une image au microscope d'une cellule InGaP/GaAs fabriquée et (d) le parquet de lentilles monobloc en PDMS

Insolight a également proposé cette approche tel que montré sur la page internet de la start-up suisse [55].

Comme pour le CPV standard, le micro-CPV ne fait pas preuve d'unification quant aux modèles optimaux à développer, ce qui est le propre d'une technologie peu mature.

d) Bilan sur l'état de l'art du micro-CPV

Les différentes architectures, en grande partie inspirées de la microélectronique et malgré leur relative jeunesse technologique, ont permis de réaliser des micromodules ayant des efficacités supérieures à 30%, 35% voire 40%. Le tableau 1-1 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présente une synthèse des technologies micro-CPV qui ont été publiées de 2012 à 2019.

Tableau 1-1 : Prototypes et micromodules commerciaux dans le micro-CPV

Année	Laboratoire ou Entreprise	Structure cellule	Surface mesa [μm^2]	Efficacité @ Concentration	Réf
2012	Semprius	3J N.C	600×600	32.2% @ 1111 X	[61]
2014	Panasonic	3J InGaP/GaAs/GaInNAsSb	600×600	34.7% @ 277 X	[63]
2014	Semprius	4J, 4 terminaux InGaP/GaAs/GaInNAsSb//Ge	600×600	36.5% @ 1111 X	[65]
2015	Panasonic	3J InGaP/GaAs/GaInNAsSb	970×970	37.1% @ ~150 X	[66]
2016	Semprius	3J N.C.	600×600	34.9% @ 1111 X	[62]
2017	CEA-INES	3J InGaP/InGaAs/Ge	600×600	33.4% @ 1000 X	[51]
2017	NRL	5J, 4 terminaux InGaP/GaAs/GaInNAsSb// GaSb/InGaAsSb	805×755	41.2% @ 744 X	[64]
2019	Insolight	3J InGaP/InGaAs/Ge	1000×1000	30% @ 200 X	[55]

Conclusion du chapitre 1

Le contexte dans lequel le projet de thèse s'inscrit a été présenté dans ce chapitre. L'énergie solaire nous parvient sur Terre sous forme de photons distribués sur large bande spectrale. Ceux-ci peuvent être captés et des porteurs électriques peuvent être générés grâce à l'effet photovoltaïque des cellules. Les limitations intrinsèques de conversion par matériau peuvent être repoussées par l'utilisation de cellules multijonctions. Celles-ci permettent d'augmenter l'efficacité de conversion et d'autant plus sous concentration solaire (record d'efficacité de 47.1% sous 143 X). Le photovoltaïque à concentration a ensuite été présenté avec ses caractéristiques techniques mais aussi ses limitations, telles que la gestion thermique et l'effet Joule. Une réponse à ces limitations réside dans la miniaturisation des cellules pour former des modules micro-CPV. Un état de l'art sur cette technologie a été effectué, pour laquelle des micromodules ont démontré une efficacité supérieure à 40%. Des défis ont été répertoriés pour que le micro-CPV puisse être déployé à grande échelle, notamment sur des structures conventionnelles GaInP/GaInAs/Ge, à moindre coût. La fabrication, la caractérisation, l'assemblage et la fiabilité de microcellules restent des challenges pour cette technologie peu mature et seront adressés dans cette thèse, selon les axes illustrés dans la figure 1-29.

Fabrication de microcellules performantes > Chapitre 2	Assemblage de cellules en MIM > Chapitre 3	Évaluation de la robustesse des microcellules > Chapitre 4
<ul style="list-style-type: none"> • Développement de procédés de fabrication adaptés aux microcellules • Mesure des performances des microcellules et rétroaction sur les procédés de fabrication • Proposition d'une architecture de contact alternative 	<ul style="list-style-type: none"> • Développement de procédés de fabrication permettant l'interconnexion des cellules en MIM • Discussion sur l'optimisation des MIM • Mesure des performances des MIM 	<ul style="list-style-type: none"> • Mise en place d'essais de vieillissement accéléré adaptés • Comparaison des différents types d'essais mis en place • Évaluation de la robustesse des microcellules • Discussion sur les essais réalisés

Figure 1-29: Axes d'étude suivis dans cette thèse et sous-objectifs associés

Chapitre 2: Développement de microcellules performantes

Dans ce chapitre, l'adaptation des procédés de fabrication permettant des microcellules triple jonction performantes est présentée. Bien que dans le chapitre précédent, des cellules multijonctions submillimétriques aient déjà été démontrées, les techniques utilisées ne sont pas détaillées ou sont réalisées sur des structures autres que la standard triple jonction InGaP/InGaAs/Ge. Ici, des cellules triple jonction de taille standard mais également avec des dimensions micrométriques sont proposées. Les techniques de fabrication mises en œuvre permettent également de fabriquer des cellules de géométries variées et avec des méthodes de contact alternatives, de sorte à être assemblées adéquatement avec le module.

Dans un premier temps, les procédés clés pour la fabrication et les techniques de caractérisation de cellules CPV standards sont décrits. Les défis, qui en découlent, pour les microcellules sont ensuite discutés. Par la suite, les réponses aux défis technologiques seront détaillées, notamment avec le développement d'une technique d'isolation électrique adaptée, l'étude de l'effet des recombinaisons de périmètre et la limitation de ces dernières par la passivation. Le dépôt des contacts d'émetteur et de base sera ensuite abordé avant la singulation des dispositifs, qui reste une étape identifiée comme critique dans le procédé. Finalement, des caractérisations certifiées des microcellules sont effectuées, dont les principaux résultats sont exposés.

2.1 Méthodologie de développement de microcellules multijonctions

Dans cette section sont présentées la méthodologie pour la fabrication et la caractérisation des microcellules de ce projet. Les étapes de fabrication de cellules CPV standards et les techniques pour leur caractérisation sont présentées. Les défis qui en découlent permettront de proposer les briques de base pour adapter les techniques de fabrication aux microcellules.

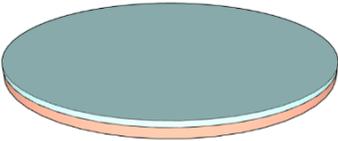
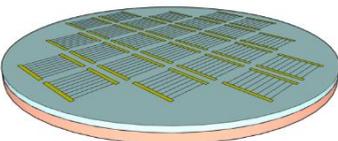
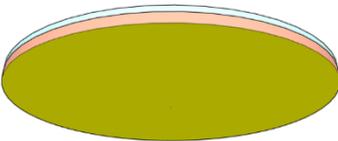
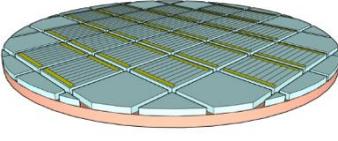
2.1.1 Fabrication et caractérisation de cellules multijonctions standards

Dans cette partie, les étapes de fabrication génériques pour la fabrication de cellules CPV standards ainsi que les techniques pour les caractériser sont introduites. Celles-ci serviront de briques de base pour le développement des microcellules traité dans cette thèse.

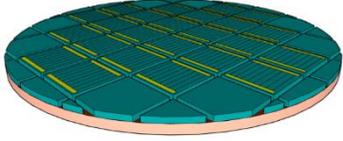
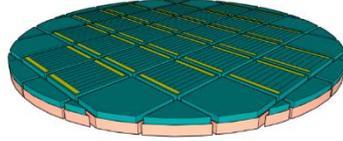
a) Étape de fabrication de cellules multijonctions

De façon générale, la fabrication de cellules multijonctions est faite en plusieurs étapes génériques, comme décrit dans le tableau 2-1. Avec ces techniques de fabrication, les cellules CPV standards dont la fabrication est complète ont une géométrie similaire à celle présentée en figure 2-1.

Tableau 2-1 : Procédés pour la fabrication de cellules multijonctions

Étape	Illustration	Détails
Épitaxie		Une structure triple jonction conventionnelle GaInP/GaInAs/Ge est crûe sur un <i>wafer</i> de germanium, telle que celle présentée sur la figure 1-8(a)
Dépôt de contact d'émetteur		Le contact d'émetteur en forme de peigne est déposé sur la face avant de la cellule. Le contact doit être optimisé (design, métallisation) pour satisfaire le compromis ombrage-résistance série.
Dépôt de contact de base		Le contact de base est déposé sur l'ensemble de la surface arrière du <i>wafer</i> .
Isolation électrique		L'isolation électrique permet de définir les cellules sur un <i>wafer</i> . Cette isolation doit séparer électriquement toutes les sous-cellules sur tout le <i>wafer</i> .

2.1 Méthodologie de développement de microcellules multijonctions

Dépôt de la couche antireflet		La couche antireflet est déposée pour limiter les réflexions à la surface des cellules. Celle-ci est par la suite ouverte sur les contacts électriques pour l'interconnexion subséquente
Singulation		L'étape de singulation consiste à séparer physiquement les cellules les unes des autres. À ce moment, les dispositifs sont unitaires et peuvent être extraits du <i>wafer</i> .

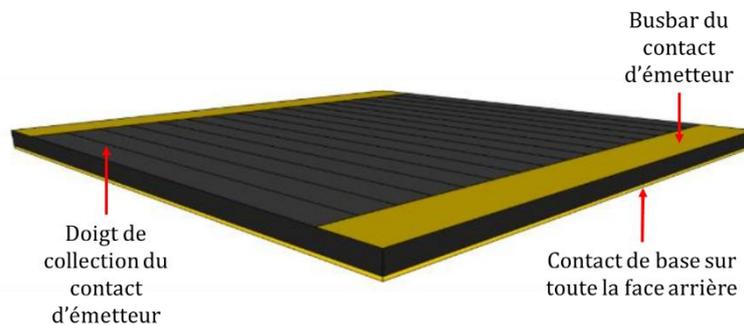


Figure 2-1: Schéma d'une cellule CPV complète

Après leur fabrication, différentes techniques de caractérisations électro-optiques permettent d'évaluer les performances des cellules.

b) Caractérisation électro-optique de cellules multijonctions

Une caractérisation des performances assez facile à mettre en œuvre consiste en la caractérisation sous simulateur solaire avec une illumination dite « un soleil » (ou 1 X).

L'éclairement de haute intensité pour la caractérisation de cellules en fonctionnement sous concentration est souvent simulé par un flash de forte intensité sur une courte période temporelle. Ce type d'équipement s'appelle un *flash tester* et permet de mesurer l'impact de la concentration solaire sur les performances électriques des cellules.

Sous obscurité, une cellule ne génère pas de photocourant et se comporte donc comme une diode, dans laquelle on injecte des porteurs qui vont se recombiner. Ainsi cette caractérisation va permettre d'analyser les propriétés électriques d'une cellule en s'affranchissant des effets dus à des fluctuations de la source d'illumination qui altèrent la répétabilité/reproductibilité des mesures effectuées. La caractéristique $I-V$ est alors tracée sur une échelle semi-logarithmique pour une meilleure compréhension des mécanismes limitants.

Une autre technique largement utilisée pour la caractérisation électro-optique de cellules est la mesure d'efficacité quantique. Celle-ci permet de connaître le ratio entre les porteurs photogénérés et les photons incidents à la cellule (EQE pour efficacité quantique externe) ou les photons absorbés dans celle-ci (IQE pour efficacité quantique interne), en fonction de la longueur d'onde des photons. Cette technique est d'autant plus intéressante pour la

caractérisation de cellules multijonctions puisqu'elle permet d'évaluer l'efficacité quantique de chaque sous-cellule et de retrouver le courant généré par celles-ci.

Ces procédés de fabrication et techniques de caractérisation établis pour les cellules CPV standards soulèvent néanmoins quelques défis pour le développement de microcellules. Ces défis sont explicités dans la partie suivante.

2.1.2 Principaux défis technologiques pour la fabrication et la caractérisation de microcellules

a) Défi lié au contact émetteur

Les contacts d'émetteur standards utilisent un design en peigne rectangulaire, composé de *busbars* et de doigts comme montré sur la figure 2-1. Ceci est dû au fait que la technique d'isolation électrique utilisée conventionnellement permet de fabriquer des cellules rectangulaires uniquement. Cependant, dépendamment du système de concentration optique utilisé, le design optimal n'est pas nécessairement rectangulaire. De plus, les cellules standards utilisent de larges *busbars* pour permettre leur interconnexion par la technique du *wirebonding*. Néanmoins, ces *busbars* créent de l'ombre sur une part non-négligeable de la cellule, d'autant plus grande que la cellule est petite puisque leur largeur est fixée par la taille des fils et l'outil de *wirebonding* utilisé. Dans l'optique où une technique d'assemblage alternative au *wirebonding* serait utilisée pour les microcellules, ces *busbars* deviendraient inutiles et ainsi, la part de surface active (*i.e.* illuminée) de la cellule pourrait être augmentée. Il convient donc d'envisager des contacts dont le design est flexible selon l'application visée donc potentiellement non-rectangulaire. Le challenge lié à ces contacts versatiles repose en partie sur une technique d'isolation électrique et de singulation adaptée permettant la fabrication de cellules avec des géométries variées.

b) Défi lié au contact de base

Le contact de base est généralement déposé sur la face arrière complète de l'échantillon. Ceci implique une méthode d'assemblage différente pour le contact de la face avant (émetteur) et pour la face arrière (base). Généralement, la face arrière de la cellule est brasée avec de la pâte à braser ou de l'adhésif conducteur. Avec la miniaturisation des cellules, la densité de dispositifs augmente et le nombre d'interconnexions aussi. Des contacts sur la même face permettraient une simplification de l'assemblage, ce qui implique que le contact de base devrait se trouver sur la face avant de la cellule. Cependant, la technique d'isolation électrique standard (scie diamant) ne permet pas d'obtenir une surface plane du germanium en face avant et rend impossible le dépôt potentiel de contact électrique sur cette face. Ainsi, outre le défi lié à l'impact des contacts en face avant sur les performances électriques, une technique d'isolation électrique alternative devra être mise en place pour le développement de cette architecture innovante.

c) Défi lié à l'isolation électrique :

L'isolation électrique constitue l'étape critique car elle permet de séparer électriquement les cellules les unes des autres. Pour cela, tous les matériaux constituant la structure des cellules multijonctions doivent être isolés. La technique d'isolation électrique devra générer le moins

2.1 Méthodologie de développement de microcellules multijonctions

de perte de matériaux possible avec la réduction de la taille des cellules. Comme décrit précédemment, le développement de cellules avec des géométries variées est prometteur selon les systèmes de concentration optique qui leur sont associées. Aussi, la technique d'isolation électrique devra générer un minimum de défauts. En effet, les défauts accumulés sur les flancs des cellules sont des centres de recombinaison potentiels et les pertes liées aux recombinaisons de surface au périmètre des cellules sont d'autant plus importantes que la taille des dispositifs diminue [66].

d) Impact des recombinaisons de périmètre

L'impact des recombinaisons de périmètre, lesquelles découlent de l'isolation électrique présentée au paragraphe précédent, sur les plus petites cellules à base de matériaux III-V a déjà été observé dans la littérature. En effet, en 1990, Stellwag *et al.* ont mesuré des cellules en GaAs avec des surfaces de 2.5×10^{-5} à 0.25 cm^2 sous 1 soleil et ont montré que le courant lié au recombinaisons de périmètre dégradait principalement le *fill factor* des plus petits dispositifs [75]. En 2014, Fidaner *et al.* ont montré qu'une cellule InGaP/GaAs/GaInNAsSb de $550 \times 550 \text{ }\mu\text{m}^2$ avait un V_{oc} réduit de 2.3% par rapport à une cellule de $5.5 \times 5.5 \text{ mm}^2$ sous un soleil [66]. Cette valeur tombe cependant à 0.4% sous 800 X. Un an plus tard, Espinet-González *et al.* ont étudié leur impact sur des diodes en InGaP, GaAs et Ge et ont montré que l'impact des recombinaisons de périmètre était le plus important dans les diodes de GaAs [76]. Une structure InGaP/InGaAs/Ge est utilisée dans ce projet de thèse et les performances des cellules fabriquées à partir de cette structure seront donc affectées par les recombinaisons de périmètre. Une technique de passivation adaptée peut cependant permettre de réduire le taux de recombinaison de surface.

e) Singulation

Une des étapes finales pour la fabrication des cellules est la singulation, qui consiste à séparer les dispositifs du *wafer* duquel ils ont été fabriqués. Les cellules sont faites de matériaux fragiles qui nécessitent des procédés de fabrication « doux » où la diminution de la taille des cellules engendre des risques d'arrachement des dispositifs singulés. De plus, la technique de singulation devrait permettre un rendement de *wafer* (surface de cellule /surface totale du *wafer*) important malgré la diminution de la taille des cellules (*i.e.* devra avoir faible largeur de découpe). Enfin, pour découper des microcellules avec des potentielles géométries variables, il convient que le procédé développé puisse s'adapter à toutes les formes de dispositifs fabriqués.

f) Défis liés à la caractérisation

Les simulateurs solaires et les *flash testers*, sont classés selon leur conformité spectrale, leur uniformité d'illumination et leur stabilité temporelle selon les lettres A (< 2%), B (< 5%) et C (< 10%). En raison de leur faible surface pour moyenniser le flux incident, les microcellules sont très sensibles à l'uniformité d'illumination. Il convient donc de s'assurer de la bonne qualité de l'illumination générée par les équipements de caractérisation des microcellules. Ces équipements de haute qualité ne sont disponibles que dans certains centres de recherche spécialisés en caractérisation électro-optique pour photovoltaïque, tels que le laboratoire SUNLAB à l'Université d'Ottawa (Canada) avec lequel une collaboration a été mise en place et l'ISE Fraunhofer à Freiburg (Allemagne), apte à fournir des mesures certifiées sous

illumination. Il est important de noter que la caractérisation d'efficacité quantique (externe :EQE ou interne :IQE), ne peut être effectuée à ce jour que sur des cellules ayant des surface $> 1 \text{ mm}^2$ en raison de la taille importante des spots utilisés dans les équipements QE conventionnels.

Que ce soit pour leur fabrication ou leur caractérisation, les microcellules nécessitent un développement particulier, lequel est présenté dans la partie suivante.

2.1.3 Axes proposés pour la fabrication de microcellules performantes

Le développement des microcellules sera articulé autour de quatre grandes axes dans ce chapitre, montrés sur la figure 2-2 et liés aux défis technologiques présentés dans la partie précédente.

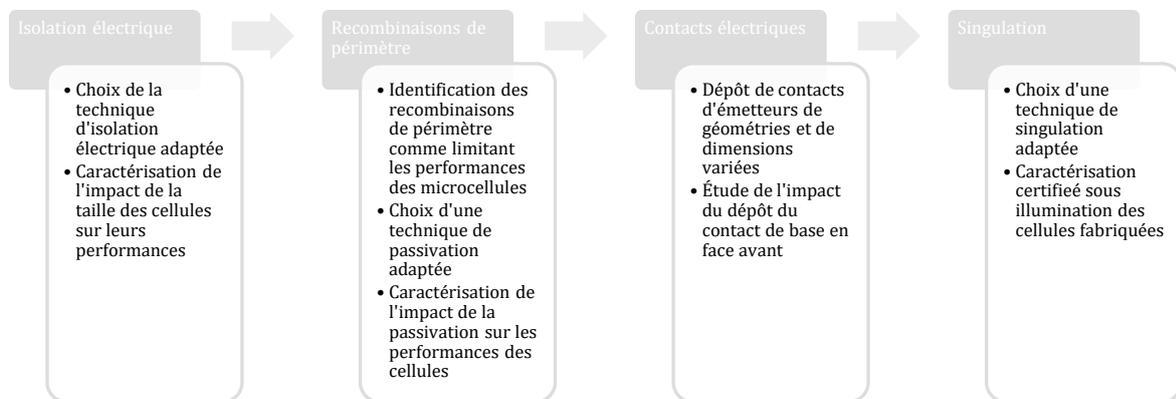


Figure 2-2 Axes d'études proposés pour la fabrication de microcellules performantes

2.2 Isolation électrique des microcellules

L'isolation électrique permet de définir les cellules en les séparant électriquement entre elles. Dans cette section sera présenté le développement lié à l'isolation électrique des microcellules. Bien que cette étape ne soit pas la première dans l'ordre chronologique de la fabrication des cellules, elle reste cruciale. En effet, les microcellules nécessitent une technique d'isolation optimisée pour limiter les phénomènes de recombinaisons de périmètre, particulièrement exacerbés dans le cas des microcellules. Aussi, cette technique devrait permettre d'avoir des dispositifs de formes variées et doit conduire à l'obtention d'un rendement de *wafer* plus important (*i.e.* peu de surface du *wafer* gaspillée pour l'isolation électrique). Dans le cadre d'hétérostructures comme celles des cellules solaires multijonctions ou dans le domaine des diodes laser par exemple, des *mesas* sont généralement formés sur un substrat. L'hétérostructure à isoler fait environ $9 \mu\text{m}$ d'épaisseur et cette étape permet de définir la taille et la forme des cellules. Pour réaliser cette étape, différentes techniques de microfabrication peuvent être utilisées. Après avoir présenté les différentes techniques d'isolation électrique, la gravure par plasma sera définie comme étant la plus adaptée aux microcellules, ce qui constitue une originalité de cette thèse. Le procédé de fabrication utilisé sera détaillé et les performances des microcellules de taille variable seront analysées.

2.2.1 Techniques d'isolation électrique envisagées

Parmi les techniques d'isolation électrique de cellules, on retrouve la découpe partielle à la scie diamant, la gravure chimique ou la gravure plasma. Ces techniques sont présentées dans cette partie, en mettant en lumière leurs avantages et leurs inconvénients. Ensuite, un bilan de celles-ci sera dressé pour sélectionner la plus adaptée à l'isolation électrique des microcellules.

a) Isolation électrique par découpe mécanique partielle

Une méthode largement utilisée pour la découpe de puces en microélectronique est la découpe mécanique à la scie diamant. Plusieurs techniques de découpe sont possibles et l'une d'entre elles consiste à réaliser une découpe partielle (*i.e.* ne traverse pas complètement le *wafers*), qui servira à initier une clive subséquente. Cette technique de découpe partielle a inspiré le domaine CPV pour réaliser l'isolation électrique des cellules.

Elle a été présentée comme technique d'isolation de cellules multijonctions par Fidaner *et al.* de Solar Junction en 2013 [77]. Celle-ci est également largement utilisée pour le développement de cellules triple jonction à l'Université de Sherbrooke.

La technique repose sur le bris mécanique de la structure à isoler, ce qui n'implique aucune réelle limitation sur les variétés de matériaux qui la composent. Une considération doit cependant être prise pour l'éventuelle apparition de courants de fuite, suite à un dépôt des débris de matériaux arrachés / fondus sur les flancs exposés de la cellule, ceci malgré la présence d'un jet d'eau sous pression pour le refroidissement de la lame.

Sur la figure 2-3(a), il est montré une image au microscope électronique à balayage (MEB) en perspective d'une structure triple jonction dans laquelle quatre *mesas* ont été formés par deux découpes partielles perpendiculaires. L'image illustre l'empreinte de la scie dans le substrat de germanium sans qu'il ait été complètement découpé. Une image MEB rapprochée sur l'hétérostructure III-V est présentée en figure 2-3(b). On y remarque les défauts générés (*micro cracks* ou *chipping*) par la scie diamant. Les matériaux III-V sont très fragiles et donc sensibles aux stress mécanique et thermique induits par le passage de la scie. Ces défauts limitent les performances de la cellule car ils deviennent des centres de recombinaison. Ces *cracks* peuvent également se propager dans la structure et induire des problèmes de fiabilité, proscrits sur des dispositifs dont la durée de vie minimum doit être de 30 ans [78]. En raison de la génération de ces défauts et de la potentielle propagation de ceux-ci, les fournisseurs de scie diamant de singulation conseillent qu'il n'y ait pas de dispositif actif dans une zone correspondant à 2 à 3 fois la largeur de la lame autour de la ligne de découpe [79].

Cette technique, bien que facile à mettre en œuvre en raison de son bas coût, présente plusieurs inconvénients, dont la génération de défauts qui est potentiellement problématique sur des microcellules III-V/Ge.

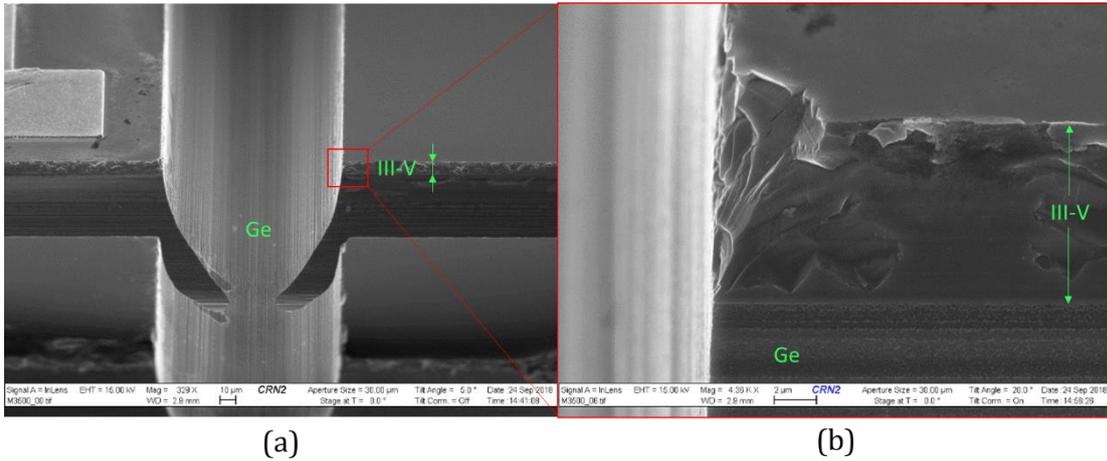


Figure 2-3: Images MEB en perspective de cellules triple jonction isolée par découpe partielle avec (a) les lignes de passage de la scie qui forment des *mesas* et (b) une vue rapprochée sur les défauts générés dans l'hétérostructure III-V

b) Isolation électrique par gravure chimique

Une technique d'isolation électrique générant moins de défauts que la découpe partielle à la scie consiste à réaliser cette étape par gravure chimique. Pour cette technique parallèle à bas coût, la complexité de sa mise en œuvre réside dans la diversité des matériaux qui composent la structure triple jonction. Cependant, des solutions ont permis de graver ces hétérostructures pour former des *mesas*. Bien que les informations sur les techniques de fabrication de cellules CPV n'abondent pas dans la littérature, cette technique semble être aujourd'hui la plus utilisée [21], [66].

En 2013, Turala *et al.* ont proposé et développé une méthode pour l'isolation simultanée de toute la structure triple jonction, étudiée à l'Université de Sherbrooke [80]. Elle repose sur l'utilisation d'une solution de brome-méthanol ($\text{Br}_2\text{-CH}_2\text{OH}$) et d'un masque dur en SiO_2 ou Si_xN_y . Cette gravure, réalisée en une seule étape, a été testée dans le cadre de ce projet et des illustrations MEB des deux côtés d'un *mesa* gravé sont présentées en figure 2-4. On peut remarquer la faible quantité de défauts sur les flancs du *mesa*. Cependant, on peut également observer les plans préférentiels suivis par la gravure en fonction de l'orientation du cristal (*wafer* III-V/Ge orienté [001]). Ainsi, la pente du flanc du *mesa* varie entre 50° pour la pente positive observée sur la figure 2-4 (a) et -13° pour la pente négative observée sur la figure 2-4 (b). De plus, une certaine sélectivité de la gravure pour les différents matériaux peut être notée. En effet, un phénomène de sous gravure dans la jonction tunnel supérieure est mis en évidence par les flèches jaunes, et concerne également le germanium.

2.2 Isolation électrique des microcellules

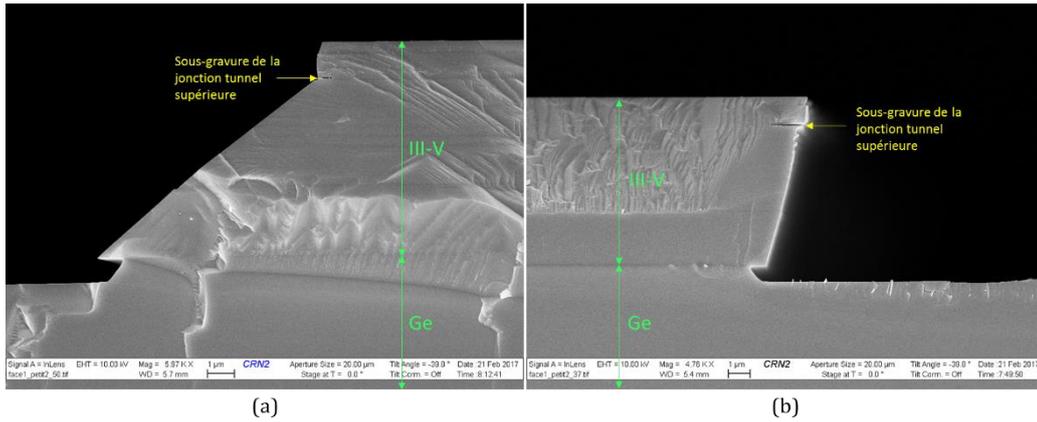


Figure 2-4: Images MEB en coupe des deux côtés d'un *mesa* gravé chimiquement avec (a) une pente positive et (b) une pente négative selon le côté du *mesa*

En 2017, Solar Junction a publié un brevet pour l'isolation des sous-cellules par voie chimique en utilisant de l'acide chlorhydrique et de l'acide iodique, qui permet d'utiliser de la photorésine comme masque de gravure [81].

Dans les deux cas, la gravure chimique, en dépit de la génération de peu de défauts, résulte en un *mesa* non-vertical ce qui la rend peu flexible à la géométrie des cellules en raison de sa forte dépendance de l'orientation cristalline du matériau à graver. De plus, la sous-gravure observée ainsi que la non-verticalité du *mesa* peut devenir problématique pour des cellules de faibles dimensions, en déséquilibrant la génération de courant dans les sous-cellules.

c) Isolation électrique par gravure plasma

Une autre technique déjà éprouvée dans le domaine des III-V et permettant une grande anisotropie des structures gravées est la gravure plasma.

L'utilisation de la gravure plasma pour des matériaux III-V a été proposée dès 1986 par Van Houten *et al* [82]. Dans le domaine du photovoltaïque, l'isolation électrique de cellules en silicium a été proposée, mais seul le groupe CPV de l'Université de Sherbrooke affirme l'utiliser pour des cellules multijonctions [83]–[85]. Cette technique, appelée également gravure ionique réactive (RIE : *Reactive Ion Etching*), permet d'accélérer des ions grâce à un champ électrique et de bombarder le *wafer* à graver. En combinaison avec des espèces neutres réactives du plasma, ces ions favorisent une réaction physico/ chimique qui permet d'attaquer les matériaux cibles. Ce type de gravure permet d'augmenter l'anisotropie de la gravure, donc sa verticalité et de limiter la sous-gravure dans les matériaux (par sélectivité). Il existe pour cela un compromis effet physique/effet chimique dans la gravure où une gravure trop physique générera des défauts et une gravure trop chimique générera de la sélectivité parmi les différents matériaux à graver.

La figure 2-5 illustre un *mesa* de cellule triple jonction gravé avec un plasma $H_2/Cl_2/SiCl_4$, recette développée par le groupe CPV [85]. L'image est prise après la gravure de la couche contact, faite au $NH_4OH : H_2O_2 : H_2O$ (9 : 9 : 240) pendant 45 s. On y remarque la forte anisotropie avec une pente de 12° environ, bien moindre que celle observée dans le cas de la gravure humide. De plus, malgré que le MEB ne soit pas la technique de caractérisation optimale pour la quantification de défauts, il peut être visuellement observé que les flancs du *mesa* de la figure 2-5 présentent moins de défauts que ceux du *mesa* créé avec la scie diamant (figure 2-3). De plus, une faible rugosité de la surface plane du Ge est générée par la gravure.

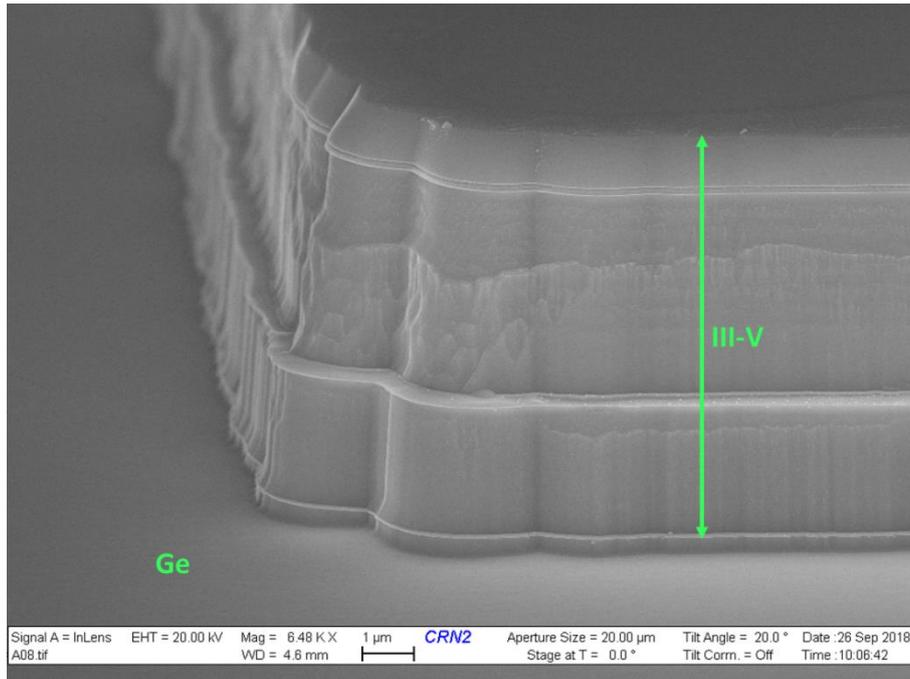


Figure 2-5: Image MEB en perspective d'un *mesa* formé par gravure plasma

d) Bilan sur les techniques d'isolation électrique

Trois techniques principales peuvent être utilisées pour l'isolation des cellules. Chacune présente des avantages mais aussi des inconvénients que le tableau 2-2 illustre. Celui-ci se focalise sur la vitesse, la génération de défauts et la flexibilité dans la géométrie des dispositifs isolés. Ces caractéristiques peuvent être liées aux considérations suivantes, nécessaire pour réaliser une isolation électrique adéquate de microcellules :

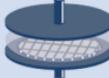
- Les défauts sur les flancs d'isolation des cellules peuvent être à l'origine de chute de performances (courants de fuite) et de problèmes de fiabilité.
- Les matériaux III-V des cellules sont fragiles. Un procédé trop agressif accentuera la génération de *cracks* ou de *chipping*.
- Un procédé anisotrope, peu sélectif aux différents matériaux permet d'assurer un équilibre en courant dans les sous-cellules (*current matching*) qui composent la cellule complète.
- Un procédé permettant le développement de méthodes alternatives de contacts sur les microcellules serait préférable. Pour cela, la surface du germanium en face avant, après isolation, doit être assez lisse pour qu'un contact électrique puisse y prendre place.

2.2 Isolation électrique des microcellules

- La géométrie optimale des cellules à singular dépend du système optique à laquelle elles sont couplées. Cette géométrie n'est donc pas nécessairement rectangulaire.
- L'Université de Sherbrooke et le LN2 possèdent une solide expertise dans la gravure plasma de cellules solaires multijonctions, domaine en forte expansion [84], [85]

L'ensemble de ces considérations a donc orienté le choix de la technique d'isolation électrique vers la gravure plasma, dont le procédé est détaillé dans la partie suivante.

Tableau 2-2: Caractéristiques des techniques d'isolation électriques envisagées

Caractéristique de la technique d'isolation électrique	Scie diamant	Gravure humide	Gravure plasma
Illustration			
Type d'isolation électrique	Découpe partielle (<i>precut</i>)	Immersion dans solution(s) de gravure	Gravure sèche
Vitesse	Sériel et vitesse < 0.1 m/s	Parallèle	Parallèle
Endommagement	Dommages mécaniques	Pas de dommages	Peu de dommages
Forme des puces	Rectangulaires	Semi-flexible (orientation cristalline à considérer)	Flexible

2.2.2 Technique d'isolation électrique par gravure plasma retenue

L'utilisation de la gravure plasma semble être la plus adéquate pour l'isolation des microcellules (*cf* §2.2.1d)). Dans cette partie, sera présenté le procédé d'isolation développé avec le système STS Multiplex ICP SR III-V de l'Université de Sherbrooke.

L'échantillon est collé sur un *wafer*-support en SiO₂ avant l'étape de gravure avec une cire Crystalbond. Celle-ci permet une bonne homogénéité de température sur l'échantillon et ainsi une meilleure uniformité de gravure. Les paramètres utilisés pour la gravure plasma sont identifiés dans le tableau 2-3, lesquels sont issus de développements effectués à l'Université de Sherbrooke [85]. La gravure utilise notamment un mélange gazeux H₂/Cl₂/SiCl₄ avec une puissance sur le *coil* de 445 W et une puissance sur le *platen* de 260 W, sur lesquelles un compromis a été déterminé entre gravure physique et gravure chimique.

Tableau 2-3: Paramètres de la gravure plasma pour l'isolation électrique

Flux de gaz	Pression et puissances	Tension et temps
SiCl ₄ : 20 sccm	$p = 4$ mTorr	$V_{DC} = 420$ V
Cl ₂ : 10 sccm	$P_{coil} = 445$ W	$V_{PP} = 840$ V
H ₂ : 20 sccm	$P_{platen} = 260$ W	$t = 10$ min

Un des intérêts d'utiliser la gravure plasma pour l'isolation électrique des microcellules est la flexibilité possible de géométrie de la cellule. Ceci est possible grâce à l'utilisation de la technique de microfabrication conventionnelle (photolithographie) pour définir un masque de gravure de la forme souhaitée pour les cellules (rectangulaire, hexagonale, circulaire...). Dans ce procédé, une résine AZ P4903 a été utilisée pour réaliser un masque de gravure de 9 μm d'épaisseur environ. L'utilisation de ce type de masque en résine implique que la durée de la gravure doit être la plus courte possible. Pour identifier la durée de la gravure, un équipement de spectroscopie optique, qui permet d'identifier les espèces gravées en analysant la longueur d'onde d'émission du plasma de gravure, a été utilisé. La figure 2-6 montre l'émission optique de trois espèces gravées durant l'isolation électrique d'une cellule solaire triple-jonction dont la structure est présentée en figure 1-8(a): le germanium, le gallium et l'indium. Les correspondances de la structure associées à cette émission optique sont également représentées. Notamment, on remarque la nette augmentation de l'émission liée au germanium au bout de 500 s, ce qui signifie que la gravure a atteint la dernière sous-cellule/substrat. Une marge de 100 s de gravure est ajoutée pour assurer la gravure complète de la dernière sous cellule pour une isolation électrique de la structure entière. Ainsi on considère qu'une durée de 600 s soit 10 min de gravure est nécessaire pour l'isolation électrique des cellules (*i.e.* formation du *mesa*). Une durée plus élevée engendrerait une trop grande profondeur de gravure latérale dans la structure et diminuerait l'anisotropie du procédé.

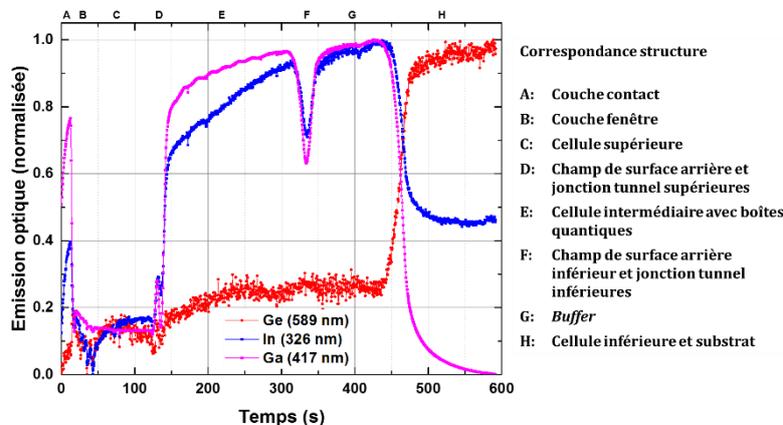


Figure 2-6: Émission optique correspondante au germanium, à l'indium et au gallium en fonction du temps de gravure des *mesas* et couches de la structure associées

Dans la section suivante, la caractérisation électrique des cellules isolées par cette technique est effectuée pour valider la gravure plasma comme procédé d'isolation.

2.2.3 Caractérisation de microcellules isolées par gravure plasma

Plusieurs dispositifs ont été fabriqués avec le procédé présenté dans le §2.1.1, utilisant la gravure plasma comme technique d'isolation électrique, sans effectuer le dépôt de la couche antireflet. Des cellules rectangulaires ayant une surface de *mesa* variant de 12.25 mm² à 0.076 mm² ont été fabriquées afin d'observer l'effet de leur taille sur leurs performances électriques.

2.2 Isolation électrique des microcellules

Après leur fabrication, les caractéristiques $J-V$ des cellules ont été mesurées sous un soleil. La figure 2-7 montre la densité de courant en fonction de la tension de cellules rectangulaires de 12.25 mm^2 à 0.076 mm^2 . L'allure globale de toutes les courbes confirme que les procédés développés et notamment celui d'isolation électrique sont valides. En effet, les performances de cellules de 12.25 mm^2 isolées par plasma ont les mêmes performances que celles isolées de façon conventionnelle à la scie diamant [83]. Cependant, il peut être observé que la réduction de la taille des cellules affecte le courant mais surtout la tension (le V_{oc} chute de 2.298 V pour la cellule de 12.25 mm^2 à 1.994 V pour la cellule de 0.076 mm^2). Les paramètres électriques ainsi que les effets de la réduction des dimensions sur ceux-ci sont montrés dans le tableau 2-4. Les performances des microcellules y sont comparées à celles de la cellule de référence de 12.25 mm^2 . On observe que les trois paramètres électriques sont affectés par la miniaturisation des cellules (entre -0.5% pour le FF de la cellule 1 mm^2 et -13.2% pour le V_{oc} de la cellule de 0.076 mm^2). On note particulièrement la chute de V_{oc} par rapport à celui de la cellule de référence qui varie entre 5.8% pour la cellule de 1 mm^2 et 13.2% pour la cellule de 0.076 mm^2 . Le FF est affecté du fait de la réduction du V_{oc} [86].

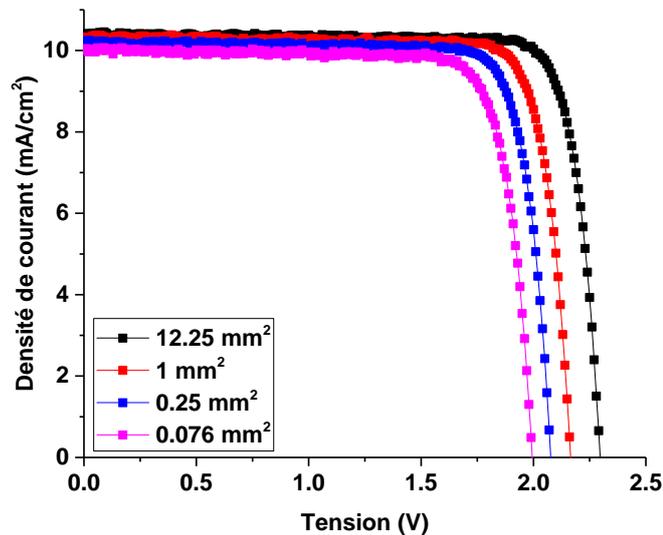


Figure 2-7: Densité de courant en fonction de la tension pour des cellules rectangulaires de 12.25 mm^2 à 0.076 mm^2

Les résultats obtenus sur les cellules de différentes tailles montrent donc que plus l'aire est petite, plus le V_{oc} est diminué. À ce stade, cet effet peut être attribué à la recombinaison de périmètre dans les cellules, dont le rapport périmètre/aire ($\frac{L_{per}}{A}$) augmente avec la réduction de la taille des cellules. Ces recombinaisons sur les flancs des mesas formés peuvent être attribuées aux défauts générés lors de l'isolation plasma. Une optimisation cette technique d'isolation plasma permettrait de générer moins de défauts et donc de réduire l'impact des recombinaisons de périmètre. La partie suivante étudiera plus en détails ces effets de recombinaisons de périmètre.

Tableau 2-4: Paramètres électriques des cellules fabriquées et effets de la réduction de leurs dimensions

Paramètre électrique (Différence avec le paramètre électrique de la cellule de référence)	Cellule de référence de 12.25 mm ²	Cellule de 1 mm ²	Cellule de 0.25 mm ²	Cellule de 0.076 mm ²
$V_{oc} [V]$ (ΔV_{oc})	2.298	2.165 (-5.8 %)	2.077 (-9.6 %)	1.994 (-13.2 %)
$FF [\%]$ (ΔFF)	84.0	83.6 (-0.5 %)	82.5 (-1.8 %)	81.1 (-3.5 %)
$J_{sc} [mA/cm^2]$ (ΔJ_{sc})	10.41	10.31 (-1.0 %)	10.23 (-1.7 %)	10.03 (-3.7 %)

2.3 Effet des recombinaisons de périmètre dans les microcellules

Il a précédemment été observé une corrélation entre le V_{oc} et la taille des cellules. Dans cette partie, la relation entre la réduction des performances des cellules et les recombinaisons de périmètre sera établie par l'analyse du modèle électrique d'une cellule et de caractérisations électriques. Une méthode de passivation sera ensuite proposée et utilisée pour réduire l'impact de ces recombinaisons. Enfin, l'impact de la concentration solaire sur les pertes de performance sera montré.

2.3.1 Modélisation pour l'identification des recombinaisons de périmètre

Pour comprendre le lien entre les recombinaisons de périmètre et la chute du V_{oc} , on peut s'intéresser à l'expression simple du V_{oc} pour une sous-cellule i qui, basé sur un modèle à une diode, peut être exprimée par :

$$V_{oc}^i \approx n^i \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{I_L^i}{I_0^i} \right] \quad (2-1)$$

où n est le facteur d'idéalité de la diode du modèle de la cellule, k est la constante de Boltzmann, T est la température, q est la charge électronique, I_L est le courant photogénéré et I_0 est le courant de saturation de la cellule. Parmi ces paramètres, seul I_0 peut expliquer la chute de V_{oc} attribuée aux recombinaisons de périmètre. Pour justifier cela, on peut s'intéresser au modèle de cellule à deux diodes, lequel est présenté sur la figure 2-8. Sur ce modèle, on retrouve la source de courant photogénéré I_L , la diode associée aux recombinaisons de porteurs minoritaires dans les zones neutres et leur densité de courant I_{D1} , la diode associée aux recombinaisons dans les zones de déplétion ou de périmètre et leur densité de courant I_{D2} . On remarque également les résistances shunt (R_{sh}) et série (R_s) et la charge externe à la cellule, dans laquelle un courant I est fourni sous une tension V .

2.3 Effet des recombinaisons de périmètre dans les microcellules

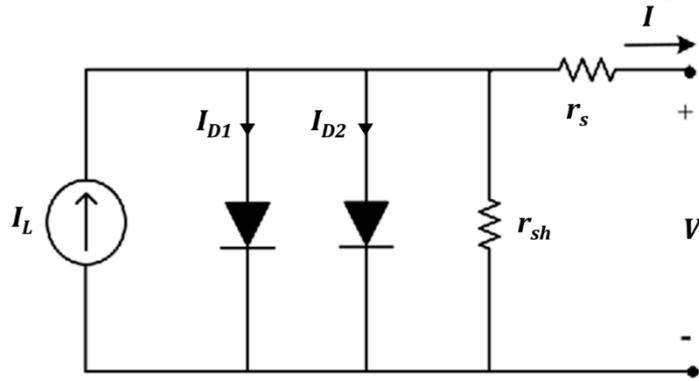


Figure 2-8: Modèle simple à deux diodes d'une cellule solaire

De ce modèle, une équation générale décrit le courant généré par une cellule :

$$I = I_L - I_{D1} - I_{D2} - \left(\frac{V + IR_s}{R_{sh}} \right) \quad (2-2)$$

et :

$$I_{D1} = I_{01} \exp \left(\left(\frac{q(V + IR_s)}{kT} \right) - 1 \right) \quad (2-3)$$

avec I_{01} le courant de saturation lié à la diffusion dans les zones neutres, q est la charge électronique, k est la constante de Boltzmann et T est la température. De plus, on définit :

$$I_{D2} = I_{02} \exp \left(\left(\frac{q(V + IR_s)}{2kT} \right) - 1 \right) \quad (2-4)$$

avec I_{02} le courant de saturation lié aux recombinaisons dans les zones de déplétion et au périmètre de la cellule.

De plus,

$$I_0 = I_{01} + I_{02,scr} + I_{02,per} \quad (2-5)$$

où I_{01} est le courant de saturation associée au processus de diffusion, $I_{02,scr}$ est le courant de saturation dans la zone de déplétion et $I_{02,per}$ est le courant de saturation résultant des recombinaisons au périmètre. Ce dernier paramètre peut être écrit comme :

$$I_{02,per} = qnS_0L_s \frac{L_{per}}{A} \quad (2-6)$$

où S_0 est la vitesse de recombinaison de surface, L_s est la longueur de diffusion, L_{per} est le périmètre cellulaire et A est la surface. Dans cette expression, le paramètre $\frac{L_{per}}{A}$ est le seul représentatif de la taille de la cellule. Ainsi, le V_{oc} en fonction de $\frac{L_{per}}{A}$ sera analysé dans le prochain paragraphe.

2.3.2 Caractérisation électrique des effets de recombinaisons de périmètre

Basé sur un modèle de cellule solaire, la baisse du V_{OC} associée à la réduction de la taille des cellules semble être liée aux effets de périmètre. Cependant, pour confirmer une telle hypothèse, il convient de comparer le V_{OC} des cellules en fonction de leur $\frac{L_{per}}{A}$ puis de normaliser le courant d'obscurité par le L_{per} comme cela a été proposé dans [76].

a) Variation de la tension de circuit ouvert en fonction du rapport périmètre/aire

L'effet des recombinaisons de périmètre peut être mis en avant en observant l'évolution du V_{OC} en fonction du $\frac{L_{per}}{A}$. En effet, les équations (2-1) à (2-6) ont montré la relation indirecte entre V_{OC} et $\frac{L_{per}}{A}$. Pour confirmer cette relation, des cellules de différentes dimensions mais également de différentes géométries (rectangulaires, circulaires ou hexagonales) ont été fabriquées. De cette façon, de nombreuses cellules, ayant dans certains cas des $\frac{L_{per}}{A}$ proches bien que des formes différentes, peuvent être comparées.

La figure 2-9 illustre le V_{OC} en fonction du $\frac{L_{per}}{A}$ de cellules rectangulaires, circulaires ou hexagonales, sur une échelle semi-logarithmique. On peut y observer que, quelle que soit la forme de la cellule, le V_{OC} suit une tendance quasi-linéaire en fonction du ratio $\frac{L_{per}}{A}$. Ceci indique la forte relation existant entre ces deux paramètres et que le $I_{02,per}$ est fortement affecté par le processus de recombinaisons, et que le $I_{02,per}$ domine le I_0 et le V_{OC} pour les cellules de faibles dimensions.

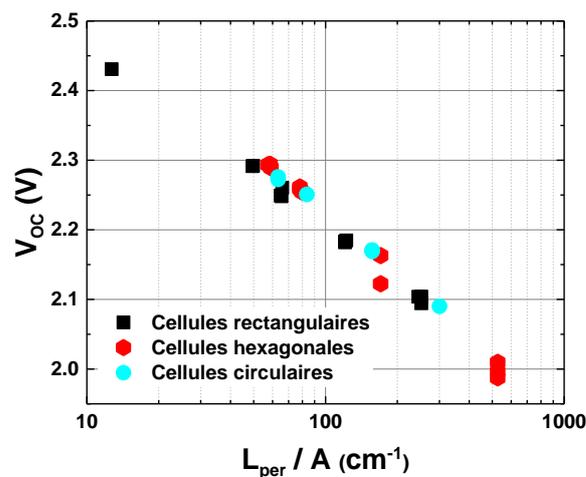


Figure 2-9: Tension de circuit ouvert en fonction du rapport périmètre/aire pour différentes formes de cellules

2.3 Effet des recombinaisons de périmètre dans les microcellules

Outre la dépendance de V_{OC} en fonction du ratio $\frac{L_{per}}{A}$, le tracé des courants d'obscurité normalisés par le périmètre L_{per} permet de conforter l'idée que les recombinaisons de périmètre sont dominantes dans les cellules de faibles dimensions.

b) Densité de courant d'obscurité linéaire en fonction de la tension

Une autre méthode pour mettre l'effet des recombinaisons de périmètre en avant est de tracer la densité de courant d'obscurité linéaire K_{dark} , qui s'exprime :

$$K_{dark} = \frac{I_{dark}}{L_{per}} \quad (2-7)$$

avec I_{dark} le courant d'obscurité [76]. La figure 2-10 illustre ce tracé pour des cellules rectangulaires de 0.076 mm², 0.25 mm² et 1 mm² sur une échelle semi-logarithmique. Il peut être observé que le K_{dark} est très similaire quelle que soit la taille de la cellule sur la plage de tension [1.0-2.5 V], en dessous de laquelle, seul du bruit de mesure est observable (non-montré pour faciliter l'analyse). Cet élément indique clairement que les recombinaisons de périmètre dominent l'évolution du courant d'obscurité des cellules de ces dimensions.

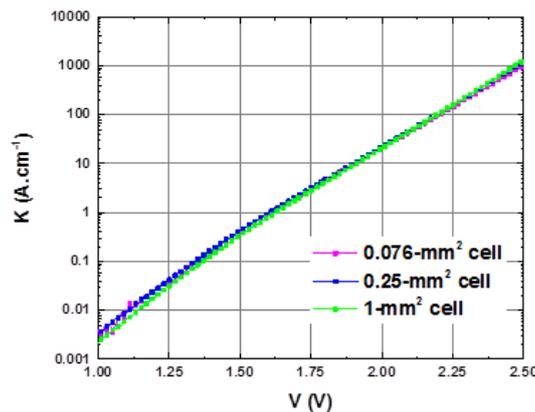


Figure 2-10: Densité de courant d'obscurité linéaire de cellules de 0.076 mm², 0.25 mm² et 1 mm²

Bien que les recombinaisons affectent particulièrement les performances des cellules de faibles dimensions, ni le modèle, ni la caractérisation n'a permis de définir quelle sous-cellule était la plus affectée. Cependant, il a été montré dans la littérature que la sous-cellule de InGaAs était la plus impactée par les recombinaisons de périmètre [76]. Une passivation des flancs des cellules peut néanmoins réduire leur impact, comme étudié dans la partie suivante.

2.3.3 Passivation des microcellules

Il a été montré que les recombinaisons de périmètre ont un effet important sur les performances des cellules et d'autant plus important pour les microcellules. Ainsi, pour les cellules submillimétriques, il est primordial de minimiser ces effets de recombinaison en passivant la surface de la cellule, flancs compris. Dans cette partie, les techniques classiques de passivation utilisées sur les matériaux III-V seront présentées et la plus adéquate sera

appliquée aux microcellules. Ceci aura pour effet d'augmenter leurs performances en réduisant leurs recombinaisons de périmètre, responsables de la chute de V_{oc} .

a) Origine des recombinaisons de périmètre

Comme décrit §2.1.2d), des caractérisations électriques sur des diodes ont montré que la sous-cellule de InGaAs est celle qui est particulièrement impactée par les recombinaisons de périmètre. Pour cause, les matériaux III-V se caractérisent par des densités d'états de surface élevées ($>10^{13} \text{ cm}^{-2}$), notamment liées à l'absence d'un oxyde natif passivant de bonne qualité sur les liaisons pendantes. Celles-ci sont dues à une rupture abrupte du cristal engendrée par l'isolation électrique [89], [90]. De ce fait, les porteurs minoritaires interagissent avec les pièges ainsi créés, la barrière de potentiel au périmètre devient plus faible que dans le bulk et un « canal de surface » se forme, générant un courant de fuite.

b) Passivation de GaAs : état de l'art

Plusieurs techniques ont été proposées pour améliorer la qualité de la surface de ces matériaux. La passivation chimique à base de solution sulfurée ou par dépôt PECVD (*Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition*) sont celles qui sont les plus répandues et semblent applicables aux cellules CPV [87].

La passivation de matériaux III-V par voie humide avec une solution contenant du soufre a été extensivement étudiée depuis la fin des années 1980 [87]. Ceci est explicable par sa simplicité de mise en œuvre. Dans ce type de solution, les oxydes de GaAs sont dissouts et des sulfures de Ga (Ga_xS_y) et d'As (As_xS_y) sont formés. Les liaisons -S empêchent une oxydation subséquente et réduisent la densité d'états de surface. L'utilisation de ces solutions sulfurées a également été étudiée sur des cellules multijonctions à l'Université de Sherbrooke [84]. Il a été montré que la passivation sulfurée avait permis de compenser presque complètement la chute de V_{oc} et de FF lié à la formation de vias dans les cellules (*i.e.* augmentation du $\frac{L_{per}}{A}$). Les atomes d'azote sont connus pour avoir la capacité de saturer les liaisons pendantes de Ga pour former du GaN [88]. Grâce à cette réaction chimique, la passivation de GaAs peut également être réalisée par PECVD comme l'ont montré Lu *et al.* en 2016 [89]. Dans leur étude, des capacités MOS ont reçu un traitement avec des gaz N_2 et NH_3 , de manière séparée. Dans les deux cas, la passivation a été effective mais les meilleurs résultats ont été obtenus avec le traitement au NH_3 . Ceci est attribué à l'ajout d'atomes de H qui permettent de rompre facilement les liaisons Ga-O et As-O.

Deux techniques principales permettent de passiver le GaAs. Bien que la passivation par voie humide est la plus simple à mettre en œuvre, elle peut démontrer des problèmes de stabilité dans le temps [90]. Les cellules ayant une durée de mission de plusieurs dizaines d'années, une passivation par PECVD est donc préférable. De plus, celle-ci peut être couplée au dépôt de la couche antireflet (ARC), dans laquelle des charges fixes peuvent ajouter un effet de passivation par effet de champ.

c) Passivation et couche antireflet des microcellules retenues dans ce projet

En 2012, Homier *et al.* ont développé à l'Université de Sherbrooke un procédé de dépôt PECVD pour déposer une couche antireflet sur les cellules multijonctions [17]. Il consiste en un

2.3 Effet des recombinaisons de périmètre dans les microcellules

empilement de SiN_xH_y et de SiO_x déposés respectivement 5 min 40 s et 3 min 15 s avec un plasma excité à 13.56 MHz. En plus de l'effet antireflet (-25% de pertes par réflexion sur la face active de la cellule), le dépôt joue le rôle de couche de passivation des flancs [91]. Cependant, le dépôt PECVD est réalisé dans les dernières étapes de la fabrication de cellules, à une température de 300°C pendant 8 min 55 s. Ceci pourrait avoir un impact non-négligeable sur la qualité des contacts ohmiques notamment, par la diffusion de métaux dans le semi-conducteur. Néanmoins, aucun effet néfaste sur les performances électriques n'a été observé.

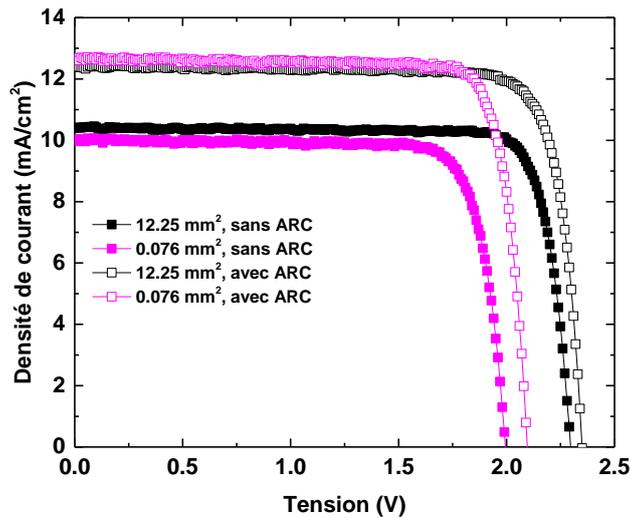


Figure 2-11: Densité de courant en fonction de la tension de cellules de 12.25 mm² et de 0.076 mm² sans et avec ARC

d) Effet de la couche ARC passivante sur les performances électriques des microcellules sous un soleil

L'ajout d'une couche antireflet permet de limiter les pertes par réflexions et donc d'augmenter le courant photogénéré. Son influence peut être observée sur les caractéristiques J - V ainsi que sur le tracé du V_{oc} en fonction du $\frac{L_{per}}{A}$.

La figure 2-11 illustre les caractérisations J - V de cellules de 12.25 mm² et de 0.076 mm², sans et avec ARC. L'effet de l'ARC peut être observé sur les deux tailles de cellules avec un gain de J_{sc} compris entre 19.1% et 26.4%, ce qui concorde avec les projections faites dans [17] (gain de 25% attendu). Par ailleurs, par l'ajout de cette couche, le V_{oc} est également augmenté en partie parce que le courant photogénéré J_L augmente (cf équation (2-1)) mais aussi par un phénomène de passivation. En effet, comme montré dans le tableau 2-5, l'effet de l'ARC est

Tableau 2-5 : Tension de circuit ouvert en fonction de la présence de l'ARC sur des cellules de 12.25 mm² et de 0.076 mm²

V_{oc} en fonction de la surface de la cellule	Sans ARC	Avec ARC	Effet de la présence de l'ARC
Cellule de 12.25 mm ²	2.298 V	2.350 V	+2.3 %
Cellule de 0.076 mm ²	1.994 V	2.097 V	+5.2 %
Effet de la réduction de la surface de la cellule	-13.2 %	-10.7 %	X

différent entre une cellule de 12.25 mm² (augmentation du V_{OC} de 2.3%) et une cellule de 0.076 mm² (augmentation du V_{OC} de 5.2%).

La figure 2-12 illustre le V_{OC} en fonction du $\frac{L_{per}}{A}$ de cellules rectangulaires avec et sans ARC. On y observe bien le gain en V_{OC} lié à l'augmentation de l'absorption mais également la tendance linéaire du $V_{OC}(\frac{L_{per}}{A})$, introduite §2.3.2a). La différence observée entre les pentes de droites de tendance indique un effet de la passivation (*i.e.* S_0 diminue). La tendance du V_{OC} en fonction du $\frac{L_{per}}{A}$, à nouveau linéaire indique que les recombinaisons de périmètre affectent de façon prédominante ce paramètre électrique malgré la présence de la couche ARC. Une optimisation de la technique de passivation voire l'utilisation d'une autre technique (ALD par exemple) permettrait potentiellement d'obtenir de meilleures performances avec les plus petites cellules.

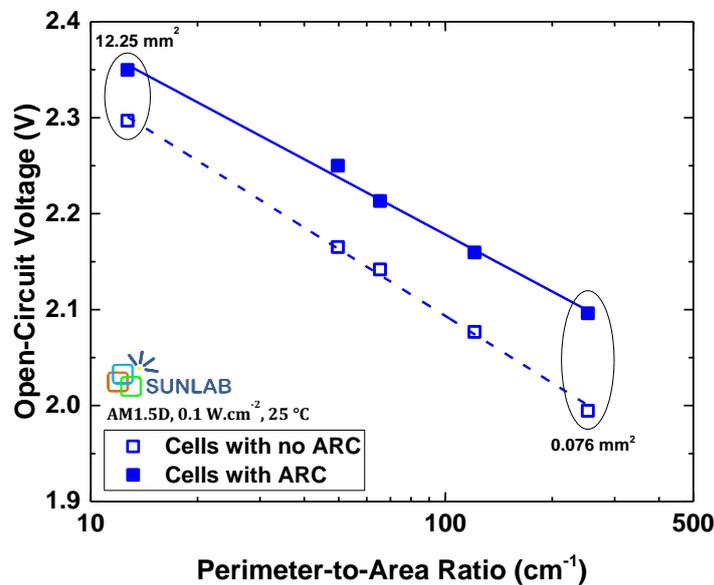


Figure 2-12: Tension de circuit ouvert en fonction du rapport périmètre/aire pour des cellules rectangulaires sans et avec ARC

Ainsi, l'ajout de la couche ARC contribue à améliorer le V_{OC} et à compenser en partie la réduction de celui-ci en raison des recombinaisons de périmètre dans les cellules de faibles dimensions. Sa présence est d'autant plus importante que la cellule est petite même si l'effet des recombinaisons demeure non-négligeable. Cependant, ces observations ont été faites sous une illumination « un soleil » or les dispositifs développés sont amenés à opérer sous des flux bien plus importants. De ce fait, l'impact de la taille des cellules sur leurs performances électriques sous concentration solaire a été étudié dans la partie suivante.

2.3.4 Effet de la concentration solaire sur les performances électriques des microcellules

Les microcellules étant logiquement adaptées à l'opération sous fort flux lumineux, l'impact de leur taille et donc des recombinaisons de périmètre sur leurs performances sous concentration est analysé dans ce paragraphe. En figure 2-13, la variation de la tension de circuit ouvert est présentée en fonction de la concentration pour une cellule de 1 mm² et une cellule de 0.25 mm². Dans les deux cas, on peut observer la croissance logarithmique du V_{oc} en fonction de la concentration, tel que prévu dans §1.4.1. De plus, il peut être observé que la différence de V_{oc} entre les deux cellules passe de 3.06% sous 1 X à 1.09% sous 1231 X (valeur du V_{oc} sous 1231 X de la cellule de 0.076 mm² obtenue par interpolation). Ceci indique que l'effet des recombinaisons de périmètre est moins prépondérant sous haute concentration et est dû à un effet de saturation des pièges au périmètre, dans lesquels le taux de recombinaisons n'augmente pas avec l'augmentation de la concentration. Bien que la réduction de la taille des cellules affecte le V_{oc} sous un soleil en raison des recombinaisons de périmètre, cet effet est fortement atténué sous concentration. De tels résultats sont donc encourageants pour l'obtention de microcellules de grande efficacité.

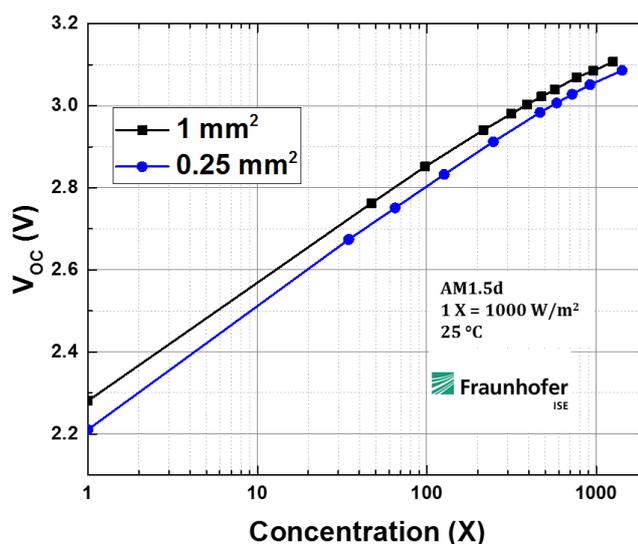


Figure 2-13: Tension de circuit ouvert en fonction de la concentration pour une cellule de 1 mm² et pour une cellule de 0.25 mm²

Dans cette partie, nous avons vu que la diminution de la taille des cellules CPV vers des microcellules entraîne un défi majeur : les pertes dues aux recombinaisons de périmètre deviennent importantes voire majoritaires. Ceci affecte notamment le V_{oc} , avec une diminution de 13.6% de celui-ci sous un soleil lorsque que la taille d'une cellule passe de 12.25 mm² à 0.076 mm². Cependant, l'ajout d'une couche déposée par PECVD peut permettre de passiver les flancs des cellules et ainsi réduire cet effet. Enfin, il a été aussi montré que la perte de V_{oc} est moins importante lorsque les cellules sont sous forte concentration lumineuse, conditions d'opération pour lesquelles elles sont conçues. Finalement, une réduction de V_{oc} de 1.09% a été observée sous 974 X (comparaison de cellules de 0.076 mm² et de 1 mm²). Celle-ci serait encore plus faible avec un procédé de passivation plus optimisé. Néanmoins, ces résultats sont

encourageants pour la mesure d'efficacité des microcellules. En effet, en raison du FF plus élevé potentiellement atteint en raison du plus faible impact des pertes Joule, une efficacité importante peut être attendue avec les microcellules. La notion de résistance d'une cellule CPV fait allusion notamment à la qualité de ses contacts électriques, dont le développement est traité dans la partie suivante.

2.4 Contacts électriques des microcellules

Après avoir développé et optimisé le procédé d'isolation couplé avec une passivation, le développement des contacts électriques a été traité.

Les performances des cellules multijonctions de l'état de l'art sont limitées en concentration en particulier en raison de la résistance série qu'elles présentent. Pour réduire celle-ci, des optimisations sont nécessaires au niveau des contacts électriques et notamment au niveau du contact d'émetteur, qui prend une part importante de la résistance série d'une cellule [35]. Un design de cellule CPV standard est montré en figure 2-1. Il montre le contact d'émetteur en face avant, composé de doigts qui forment une grille pour la collection des porteurs photogénérés et de *busbars* pour interconnecter la cellule avec son support. La cellule comporte également un contact de base occupant toute la face arrière. Ces contacts sont l'objet d'une constante optimisation dans le domaine CPV, tant sur le design que sur leur composition tel que décrit dans la partie suivante.

2.4.1 Contacts d'émetteur sur les cellules

Le contact d'émetteur est un élément indépendant de la structure de la cellule qui nécessite une optimisation en termes de géométrie et de matériaux pour être le moins résistif possible.

a) Design du contact d'émetteur d'une cellule

Le design du contact émetteur est complexe puisqu'il résulte d'un compromis ombrage-résistance. En effet, on souhaite que le contact apporte le moins d'ombrage possible (*i.e.* plus de surface active et plus de photons collectés) tout en collectant un maximum de porteurs de la manière la moins résistive possible malgré une faible surface de contact. Il n'y a malheureusement pas de solution universelle, car chaque structure implique des effets résistifs différents et chaque cellule a une application spécifique. Des lignes directrices ont cependant été données pour le design de contact émetteur dans [35], [36], [92] en se focalisant en particulier sur l'espacement (ou pas) de la grille, l'épaisseur et la largeur des doigts.

Dans le cadre de cette étude, des simulations ont été réalisées par Christopher E. Valdivia de SUNLAB à l'Université d'Ottawa (Canada). La structure de la cellule considérée pour les simulations est celle utilisée pour le développement de nos microcellules, la surface de la cellule est de 1 mm^2 , les doigts ont une largeur de $6 \text{ }\mu\text{m}$ et une épaisseur de $3 \text{ }\mu\text{m}$. La métallisation d'émetteur a une résistivité de $1.7 \times 10^{-8} \text{ }\Omega\cdot\text{m}$ et une résistivité de contact de $1 \times 10^{-5} \text{ }\Omega\cdot\text{cm}^2$. Ces valeurs sont typiques pour une métallisation Au/Ge/Ni/Au. La figure 2-14 illustre les variations de l'efficacité simulées d'une cellule en fonction du pas de la grille (distance entre deux doigts). On remarque la dépendance entre concentration visée et efficacité projetée. Ainsi, l'efficacité la plus élevée est théoriquement atteinte sous une

2.4 Contacts électriques des microcellules

concentration plus importante avec un pas de grille 94 μm par exemple, pour une efficacité maximale sous 2000 X.

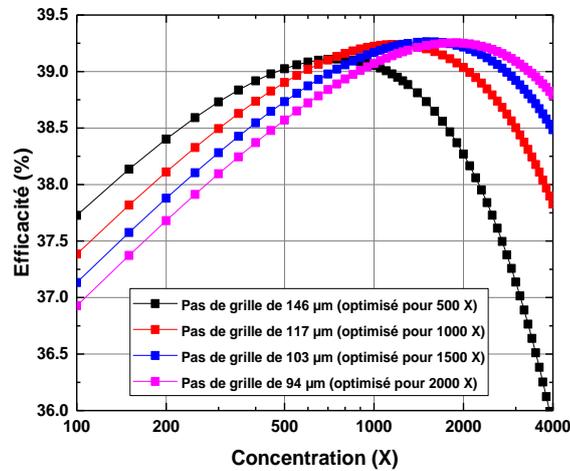


Figure 2-14: Impact du pas de la grille optimisé sur l'efficacité en fonction de la concentration (modélisation réalisée par Christopher E. Valdivia, SUNLAB, U.Ottawa)

b) Métallisations pour le contact d'émetteur

Les cellules CPV sont amenées à générer de fortes densités de courant sous concentration. La qualité du contact ohmique est donc primordiale. Celui-ci est réalisé sur la couche contact de la structure triple jonction, qui consiste généralement en du GaAs fortement dopé *n*. Un contact ohmique largement étudié depuis son développement en 1967 et aujourd'hui toujours utilisé sur des cellules commerciales l'empilement Au/Ge/Ni/Au [21], [93]. Toutefois, ce type de contact est limitant sous forte concentration car il ne permet pas d'atteindre une résistance feuille de moins de 50 $\text{m}\Omega/\square$ et une résistance spécifique de contact inférieure à $10^{-5} \Omega\cdot\text{cm}^2$, nécessaires pour garantir de bonnes performances sous 1000 X [38]. Pour répondre à cette limitation, Huo et al. ont récemment introduit un contact ohmique à plus faible coût et performant pour les fortes densités de courant : la métallisation Pd/Ge/Ti/Pd/Al [94]. Un traitement thermique est généralement requis pour améliorer sa qualité. Celui-ci est généralement réalisé par un RTA (*Rapid Thermal Annealing*, recuit thermique rapide), typiquement compris entre 20 s à 180 s et entre 300°C et 400°C [94].

Dans le cadre de cette étude, des métallisations en Pd/Ge/Ti/Pd/Al (50 nm/100 nm/50 nm/50 nm / 1 μm) ont été retenues. Le procédé de dépôt débute par une étape de photolithographie pour définir les *busbars* et grilles, dont les différents designs sont montrés en figure 2-15. On remarque les différentes tailles de et géométries de contacts, possibles grâce à l'isolation électrique développée §2.2.2.

Pour cela, une étape de photolithographie utilisant de la photorésine Futurrex NR4-8000P est utilisée pour définir les formes de contacts d'émetteur sur la *wafers*. L'évaporation des différents métaux est faite sur toute la surface de l'échantillon avec un évaporateur Intlvac Nanochrome I. Puis par une technique de *lift-off*, la résine de masquage est retirée par

2.4 Contacts électriques des microcellules

b) Typologies de contact de base

Dans le cadre de ce projet, une méthode de contact alternatif pour la base a été étudiée. Celle-ci est envisageable grâce à l'utilisation de la gravure plasma pour l'isolation électrique des cellules, laquelle laisse une surface lisse sur le germanium autour du *mesa*. Cette méthode de contact alternative ouvre la voie à des techniques d'interconnexion de type *flip-chip* comme celles présentées §1.5.2b). De plus, des interconnexions monolithiques entre les cellules pour former des MIM (*Monolithic Interconnected Modules*) deviennent concevables, lesquelles seront étudiées dans le chapitre 3. La création de ce type de dispositif ouvre également la voie à des modules assemblés selon une autre technique issue de la microélectronique : la *Fan-Out Wafer-Level Packaging*.

Plusieurs formes de contacts en face avant seront envisagées : « I », « L », « U » ou « O » selon que le contact de base soit présent sur un, deux, trois ou quatre côtés du *mesa*. Les métallisations sont constituées de 15 nm de Ti et 500 nm d'Al dont le dépôt est réalisé de manière similaire à celui des contacts d'émetteur (*lift-off* et évaporation). Des cellules avec des contacts de base en face arrière ont également été fabriquées, afin de connaître l'impact de ce changement d'architecture sur les performances électriques.

La figure 2-16 montre une image au microscope optique d'une cellule carrée de 500 μm de côté avec un contact de base en face avant de 200 μm de large sur les quatre côtés.

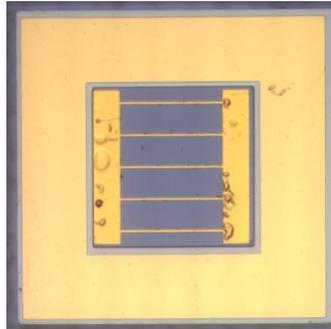


Figure 2-16: Cellule carrée de 500 μm de côté avec un contact de base en face avant de 200 μm de large sur les quatre côtés

c) Impact de la typologie de contact de base sur les performances

Deux designs de cellules ont été comparés : une cellule de 9 mm^2 et une de 0.25 mm^2 . Les cellules comportent un contact de base sur leur face arrière ainsi que sur leur face avant, celui-ci étant en forme de « O » de 200 μm de large. Les contacts de base n'ont pas d'influence mutuelle sur les performances électriques. La figure 2-17 montre les caractéristiques de cellules, ayant leur contact de base en face arrière ou en face avant. Il peut être observé que pour les deux tailles de cellules mesurées, les caractéristiques J-V sont similaires quelle que soit la méthode de contact pour une taille de cellule donnée. La différence de V_{oc} est due aux recombinaisons de périmètre, comme montré §2.2.3. Ainsi, il a été démontré que réaliser les contacts de base sur la face avant d'une cellule n'affecte pas ses performances.

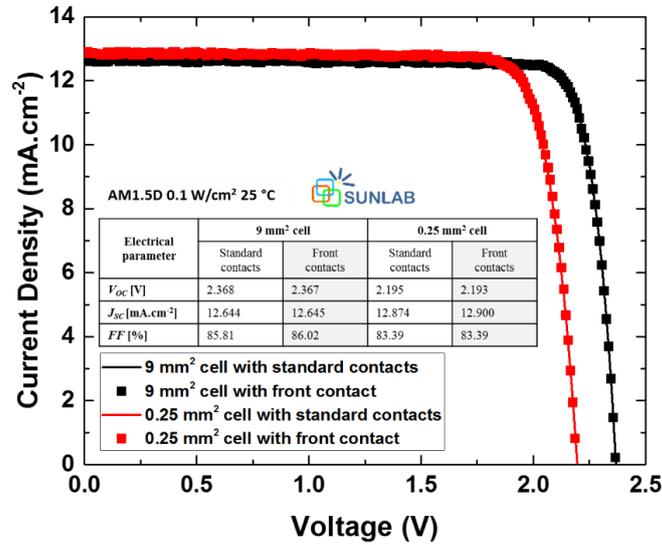


Figure 2-17: Densités de courant en fonction de la tension de cellules de 9 mm² et de 0.25 mm² avec leur contact de base en face arrière ou en face avant. Le tableau inséré montre les paramètres électriques issus de ces caractéristiques.

d) Calcul de l'impact de la largeur et de la forme du contact de base

L'ajout d'un contact de base en face avant représente une perte d'espace car la surface de semiconducteur nécessaire à la fabrication de chaque cellule est bien plus importante. Dans cette partie, l'impact de la largeur de ce contact est étudié de manière à connaître ses dimensions minimales avant qu'un effet résistif trop important n'apparaisse.

Dans les cellules ayant leur contact de base en face avant, les porteurs de charge se déplacent latéralement dans le germanium entre le point d'entrée dans la base et le contact de base. Ceci pourrait avoir pour effet d'augmenter la contribution du germanium dans la résistance de la cellule par rapport à une cellule standard puisque la distance moyenne est supérieure à l'épaisseur du germanium, soit 170 μm. De plus, la surface de la cellule est plus importante que celle du contact de base en face avant.

En considérant une cellule ayant un *mesa* de largeur w_m , la plus grande distance que les porteurs doivent traverser est w_m pour un contact de base en « I » ou « L » ou $w_m/2$ pour un contact en « U » ou « O », (distance entre le *mesa* et le contact négligée, 10 μm dans notre cas). On s'attend alors à ce que $R_{S_{Ge}} < R_{sheet}$ (cas du contact en « I » ou « L ») ou $R_{S_{Ge}} < R_{sheet}/2$ (cas du contact en « U » ou « O »), où $R_{S_{Ge}}$ est la résistance du germanium et R_{sheet} est la résistance de feuille du germanium. Ainsi en considérant un contact ayant une largeur de w_c , on établit que la résistance du contact R_c peut s'écrire :

$$R_c = \frac{\rho_c}{n \times w_m \times \min(w_c, L_T)} \quad (2-8)$$

où ρ_c est la résistivité de contact spécifique, n le nombre de côtés du contact ($n=1, 2, 3$ ou 4 pour les contacts de base en forme de « I », « L », « U », « O ») et L_T est la longueur de transfert.

2.4 Contacts électriques des microcellules

Les structures TLM ont permis d'évaluer ces contributions. Ainsi, une résistivité spécifique de contact ρ_c de $8.01 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$, une longueur de transfert L_T de $49.5 \mu\text{m}$ et une résistance feuille du germanium R_{sheet} de $0.33 \text{ m}\Omega/\square$ ont été mesurés.

Basé sur la littérature, la résistance série totale pour une cellule InGaP/InGaAs/Ge peut être évalué à $25 \text{ m}\Omega$ environ [35]. Ceci indique que la contribution du germanium, dans le cas des cellules avec contact de base en face avant, reste négligeable. Cependant, dans le cas où une cellule de $500 \mu\text{m}$ a un contact de base en « I » de $10 \mu\text{m}$, une résistance de contact de 1.6Ω peut être anticipée. Ceci prouve qu'il est nécessaire d'opter pour un contact d'une largeur supérieure ou égale à L_T , idéalement en forme de « O ». Ces résultats sont vérifiés expérimentalement dans le paragraphe suivant.

e) Mesure de l'impact de la taille du contact de base

Un bon indicateur de l'effet résistif d'une cellule est le *fill factor* FF , qui sera d'autant plus affecté que le flux lumineux sera important. La figure 2-18 montre le FF de cellule de 0.25 mm^2 sous une illumination de 699 X en fonction de la largeur du contact de base en face avant en « O ». On peut y observer que le FF demeure plutôt constant (environ $82.6\% \pm 0.2\%$) pour des largeurs de contact de base supérieures à $50 \mu\text{m}$. Cependant, pour des largeurs inférieures ($25 \mu\text{m}$ et $10 \mu\text{m}$), le FF semble nettement être affecté, puisqu'il décroît de 82.8% à 81.6% .

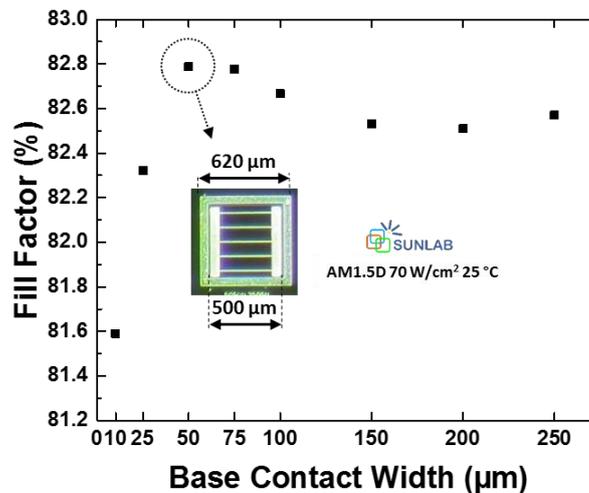


Figure 2-18: *Fill factor* en fonction de la largeur du contact de base en face avant pour des cellules de 0.25 mm^2 mesurées sous une illumination correspondant à 699 X .

Ainsi, avec la métallisation utilisée pour ce contact de base et pour cette dimension de cellule, il conviendra de ne pas diminuer la largeur de ce contact en dessous de $50 \mu\text{m}$, de sorte à ne pas avoir de pertes résistives dues à ce contact. Ceci confirme la valeur précédemment calculée. L'impact de la forme de ce contact a également été investigué, comme le montre la partie suivante.

f) Mesure de l'impact de la forme du contact de base

Afin de diminuer encore la surface utilisée sur le *wafer*, l'impact de la forme du contact de base de face avant a également été étudié. Les cellules fabriquées dans les parties précédentes étaient constituées d'un contact de base qui entourait toute la cellule, en forme de « O ». Ainsi, enlever une partie de cette métallisation pourrait permettre de réduire la quantité de semiconducteur utilisée lors de la réalisation de cellules à contact de base en face avant.

Pour cette étude, des cellules de 0.25 mm^2 ont été fabriquées, avec des largeurs de contact de base de $100 \text{ }\mu\text{m}$. La figure 2-19 montre les caractéristiques $J-V$ à sous une illumination d'un soleil des 4 configurations possibles pour le contact de base (*i.e.* en « O », « U », « L » ou « I »). On remarque que le V_{OC} est légèrement affecté avec une valeur maximale obtenue pour la cellule ayant le contact de base en « I », soit pour la plus petite surface de contact. Etant donné que le J_{SC} est très similaire dans tous les cas, la non-uniformité de l'illumination ne peut être incriminée. Cependant, ceci pourrait provenir d'un taux de recombinaison plus important lorsque la surface de contact augmente. Ainsi, au premier ordre, il semble qu'un côté simple sur un seul côté de la cellule soit bénéfique. Cependant des mesures à hautes concentration permettant de mettre en avant les effets résistifs pourraient confirmer ce résultat (n'ont pu être effectuée à Sunlab en raison de la non-uniformité du flash-tester).

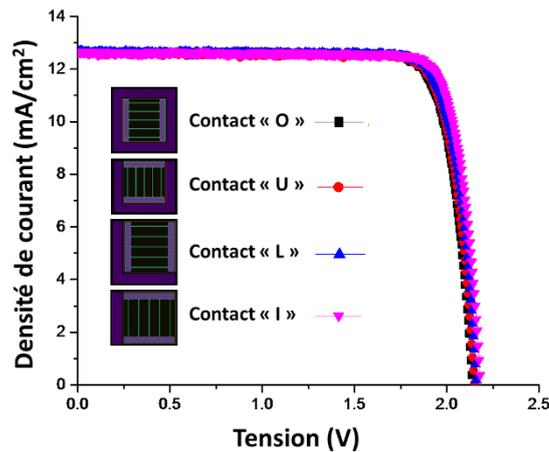


Figure 2-19: Caractéristiques $J-V$ de cellules de 0.25 mm^2 ayant différentes formes de contacts de base (sur 4, 3, 2 ou 1 côtés de la cellule)

Bien que les contacts de base en face avant utilisent une surface non-négligeable du coûteux *wafer*, des optimisations sont possibles pour réduire leurs dimensions tout en gardant de bonnes performances électriques. De plus, ce type de contact est nécessaire pour le développement de MIM, développé dans le chapitre 3. Enfin, en raison de la surface excédentaire nécessaire pour ce type de contact en face avant, il serait intéressant qu'une technique de singulation à faible empreinte (*i.e.* largeur de découpe) soit utilisée. Le développement de celle-ci est traité dans la partie suivante.

2.5 Singulation des microcellules

La singulation peut être considérée comme la dernière étape de la fabrication des cellules, qui consiste à séparer les cellules de leurs *wafers* source. De manière générale, la technique de singulation choisie devra offrir un bon rendement de *wafers* (peu de pertes de matériau liées à la singulation), peu ou pas de défauts dans les dispositifs, et devra idéalement permettre la découpe de formes variées (*i.e.* découpes qui ne sont pas uniquement rectilignes).

Cette étape est similaire à celle qui est réalisée en microélectronique lors de la singulation des puces. Dans cette partie, les différentes techniques de singulation habituellement utilisées en microélectronique sont présentées puis un bilan sur celles-ci est dressé. Enfin, la technique de singulation sélectionnée pour ce projet, la gravure plasma, sera détaillée.

2.5.1 Techniques de singulation envisagées

Les débuts de la singulation datent des années 1950 quand IBM réalisait un clivage mécanique de ses *wafers* par laser pour découper ses puces [95]. Depuis, les techniques de singulation ont pu évoluer pour offrir plus de rapidité d'exécution, plus de contrôle sur les designs de puces et surtout d'un minimum de défauts. La découpe à la scie a été introduite dans les années 1970 et s'est imposée comme technique de singulation de référence en microélectronique [78]. Dans les années 2000, de nouvelles techniques sont apparues basées sur l'utilisation d'un laser (par ablation ou par focalisation sub-surface) et la gravure plasma [96], [97]. Dans cette partie seront présentées et comparées pour les besoins du projet les techniques de singulation utilisant la scie diamant, le laser ou la gravure plasma. Bien qu'une utilisation combinée de ces techniques existe pour la singulation, celles-ci ne seront pas traitées pour des raisons de simplification des procédés de fabrication.

a) Singulation par découpe à la scie diamant

La singulation de puce à la scie diamant est une méthode peu coûteuse et s'est établie historiquement comme la technique de référence en microélectronique.

On distingue deux techniques de singulation à la scie : la technique de découpe complète, à travers le *wafers* et la découpe partielle, laquelle est complétée par un clivage mécanique. La technique de découpe complète est ou a été utilisée dans le domaine du CPV [77]. Dans cet article, les auteurs considèrent une largeur de découpe de 50 μm . Cependant, la valeur donnée ne correspond qu'à la largeur de la lame, n'inclut pas la zone sans défauts, évaluée entre 2 et 3 fois la largeur de la lame selon les fabricants [79]. De plus, la singulation à la scie diamant génère des défauts dans le semiconducteur. De plus, ce procédé « agressif » peut mener à l'arrachement des dispositifs à singulariser lorsque ceux-ci ont une faible surface de contact avec le film adhésif de support.

Une autre technique de singulation, maintenant très établie, consiste à utiliser un faisceau laser pour réaliser la découpe et est présentée dans la partie suivante.

b) Singulation par laser

Peu de temps après l'introduction de la scie diamant pour la singulation, l'utilisation du laser a été développée [78]. Les raisons principales sont la génération de moins de défauts et la découpe de formes plus complexes.

La singulation par laser est dominée par deux techniques : la singulation par focalisation sub-surface ou par ablation, dont les principes et surfaces de découpe sont illustrés sur la figure 2-20 [98]. La singulation laser par focalisation sub-surface est illustrée sur la figure 2-20(a, haut). Le principe est de modifier une zone à l'intérieur du *wafer*. Cette zone modifiée est le point d'initiation du clivage subséquent. La forme des puces singulées est donc guidée par l'orientation cristalline du *wafer* à singular. Cette technique ne laisse aucun débris à la surface du *wafer* singulé comme montré sur la figure 2-20(a, bas). Cependant, l'utilisation d'une lentille de focalisation nécessite une zone d'exclusion de minimum 40% de l'épaisseur du *wafer*.

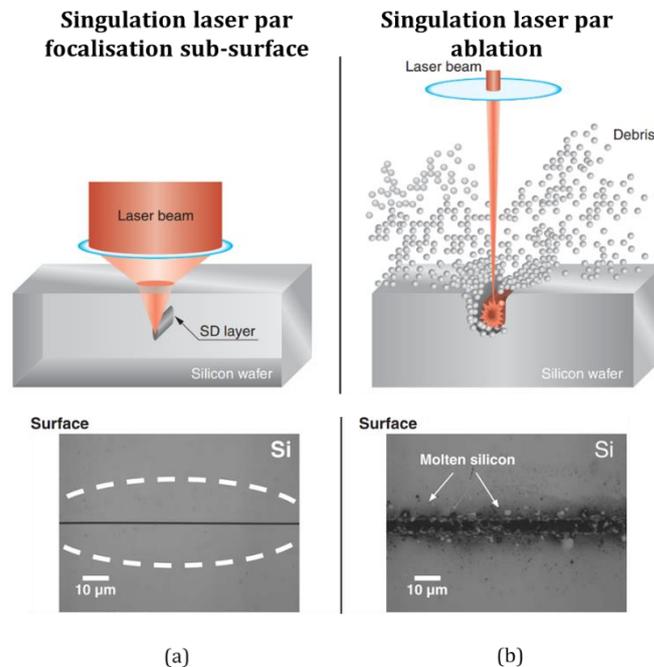


Figure 2-20: Techniques de singulation par laser avec (a) le principe de la singulation par focalisation sub-surface (haut) et la surface du *wafer* après découpe (bas) et (b) le principe de la singulation par ablation (haut) et la surface du *wafer* après découpe (b) [98]

La singulation laser par ablation est réalisée en focalisant le faisceau sur la surface du *wafer*, comme montré sur la figure 2-20(b, haut). Dépendamment du matériau à singular et du laser utilisé, la profondeur d'ablation varie et résulte en une efficacité plus ou moins grande. Dans le cas de l'ablation, le matériau est fondu et des débris peuvent se redéposer sur le *wafer* (cf figure 2-20(b, bas)). Néanmoins, l'ablation permet de découper des puces de la forme souhaitée.

Dans les deux cas, une zone affectée par la chaleur (HAZ, *Heat-Affected Zone*), dans laquelle des défauts sont générés [78]. De plus, la présence de différents matériaux affecte les performances de la singulation.

2.5 Singulation des microcellules

La technique de singulation par ablation laser est utilisée pour les cellules CPV [99]. Une technique alternative, basée sur la gravure plasma peut également être utilisée et est décrite dans le prochain paragraphe.

c) Singulation par plasma

La technique de singulation par plasma a été introduite dans le domaine de la microélectronique en 2003 par Kumar *et al.* [97]. Cette technique permet en théorie de ne générer aucun stress, ce qui n'engendre que très peu de défauts dans la structure gravée et assure l'intégrité mécanique des puces singulées. Ceci a été démontré par Harikai *et al.* en 2011, puisque seulement moins de 10% sur une population de 200 puces testés n'ont pas supporté une charge de 1000 MPa (*die strength testing*) [100]. En comparaison, aucune des puces singulées mécaniquement (à la scie diamant) n'a passé le test. Par ailleurs, la gravure plasma utilisée est un procédé parallèle à très fort rapport d'aspect *AR*, qui rend la rend adaptée à la singulation de puces de faibles dimensions.

En 2015, Darnon *et al.* ont démontré au sein du LN2 qu'il était possible de graver à travers un *wafer* de germanium avec un *AR* de 17, dont des images MEB sont montrées figure 2-21 [101]. Ainsi, des tranchées de 10 μm environ permettent de traverser un *wafer* standard de germanium de 170 μm . Aussi, les motifs étant définis par photolithographie, les puces peuvent être singulées selon la forme désirée. Le point limitant de cette technologie est son coût de mise en œuvre (étape de photolithographie, équipements, nettoyage, ...) malgré qu'elle soit parallèle.

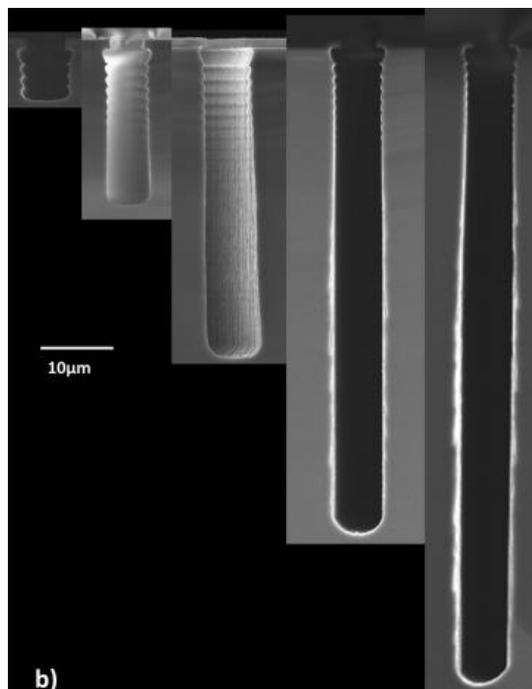


Figure 2-21: Tranchées de 5 μm gravées dans un *wafer* de germanium [101]

d) Bilan sur les techniques de singulation

L'analyse des principales techniques de singulation utilisées en microélectronique a permis de mettre en avant leurs avantages et inconvénients. Le tableau 2-6 résume les caractéristiques ayant un impact sur la fabrication des microcellules : la vitesse, l'endommagement, la forme de découpe et la largeur de découpe.

Pour le choix d'une technique de singulation adaptée aux microcellules CPV, les considérations suivantes ont été prises en compte :

- Les microcellules à singuler ont des dimensions jusqu'à la valeur non exhaustive de 0.068 mm².
- En raison des faibles dimensions des dispositifs à singuler, il convient d'utiliser un procédé « doux », ne risquant pas d'arracher les cellules de leur support.
- Les matériaux III-V des cellules sont fragiles et la propagation de cracks dans ceux-ci est aisée. Pour ne pas affecter les performances et la fiabilité de ces dispositifs, il convient de s'affranchir de ces défauts.
- La géométrie optimale des cellules à singuler dépend de l'optique à laquelle elles sont couplées. Cette géométrie n'est donc pas nécessairement rectangulaire.
- L'Université de Sherbrooke et le LN2 possèdent une solide expertise en gravure plasma.

Tableau 2-6: Caractéristiques des techniques de singulation envisagées

Caractéristique de singulation	Scie diamant		Laser		Gravure plasma
Illustration					
Type de singulation	Complète	Partielle + clivage	Ablation	Focalisation sub-surface + clivage	Ablation
Description	Découpe du wafer avec une lame abrasive	Découpe partielle en surface puis clivage	Découpe du wafer par fonte du matériau	Génération de cracks par la fonte locale puis le clivage du wafer	Gravure physique et chimique du wafer
Vitesse	Procédé sériel < 0.1 m/s		Procédé sériel < 1 m/s		Procédé parallèle wafer entier
Endommagement	Dommages mécaniques		Dommages mécaniques	Dommages mécaniques amoindris	Pas de dommages mécaniques
Forme des puces	Rectangulaire		Non restreinte	Affectée par l'orientation cristalline	Non restreinte
Largeur de découpe + zone sans dispositif	~ 100 µm		~ 60 µm		~ 15 µm

La figure 2-22 montre l'impact de la technique de singulation sur le rendement $\eta_{surface}$ (surface active de cellule / surface totale) d'un wafer en fonction des dimensions de la cellule à singuler. Les largeurs de découpe ont été établies à partir de l'état de l'art dressé précédemment et aucune zone d'exclusion n'a été considérée. Plus la cellule a une surface faible, plus la surface perdue lors de la découpe devient importante dans le rendement du wafer. Ainsi, pour des

2.5 Singulation des microcellules

applications micro-CPV, il devient important d'utiliser une technique de singulation à faible largeur de découpe. À titre d'exemple, un *wafer* dont on veut extraire des cellules de 500 μm de côté aura un rendement de 95% avec la singulation plasma. Ce rendement tombe à 80% avec une singulation par laser et à 70% avec une singulation par découpe mécanique.

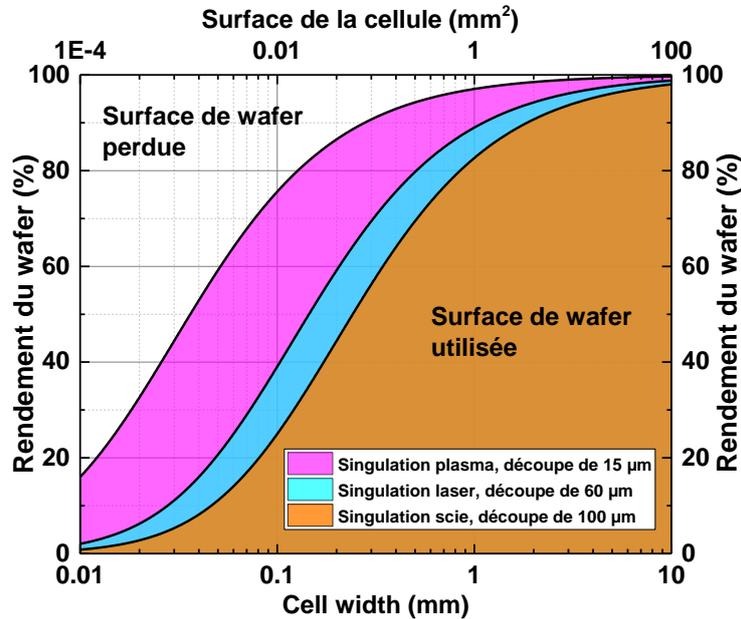


Figure 2-22: Rendement du *wafer* (surface active/surface totale) en fonction des dimensions d'une cellule pour différentes techniques de singulation

Pour ces raisons, le choix de la technique de singulation des microcellules s'est porté sur la gravure plasma. Dans la section suivante, le choix de la technique de singulation et les détails sur son utilisation seront détaillés.

2.5.2 Technique de singulation retenue par gravure plasma

L'utilisation de la gravure plasma implique l'utilisation d'un masque de gravure, défini par photolithographie. Pour cela, un masque en photorésine Futurrex NR4-8000P d'environ 7.5 μm est réalisé. Il permet de définir des ouvertures pour les tranchées de singulation de 20 μm de large. L'échantillon est ensuite fixé sur un *wafer*-support recouvert de SiO_2 avec de la cire Crystalbond, de façon similaire à ce qui est présenté §2.2.2. La gravure plasma est réalisée dans un système STS Multiplex Advanced Silicon Etch. Pour réaliser des gravures profondes, cet outil utilise le procédé Bosch qui consiste à alterner rapidement des phases de gravure isotrope et de passivation. Ce procédé génère un *scalloping*, dont les dentelures peuvent être observées sur la figure 2-21. Les détails du procédé utilisé pour la gravure de singulation sont montrés dans le tableau 2-7.

Tableau 2-7: Paramètres de la singulation par plasma

Procédé Deep Ge, 135 cycles, 45 min							
Étape	t	Gaz	P_{coil}	P_{platen}	p	V_{DC}	V_{PP}
Passivation	7 s	C_4F_8 @ 85 sccm	600 W	0 W	15 mTorr	0 V	0V
Gravure	13 s	O_2 @ 13 sccm SF_6 @ 130 sccm	610 W	18 W	25 mTorr	0 V	300 V

Après que la singulation ait été effectuée, l'échantillon est nettoyé et les cellules sont complètes. Des exemples de cellules singulées sont montrés sur la figure 2-23. On y observe des cellules de formes diverses (rectangulaires, à zones actives circulaires ou hexagonales) de 12.25 mm^2 (rectangulaire) à 0.068 mm^2 (hexagonale) avec des contacts de base standards (a) ou en face avant (b).

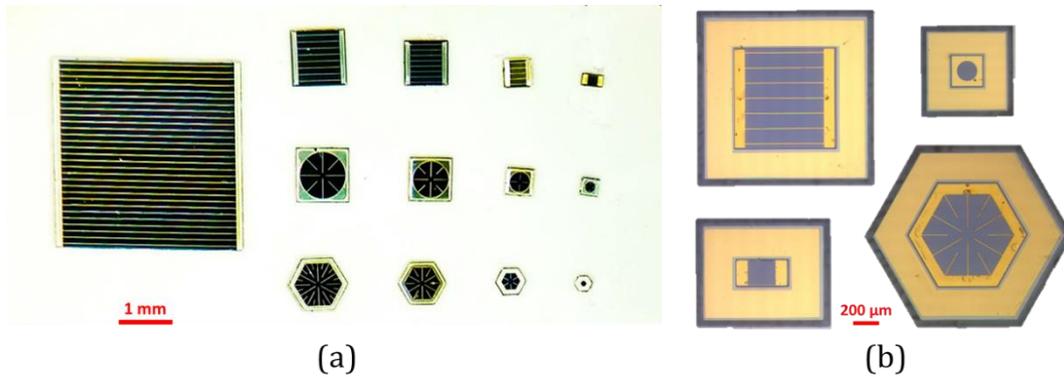


Figure 2-23: Cellules de dimensions et de géométries variables, avec (a) contacts standards et (b) contacts en face avant

L'étape de singulation complète le développement de la fabrication des microcellules. Dans la partie suivante, deux des microcellules fabriquées selon ces procédés sont caractérisées sous concentration.

2.6 Caractérisation certifiée des microcellules en fonction de la concentration

Deux microcellules ont été caractérisées à l'Institut ISE Fraunhofer en Allemagne, un des laboratoires capables de fournir des mesures certifiées de cellule sous illumination. Pour la simplicité de la mesure, les cellules ne sont pas singulées.

La figure 2-24 illustre les caractéristiques $J-V$ sous différentes concentrations (spectre AM1.5d) de cellules de 1 mm^2 (a) et de 0.25 mm^2 (b) qui possèdent des contacts standards (base en face arrière) et un pas de grille de $120 \text{ }\mu\text{m}$. Le facteur de concentration varie respectivement de 32 X à 974 X et de 35 X à 1432 X pour les cellules de 1 mm^2 et de 0.25 mm^2 . Une distorsion des caractéristiques $I-V$ peut être observée autour de 2.7 V à partir de 450 X pour la cellule de 1 mm^2 et de 584 X pour la cellule de 0.25 mm^2 . Cet effet est représentatif de la limitation du courant par une jonction tunnel de mauvaise qualité [102]. Bien qu'il soit attendu que les effets résistifs des microcellules sous haute concentration soient moins importants que pour les cellules de plus grandes dimensions, ceux-ci sont « noyés » dans les caractéristiques atypiques dues au problème de jonction tunnel. Cependant, le FF reste particulièrement élevé jusqu'aux concentrations où l'effet de la jonction tunnel apparaît (450 X pour la cellule de 1 mm^2 et 584 X pour la cellule de 0.25 mm^2). Il peut donc être projeté que la cellule de 0.25 mm^2 pourrait démontrer une efficacité maximale égale voire supérieure à celle de la cellule de 1 mm^2 .

2.6 Caractérisation certifiée des microcellules en fonction de la concentration

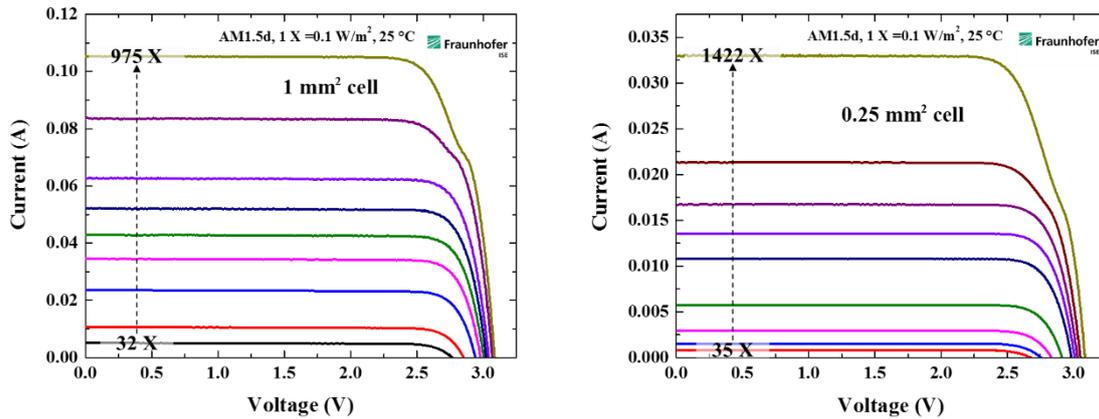


Figure 2-24: Caractéristiques J - V sous différents facteurs de concentration d'une cellule de (a) 1 mm² et (b) 0.25 mm²

La figure 2-25 illustre le V_{OC} , le FF et l'efficacité des cellules en fonction de la concentration (de 1 X à 1423 X). La tendance logarithmique typique du V_{OC} peut être observée dans les deux cas. La différence entre le V_{OC} de la cellule de 1 mm² et celui de la cellule de 0.25 mm² est de $\Delta V_{OC,1X} = 3.8\%$ sous 1 X mais tombe à $\Delta V_{OC,974X} = 1.1\%$ sous 974 X (valeur obtenue par interpolation). Cet effet est dû au phénomène de saturation des recombinaisons de périmètre, décrit §2.3.4. Il peut également être observé que le FF varie avec la taille des cellules. Les deux cellules possèdent un FF maximal à une valeur très basse de 32 X (cellule 1 mm²) et 35 X (cellule 0.25 mm²), ce qui indique qu'une optimisation (structure et/ou contacts) est nécessaire pour limiter l'effet résistif. La chute de FF observée à partir de 450 X pour la cellule de 1 mm² et de 584 X pour la cellule de 0.25 mm² n'est pas attribuée à l'effet Joule mais à la limitation d'une jonction tunnel. En raison de cette chute de FF , une efficacité maximale de 34.4% est atteinte sous 450 X par la cellule de 1 mm² et de 33.8% sous 584 X par la cellule de 0.25 mm². Il est cependant attendu qu'étant données les tendances des courbes, l'efficacité la plus élevée soit atteinte par la plus petite cellule sous très haute concentration, pour une structure possédant une jonction tunnel conforme.

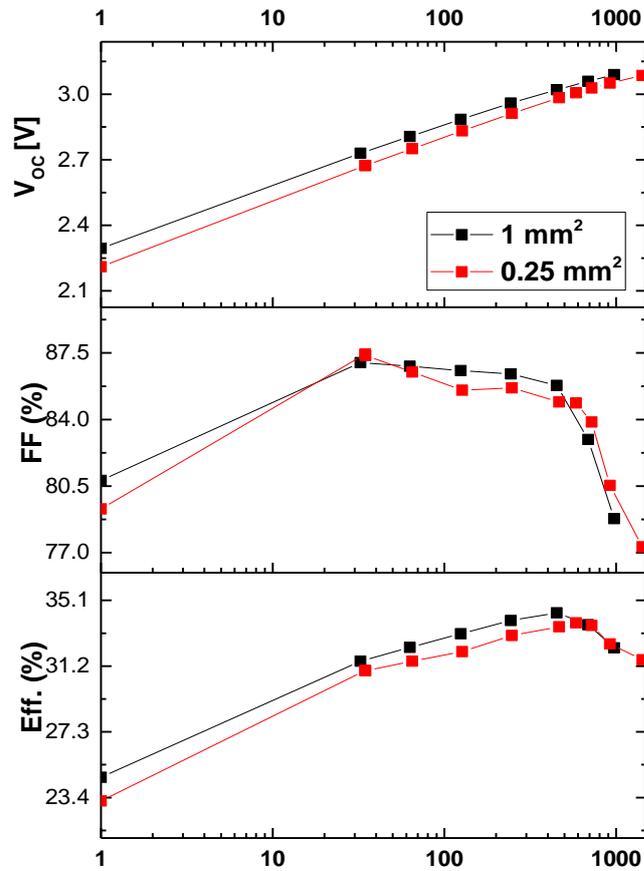


Figure 2-25: Paramètres électriques (haut: V_{OC} , milieu: FF et bas: efficacité) de cellules de 1 mm^2 et de 0.25 mm^2 en fonction de la concentration

Malgré des effets parasites, attribués aux jonctions tunnels, observés sur les caractéristiques des cellules, les mesures certifiées par ISE Fraunhofer ont permis de confirmer l'aptitude des microcellules développées au LN2 à être dédiée aux fortes concentrations.

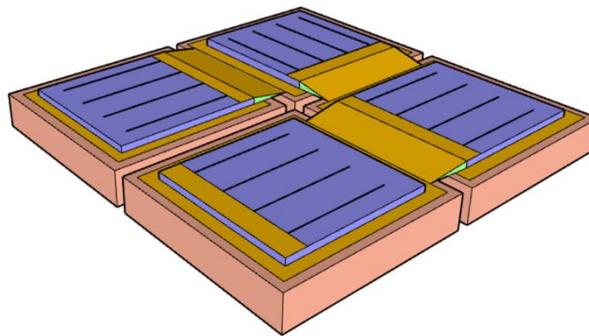
Conclusion du chapitre 2

Dans ce chapitre, la fabrication et la caractérisation de microcellules ont été présentés. Dans un premier temps, les étapes-clés de la fabrication de cellules CPV conventionnelles et leur caractérisation ont été introduits. Les défis à relever pour les microcellules ont été identifiés. L'isolation électrique était la première étape de fabrication sensible abordée pour laquelle une gravure plasma a été sélectionnée pour les microcellules. Des cellules ayant des dimensions allant jusqu'à 0.068 mm^2 et de formes diverses ont pu être fabriquées. La baisse de performances avec la diminution des performances a été étudiée et révèle l'importance des recombinaisons de périmètre pour les cellules submillimétriques. Cependant, leur impact est réduit grâce à une technique de passivation par PECVD adaptée (couplée à la fonction de couche antireflet) et un fonctionnement sous haute concentration (différence de V_{oc} due à la miniaturisation des cellules de l'ordre de 1.1% sous 974 X). Par la suite, le dépôt des contacts électriques a été abordé et le dépôt du contact de base en face avant a été validé électriquement pour proposer une architecture d'interconnexion alternative. Ensuite, l'étape de singulation a été traitée, pour laquelle la gravure plasma a démontré ses performances pour singulariser efficacement des microcellules (rendement de *wafers* augmenté de 27% relativement à la technique conventionnelle pour des cellules de $500 \mu\text{m}$ de côté). Finalement, considérant les caractérisations certifiées sous différents facteurs de concentration, il est attendu que l'efficacité maximale des microcellules soit plus élevée que celle de cellules de plus grande surface.

Ce chapitre a donc permis de valider la fabrication de microcellules, incluant celles avec leurs contacts en face avant, lesquelles seront utilisées comme briques de base pour le développement de MIM dans le chapitre suivant.

Chapitre 3: Micro-assemblage monolithique de cellules

Dans cette section, l'assemblage de microcellules de façon monolithique est présenté. Comme il a été montré dans le chapitre 1, l'assemblage de microcellules constitue un challenge majeur et les techniques conventionnelles d'assemblage utilisées dans le CPV (*pick-and-place* + brasage + *wirebonding*) constituent un frein au développement de masse du micro-CPV. Dans le chapitre précédent, il a été montré qu'une méthode alternative de contact des cellules multijonctions était possible et qu'elle conduisait à des performances identiques à celles des cellules avec des contacts standards. Cette architecture alternative repose sur des contacts de base placés en face avant des cellules, qui permettent de prendre les deux contacts électriques d'une cellule sur la même face. Dans ce chapitre, le développement de techniques d'interconnexion en série de cellules, sur leur face avant et de façon monolithique (microfabriquée) est réalisé. Ce type de dispositif ainsi assemblé est appelé MIM pour *Monolithic Interconnected Module*, dont un schéma est montré sur la figure 3-1 et n'a été développé que pour des structures ayant deux jonctions au maximum. Pour réaliser le premier MIM à triple jonction, une introduction à ce type de dispositif puis un état de l'art sur les MIM faits de structures simple jonction (Si ou III-V) et double jonction sont réalisés. Par la suite, de tels dispositifs sont fabriqués, en se focalisant sur les étapes critiques que représentent l'interconnexion et la planarisation. Une possible optimisation des MIM est discutée avant de présenter les différents MIM qui ont été fabriqués puis leur caractéristiques électriques certifiées sous illumination (1 soleil et sous concentration).



**Figure 3-1: Schéma d'un MIM fait de quatre cellules
assemblées en série**

3.1 Modules micro-intégrés (MIM)

Un module interconnecté de façon monolithique, plus connu sous le nom de *MIM* en anglais, pour *Monolithic Interconnected Module* est un dispositif photovoltaïque dont les cellules sont interconnectées en série par des techniques de microfabrication. Il est spécifiquement utilisé pour la conversion de fortes illuminations ($> 10 \text{ W.cm}^{-2}$), telles que celles rencontrées dans le photovoltaïque à concentration (CPV), où des systèmes optiques concentrent l'illumination solaire plus de 100 fois. Un exemple de récepteur CPV avec quatre MIM basés sur GaAs est montré sur la figure 3-2 [103]. Sur cet exemple, chaque MIM est constitué de 23 cellules en série. La connexion des cellules en série permet au dispositif de générer une forte tension (la somme des tensions de toutes les cellules élémentaires en théorie) et un courant restreint (courant de la cellule élémentaire générant le moins de courant) dans le but de limiter l'impact des pertes Joule. Ces dernières dépendent du carré du courant photogénéré et sont responsables de la chute de *FF*, qui se répercute sur la baisse de l'efficacité des cellules photovoltaïques lorsque soumises à de fortes illuminations (*cf* §1.4.2c).

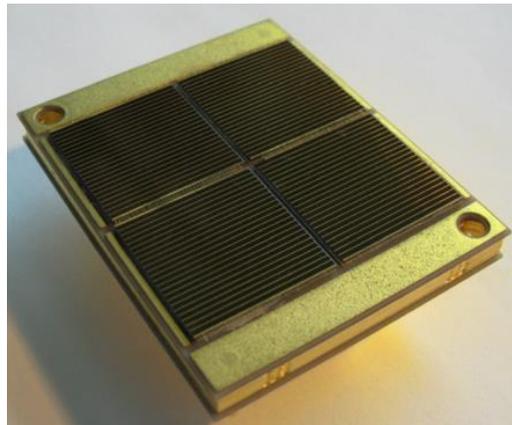


Figure 3-2: Receveur CPV avec quatre MIM monojonctions basés sur GaAs et constitués de 23 cellules longitudinales chacun [103]

3.1.1 Pertes Joule dans un MIM

Dans cette partie sont comparées les pertes Joule d'un MIM carré (P_{J_MIM}) aux pertes Joule d'une cellule simple (P_{J_CELL}), de mêmes dimensions et avec la même densité de courant générée. On considère, pour le calcul, que les interconnexions entre les cellules n'induisent aucune perte de surface photoactive et que leur résistance est négligeable. Pour cela, on s'intéresse au rapport $\eta_{P_{J_MIM}/CELL}$ des pertes Joule du MIM sur celles de la cellule et défini par:

$$\eta_{P_{J_MIM}/CELL} = \frac{P_{J_MIM}}{P_{J_CELL}} \quad (3-1)$$

Or, les pertes Joule d'une cellule ayant une résistance série R_{s_CELL} et générant un courant I_{CELL} s'écrivent :

$$P_{J_CELL} = R_{s_CELL} \times I_{CELL}^2 \quad (3-2)$$

3.1 Modules micro-intégrés (MIM)

et les pertes Joule d'un MIM s'écrivent :

$$P_{J_MIM} = R_{s_MIM} \times I_{MIM}^2 \quad (3-3)$$

où R_{s_MIM} est la résistance série du MIM et I_{MIM} le courant généré par celui-ci.

Le courant généré par un MIM est le courant généré par une seule des cellules élémentaires le composant, soit :

$$I_{MIM} = \frac{I_{CELL}}{n_{CELLS_MIM}} \quad (3-4)$$

Il a été montré que le pic d'efficacité se décalait en fonction de la taille des cellules (*i.e.* plus grande concentration pour plus petites cellules) (*cf* §2.4.1a)). Ceci peut être attribué à la réduction des pertes résistives. En considérant que les interconnexions entre les n_{CELL_MIM} cellules dans un MIM n'induisent pas de pertes résistives, on peut établir que la résistance série maximale du MIM sera n fois celle d'une cellule élémentaire, soit :

$$R_{s_MIM} = n_{CELL_MIM} \times R_{s_CELL} \quad (3-5)$$

En reprenant l'équation 3.1, on a un rapport des pertes Joule du MIM sur celles de la cellule qui vaut au minimum:

$$\eta_{Pj_MIM/CELL} = \frac{n_{CELL_MIM} \times R_{s_CELL} \times \left(\frac{I_{CELL}}{n_{CELLS_MIM}}\right)^2}{R_{s_CELL} \times I_{CELL}} \quad (3-6)$$

soit :

$$\eta_{Pj_MIM/CELL} = \frac{1}{n_{CELL_MIM}} \quad (3-7)$$

Ainsi, à titre d'exemple, les pertes Joule d'un MIM constitué de 4 cellules élémentaires seront 4 fois moins importantes que celles d'une cellule simple ayant la même surface photoactive (9 fois moins importantes pour un MIM de 9 cellules).

Malgré cet avantage certain, les MIM n'ont pas encore été largement adoptés, notamment à cause de leur architecture relativement complexe par rapport à une cellule standard.

3.1.2 Architecture type

Un schéma type en coupe d'un MIM sur un substrat semi-isolant (SI, *SI-substrate*) est présenté sur la figure 3-3 [104]. Sur cette figure, trois cellules sont interconnectées en série via la métallisation (*metal grid*). On remarque particulièrement que ces cellules sont électriquement isolées les unes des autres en utilisant des puits d'isolation (*insulation*) dans le substrat semi-isolant (*SI substrate*). Ces puits sont remplis d'un matériau isolant pour prévenir des courts-circuits non-désirés. L'interconnexion monolithique est possible seulement si les contacts électriques des cellules sont sur la même face. Ici, le MIM utilise une couche de conduction latérale (CCL ou LCL, *Lateral Conduction Layer*), fortement dopée, permettant de reporter le

contact inférieur de la cellule (base ou émetteur selon la configuration) sur la face avant du MIM au niveau de la tranchée d'isolation. Le chemin parcouru par le courant photogénéré est représenté par les flèches noires. Cette structure de MIM, bien que monojonction, est assez complexe en comparaison avec une cellule standard car elle doit répondre à plusieurs défis technologiques pour que l'interconnexion des cellules en série soit effective. Ces défis sont détaillés dans la partie suivante.

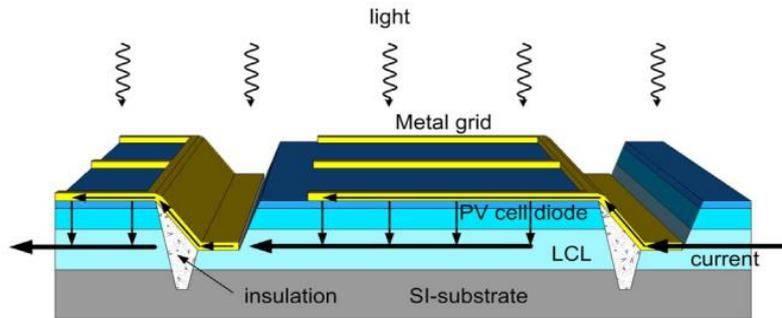


Figure 3-3: Schéma de principe d'un MIM sur substrat semi-isolant [104]

3.1.3 Défis technologiques

Il existe pour la fabrication d'un MIM, plusieurs défis technologiques à relever :

- Les cellules élémentaires doivent avoir leurs contacts électriques sur la même face.
- Les cellules élémentaires doivent être électriquement isolées entre elles. En effet leurs base et émetteur ne doivent pas être interconnectés pour que l'interconnexion série ultérieure soit effective.
- Les cellules élémentaires doivent être interconnectées en série.
- La surface du MIM doit être optimisée pour avoir un rapport surface photoactive sur surface totale le plus grand possible ($\eta_{surface}$).

Dans les sections suivantes sera montré comment les réponses à ces défis ont été apportées, afin de fabriquer des MIM sur structure triple jonction. Un état de l'art sur les solutions déjà proposées dans la littérature sur d'autres types de structures sera préalablement dressé.

3.2 État de l'art sur les MIM

Les premiers MIM ont été développés sur silicium pour des applications de conversion solaire dans les années 1970 [105]. Une dizaine d'années plus tard, un essor des matériaux III-V, dû à la flexibilité de leur alliages (ternaires, quaternaires) sur divers substrats (GaAs, InP et GaSb) ouvre l'utilisation de MIM à des applications thermophotovoltaïques (TPV) et de conversion de puissance laser (LPC, *laser power conversion*) [104]. Il faut attendre la fin des années 1990 pour que des MIM à structure multijonction soient développés [106]. Cet état de l'art se focalisera majoritairement sur les MIM dédiés à la conversion solaire.

3.2.1 MIM monojonctions basés sur silicium

Les premiers MIM, développés au début des années 1970, utilisaient le Si comme matériau photoactif [105]. Plusieurs designs de ces MIM sont présentés dans cette partie et montrent la diversité et l'évolution des approches.

La figure 3-4.a illustre un des premiers designs de MIM sur Si, proposé en 1970 par Riel [105]. L'architecture proposée utilise une diode d'isolation des cellules élémentaires (jonction inverse des cellules). Ces diodes d'isolation sont par ailleurs peu efficaces sous illumination et un courant de fuite peut apparaître.

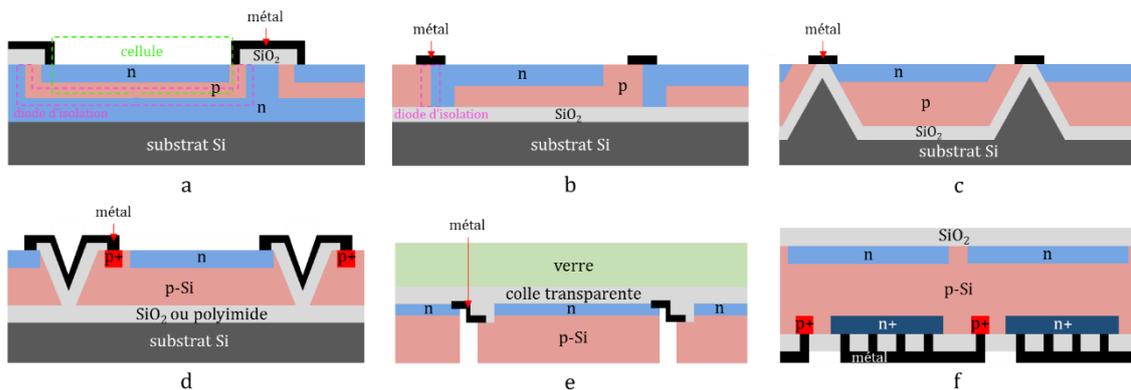


Figure 3-4: Exemples de designs de MIM basés sur silicium

En 1977, Warner propose un design basé sur un substrat *SOI* (semiconducteur sur isolant) (cf figure 3-4.b) pour faciliter l'isolation verticale des cellules élémentaires [107]. Celui-ci conserve les puits d'isolation latérale introduits précédemment mais les pertes sont restreintes en les ombrageant complètement avec les métallisations, limitant ainsi les risques de fuite. Une efficacité de 8% sous un soleil est relevée.

Un autre design de Warner, développé en 1978, est montré sur la figure 3-4.c [108]. Cette architecture utilise une structure *SOI* comme présentée précédemment. Cependant, l'isolation latérale des cellules n'est plus réalisée par des puits d'isolation mais par un confinement physique des cellules sur le substrat *SOI*. Une efficacité de 19% sous 300 X a été atteinte avec ce type d'architecture [109].

Un design similaire a été plus récemment repris par Peters *et al.* en 2003 (voir figure 3-4d) [110]. Celui-ci repose encore sur l'utilisation d'un substrat *SOI* mais une gravure chimique anisotrope permet de réaliser l'isolation des cellules par la face avant. Une efficacité de 11% sous un soleil est reportée par les auteurs. Bermejo *et al.* ont réutilisé cette architecture, en expérimentant l'utilisation de polyimide pour l'isolation des cellules élémentaires et le collage du *wafer* actif sur un *wafer* support [111]. Les dispositifs développés par les auteurs n'ont pas permis de dépasser une efficacité de 4.3% sous un soleil.

Un design alternatif, proposé par Hammud *et al.*, est montré sur la figure 3-4.e [112]. Dans cette étude, les cellules non-isolées sont interconnectées avant d'être collées (face avant) sur un superstrat transparent. Ces cellules sont ensuite isolées par la face arrière par une combinaison

de découpe partielle (à la scie diamant) et complète (par gravure sèche). Ce type d'architecture a permis d'atteindre une efficacité de 11% sous un soleil.

Un design alternatif, présenté sur la figure 3-4.f a été proposé par Kapoor *et al* [113]. Contrairement aux designs présentés précédemment, celui-ci repose sur un agencement planaire des jonctions et les interconnexions/contacts sont sur la face arrière ($\eta_{surface}=100\%$). L'utilisation de zones dopées n sur la face avant du *wafers* type p permet de réduire l'impact des recombinaisons de surface. Cette architecture a été reprise par Verlinden *et al.*, lesquels ont démontré une efficacité record de 21.8% sous 58 X pour ce MIM basé sur Si [114].

Cette partie a permis de remarquer l'évolution des designs de MIM développés sur Si, pour lesquels une efficacité maximale de 21.8% a été mesurée sous 58 X. L'utilisation de matériaux III-V dans les MIM permettrait théoriquement d'augmenter cette efficacité. En effet, le GaAs (1.43eV) et les alliages ternaires et quaternaires de matériaux III-V permettent une meilleure conversion du spectre solaire (bandgap idéal de 1.3eV) que le Si (1.11 eV).

3.2.2 MIM monojonctions basés sur matériaux III-V

Les meilleures performances attendues avec des MIM basés sur III-V comparés à ceux basés sur Si ont motivé leur développement dans les années 1980. Cependant, l'utilisation de matériaux III-V dans les MIM requiert d'adapter les procédés de fabrication. Par exemple, un oxyde thermique est souvent utilisé dans les MIM basés sur Si. Cet oxyde de bonne qualité permet notamment d'isoler les cellules élémentaires comme montré dans la figure 3-4.a,c,d. D'autres techniques d'isolation de cellules doivent donc être développées pour les MIM sur III-V. Par ailleurs, les substrats semi-isolants (SI) en GaAs ont de meilleures propriétés isolantes que les substrats semi-isolants en Si. Ainsi, les MIM basés sur III-V peuvent bénéficier de ces substrats de bonne qualité pour assurer l'isolation électrique entre cellules élémentaires. Les principaux designs de MIM sur III-V, issus de ces spécificités technologiques, sont présentés dans cette partie.

Un design de MIM, développé en 1979 par Borden *et al.*, est présenté sur la figure 3-5.a [115]. Il repose sur l'utilisation d'un substrat semi-isolant (SI) en GaAs et une hétérojonction p-AlGaAs sur n-GaAs. Les cellules élémentaires sont formées par gravure chimique et un dépôt *CVD* (*Chemical Vapor Deposition*, dépôt chimique en phase vapeur) de SiO_x permet d'isoler leurs flancs. Une efficacité de 13.9% est mesurée sous un soleil (spectre AM2).

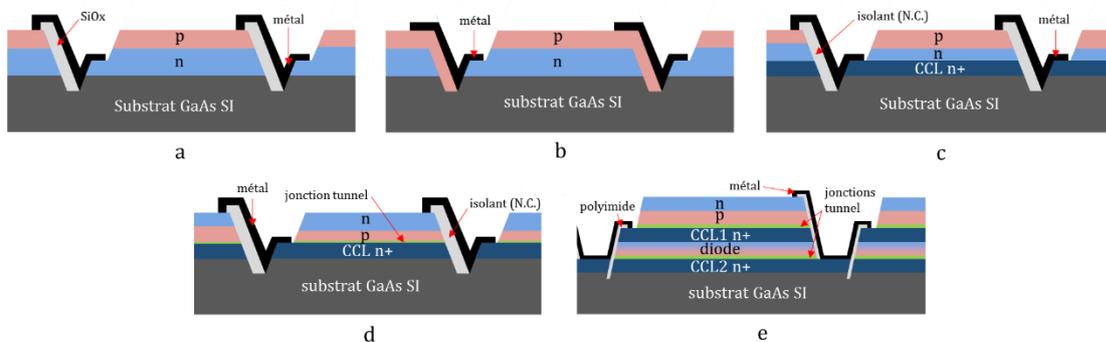


Figure 3-5: Exemples de designs de MIM basé sur matériaux III-V

3.2 État de l'art sur les MIM

Un autre design, ne requérant pas de couche d'isolation sur les flancs des cellules est montré sur la figure 3-5.b [116]. L'objectif de cette architecture est de limiter les shunts liés à la mauvaise isolation des flancs des cellules. Cependant, les auteurs ne mesureront qu'une efficacité de 8.4% sous un soleil (spectre AM1).

En 1991, une structure utilisant une couche de conduction latérale est introduite par Beaumont *et al.* (cf figure 3-5.c) [117]. L'utilisation d'une CCL, fortement dopée n, permet de limiter les pertes résistives et d'améliorer la qualité du contact ohmique. De plus, on retrouve une couche d'isolant (non-spécifiée) telle qu'introduite dans le design de la figure 3-5.a. Les auteurs introduisent également le design de MIM en camembert, composé de 6 secteurs, adapté au profil optique du laser incident, illustré sur la figure 3-6. Un $\eta_{surface} \approx 68\%$ est estimé par analyse de l'image MEB de la figure 3-6 en ne considérant pas les pads sur lesquels sont fixés les fils de microcâblage. Une efficacité de 52.8% est mesurée avec cette structure pour une illumination monochromatique à 810 nm de 14 W.cm^{-2} .

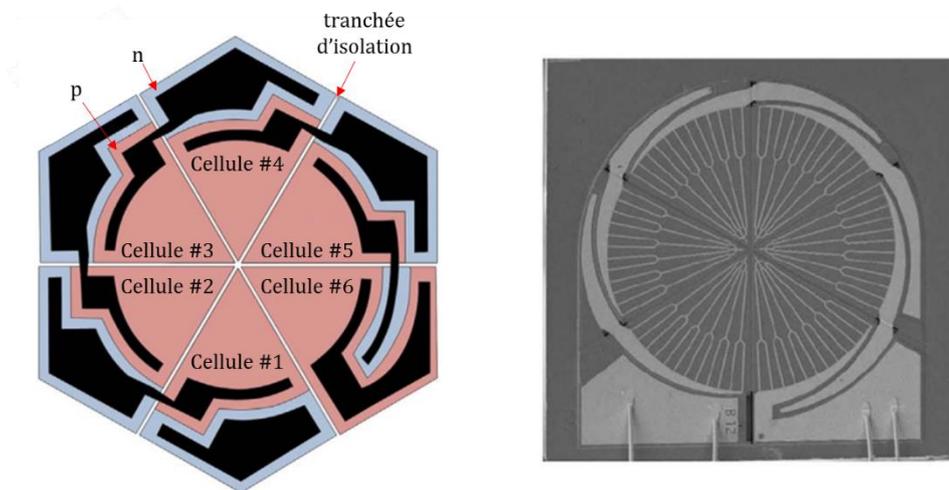


Figure 3-6: Design de MIM en camembert et image MEB du dispositif associé [117]

Une structure similaire, dédiée à la conversion de puissance laser, est présentée sur la figure 3-5.d [118]. Ce design repose sur une configuration n sur p (pour une meilleure collection à l'émetteur) mais conserve la CCL en GaAs fortement dopée n telle que montrée précédemment. L'utilisation d'une jonction tunnel entre la base p et cette CCL n+ est ainsi nécessaire. Une efficacité maximale de 40% est atteinte pour une illumination monochromatique de $\sim 26 \text{ W.cm}^{-2}$ à 810 nm.

Cette même structure a été réutilisée en 2006 par Loeckenhoff *et al.* pour l'application CPV [119]. Le MIM développé utilise un polyimide pour l'isolation du flanc des cellules. Une autre structure, qui intègre une diode de roue libre (*by-pass diode*), est présentée dans le même article. Cette structure, nécessite deux jonctions tunnel et deux CCL tel que montré sur la figure 3-5.e. Une efficacité maximale de 22.0% est mesurée sous 199 X avec ce design, le record pour un MIM monojonction. Une efficacité légèrement plus faible, 19.9%, est également mesurée sous 962 X. La faible chute de l'efficacité (2.1%) par rapport à celle mesurée sous 199 X indique que les pertes Joule sont restreintes bien que le dispositif soit testé sous haute concentration.

Tous les designs MIM sur III-V présentés dans cette partie sont basés sur des substrats semi-isolant, ceux-ci ayant de bonnes capacités d'isolation. L'évolution des architectures utilisées a permis d'atteindre 22.0% sous 199 X avec une structure intégrant une diode de roue libre, proche de celles utilisées dans les dispositifs à multijonctions. Ceci ouvre la voie au développement de MIM multijonctions, qui permettraient d'obtenir théoriquement des efficacités plus élevées grâce à la fragmentation du spectre solaire par les différents matériaux photoactifs des différentes sous-cellules.

3.2.3 MIM multijonctions

Le développement des MIM multijonctions a logiquement débuté par une structure à double jonction. Les bandgaps optimaux pour la conversion du spectre AM1.5D avec une structure à double jonction sont proches de 1.4 eV et 1.85 eV. Ces bandgaps sont aisément obtenus avec du GaInAs et du GaInP, lesquels sont crus en accord de maille sur du GaAs. Ces structures ont été étudiées par Helmers *et al.* de ISE Fraunhofer dans deux travaux [120], [121]. La structure est présentée sur la figure 3-7, basée sur l'utilisation de trois jonctions tunnel et deux CCL.

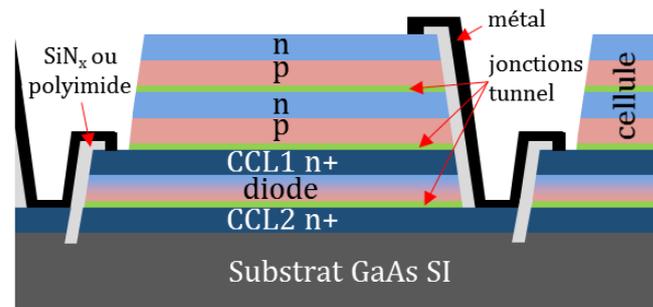


Figure 3-7: Exemple de design de MIM double jonction basé sur matériaux III-V

Dans une première étude, les auteurs présentent deux MIM double jonctions sur GaAs [120]. Un d'entre eux est basé sur une croissance épitaxiale de GaInP en accord de maille sur GaAs. L'autre structure repose sur une croissance métamorphique de GaInP sur GaInAs (ce dernier étant crû sur substrat GaAs). Dans les deux cas, les pertes de surface dues aux interconnexions ont été traitées pour être réduites au maximum. Pour cela, deux approches d'isolation des cellules élémentaires ont été décrites par les auteurs. La première approche utilise une gravure chimique combinée avec le dépôt d'un polyimide. Cette approche a permis d'obtenir un $\eta_{surface}$ de 89.1% à 91.1%. La seconde approche, basée sur une gravure physique RIE et un dépôt PECVD de SiNx, a permis une réduction significative de la surface perdue ($\eta_{surface} = 94.3\%$).

Dans une seconde étude, les auteurs détaillent et comparent les procédés utilisés pour la fabrication des dispositifs présentés précédemment [121]. La figure 3-8 montre des images MEB des deux types de procédés utilisés.

Sur la figure 3-8.a apparaissent les structures gravées chimiquement selon des plans cristallographiques (apparition de sous-gravure dans le rectangle noir). Ces structures sont ensuite recouvertes d'un polyimide pour assurer l'isolation électrique. L'interconnexion

3.2 État de l'art sur les MIM

métallique est enfin déposée sur le polyimide. Dans ce cas, la tranchée d'interconnexion fait 100 μm . Sur la figure 3-8.b., une tranchée d'interconnexion de 56.5 μm réalisée par gravure sèche est montrée. Le SiN_x servant d'isolant suit les profils quasi-verticaux avec une bonne conformité (apparaît en noir sur l'image). Une épaisseur importante du métal d'interconnexion (contact ohmique Pd/Ge puis 3 μm d'au électroplaqué) permet d'assurer la continuité électrique. La structure basée sur une croissance métamorphique (GaInP/GaInAs) et dont les tranchées ont été fabriquées par gravure sèche, a permis d'obtenir une efficacité de 26.0% sous 496 X et de 24.2% sous 1028 X pour un dispositif de 4.368 cm^2 . Ces performances ont été atteintes avec une structure GaInP/InGaAs sur GaAs SI. Le faible déclin de l'efficacité observé (1.8%) entre 496 X et 1028 X indique encore une fois que le dispositif est peu affecté par les pertes Joule malgré les fortes illuminations.

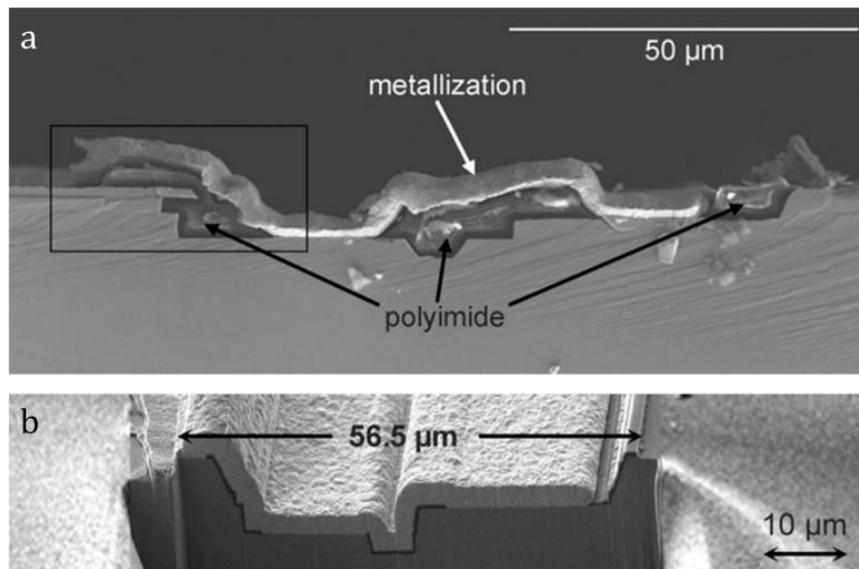


Figure 3-8: Images MEB de microsection d'une tranchée d'une interconnexion réalisée par : a) gravure humide et b) gravure sèche [121]

Une architecture de MIM triple jonction a été brevetée par Spectrolab en 1997 [106]. La figure 3-9 montre le design de ce MIM et sa légende associée. Dans ce brevet, les auteurs proposent l'utilisation d'une couche d'isolation (100) entre la sous-cellule inférieure en Ge (102) et le substrat (98), dont le matériau n'est pas communiqué. L'isolation des cellules est réalisée par la gravure de tranchées à travers les trois sous-cellules (116). Le contact de base (118) est quant à lui obtenu en réalisant une tranchée dans les sous-cellules jusqu'à la base du Ge (114). Le pad de contact de base est finalement relié à l'émetteur de la cellule adjacente (120). Cette architecture a été imaginée il y a plus de vingt ans mais n'a jamais été conçue expérimentalement.

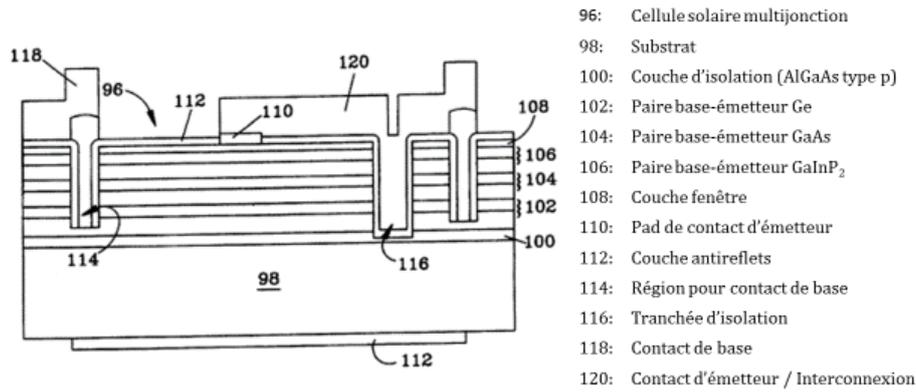


Figure 3-9: Design d'un MIM triple jonction proposé par Spectrolab [106]

3.2.4 Bilan de l'état de l'art sur les MIM

L'état de l'art a permis d'observer l'évolution des architectures et des matériaux utilisés pour la fabrication de MIM. Le tableau 3-1 résume les principaux travaux sur les MIM dédiés à la conversion solaire en fonction de leur architecture. On remarque notamment que l'efficacité la plus élevée pour un MIM monojonction en Si est de 21.8% sous 85 X. Une efficacité de 22.0% sous 199 X est atteinte avec une structure monojonction sur GaAs, matériau plus adéquat à la conversion du spectre solaire. Enfin, l'efficacité la plus élevée a été atteinte par un MIM basé sur une double jonction GaInP/GaInAs avec 26.0% sous 496 X, grâce à la meilleure fragmentation du spectre solaire par les sous-cellules pour la conversion photovoltaïque. L'utilisation d'une structure à trois jonctions (ou plus) permettrait donc logiquement d'atteindre de plus grandes efficacités. Cependant, bien que proposés pour une structure GaInP/GaInAs/Ge dans un brevet en 1997 par Spectrolab, aucun résultat n'a été démontré. L'emploi du germanium comme sous-cellule inférieure d'un MIM a été envisagé par l'utilisation de substrats *GOI* (*germanium on insulator*, germanium sur isolant) ou la croissance épitaxiale de germanium sur des substrats SI de GaAs. [104], [122], [123] Les travaux de ce projet de thèse ont cependant permis de proposer les premiers MIM triple jonctions basés sur Ge sans utiliser les techniques suggérées précédemment. La section suivante est consacrée aux procédés de fabrication de ces MIM.

Tableau 3-1: Résumé des travaux principaux pour les MIM dédiés à la conversion solaire

Technologie de MIM	Illustration architecture	Efficacité	Référence
Monojonction Si	Figure 4.2.c	19 % sous 300 X	[109]
Monojonction Si	Figure 4.2.f	21.8 % sous 85 X	[114]
Monojonction GaAs	Figure 4.3.a	13.9 % sous 1X	[115]
Monojonction GaAs	Figure 4.3.e	22.0 % sous 199 X	[119]
Double jonction GaInP/InGaAs	Figure 4.5	26.0 % sous 496 X 24.2 % sous 1028 X	[121]

3.3 Fabrication de MIM à triple jonction

Comme présenté §3.1.3, la fabrication de MIM requiert de répondre à quatre grands défis, qui seront adressés pour des structures triple jonctions dans cette partie :

3.3 Fabrication de MIM à triple jonction

- Les contacts électriques des cellules élémentaires doivent être sur la même face.
→ La fabrication de cellules avec leurs contacts d'émetteur et de base en face avant a été démontrée §2.4.2.
- Les cellules élémentaires doivent être isolées entre elles.
→ La singulation de cellules par gravure plasma a été montrée §2.5.
→ L'isolation des tranchées de singulation sera traitée §3.3.1.
- Les cellules élémentaires doivent être interconnectées.
→ L'interconnexion sera traitée en deux parties : la métallisation (§3.3.2) et la planarisation nécessaire pour que l'interconnexion soit effective (§3.3.3).
- La surface du MIM doit être optimisée.
→ L'optimisation de la surface des MIM sera traitée §3.3.5.

La figure 3-10 illustre des cellules avec les contacts en face avant, singulées sur un support en silicium, isolées par leur base grâce à une couche de SiO₂ de 500 nm préalablement déposée. Les dimensions données sont celles typiquement obtenues avec les procédés de fabrication détaillés dans le chapitre 2.

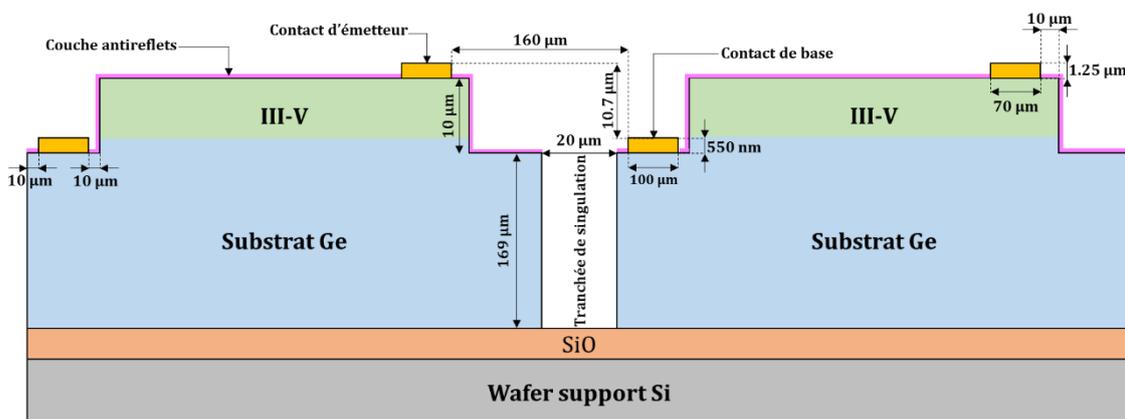


Figure 3-10: Vue en coupe de cellules avec contacts en face avant, singulées sur un substrat Si

3.3.1 Isolation par remplissage des tranchées de singulation

Une des conditions à la fabrication des MIM est l'isolation électrique des cellules élémentaires qui les composent. La singulation de celles-ci sur un support répond partiellement à cette condition. En effet, à l'inverse de la surface supérieure du substrat Ge, les flancs des tranchées gravées ne sont pas isolés par la couche antireflet, le dépôt de celle-ci étant effectué préalablement à la singulation (voir figure 3-10). Sans isolation, une métallisation d'interconnexion entre les contacts de base et d'émetteur de cellules adjacentes créerait un court-circuit via le substrat conducteur. Un matériau isolant sera déposé pour remplir ces tranchées de 169 µm par *spin-coating*, cette technique est compatible avec le dépôt d'une large variété de matériau fluide.

La viscosité du matériau isolant est un paramètre important pour assurer un bon remplissage des tranchées. La figure 3-11 illustre les différents types de remplissage de tranchées rencontrés selon la viscosité du matériau. On y remarque qu'un matériau trop fluide (*i.e.* à viscosité trop faible) ne permettra pas de couvrir les arrêtes de la tranchée et l'isolation électrique de la tranchée ne pourra pas être assurée (*cf* figure 3-11.a.). Au contraire un matériau trop visqueux ne permettra pas de remplir le fond des tranchées (*cf* figure 3-11.c.). La bulle d'air emprisonnée (*void*) est une source de défaillance potentielle pour un dispositif amené à éprouver des variations de température importantes. Des matériaux avec une viscosité ν comprise entre 10 cSt et 2000 cSt seront envisagés pour cette application, de manière à obtenir un remplissage tel que celui montré sur la figure 3-11.b. Le choix du matériau sera traité dans le §4.3.3.

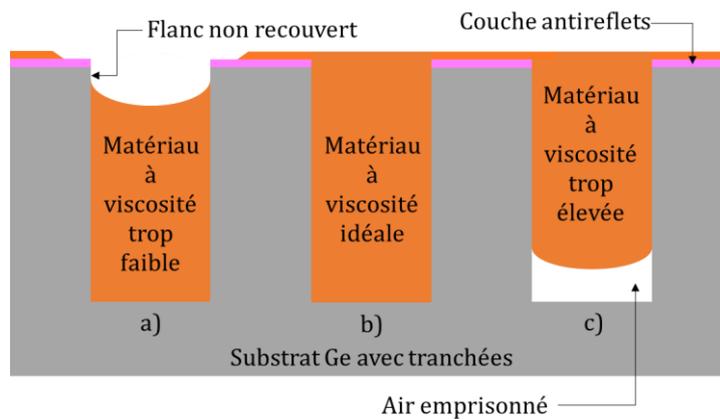


Figure 3-11: Remplissage de tranchées d'un substrat avec un matériau à viscosité a) trop faible, b) idéale et c) trop élevée

Après l'isolation des cellules, une marche d'environ $10.7 \mu\text{m}$ (hauteur *mesa* + hauteur contact d'émetteur - hauteur contact de base) subsiste entre le contact de base d'une cellule et le contact d'émetteur de la cellule adjacente à interconnecter ultérieurement. Cette hauteur de marche est importante et requiert idéalement le développement d'une métallisation d'interconnexion assez épaisse pour assurer une continuité électrique entre les cellules.

3.3.2 Contrainte sur l'épaisseur maximale de l'interconnexion

La métallisation d'interconnexion devra couvrir la différence de marche de $10.7 \mu\text{m}$ entre les deux contacts (*cf* figure 3-10). Cependant, l'évaporateur utilisé dans le cadre de ce projet, le Intlvac Nanochrome I, a une limite d'épaisseur de métal déposé par séquence de $3 \mu\text{m} \pm 10\%$ [124]. Un dépôt multiple (*e.g.* plusieurs dépôts de $3 \mu\text{m}$) requiert l'ouverture de la chambre de l'évaporateur et donc une oxydation de la métallisation déposée, qui peut affecter la qualité de celle-ci. Néanmoins, cet évaporateur dispose d'un système d'inclinaison de l'échantillon (10°) couplé à une rotation ($2 \text{tr.}\text{min}^{-1}$), qui contribue à limiter les risques de non-continuité du métal déposé sur des surfaces à fortes topographies. Cette technique sera donc utilisée avec une épaisseur de dépôt de $3 \mu\text{m}$ pour restreindre les risques de circuits ouverts dans les interconnexions.

3.3.3 Planarisation pour l'interconnexion

L'épaisseur du métal d'interconnexion déposé ($3 \mu\text{m}$) est trop faible pour permettre de relier les contacts de cellules adjacentes (hauteur de marche = $10.7 \mu\text{m}$). Pour cette raison, une étape de « planarisation », qui peut être effectuée en même temps et avec le même matériau que pour l'isolation des cellules par le remplissage des tranchées (*i.e.* avant la métallisation d'interconnexion), permet de réduire la hauteur de marche perçue par l'interconnexion en réalisant un pont entre les contacts. Dans cette étude, le terme de « planarisation » est utilisé par soucis de compréhension bien qu'une topologie subsiste sur le dispositif après cette étape.

a) Exigences dimensionnelles pour la planarisation

La figure 3-12 illustre une interconnexion typique entre deux cellules élémentaires utilisant un matériau planarisant. Deux paramètres critiques sont à considérer pour le succès de l'interconnexion des cellules :

- L'épaisseur $e_{p/c}$ du planarisant au niveau des contacts, qui dépend principalement de la viscosité et des solvants du matériau utilisé a été estimée à $3.5 \mu\text{m}$, qui correspond à l'épaisseur $e_{i/c}$ de $3 \mu\text{m}$ de métal évaporé à laquelle l'effet de l'inclinaison de l'échantillon lors de l'évaporation est ajoutée ($e_{p/c} = e_{i/c} + \tan(10^\circ) * e_{i/c}$).
- L'angle β formé par le planarisant au niveau des contacts, qu'on souhaite supérieur ou égale à 90° pour ne pas former de marche négative, qui augmenterait le risque de circuit ouvert.

Un compromis devra donc être fait pour que le matériau choisi réponde aux fonctions d'isolant et de planarisant.

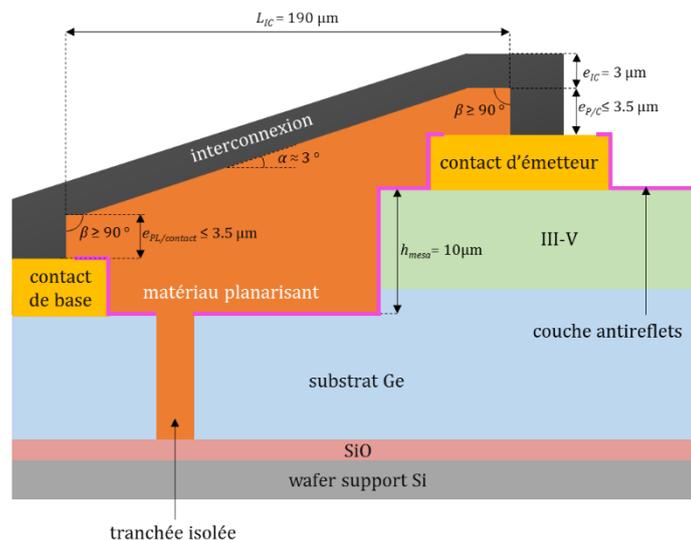


Figure 3-12: Schéma d'interconnexion typique entre deux cellules avec matériau planarisant

b) Compromis sur le choix du matériau

Le tableau 3-2 montre les avantages et inconvénients de plusieurs matériaux proposés pour la planarisation : le polyimide HD-41XX, le polybenzoxazole HD-88XX, l'époxy SU-8 20XX, ou le Spin-on Glass NDG-7000R [125-128].

Tableau 3-2: Avantages et inconvénients des matériaux planarisants

Matériau planarisant	Avantages	Inconvénients
Polyimide (PI) (type HD-41XX)	- Matériau qui a déjà été démontré comme planarisant dans la littérature (cf. §3.2.3.)	- Température de recuit permanent élevée (375 °C) ➢ <i>Un température de recuit élevée peut générer des shunts (diffusion des contacts)</i> - Rétraction (~50%) pendant recuit permanent ➢ <i>Mauvais contrôle du remplissage des tranchées d'isolation</i> - Résine photosensible mais négative ➢ $\beta \leq 90^\circ$
Polybenzoxazole (PBO) (type HD-88XX)	- Température de recuit permanent modérée (200 °C) - Résine photosensible positive ➢ $\beta \geq 90^\circ$	- Rétraction (~50%) pendant le recuit permanent ➢ <i>Mauvais contrôle du remplissage des tranchées d'isolation</i>
Époxy (type SU-8 20XX)	- Température de recuit permanent modérée (150-250 °C)	- Résine photosensible mais négative ➢ $\beta \leq 90^\circ$
Spin-on Glass (type NDG-7000R)	- Stabilité optique du SiO₂ ➢ <i>Propriétés insensibles aux UV</i> - Température de recuit permanent modérée (225 °C)	- Matériau non-photosensible ➢ <i>Nécessité d'une étape de gravure de SiO₂, qui risque de graver l'ARC</i> - Faible viscosité ➢ <i>Difficulté de remplissage des tranchées d'isolation</i> ➢ <i>Mauvaise couverture des arrêtes</i>

En comparant les différents avantages et inconvénients des différents matériaux, la résine époxy SU-8 a été sélectionnée particulièrement pour sa température de recuit permanent modérée et son caractère photosensible.

- Température de recuit permanent

Le choix s'est porté sur la résine SU-8 car la température de recuit permanent de cette résine est modérée (150-250°C). En effet, le recuit *RTA*, qui permet de faire diffuser les contacts Pd/Ge/Ti/Pd/Al dans la couche contact GaInAs (pour diminuer la résistance de contact), est effectué pendant 20 s à 300°C [129]. Le recuit permanent d'un planarisant dont la température est supérieure ou équivalente à 300°C mènerait à une diffusion non contrôlée et risquée des contacts d'émetteur et de base dans le semiconducteur. C'est pourquoi une résine dont la température de recuit permanent est en dessous de 300°C a été choisie.

- Photosensibilité

Le principe d'une résine photosensible est de modifier ses propriétés lors d'une exposition aux UV. Ainsi, l'exposition prolongée aux UV (*i.e.* en conditions d'opération pour le CPV) pourrait modifier les propriétés de la SU-8 et la dégrader. Cependant, cette résine a une photosensibilité négative, et se fige lors de l'exposition aux UV. L'utilisation d'un matériau non-photosensible tel que le *Spin-on Glass* aurait permis de s'affranchir de ces contraintes. Cependant, l'utilisation de ce matériau aurait nécessité une étape de gravure de SiO₂ pour définir les motifs complexes d'isolation/planarisation, à laquelle la couche antireflet (SiN_xH_y/SiO_xH_y) aurait été sensible.

3.3 Fabrication de MIM à triple jonction

C'est pourquoi, dans le cadre de la fabrication des premiers prototypes de MIM, le choix s'est porté sur un matériau photosensible, dont la structure est définissable par photolithographie. La polarité négative impose un angle β aigu ou droit uniquement (cf figure 3-12). Une optimisation de la photolithographie (paramètres d'exposition et recuits) sera donc nécessaire pour obtenir un $\beta = 90^\circ$ et ainsi limiter les risques de non-continuité des métallisations d'interconnexion (risques élevés si $\beta < 90^\circ$).

c) Épaisseur du matériau planarisant

Dans cette partie, les optimisations sont effectuées pour que le planarisant réponde aux exigences présentées dans le §3.3.3.a).

Deux résines SU-8 de viscosités différentes, la SU-8 2005 (45 cSt) et la SU-8 2015 (1250 cSt) ont été déposées par *spin-coating* en mono-, bi- et tricouches pendant 60 s à des vitesses comprises entre 2000 tr/min et 4000 tr/min.

La figure 3-13 montre des images MEB en perspective de ces différents dépôts faits avec de la SU-8 sur des structures test. La figure 3-13.a illustre un étalement monocouche de SU-8 2015 étalée 60 s à 4000 tr/min. On peut observer que la résine SU-8 durcie atteint bien le fond de la tranchée, sans qu'un vide soit créé à l'interface SU-8/fond de tranchée. Cependant, l'épaisseur du planarisant hors-tranchée est supérieure à $15\ \mu\text{m}$. Cette hauteur est trop importante ($e_{P/C} \gg 3.5\ \mu\text{m}$) pour répondre aux exigences statuées §3.3.3.a). Une solution moins visqueuse, la SU-8 2005, a donc été choisie.

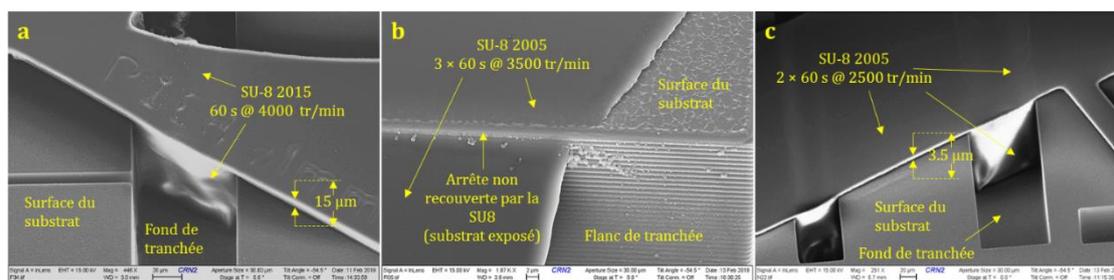


Figure 3-13: Images MEB en perspective de tests de planarisation avec de la SU-8 pour différents paramètres. Les paramètres d'étalement sont : a. monocouche de SU-8 2015 (60 s à 4000 tr/min), b. tricouche de SU-8 2005 (3 x 60 s à 3500 tr/min) et c. bicouche de SU-8 2005 (2 x 60 s à 2500 tr/min)

Sur la figure 3-13.b est montré un étalement tricouche de cette résine étalée 3×60 s à 3500 tr/min. Dans ce cas, l'épaisseur du planarisant est correcte ($e_{P/C} \leq 3.5\ \mu\text{m}$) mais la couverture du matériau planarisant n'est pas suffisante au niveau de l'arrêt d'une tranchée du substrat (cf figure 3-11.a). La figure 3-13.c montre un cas où la planarisation est correcte (étalement bicouche de SU-8 2005 2×60 s à 2500 tr/min). Dans ce cas, le remplissage des tranchées est correct (la résine atteint le fond sans qu'un vide soit créé) et la hauteur de marche maximale $e_{P/C}$ est d'environ $3.5\ \mu\text{m}$ (cf profilométrie et schéma associé sur la figure 3-14). Ainsi ces paramètres d'étalement répondent aux exigences pour la fabrication du MIM.

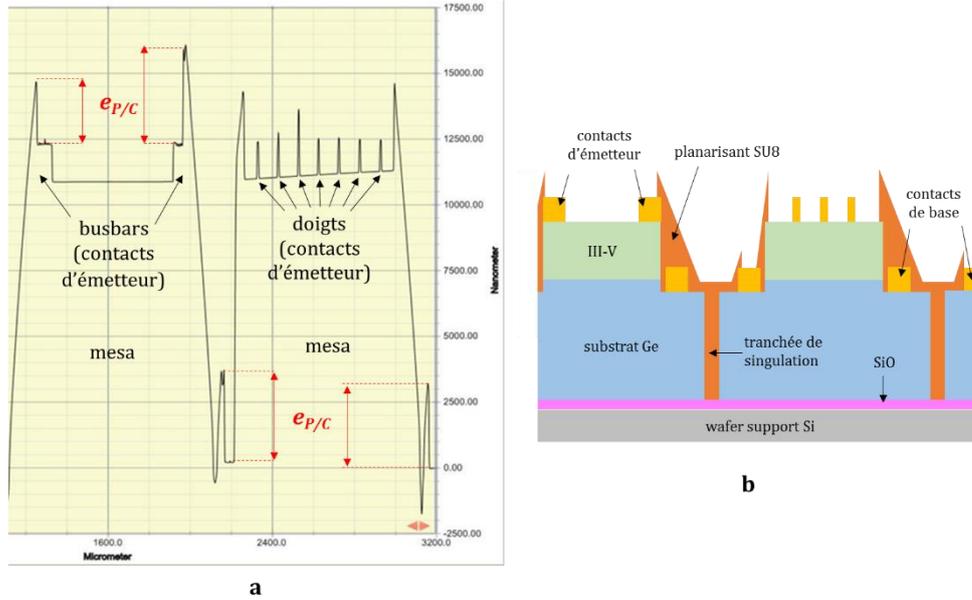


Figure 3-14: Profilométrie en coupe (a) et schéma en coupe associé (b) d'une planarisation bicouche de SU-8 2005 (2×60 s à 2500 tr/min) entre deux cellules élémentaires

d) Résumé des paramètres de fabrication pour la planarisation

Le tableau 3-3 regroupe les paramètres de fabrication utilisés avec la SU-8 pour la planarisation avec le besoin associé. À cette étape, la métallisation d'interconnexion peut être réalisée. Néanmoins, celle-ci ne doit pas induire de pertes par effet Joule notable, comme décrit dans la partie suivante.

Tableau 3-3: Résumé des paramètres de fabrication utilisés pour la planarisation

Étape de planarisation	Paramètres	Exigence technologique
Spin-coating	2×60 s à $2500 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$ Rampe de $500 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	- Remplissage des tranchées de singulation - Couverture des flancs des tranchées - Épaisseur raisonnable au niveau des contacts ($e_{P/C} < 3.5 \mu\text{m}$)
Recuit doux <i>sur plaque chauffante</i>	2×3 min 30 s à 95°C	- Durcissement de la résine jusqu'au fond des tranchées de singulation - Angle des marches de planarisant $\beta < 90^\circ$
Exposition <i>lampe $10 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2} \pm 0.2 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ à 400 nm</i>	$120 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$	
Recuit post-exposition <i>sur plaque chauffante</i>	5 min à 95°C	
Développement <i>immersion dans SU-8 developer</i>	3 min 30 s avec agitation	- Pas de surdéveloppement, qui créerait un profil de marche négatif et risquerait d'engendrer un circuit ouvert
Nettoyage <i>Plasma oxygène</i>	2 min à 75 W sous 300 mTorr	- Retrait des résidus de SU8 - Gravure de la SU8 restreinte pour conserver les motifs obtenus par photolithographie
Recuit permanent <i>sur plaque chauffante</i>	30 min à 200°C	- Température $< 300^\circ\text{C}$ pour éviter la diffusion non contrôlée des contacts ohmiques

3.3.4 Métallisation d'interconnexion

Dans cette partie, la largeur de l'interconnexion entre les cellules sera définie puis la réalisation de la métallisation sera effectuée.

a) Largeur minimale de l'interconnexion

Dans cette partie, la largeur minimale de la métallisation est calculée de manière à ce que les pertes Joule maximales dues à une interconnexion sous 1000 X ($P_{J_{IC}}^{1000X}$) soient négligeables (< 0.1%) devant la puissance maximale générée par un MIM de 4 cellules sous cette même concentration ($P_{max_MIM}^{1000X}$). On cherche donc à satisfaire :

$$P_{J_{IC}}^{1000X} < 10^{-3} \times P_{max_MIM}^{1000X} \quad (3-8)$$

Le MIM considéré est constitué de $N_{cell} = 4$ cellules de 1 mm de côté avec une surface active $S_{act_cell} = 0.9 \text{ mm}^2 = 9 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$ (exemple avec 10% d'ombrage dû aux métallisations), une densité de courant au point de puissance maximale $J_{Pmax_cell}^{1000X} = 13 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ et une tension au point de puissance maximale $V_{Pmax_cell}^{1000X} = 3.00 \text{ V}$ (valeurs approximatives tirées de la figure 2-25).

Le MIM génère une puissance maximale de:

$$P_{max_MIM}^{1000X} = N_{cell} \times V_{Pmax_cell}^{1000X} \times I_{Pmax_MIM}^{1000X} \quad (3-9)$$

où :

$$I_{Pmax_MIM}^{1000X} = S_{act_cell} \times J_{Pmax_cell}^{1000X} \quad (3-10)$$

soit :

$$I_{Pmax_MIM}^{1000X} = 73.13 \text{ mA}$$

Le courant généré par le MIM sous 1000 X est donc de 73.13 mA. L'application numérique de l'équation (3-13) donne ainsi :

$$P_{max_MIM}^{1000X} = 877.6 \text{ mW}$$

La puissance maximale générée par le MIM étudié sous 1000 X est de 877.6 mW. En reprenant l'inéquation (3-11), on a :

$$P_{J_{IC}}^{1000X} < 877.6 \text{ } \mu\text{W}$$

Les pertes Joule dues à l'interconnexion sous une illumination de 1000 X doivent donc être inférieures à 877.6 μW .

Or, les pertes Joule à 1000 X $P_{J_{IC}}^{1000X}$ dans une interconnexion de résistance $r_{s_{IC}}$, traversée par un courant $I_{P_{max_cell}}^{1000X}$ sont exprimées par :

$$P_{J_{IC}}^{1000X} = r_{s_{IC}} \times I_{P_{max_cell}}^{1000X}{}^2 \quad (3-11)$$

On cherche donc :

$$R_{s_{IC}} < \frac{P_{J_{IC}}^{1000X}}{I_{P_{max_cell}}^{1000X}{}^2} \quad (3-12)$$

L'application numérique donne alors :

$$R_{s_{IC}} < 164 \text{ m}\Omega$$

Ainsi, la résistance de l'interconnexion doit être inférieure à 164 mΩ pour satisfaire l'inéquation (3-11). Or, la résistance d'un élément conducteur rectiligne s'écrit :

$$R_{s_e} = \frac{\rho_e \times L_e}{e_e \times l_e} \quad (3-13)$$

avec ρ_e la résistivité du conducteur, L_e la longueur de l'élément, e_e son épaisseur et l_e sa largeur.

Dans cette partie, une interconnexion de longueur $L_{IC} = 190 \mu\text{m}$ et d'épaisseur $e_{IC} = 3 \mu\text{m}$ sera considérée (cf §3.3.2). De plus, l'aluminium ($\rho_{Al} = 28 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$) sera utilisé comme métal pour celle-ci pour assurer un contact électrique sur les contacts de base et d'émetteur (constitués de contacts ohmiques et dont la métallisation supérieure est en aluminium). La largeur de l'interconnexion doit alors satisfaire :

$$l_{IC} > \frac{\rho_{Al} \times L_{IC}}{R_{s_{IC}} \times e_{IC}} \quad (3-14)$$

dont l'application numérique donne :

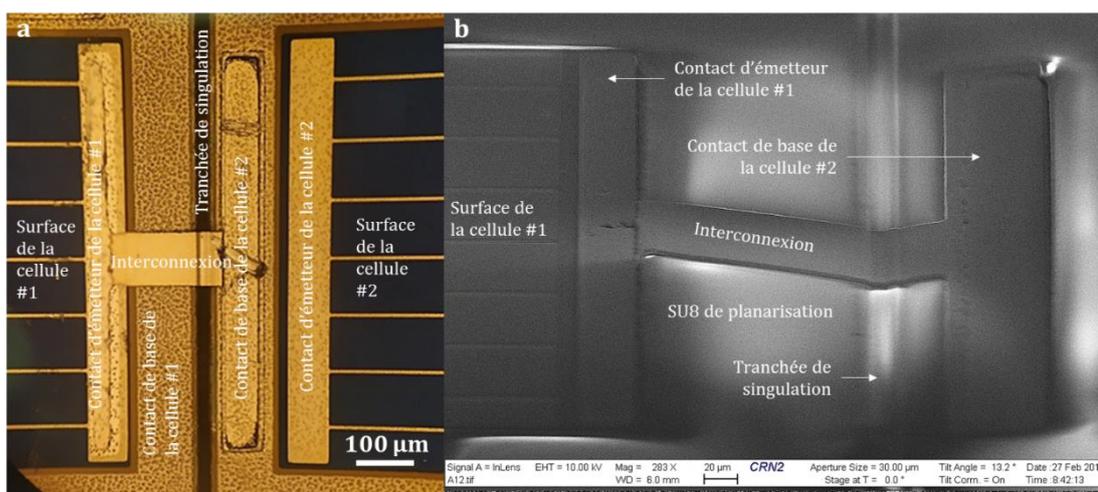
$$l_{IC} > 10.8 \mu\text{m}$$

En considérant le MIM précédemment présenté, une largeur minimale de 10.8 μm pour l'interconnexion en aluminium est donc nécessaire de sorte à ce que ses pertes Joule soient négligeables (< 0.1%) sous une concentration de 1000 X. La largeur maximale de l'interconnexion étant limitée à celle des *busbars* des cellules du MIM, une valeur intermédiaire de $l_{IC} = 100 \mu\text{m}$ sera choisie pour les MIM conventionnels.

3.3 Fabrication de MIM à triple jonction

b) Dépôt de la métallisation d'interconnexion

La figure 3-15 montre une vue de dessus obtenue au microscope optique (a) et une vue en perspective obtenue au MEB (b) d'une interconnexion en aluminium de 3 μm d'épaisseur et de 100 μm de large entre deux cellules. L'interconnexion métallique est déposée sur la SU-8 de planarisation et relie le contact d'émetteur de la cellule de gauche au contact de base de la cellule de droite, $\sim 10 \mu\text{m}$ plus bas. Sur la figure 3-15.a, on peut observer la tranchée de singulation entre les cellules et les contacts de base par transparence de la SU-8. Sur la figure 3-15.b, on peut distinguer la topographie des structures (tranchée, différence de hauteur des contacts).



3.3.5 Optimisation de la surface des MIM à triple jonction

a) Défi de l'optimisation de la surface des MIM

Un des défis technologiques pour la fabrication des MIM est l'optimisation de la surface. On cherche en effet à maximiser le rapport surface photoactive (semiconducteur illuminé) sur surface totale $\eta_{surface}$ pour que l'efficacité électrique du dispositif soit la plus grande possible. Les techniques de fabrication employées pour l'isolation et l'interconnexion et le design du MIM (nombre de cellules élémentaires, surface totale, ...) sont les paramètres qui affectent directement le rendement

surfacique. Le $\eta_{surface}$ le plus élevé présenté dans la littérature est de 100% avec un design basé sur Si [113], [114]. Ce design a permis d'atteindre le record d'efficacité pour la filière Si (21.8% sous 58 X) [114]. Helmers *et al.* ont démontré un MIM double jonction sur GaAs de 4.368 cm^2 avec un $\eta_{surface} = 94.3\%$ après optimisation des designs et techniques de fabrication [120], [121]. Cette optimisation a permis d'atteindre l'efficacité record pour un MIM (26.0% sous 496 X). Ces cas présentés prouvent la forte dépendance entre $\eta_{surface}$ et efficacité du dispositif. L'optimisation de la surface des MIM a également pour but d'exploiter au maximum le semiconducteur, particulièrement coûteux pour les structures multijonctions. Dans cette

partie seront traitées les principales stratégies pour optimiser la surface du MIM triple jonction développé dans le cadre de cette thèse.

b) Optimisation du contact d'émetteur

Le contact d'émetteur d'une cellule élémentaire comprend les doigts pour la collection des porteurs et le *busbar* pour l'assemblage.

Le design des doigts (forme, espacement, largeur et hauteur) peut être optimisé pour une application donnée (profil lumineux sur la cellule, concentration visée). L'objectif est de maximiser l'efficacité en trouvant le compromis collection/ombrage des doigts. Cet aspect est traité §2.4.1a) du chapitre précédent et les mêmes designs de contacts émetteurs de cellules seront utilisés ici.

Le *busbar* est le *pad* électrique sur lequel le microcâblage est effectué pour connecter le contact d'émetteur d'une cellule standard à son support. Typiquement, des *busbars* de 250 μm de large sont utilisés sur des cellules CPV standards, qui engendrent à eux seuls un ombrage de 14.2% des cellules 3.5×3 mm² d'Azur Space [21]. Cet ombrage important est inconcevable pour des cellules de très petites dimensions (*i.e.* < mm²). Les techniques de microfabrication utilisées pour l'interconnexion de cellules élémentaires dans les MIM permettent logiquement de s'affranchir du *wirebonding* et donc de ces larges *busbars*. Cependant, dans le cadre du développement des premiers prototypes de MIM, la taille des *busbars* n'a pas été optimisée. Les optimisations réalisées sur les contacts électriques ont été faites sur les contacts de base en face avant, tel que décrit dans le paragraphe suivant.

c) Optimisation du contact de base

Il a été montré qu'un contact de base de 50 μm de large était suffisant pour qu'une cellule de 500 μm de côté fonctionne efficacement sous haute concentration (*cf* §2.4.2). Ceci représente 30.6% de la surface du dispositif dans ces conditions (contact non-optimisée) mais ces dimensions peuvent varier selon l'application visée, la qualité du contact électrique et la forme du contact. La figure 3-16 illustre le η_{surface} en fonction des dimensions d'un MIM carré, du nombre de cellules élémentaires qui le composent (4 ou 9 cellules) et de la part de surface dédiée au contact de base en face avant (5%, 15% ou 30% de la surface de la cellule élémentaire). On remarque l'intérêt d'utiliser des contacts de base les moins grands possibles pour pouvoir tirer un η_{surface} le plus élevé possible. Ainsi, le η_{surface} maximal attendu avec des contacts de base en face avant représentant 5% de la surface d'une cellule tend vers ~90.6%. Cette valeur tombe à ~59.1% pour un MIM utilisant des contacts de base de 30% de la surface de la cellule. L'utilisation du contact de base en face avant a été réalisable par l'utilisation de la gravure plasma pour l'isolation électrique des cellules. Cette technique est également utilisée pour la singulation des cellules élémentaires du MIM et permet de restreindre la surface nécessaire à l'interconnexion, comme montré dans la section suivante.

3.3 Fabrication de MIM à triple jonction

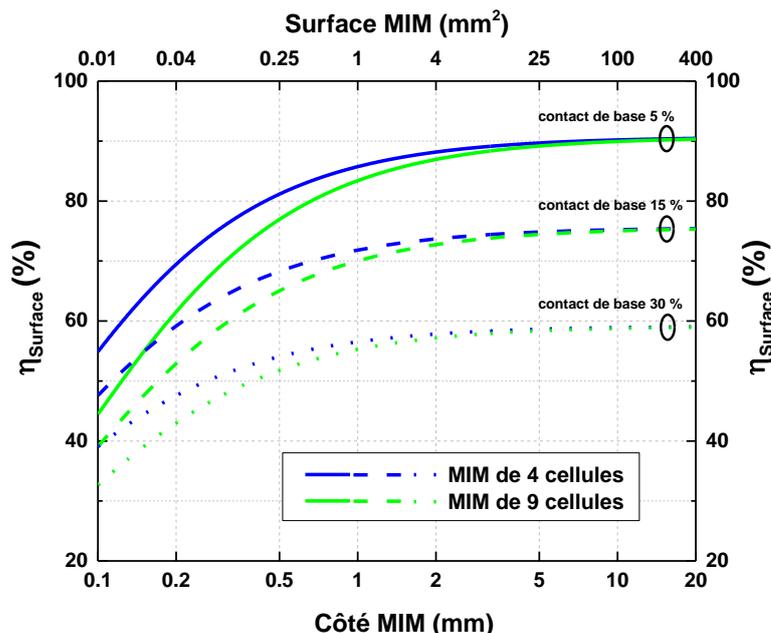


Figure 3-16: Rendement de surface d'un MIM carré en fonction de ses dimensions, du nombre de cellules élémentaires qui le compose et la part de surface du contact de base en face avant. Une singulation par plasma avec une largeur de ligne de découpe de 15 μm est considérée.

d) Isolation électrique et singulation par gravure plasma

Comme décrit dans le chapitre 2, l'isolation des sous-cellules par la formation de *mesa* et la singulation des cellules élémentaires ont été étudiés en utilisant la technologie de gravure plasma. L'utilisation de la gravure plasma pour la formation de *mesas* a permis le développement de contacts de base sur la face avant du substrat et cette architecture est nécessaire à la fabrication de MIM. La gravure anisotrope développée permet une occupation moindre sur le *wafers*. Cette propriété ne pourrait pas être obtenue avec des techniques alternatives telles que la gravure humide et la découpe à la scie (cf §2.3 du chapitre 2). L'emploi de la gravure plasma pour la singulation des cellules est détaillé §2.6 du chapitre 2. Il y est montré que la largeur des lignes de découpe obtenues avec une scie diamant est d'environ 100 μm tandis que celles obtenues par gravure plasma peuvent être réduites à 15 μm (cf figure 2.10). Ainsi, l'utilisation de la gravure plasma permet de réduire fortement la surface entre deux cellules élémentaires d'un MIM.

e) Rendement de surface d'un MIM en fonction du nombre de cellules qui le composent

La figure 3-17 illustre le $\eta_{surface}$ attendu en fonction des dimensions d'un dispositif, selon le nombre de cellules élémentaires qui le composent (1 : cellule simple, 4 ou plus : MIM) lorsque la singulation plasma est utilisée (largeur de ligne de découpe = 15 μm). Il y apparaît clairement que plus le dispositif est de grandes dimensions plus le $\eta_{surface}$ attendu est élevé. On notera par exemple qu'un dispositif de 1 mm² constitué d'une cellule simple singulée par plasma peut fournir un $\eta_{surface} = 97.0\%$ alors qu'un MIM de mêmes dimensions, constitué de 100 cellules (865 μm de côté) aura un $\eta_{surface} = 75.6\%$. Ces valeurs ne prennent pas en compte la surface nécessaire pour le contact de base.

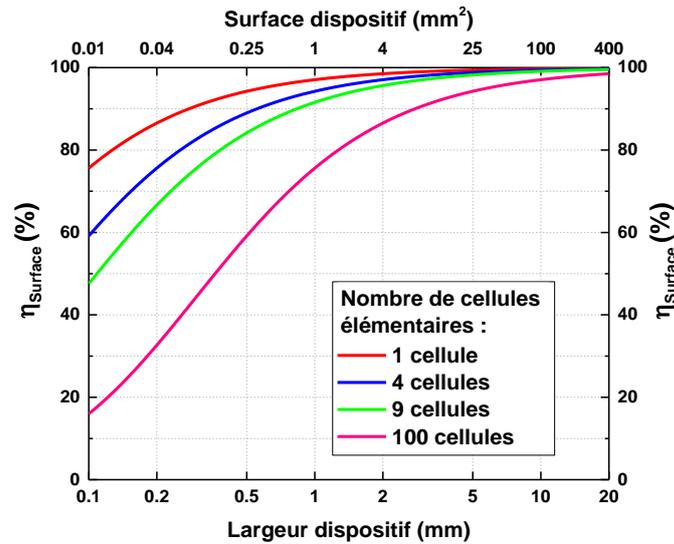


Figure 3-17: Rendement de surface d'un dispositif carré selon ses dimensions et le nombre de cellules élémentaires qui le compose. Une singulation par plasma avec une largeur de ligne de découpe de 15 μm est considérée.

f) Designs des prototypes proposés

La figure 3-18 illustre le *layout* du photomasque utilisé pour la fabrication des MIM. Les designs incluent des MIM de forme carrée, circulaire et hexagonale dont les dimensions sont comprises entre 0.196 mm^2 et 9 mm^2 . Les prototypes fabriqués dans ce chapitre ont un $\eta_{surface}$ qui varie de 46.7% (MIM de sept cellules hexagonales, 2.9 mm de côté) à 73.0% (MIM circulaire de deux cellules, 1.15 mm de diamètre). Ceci est le résultat des choix qui ont été faits pour la démonstration d'une preuve de concept, non optimisée (*e.g.* les contacts de base font 100 μm de large pour des cellules de 750 μm de côté). Plusieurs optimisations sont cependant envisageables, comme il a été montré précédemment, pour que le $\eta_{surface}$ soit le plus élevé possible ($\eta_{surface} > 85\%$ pour un MIM de 1 mm^2 de 4 cellules élémentaires singulées par une ligne de découpe de 15 μm et avec une surface dédiée au contact de base en face de 5%).

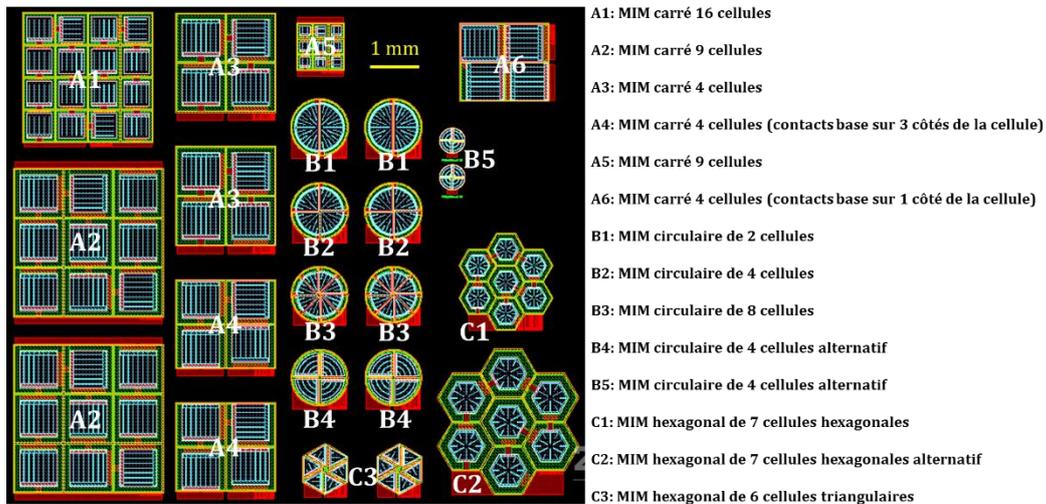


Figure 3-18: *Layout* du photomasque montrant les différents designs MIM proposés

3.3 Fabrication de MIM à triple jonction

g) Prototypes fabriqués

Les procédés de microfabrication décrits §3.3 ont permis de fabriquer plusieurs MIM triple jonction fonctionnels avec des formes et dimensions variables. Quatre de ces prototypes, caractérisés dans cette partie, sont montrés sur la figure 3-19. On y retrouve un MIM carré de 2 mm de côté composé de 4 cellules (figure 3-19.a), un MIM carré de 3 mm de côté composé de 9 cellules (figure 3-19.b), un MIM hexagonal de 3 mm de côté composé de 7 cellules (figure 3-19.c) et un MIM circulaire de 1 mm de diamètre composé de 2 cellules (figure 3-19.d).

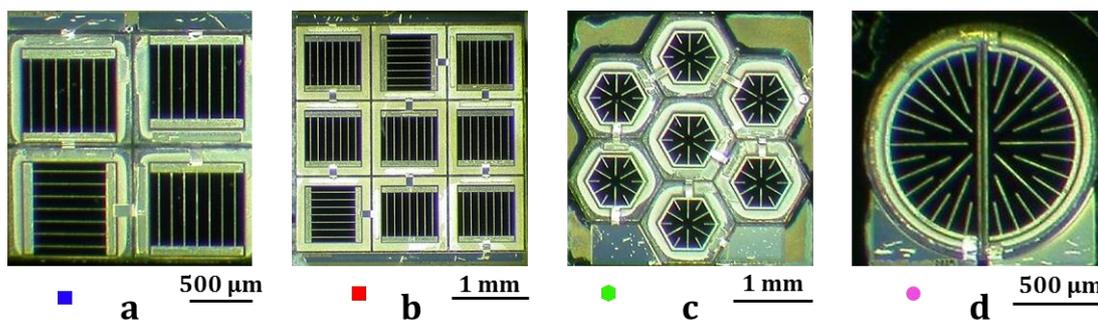


Figure 3-19: Exemple de prototypes de MIM triple jonction fabriqués avec a) un MIM carré de 4 cellules, b) un MIM carré de 9 cellules, c) un MIM hexagonal de 7 cellules et d) un MIM circulaire de 2 cellules.

3.3.6 Bilan sur la fabrication des MIM

Dans cette partie ont été présentés les procédés de microfabrication développés pour les premiers MIM à triple jonction reportés dans la littérature. Les réponses aux quatre grands défis technologiques des MIM ont été apportées, avec en particulier :

- L'isolation des cellules par remplissage des tranchées de singulation pour empêcher les court-circuits entre les cellules adjacentes. Pour cela, de la résine photosensible SU-8 a été utilisée et a démontré sa capacité à effectivement remplir les tranchées de singulation de 169 µm de profondeur et donc à isoler les cellules entre elles avant leur interconnexion en série.
- La planarisation permettant à l'interconnexion ultérieure de connecter le contact de base d'une cellule au contact d'émetteur d'une autre malgré le dénivelé entre ces deux contacts. Cette étape a été réalisée en même temps que l'isolation des cellules par remplissage des tranchées de singulation avec de la résine SU-8. Ainsi, une pente douce ($\alpha \approx 3^\circ$) a été obtenue entre les contacts de base et d'émetteur à relier pour limiter les risques de discontinuité du métal d'interconnexion.
- L'interconnexion métallique entre les cellules. Cette étape a été réalisée avec l'évaporation de 3 µm d'aluminium par-dessus la résine SU-8 de planarisation et a permis d'effectivement connecter les cellules élémentaires des MIM en série.
- L'optimisation de la surface des MIM permettant d'avoir une surface photoactive la plus importante possible. Pour cela, les designs des contacts d'émetteur et de base en face avant ont été partiellement optimisés et la gravure plasma a été utilisée pour l'isolation et la singulation des cellules élémentaires (possibilité de tranchées de singulation de 15 µm de large seulement entre les cellules). Un rendement de surface de wafer $\eta_{surface}$ de 73.0% a été atteint dans le cadre du développement des prototypes.

Il a été cependant montré qu'une optimisation plus poussée, qui ne fait pas l'objet de cette étude, pourrait permettre au $\eta_{surface}$ de s'approcher de 85%.

Après la fabrication des dispositifs, ceux-ci sont caractérisés sous un soleil et sous illumination de haute intensité. Cet aspect est traité dans la partie suivante. Les MIM fabriqués avec les techniques présentées n'ont cependant pas été tous fonctionnels. Leur défaillance a été attribuée à la hauteur de marche critique $e_{p/c}$ trop importante, résultant en des circuits ouverts dans les interconnexions (cf §3.3.3a).

3.4 Caractérisation des MIM à triple jonction

3.4.1 Mesures électriques sous illumination « un soleil »

Les quatre prototypes de MIM fonctionnels présentés sur la figure 3-19 ont été caractérisés sous un soleil (AM1.5D, 1000 W/m², 25°C). La figure 3-20 illustre les caractéristiques $J-V$ de ceux-ci et leurs paramètres électriques (V_{OC} , FF , J_{SC}) sont reportés dans le tableau 3-4. Le tableau 3-4 inclut également les caractéristiques d'une cellule unitaire de 800 μm de côté, dont les dimensions sont comparables à celles des 4 (figure 3-19.a) et 9 (figure 3-19.b) cellules élémentaires des MIM carrés (cellules de 750 μm de côté).

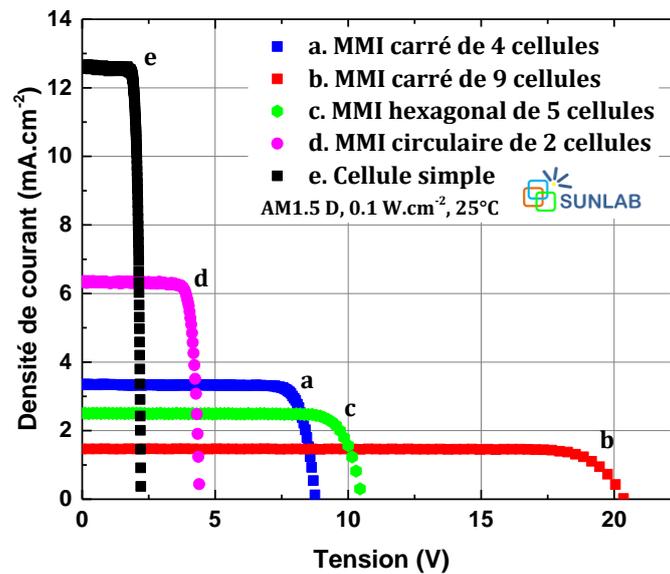


Figure 3-20 : Caractéristiques J-V mesurées sous un soleil des MIM et d'une cellule simple. Seule une série de 5 cellules du MIM hexagonal est mesurée en raison d'une interconnexion défaillante.

La comparaison des performances des MIM avec celles d'une cellule simple permet de s'assurer de la qualité de la fabrication. En effet, on s'attend à une tension de circuit ouvert du MIM V_{OC}^{MIM} :

$$V_{OC}^{MIM} = n_{cells_MIM} \times V_{OC}^{cell} \quad (3-15)$$

3.4 Caractérisation des MIM à triple jonction

où n_{cells_MIM} est le nombre de cellules composant le MIM et V_{OC}^{cell} est la tension de circuit ouvert d'une cellule simple.

On s'attend aussi à ce que la densité de courant de court-circuit du MIM (courant de court-circuit normalisé par la surface photoactive) J_{SC}^{MIM} soit :

$$J_{SC}^{MIM} = \frac{J_{SC}^{cell}}{n_{cells_MIM}} \quad (3-16)$$

où J_{SC}^{cell} est la densité de courant de court-circuit d'une cellule simple.

Enfin, si les interconnexions n'induisent pas de pertes résistives, comme prévu §3.1.1), le *fill factor* du MIM FF^{MIM} devrait être égal à :

$$FF^{MIM} \approx FF^{cell} \quad (3-17)$$

où FF^{cell} est le *fill factor* d'une cellule simple.

Les performances attendues pour chaque MIM, basées sur les caractéristiques de la cellule simple, sont également reportées dans le tableau 3-4. Il est important de noter que le MIM hexagonal a montré une défaillance sur une de ses interconnexions, ce qui n'a permis de mesurer qu'une série de cinq cellules sur les sept attendues. Les performances attendues seront donc montrées dans le tableau 3-4, mais ne sont pas analysées dans les paragraphes suivants.

Tableau 3-4 : Paramètres électriques mesurés et espérés sous un soleil des MIM fabriqués et paramètres électriques d'une cellule simple de 800 μm de côté. Seule une série de 5 cellules sur le MIM hexagonal a été mesurée en raison d'une interconnexion défaillante.

Paramètres électriques « un soleil » (AM1.5D, 0.1 W.cm ⁻² , 25 °C)	a ■ MIM carré de 4 cellules	b ■ MIM carré de 9 cellules	c ● MIM hexagonal de 5 cellules	d ● MIM circulaire de 2 cellules	e ■ Cellule simple
V_{oc} [V] (valeur espérée, basée sur les performances de la cellule simple)	8.77 (~8.84)	20.36 (~19.89)	10.53 (~11.05)	4.42 (~4.42)	2.21
FF [%] (valeur espérée, basée sur les performances de la cellule simple)	84.19 (~83.67)	85.12 (~83.67)	82.36 (~83.67)	84.11 (~83.67)	83.67
J_{sc} [mA.cm⁻²] (valeur espérée, basée sur les performances de la cellule simple)	3.34 (~3.16)	1.46 (~1.41)	2.51 (~2.53)	6.33 (~6.33)	12.65

Les paramètres tirés des caractéristiques J - V sous un soleil valident la fabrication des 4 MIM présentés sur la figure 3-19. En effet, une variation de V_{oc} mesuré comprise entre -0.8% (MIM carré de 4 cellules) et +2.4% (MIM carré de 9 cellules) par rapport à celui attendu en se basant sur le V_{oc} de la cellule simple de 800 μm de côté a été obtenue. Ceci indique que les procédés utilisés pour la fabrication de MIM n'ont globalement pas induits de défauts sur les cellules élémentaires qui auraient pu affecter ce paramètre. Le léger gain observé dans certains cas est

attribué aux réflexions plus importantes sur la surface des dispositifs en raison de la présence des pistes d'interconnexion (cas où un courant plus important est photogénéré).

Le FF mesuré est également satisfaisant pour tous les MIM. En effet, il est compris entre 84.11% (MIM circulaire de 2 cellules) et 85.12% (MIM carré de 9 cellules). Ces valeurs sont supérieures au FF d'une cellule simple (83.67%), ce qui indique que les interconnexions microfabriquées ne génèrent pas d'effet résistif notable sous une illumination « un soleil » et est en accord avec l'équation (3-20).

Enfin, le J_{sc} répond également aux attentes en étant compris entre 1.46 mA.cm^{-2} pour le MIM carré de 9 cellules et 6.33 mA.cm^{-2} pour le MIM circulaire de 2 cellules. Ces valeurs sont supérieures (jusqu'à +5.7% pour le MIM carré de 4 cellules) ou égales (pour le MIM circulaire de 2 cellules) aux densités de courant attendues en se basant sur les données d'une cellule simple de $800 \mu\text{m}$ de côté. Le gain en J_{sc} observé semble confirmer l'hypothèse de réflexions plus importantes à la surface des MIM dans certains cas, en raison de la présence des pistes d'interconnexion et des contacts de base en face avant.

Les mesures sous illumination « un soleil » des premiers prototypes de MIM triple jonction ont démontré des caractéristiques très prometteuses, du même ordre que celles attendues en se basant sur les mesures d'une cellule simple de $800 \mu\text{m}$ de côté. Ce bon comportement électrique doit cependant être validé sous illumination haute intensité afin de s'assurer que les MIM développés sont peu affectés par les pertes Joule dans de telles conditions.

3.4.2 Mesures électriques certifiées en fonction de la concentration

Le flash tester AlphaOmega dont dispose SUNLAB, U.Ottawa, Canada possède un sourcemètre limité en tension à 10 V. Pour cette raison, des mesures $I-V$ certifiées sous haute intensité lumineuse d'un MIM rectangulaire de 4 cellules ont été réalisées au laboratoire ISE de l'institut Fraunhofer en Allemagne. En effet, le V_{oc} de celui-ci sous concentration est attendu comme étant supérieur à 10 V (*i.e.* $V_{oc} > 3 \text{ V}$ par cellule sous concentration, *cf* §2.6).

La figure 3-21 illustre le V_{oc} (en haut), le FF (au centre) et l'efficacité η (en bas), normalisée par la surface active du MIM. Il peut y être observé que le V_{oc} atteint le seuil de 12 V (soit 3 V par cellule) à partir de 300 X environ et atteint 12.43 V (3.11 V par cellule) sous 1231 X. Une efficacité η maximale de 35.08% est atteinte sous 798 X. Cette valeur de concentration élevée pour laquelle l'efficacité est maximale indique que les pertes par effet Joule ont pu être restreintes. En effet, pour cette valeur de concentration, le FF est toujours de 84.4%. On peut également noter que l'efficacité reste aussi haute que 34.7%, avec un FF de 82.7% sous une concentration de 1231 X, ce qui indique que les interconnexions entre les cellules du MIM n'ont pas induit de pertes résistives importantes. Ainsi, avec ses très bonnes caractéristiques électriques, le premier MIM triple jonction démontré détient le record d'efficacité tout MIM confondu.

3.4 Caractérisation des MIM à triple jonction

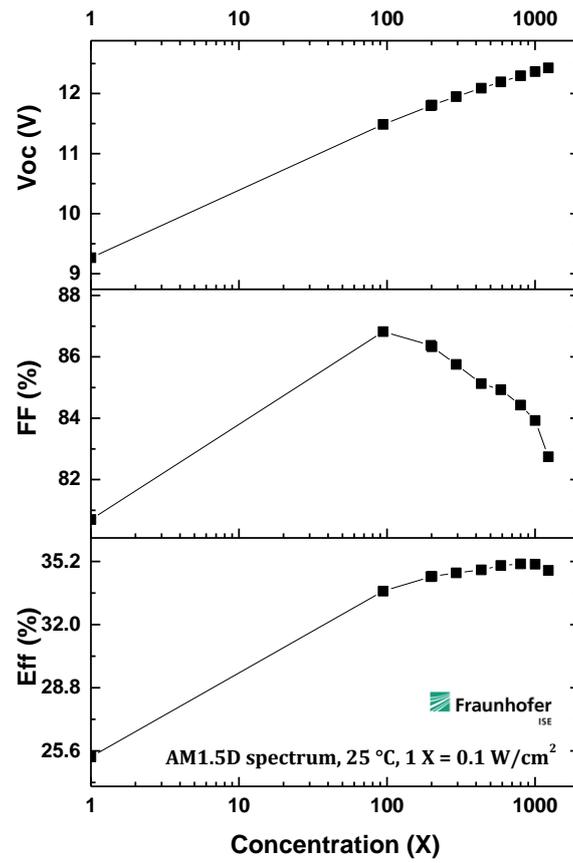


Figure 3-21: Caractéristiques électriques (V_{oc} , FF et efficacité) d'un MIM de 4 cellules en fonction de la concentration

Conclusion du chapitre 3

Basés sur les MIM qui ont déjà été développés dans la littérature, des procédés pour fabriquer les premier MIM à triple jonction ont été présentés dans ce chapitre. Ils ont permis de démontrer que de multiples designs (rectangulaire, circulaire, hexagonal) et l'interconnexion en série d'un nombre variable de cellules (2 à 9) sont réalisables. La possibilité d'optimisation de la surface des MIM a été discutée, de sorte à augmenter le $\eta_{surface}$, pour lequel des valeurs supérieures à 85% peuvent être attendues (contre 73.0% au maximum pour les prototypes fabriqués). La variété des designs de MIM a également eu pour effet de fournir des couples courant-tension variables. En effet, les mesures $I-V$ sous un soleil ont montré que le J_{SC} pouvait varier entre 1.46 mA.cm^{-2} et 6.33 mA.cm^{-2} et le V_{OC} entre 4.42 V et 20.36 V, valeurs en adéquation avec les valeurs d'une cellule unitaire. Le FF , similaire pour une cellule unitaire et un MIM, indique que l'interconnexion n'a pas généré des pertes résistives supplémentaires, validant les procédés de fabrication. Cet aspect a été confirmé par des mesures certifiées sous haute concentration pour lesquelles une efficacité maximale de 35.1% sous 798 X a permis d'établir, à notre connaissance, le record d'efficacité obtenue à ce jour, toutes technologies de MIM confondues.

Chapitre 4: Essais de vieillissement accéléré pour l'évaluation de la robustesse des microcellules

Ce chapitre décrit les résultats de l'étude de robustesse des microcellules développées dans le cadre de ce projet. Bien que le micro-CPV semble avantageux, il ne peut se déployer à large échelle que si ses performances sont durables dans le temps, sous peine de rester une curiosité technologique. Ainsi, dans cette section, l'effet de la réduction de la taille des cellules sur leur robustesse est présenté. Après avoir introduit quelques rappels sur les aspects de robustesse, fiabilité et vieillissement accéléré, les spécificités du CPV à considérer pour une étude de robustesse ou de fiabilité sont introduites. Un état de l'art sur les différents essais, présentés dans la bibliographie, est dressé avant de définir la méthodologie suivie pour l'étude de robustesse dans le cadre de ce projet. Le design des tests de vieillissement accéléré et les dispositifs étudiés sont décrits. L'évolution des performances des cellules, selon leurs particularités technologiques (présence d'une couche antireflet ou non, variation des dimensions) est ensuite analysée. Pour terminer, les résultats obtenus sont analysés et discutés.

4.1 Robustesse dans le CPV

La clé pour l'accès au marché d'une technologie photovoltaïque réside dans la réduction de son *LCOE* (*Levelized Cost of Electricity*, cf. §1.1.1). Pour réduire ce *LCOE*, soit l'efficacité de technologie doit augmenter, soit sa durée d'opération de celle-ci doit être allongée, en conséquence sa fiabilité doit être accrue. Dans cette partie, les notions liées à la robustesse de composants, leurs défaillances et les essais de vieillissement accéléré sont présentées. Les particularités du CPV pour la mise en œuvre d'essais sont discutées puis un état de l'art sur les essais de vieillissement accéléré sur des cellules dédiées au CPV est dressé.

4.1.1 Définitions

a) Fiabilité et robustesse

La fiabilité d'un système S est définie par sa capacité à accomplir une fonction pendant une durée donnée, dans des conditions nominales. Cette notion relève du domaine des probabilités où la fiabilité R à un instant t est décrite par :

$$R(t) = \text{Prob}(S \text{ fonctionne sur } [0; t]) \quad (4-1)$$

Il n'existe pas de définition claire de la robustesse d'un système. Cependant, Johannesson *et al.* déclarent « les défaillances générées par de mauvais designs, une utilisation hors conditions nominales ou une mauvaise qualité peuvent être attribuées à un manque de robustesse » [130].

Fondamentalement, la robustesse peut être définie par la tolérance d'un système vis à vis de sources de variation, par exemple sur des procédés de fabrication. Ainsi, un système robuste peut tomber en panne durant sa durée de vie et un système fiable n'est pas nécessairement robuste. Cette notion a d'autant plus d'importance qu'une technologie est peu mature, pour laquelle une approche *Design for Reliability* (*DfR*, design pour la fiabilité) peut être mise en place [131]. Cette approche met en avant le lien qui existe entre les deux notions, où la fiabilité est assurée par un design robuste.

Dans tous les cas, l'objectif est de repousser au maximum l'arrivée de défaillances qui peuvent survenir en conditions opérationnelles, lesquelles sont décrites dans le paragraphe suivant.

b) Défaillances

Les défaillances sont définies par les événements qui font qu'un dispositif considéré ne fonctionne plus tel que cela avait été spécifié pour des conditions données. Aussi, on parle soit de mode de défaillance, qui est le paramètre affecté (*e.g.* un paramètre électrique comme la tension) ou de mécanisme de défaillance, qui est l'origine physique de celle-ci (*e.g.* diffusion non contrôlée d'un métal dans un matériau semiconducteur). Selon comment elles affectent le dispositif, les défaillances peuvent être soit catastrophiques soit graduelles [31].

- Une défaillance catastrophique résulte en un changement abrupt et non-négligeable des performances d'un dispositif. Ce type de défaillances est généralement observé en « mortalité infantile », c'est-à-dire peu de temps après leur mise en fonctionnement et résulte généralement de défauts intrinsèques à la fabrication.

- Une défaillance graduelle correspond à une baisse légère des performances avec le temps. Par exemple, dans le domaine du photovoltaïque, il est admis qu'un module ne répond pas aux spécifications si sa puissance chute de plus de 1% par an dans son environnement [132].

Quel que soit le type de défaillance rencontré, des critères doivent être fixés pour désigner quand un dispositif ne répond pas aux exigences pour sa mission. S'agissant du domaine du CPV, ce critère n'est pas clairement défini bien que des valeurs de chute de la puissance maximale des cellules de 5% ou 10% aient été fixées dans par les stratégies de tests accélérés dans la littérature [133], [134]. En effet, une étude de fiabilité ou de robustesse de dispositifs repose généralement sur des tests de vieillissement accéléré dont un précautionneux design est nécessaire.

4.1.2 Vieillissement accéléré

L'apparition de défaillances dans un système est accélérée par le niveau de stress que celui-ci subit, en termes de conditions d'utilisation (niveau et fréquence des sollicitations) et d'environnement (température, humidité, vibrations...) [135].

a) Modèles d'accélération

L'association de modèles de fiabilité et de modèles d'accélération permettent de concevoir des essais de vieillissement accéléré. Ici, l'objectif est d'augmenter le stress par rapport aux conditions opérationnelles pour réduire la durée du test. Pour cela, on fait généralement l'hypothèse que seul le paramètre d'échelle de la loi de fiabilité est modifié par le niveau de stress. Ceci est illustré sur la figure 4-1, où la forme des distributions des défaillance est inchangée entre les conditions nominales et accélérées.

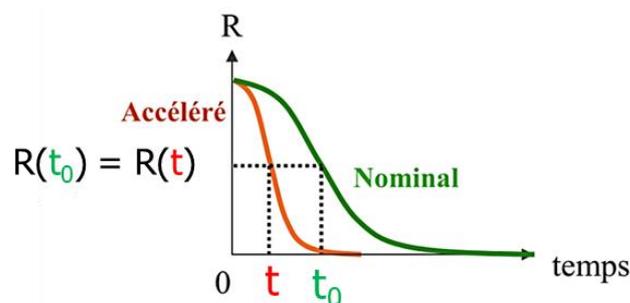


Figure 4-1: Modèle standard de vie accélérée

De ces modèles d'accélération, on définit un facteur d'accélération AF égal au rapport entre la vitesse de dégradation ou de la durée de vie dans les conditions nominales et dans les conditions accélérées. Ainsi, la fiabilité dans des conditions accélérées peut s'écrire :

$$R(t) = R_0(AF \times t) \quad (4-2)$$

où R_0 est la fiabilité dans les conditions nominales.

4.1 Robustesse dans le CPV

Le modèle observé sur la figure 4-1 est régi par des lois d'accélération décrites dans la section suivante.

b) Lois d'accélération usuelles

Plusieurs lois d'accélération peuvent être utilisées dans le modèle d'accélération présenté dans la section précédente [135]. Celles-ci dépendent du type de contraintes actives (stress), comme montré dans cette section.

- Loi d'Arrhenius (thermique)

La loi d'Arrhenius permet de modéliser l'accélération due au stress en température. Sous cette loi, le AF s'écrit :

$$AF = e^{\frac{E_a}{K}(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T})} \quad (4-3)$$

où E_a est l'énergie d'activation, K est la constante de Boltzmann, T_0 est la température dans les conditions nominales et T est la température dans les conditions accélérées.

- Loi d'Eyring (thermo-électrique)

La loi d'Eyring permet de modéliser l'accélération due à l'action conjointe de la température et de la tension. Le facteur d'accélération s'écrit :

$$AF = e^{\frac{E_a}{K}(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T})} \left(\frac{V}{V_0}\right)^m \quad (4-4)$$

Avec V la tension sous test, V_0 la tension d'opération nominale et m un intervalle de confiance.

- Loi de Norris-Landzberg (cyclage thermique)

La loi de Norris-Landzberg permet de modéliser l'accélération due à un cyclage thermique du système. Cette loi mène au facteur d'accélération :

$$AF = e^{\frac{E_a}{K}(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T})} \left(\frac{\Delta T}{\Delta T_0}\right)^m \quad (4-5)$$

Avec ΔT l'excursion en température et ΔT_0 l'excursion en température en conditions nominales. Des expressions dérivant de celle-ci peuvent inclure la vitesse de changement de température et la fréquence des changements de température.

Les différentes lois présentées permettent d'exploiter le modèle d'accélération selon le paramètre stressant utilisé. Ceci peut se faire avec plusieurs niveaux ou profils de stress, tels que montrés dans la section suivante.

c) Types de test de vieillissement accéléré

Deux types de test de vieillissement accéléré existent selon les applications.

Chapitre 4: Essais de vieillissement accéléré pour l'évaluation de la robustesse des microcellules

Le premier type est le test quantitatif. Dans ce cas, l'objectif est d'évaluer la fiabilité d'un produit dans les conditions nominales. Les défaillances observées sous test sont extrapolées avec les modèles adéquats pour évaluer la durée de vie du produit dans les conditions nominales. Ceci implique que les produits développés sont en phase de pré-industrialisation et qu'un nombre d'échantillons assez important peut être mis sous test.

Néanmoins, il est souvent nécessaire d'effectuer un autre type de test préalablement : le test qualitatif. Celui-ci permet de connaître les types et niveaux de stress qui affectent particulièrement un produit, et de concevoir de manière optimale un test quantitatif. Un vieillissement accéléré quantitatif (ou *Highly Accelerated Life Test*, test de vie hautement accéléré) permet d'évaluer les faiblesses d'une technologie sur une courte durée. Parmi ce type de test, on retrouve les essais à stress progressifs, à échelons (*Step Stress Accelerated Test*) ou linéaires. Ces types de tests permettent d'évaluer à quel niveau de stress surviennent les défaillances (*e.g.* pour donner une information sur une énergie d'activation). De plus, ces tests qualitatifs sont généralement conçus pour atteindre des contraintes bien plus importantes que celles atteintes dans un test quantitatif, de manière à augmenter les risques d'apparition de défaillance [136]. Il est donc important de noter qu'un dispositif qui survit au test qualitatif a de grandes chances de réussir le test quantitatif tout en sachant que ce dernier ne permet pas prévoir une durée de vie en conditions opérationnelles (durée de mission > 25 ans).

Ainsi, selon l'objectif du vieillissement accéléré, plusieurs stratégies coexistent pour un design optimal du test. Ces variétés de test sont illustrées dans la section suivante, où les essais de vieillissement accéléré sur des cellules CPV sont traités.

4.1.3 Vieillissements accélérés dans le CPV

De manière similaire à la technologie photovoltaïque conventionnelle, les cellules CPV ont une durée de mission longue de plusieurs dizaines d'années [132]. De plus, comme il sera montré dans cette section, des particularités sur les stress rencontrés dans les cellules sont propres au CPV. Cependant, il sera montré qu'une polarisation des cellules sous test de vieillissement accéléré permet de s'approcher de leurs conditions d'opérations. Finalement, un état de l'art des tests de vieillissements accélérés sur des cellules CPV est dressé.

a) Spécificités du CPV

Le vieillissement accéléré d'un dispositif consiste à augmenter le stress auquel il serait soumis en opération. Dans le cas complexe des cellules CPV, elles sont soumises à plusieurs facteurs de stress en conditions opérationnelles:

- Les forts flux lumineux qui atteignent la cellule. Un dispositif sous 1000 X reçoit 100 W/cm^2 . Cette illumination contient notamment une part importante de rayons UV de haute énergie (*cf* figure 1-1), qui peuvent mener à la dégradation de la cellule ou des éléments qui l'entourent.
- De fortes densités de courant sont atteintes sous concentration. À titre d'exemple, une cellule générant 15 mA/cm^2 sous 1X générera 15 A/cm^2 sous 1000 X. Ces fortes densités de courant peuvent contribuer à la génération de défauts [137].
- De fortes températures résultant de l'illumination sous fort flux lumineux. Il est admis qu'une cellule CPV a une température de fonctionnement de 65°C à 80°C en opération

4.1 Robustesse dans le CPV

[133]. De plus, l'apparition de défaillances dans un système est la plupart du temps accélérée par la température.

- Une non-uniformité du profil lumineux due aux optiques de concentration crée des disparités sur la cellule. De ces disparités peuvent résulter des pics de densité de courant locaux ainsi que des gradients de température.
- Un cyclage rapide des stress précédents, lié au passage de nuages, aux alternances jour/nuit et aux variations de la température extérieure.
- Un environnement potentiellement humide en raison de la non-étanchéité des modules [138]

Ces différents stress rendent le design d'essais de vieillissement accéléré complexe. Cependant, le fonctionnement sous concentration peut être simulé par la polarisation en courant des cellules, comme le montre la partie suivante.

b) Simulation de la photogénération par la polarisation directe de cellules

Les stress dans les cellules en conditions nominales sont divers. En particulier, la lumière concentrée, à laquelle elles sont exposées, est difficile à reproduire pour des tests de vieillissement accéléré. En effet, cette illumination devrait idéalement respecter le spectre, l'intensité et l'uniformité qui seraient rencontrés en conditions d'opération quelles que soient la température et la durée du test. Ceci est à ce jour irréalisable. Toutefois, la technique de polarisation en courant des cellules a été proposée en 2005 par Van Riesen *et al.* pour répondre à cette problématique [139].

Pour s'assurer de la validité de cette technique (qui ne fait pas consensus dans la communauté scientifique), il convient de comparer le modèle électrique d'une cellule en photogénération et celui d'une cellule polarisée. La figure 4-2 illustre le modèle à une diode d'une cellule en (a) photogénération et (b) polarisation.

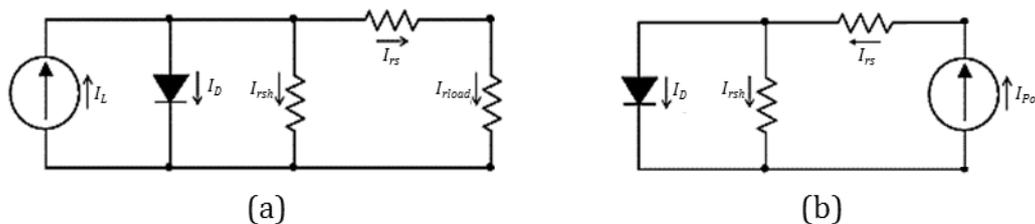


Figure 4-2: Modèle à une diode d'une cellule (a) en convention photogénération et (b) en convention polarisation directe

Sur la figure 4-2(a), on peut observer que la source de courant photogénéré I_L alimente la diode avec un courant I_D , la résistance shunt avec un faible courant I_{Rsh} (en considérant que R_{sh} est élevée), la résistance série et de charge, avec un courant identique $I_{Rs} = I_{Rload}$. Ainsi, le courant dans la diode I_D vaut environ $I_L - I_{Rs}$ ou $I_L - I_{Rload}$ et la jonction est polarisée directement.

Dans le cas de la figure 4-2 (b), où la cellule est polarisée, la valeur du courant de polarisation I_{Pol} est le même que celui parcourant la résistance série I_{Rs} . De plus, en considérant à nouveau que R_{sh} est très élevée, I_{Rsh} est faible donc $I_{Pol} \approx I_D$ et la jonction est polarisée directement. Dans les deux cas (photogénération et polarisation), la jonction est polarisée de manière identique

ce qui valide préliminairement la technique de polarisation directe pour la simulation de la photogénération.

Bien que les niveaux de courant traversant la jonction puissent être différents (ils sont identiques en circuit ouvert), une modélisation précise de la cellule peut permettre de charger chaque composant (R_s , jonction) du modèle de manière similaire à la photogénération.

La différence notable entre photogénération et polarisation se situe principalement au niveau des jonctions tunnel entre chaque sous-cellules d'une cellule multijonction [140]. En effet, dans le cas de la photogénération, celles-ci sont polarisées directement, et fonctionnent dans la partie linéaire de leur courbe $I-V$ (fonctionnement résistif). Dans le cas de la polarisation directe, les jonctions tunnel sont polarisées en inverse. Cependant, elles fonctionnent également dans le régime linéaire de leur courbe $I-V$, ce qui n'engendre pas de différence significative.

Ceci confirme l'utilisation de la polarisation directe comme technique de simulation de l'illumination des cellules en tests de vieillissement accéléré. Les variations induites par cette technique sur les lignes de champ dans la cellule seront discutées au §4.4.2.

Cette technique de polarisation directe des cellules a été largement utilisée pour la mise en place de tests de vieillissement accéléré de cellules CPV, tel que montré dans l'état de l'art qui suit.

c) État de l'art sur le vieillissement accéléré de cellules CPV

Dans cette section est présenté un état de l'art sur les différentes stratégies de vieillissement accéléré de cellules CPV ou multijonctions, sur les modes voire mécanismes de défaillance observés. Pour des soucis de compréhension, l'état de l'art est réalisé chronologiquement.

En 2001, Rey-Stolle et Algora mettent en place des tests de vieillissement accéléré sur des cellules monojonctions en GaAs avec différentes couches fenêtre (GaInP_2 ou $\text{Al}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{As}$) [141]. Le test consiste en 8500 cycles de 40 minutes de 5°C à 95°C dans une enceinte à chaleur humide à 30% de RH (*Relative Humidity*, Humidité Relative). L'évolution des performances est analysée par des mesures $I-V$ sous un soleil, pour lesquelles une dégradation moyenne du I_{SC} de 4% et du V_{OC} de 2% a été mesurée, quelle que soit la couche fenêtre.

Les premiers tests de vieillissement accéléré sur des cellules multijonctions datent de 2005 lorsque Van Riesen et Bett ont étudié la dégradation de cellules double jonction $\text{Ga}_{0.35}\text{In}_{0.65}\text{P}/\text{Ga}_{0.83}\text{In}_{0.17}\text{As}$ en désaccord de maille (*lattice-mismatched*) [139]. Pour cela, deux tests ont été effectués :

- un stockage à 95°C de 200 h à 270 h, saturé en humidité,
- une injection de courant équivalent à 1000 fois le $I_{SC@1X}$ en obscurité pendant 600 h.

Le stockage thermique n'a révélé aucune dégradation notable. Cependant, dans le cas de l'injection de courant, pour lequel la température des cellules a été mesurée à environ 70°C , il est noté une réduction du V_{OC} . Cette réduction est liée à une augmentation logarithmique du J_{02} avec le temps. Certaines cellules ont également démontré des défaillances catastrophiques,

4.1 Robustesse dans le CPV

attribuées à des défauts liés à l'épithaxie en raison des tâches noires observables par électroluminescence.

En 2006, un test de vieillissement accéléré sur de cellules InGaP/InGaAs/Ge en accord de maille pour application spatiale a été mis en place par Zimmermann [142]. En particulier, l'impact des défauts mécaniques dus à l'épithaxie ont été étudiés, lesquels étaient encore largement présents sur cette structure en 2006. Des tests de cyclage thermique de -175°C à 86°C et de -120°C à 120°C , sous atmosphère inerte, ont été utilisés en raison du profil de mission des cellules. Il a été noté que les défauts menaient à une diminution de la résistance shunt et dans certains cas à la rupture de doigts du contact d'émetteur.

En 2008, Schone *et al.* étudient l'impact de cycles thermiques sur des cellules à structure métamorphique $\text{Ga}_{0.35}\text{In}_{0.65}\text{P}/\text{Ga}_{0.83}\text{In}_{0.17}\text{As}/\text{Ge}$ [143]. Les tests de vieillissement accéléré consistent en 500 cycles de -40°C à 90°C de 2 h. À la suite de ces tests, une augmentation du courant d'obscurité à faible tension a été mesurée, laquelle est attribuée à une baisse de la résistance shunt. De plus, la forte chute du FF et du V_{oc} associée est imputée à la détérioration du périmètre des cellules.

En 2009, Gonzalez *et al.* introduisent des tests à stress échelonné pour des cellules en GaAs de 1 mm^2 [133]. Ces tests sont décrits comme étant préliminaires à l'étude de cellules triple jonctions. Ils consistent en l'injection d'un courant équivalent à $1000 \times I_{SC@1X}$ sous obscurité, en même temps qu'une élévation de la température de 90°C à 150°C sur 315 h. Par *fitting* du courant d'obscurité des cellules, la dégradation des performances est attribuée à une réduction de la résistance shunt, découlant de la dégradation du périmètre des cellules.

En 2010, Padovni *et al.* mettent en œuvre des tests de vieillissement accéléré sur des cellules triple jonctions en accord de maille GaInP/GaInAs/Ge de $2.05 \times 2.05\text{ mm}^2$ [144]. Dans cette étude, un courant équivalent à $1000 \times I_{SC@1X}$ a été utilisé pour polariser les cellules sous obscurité, associée à une température de stockage de 140°C pendant 800 h. Il a été noté que 85% des cellules ont vu leur V_{oc} chuter de 3% à 10%, et leur I_{SC} chuter de 2% à 15%. Les 15% de cellules restant présentaient une dégradation encore plus élevée.

En 2011, Zimmermann publie les résultats de tests réalisés sur des cellules en accord de maille InGaP/InGaAs/Ge destinées à des applications spatiales [145]. Les stress consistent en une illumination UV équivalente à un fonctionnement sous 11 X, à des températures de 197°C et 227°C . Il montre que les cellules nues ne se dégradent pas mais que l'encapsulant en silicone, lorsque présent, est à l'origine du shunt des sous-cellules conduisant à une chute d'efficacité jusqu'à 20%.

En 2012, France *et al.* mettent en place un test de vieillissement accéléré utilisant la température et la lumière comme stress sur des cellules GaInAs [146]. Les cellules ont été placées soit en circuit ouvert soit en court-circuit pendant 336 h à une température de 125°C , sous une illumination à 808 nm, dont l'intensité équivaut à un facteur de concentration de 1300 X. Dans les deux cas, l'évolution du V_{oc} a été la même en fonction du temps : $-0.53\%/ \log(\text{temps})$. La chute de performance a été imputée à la dégradation du périmètre.

Plus récemment, en 2017, Orlando *et al.* ont réalisé des tests de vieillissement accélérés couplés à une analyse de défaillance approfondie pour déterminer l'origine des dégradations de cellules GaInP/GaInAs/Ge [137]. 45 cellules fabriquées ont été polarisées par un courant

équivalant à celui généré sous 820 X dans 3 chambres climatiques de sorte à ce que la température de jonction soit de 119°C, 126°C et 164°C. Il a été montré que le courant injecté était la source des dégradations tandis que la température n'affectait que le facteur d'accélération des tests. Il a notamment été exposé que le courant circulant dans le contact d'émetteur en face avant affectait chimiquement des impuretés liées aux méthodes de dépôt de contact ou d'interconnexion (électroplaquage, soudure de rubans ou *tab soldering*). Les auteurs concluent sur le fait que les cellules testées sont très robustes si leur contact en face avant ne comporte pas d'impuretés.

La même année, Eltermann *et al.* ont étudié la dégradation de cellules InGaP/InGaAs/Ge en accord et en désaccord de maille et dont les vieillissements accélérés suivent trois stratégies : stockage thermique seulement, une combinaison de stockage thermique et d'injection de courant ou injection de courant seulement [134]. Toutes les méthodes de stress avaient pour objectif de faire atteindre une température de 180°C aux cellules. Finalement, les cellules ayant reçu un stress thermique uniquement (stockage simple à 180°C) sont celles qui ont montré le plus de dégradation (chute de 20% d'efficacité en moyenne).

Cet état de l'art a présenté les tests de vieillissement accéléré sur des cellules dédiées au CPV lesquels ont été mis en place depuis le début des années 2000. Différents types de tests ont été réalisés et parmi ceux-ci, le stockage thermique associé à une polarisation en courant des cellules est récurrent. Les tests de vieillissement accéléré ont, dans tous les cas, mené à une réduction des performances des cellules. Parmi les défaillances observées durant les tests, on retrouve une baisse de la résistance shunt ou l'augmentation du courant I_{02} dans plusieurs études. Ces effets peuvent être imputés à une dégradation du périmètre des cellules durant les tests de vieillissement accéléré. Basé sur cet état de l'art, la méthodologie dédiée au développement des essais dans le cadre de ce projet est décrite dans la partie suivante.

4.2 Méthodologie pour les tests de vieillissement accéléré de microcellules

Dans cette thèse, l'objectif est d'évaluer l'impact de la miniaturisation, de la présence de l'ARC passivant et du type de test mis en œuvre sur les variations des performances des cellules sous vieillissement accéléré. Pour répondre à cela, trois essais de vieillissement accéléré sont mis en œuvre. La conception des tests de vieillissement, les dispositifs testés ainsi que les méthodes de suivi de l'évolution des performances des cellules sont détaillés dans cette section.

4.2.1 Conception des tests de vieillissement accéléré

La stratégie de vieillissement accéléré se décline de la manière suivante: deux tests à stress échelonné passif (PSSAT, *Passive Step Stress Accelerated Test*) et un test à stress échelonné actif (ASSAT, *Active Step Stress Accelerated Test*). Ils sont présentés ci-après.

a) Design de test de vieillissement accéléré à stress échelonné passif

La plupart des mécanismes de défaillance sont affectés par des processus thermiques. C'est pourquoi un test à stress échelonné passif (PSSAT) où le stress est la température, a été mis en place dans un premier temps. Ce type de test consiste en un stockage thermique, sans

4.2 Méthodologie pour les tests de vieillissement accéléré de microcellules

polarisation en courant des cellules. Grâce à une contrainte graduelle idéalement dimensionnée, les défaillances potentielles peuvent également être progressivement mises en avant. De plus, la température à laquelle celles-ci surviennent peut donner des indications sur leur origine.

En se basant sur des travaux utilisant des structures de cellule similaires à celles de ce projet, la température de fonctionnement des dispositifs de 80-90°C est évaluée [147], [148]. Il peut donc être considéré qu'une température de stockage à 85°C équivaut à un facteur d'accélération $AF = 1$. Les incréments en température entre chaque palier ont été définis à 20°C, de sorte à optimiser le nombre de mesures pour le suivi des performances des cellules. Ces incréments ont également été utilisés dans la littérature [133]. Enfin les durées des paliers ont été définies à 1 semaine, soit 176 heures pour compromis durée de test-accélération des défaillances.

La figure 4-3 illustre le profil de température suivi pour les tests de vieillissement accéléré à stress échelonné passif. On remarque également la périodicité des mesures électriques des cellules, réalisées initialement et après chaque palier, dont les détails sont donnés §4.2.3. La température de stockage a été limitée à 185°C en raison de la détérioration des assemblages, observée au-delà.

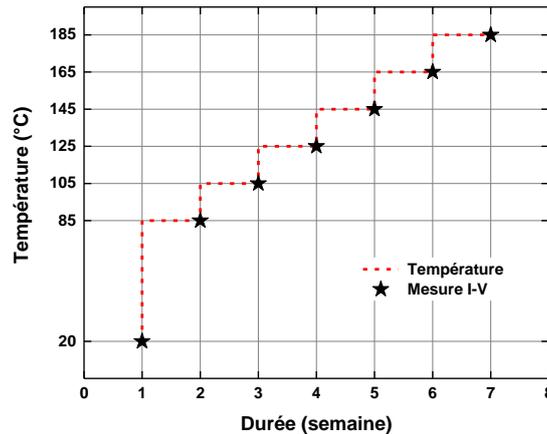


Figure 4-3: Profil de température de stockage et périodicité des mesures I-V dans le cas des tests à stress échelonné passif

Un autre test de vieillissement, dit « actif », lequel combine la température de stockage à une polarisation en courant comme contraintes, est présenté dans le paragraphe suivant.

b) Design de test de vieillissement accéléré à stress échelonné actif

Un test de type « ASSAT » (*Active Step Stress Accelerated Test*) a également été mise en œuvre dans le cadre de ce projet. Il consiste en la polarisation en courant équivalent à celui photogénéré en conditions opérationnelles, en plus du stockage en température échelonné PSSAT.

Comme déjà présenté dans l'état de l'art, il a été considéré qu'une cellule fonctionnant sous 1000 X générerait une densité de courant de l'ordre de $1000 \times J_{SC@1sun}$. (cf §4.1.3c) Pour cela, un

$J_{SC@1sun}$ de 12.86 mA/cm², qui correspond à la valeur moyenne des densités de courant de court-circuit des cellules avec ARC mesurées sous 1 soleil, a été considéré. Ainsi, des courants $I_{SC1000X_{1mm^2}} = 109.3$ mA pour les cellules de 1 mm², $I_{SC1000X_{0.25mm^2}} = 22.45$ mA pour les cellules de 0.25 mm² et $I_{SC1000X_{0.076mm^2}} = 6.48$ mA pour les cellules de 0.076 mm² ont été utilisés pour polariser les cellules dans le cas du ASSAT. Cette polarisation a été gardée constante durant toute la durée du test (sauf lors des périodes de mesure sous illumination), quelle que soit la contrainte en température.

Le profil de température du ASSAT et la périodicité des mesures électriques des cellules sous illumination, réalisées initialement et après chaque palier de température, sont montrés sur la figure 4-4. Il peut être noté que, contrairement au profil suivi pour le PSSAT, la température initiale a été réduite à 65°C. Ceci est dû au fait que les PSSAT réalisés antérieurement avaient démontré qu'un stockage à la température de 85°C était suffisant pour initier une diminution des performances électriques des cellules (cf §4.3.2). Enfin, de manière similaire au PSSAT, l'échelon de température le plus élevé était de 185°C en raison de la détérioration de l'assemblage des dispositifs sous test.

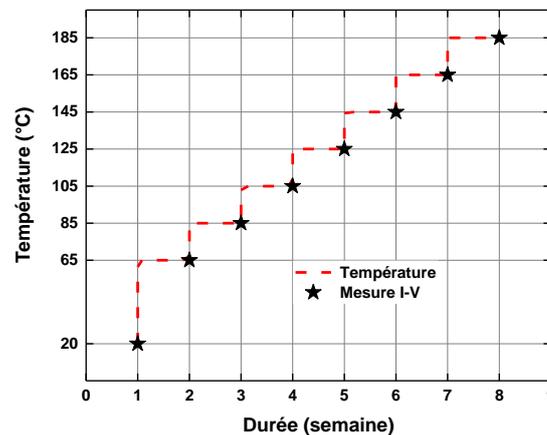


Figure 4-4 : Profil de température de stockage et périodicité des mesures I-V dans le cas du test à stress échelonné actif

Deux types de test de vieillissement accéléré sont proposés, permettant de mettre en lumière les défaillances susceptibles de varier selon les dispositifs testés, lesquels sont présentés dans la section suivante.

4.2.2 Dispositifs testés

Différentes cellules solaires ont été fabriquées avec les procédés présentés dans le chapitre 2 puis testées dans cette étude de robustesse. Les différences entre les cellules concernent leurs dimensions, la présence d'une couche antireflet à leur surface et leur assemblage, comme décrit dans cette section.

a) Dimensions des cellules

Selon [133], une dégradation des cellules peut être attribuée au périmètre des cellules. Ainsi, des cellules ayant un fort rapport périmètre / aire ($\frac{L_{per}}{A}$) (i.e. des cellules de faibles dimensions)

4.2 Méthodologie pour les tests de vieillissement accéléré de microcellules

pourraient être d'autant plus dégradées par les tests de vieillissement accéléré. Pour étudier cet effet, des cellules rectangulaires avec différentes surfaces (*i.e.* différents $\frac{L_{per}}{A}$), ont été sélectionnées. Sept cellules sans ARC de 0.076 mm² à 12.25 mm², six cellules avec ARC de 0.076 mm² à 1mm² dans le cas du PSSAT et neuf cellules avec ARC dans le cas du ASSAT ont été comparées. Il est important de noter qu'avec la variation des dimensions des cellules, la proportion de surface de contact électrique varie de 39.5% pour une cellule de 0.076 mm² à 10.3% pour une cellule de 12.25 mm².

Outre la surface des cellules et donc la surface des contacts, l'impact de la présence de la couche ARC sur la robustesse a également été caractérisé, tel que décrit dans le paragraphe suivant.

b) Présence d'une couche antireflet ARC sur les cellules

En attribuant les dégradations au périmètre des cellules, cela implique que la densité d'états de surface sur les flancs des cellules a un impact [133]. Aussi, dans le cadre de cette étude, l'effet de la présence ou de l'absence d'ARC passivant sur les cellules, développé §2.3.3, a été analysé dans les PSSAT.

c) Assemblage de cellules non-singulées

Le montage utilisé pour les mesures *I-V* ne permet pas la prise de contact électrique sur la face arrière des échantillons. Ainsi, dans le cas des essais PSSAT, les échantillons comportant les cellules non-singulées ont été assemblés sur des supports FR4 (laminé époxy et fibre de verre) recouverts d'une couche de cuivre. L'assemblage d'un échantillon de cellules avec ARC est illustrée figure 4-5. Sur cette photographie, on peut également observer l'indium utilisé sous forme de feuille pour la brasure (170°C, sur plaque chauffante) du contact de base en face arrière. Ce type d'assemblage implique des mesures électriques réalisées sous pointes.

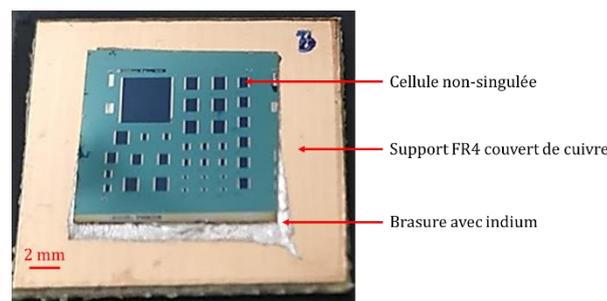


Figure 4-5: Échantillon constitué de cellules non-singulées avec ARC assemblées sur un support FR4 avec cuivre via une brasure à l'indium

d) Assemblage de cellules singulées

Dans les conditions d'opération, les cellules sont assemblées sur des supports métalliques, tel que montré sur la figure 1-12. Pour se rapprocher au plus près de ces conditions dans le cas du ASSAT, des cellules singulées ont été assemblées sur des supports ou embases (*cf.* figure 4-6). Pour cela, les cellules ont été singulées à la scie diamant à l'Atelier Interuniversitaire de Micro-nano Électronique (AIME) de Toulouse, France. Des problèmes d'arrachement des cellules de faibles dimensions de l'échantillon, abordés au §2.5.1a), ont pu être observés lors de la découpe. Cependant, malgré un faible rendement de singulation mécanique, des cellules de 0.076 mm^2 sur des sections d'échantillons de plus grande taille ont pu être utilisées.

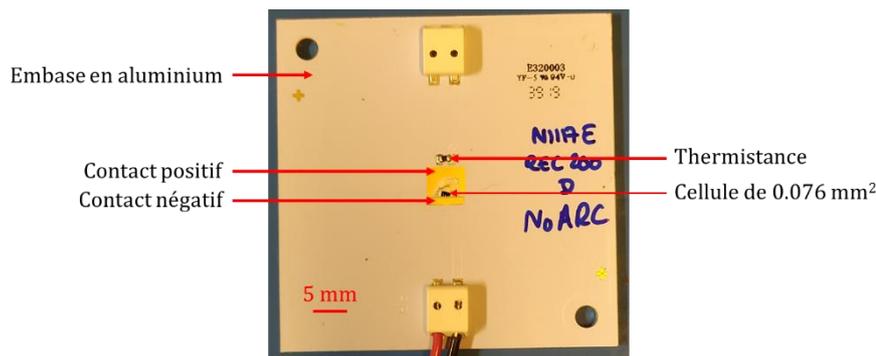


Figure 4-6: Cellule de 0.076 mm^2 assemblée sur un support en aluminium verni via wirebonding et pâte à braser SAC 305

Les cellules ont été assemblées sur des embases en aluminium de $50 \times 50 \text{ mm}^2$ conçues à cet effet par la société Led Engineering Development de Montauban en France. Le brasage pour le contact de base en face arrière a été réalisé au laboratoire IMS à de la pâte à braser SAC 305 (Sn-96.5%, Ag-3%, Cu-0.5%), dont la température atteint 230°C pendant 30 s. Le contact d'émetteur de la face avant est quant à lui connecté au support via des fils de *wirebonding* de $25 \mu\text{m}$ de diamètre en aluminium. Ces interconnexions ont également été réalisées à l'AIME. Enfin, pour un suivi de la température des assemblages, ceux-ci comportent des thermistances NTC de $10 \text{ k}\Omega$.

Ce type d'assemblage a permis de simplifier le montage pour la polarisation, permettant l'assemblage en série des cellules selon leur taille, tel que montré dans la figure 4-7. Aussi cet assemblage a permis de s'affranchir du délicat montage sous pointes pour les mesures *I-V* sous illumination.

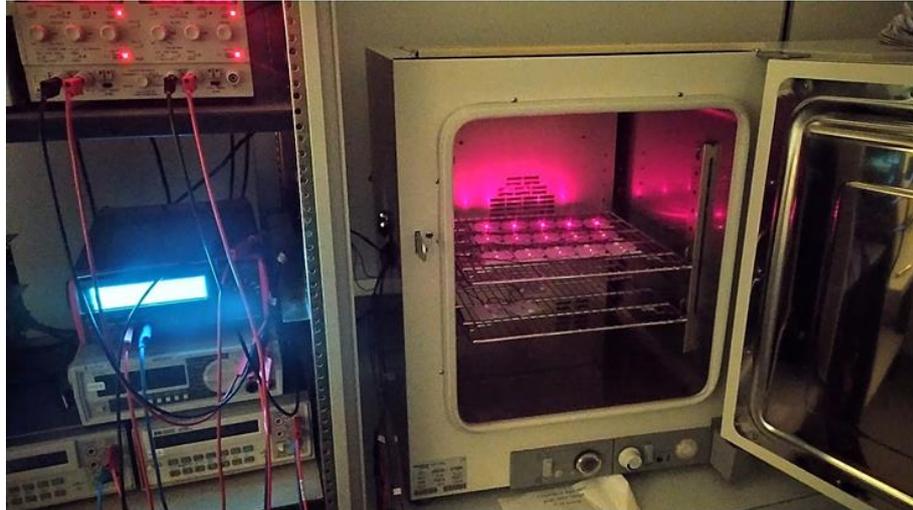


Figure 4-7: Setup pour le test accéléré actif de 15 cellules sous polarisation en courant dans une étuve HERAEUS

4.2.3 Suivi des performances

L'évolution des cellules durant les essais de vieillissement accéléré a été suivie en termes de performance électrique uniquement. Les paramètres électriques monitorés sont choisis et les équipements de mesure sont décrits ci-après.

a) Paramètres pertinents

Plusieurs paramètres peuvent être observés pour le suivi de l'évolution des performances des cellules. Dans la littérature, l'efficacité ou la puissance sous illumination sont usuellement les paramètres suivis, car ils informent sur la performance générale de la cellule. Cependant, dans ces paramètres, les modes de défaillances potentiels tels que des variations sur V_{OC} , J_{SC} ou FF sont « noyés ». En effet, ces derniers pourraient potentiellement se compenser mutuellement sans que la puissance de la cellule soit affectée.

Le lissage (*fitting*) des caractéristiques électriques, basé sur le modèle électrique des cellules sous test, tel que celui qui a été réalisé dans [133], fournit plus d'indications sur l'origine des défaillances. Dans l'étude citée, les paramètres J_{01} , J_{02} , J_{02per} , R_s ou R_{sh} ont pu être extraits des courants d'obscurité mesurés durant la campagne de vieillissement. Néanmoins, cela nécessite une modélisation très précise des complexes cellules multijonctions. De plus, dans le cas des microcellules, pour lesquelles les courants d'obscurité sont très faibles, des sourcemètres d'une très grande finesse de mesure doivent être utilisés pour limiter le bruit, particulièrement important pour les faibles tensions. (cf §2.1.2f).

b) Équipements de mesure

Les mesures pour le suivi des performances ont été réalisées sur la plateforme du groupe ELORGA (électronique organique) du laboratoire IMS, lequel est spécialisé dans le développement de cellules solaires organiques.

Chapitre 4: Essais de vieillissement accéléré pour l'évaluation de la robustesse des microcellules

Deux simulateurs solaires ont été utilisés dans ce cadre de l'étude de robustesse : un Oriel 1A pour les mesures $I-V$ de cellules en PSSAT (cellules nues sous pointes) et un Oriel LCS100 pour les mesures $I-V$ de cellules en ASSAT (cellules assemblées, câblées).

Dans les deux cas, les simulateurs solaires sont de classe ABB. Ceci signifie que la variation spectrale avec un spectre AM1.5g est inférieure à 2% tandis que la non-uniformité spatiale et l'instabilité temporelle est comprise en 2% et 5%. Cette non-uniformité spatiale risque d'impacter les mesures des microcellules, lesquelles sont particulièrement sensibles aux fluctuations lumineuses. (cf §2.1.2f)

Aussi, les mesures électriques $I-V$ ont été réalisées avec un sourcemètre Keithley 2420, qui ne permet pas de mesurer les courants d'obscurité de très faible intensité pour des tensions faibles. Ceci est particulièrement limitant pour les microcellules et exclut la possibilité de faire un *fitting* précis des paramètres électriques.

Pour ces raisons, il a été décidé de se focaliser sur les paramètres de puissance maximale P_{MPP} et de tension de circuit ouvert V_{OC} estimés comme des indicateurs pertinents de performance des cellules sous test. En effet, la P_{MPP} informe de façon générale sur l'efficacité de la cellule tandis que le V_{OC} donne des informations sur les potentiels mécanismes de recombinaisons des cellules (cf §2.3.2).

Ainsi, les équipements de mesure utilisés ont permis de sélectionner les paramètres électriques pertinents à suivre pour l'évolution des performances des cellules au long des tests de vieillissement accélérés.

La méthodologie pour la mise en place de ces tests est ainsi bouclée et un bilan sur celle-ci est réalisé dans la section suivante.

4.2.4 Bilan sur la méthodologie pour le vieillissement accéléré

La méthodologie suivie pour la mise œuvre de vieillissements accélérés a été décrite et le tableau 4-1 résume les paramètres utilisés dans les trois différents tests. Ceux-ci varient selon les contraintes appliquées et les dispositifs testés varient selon le type d'assemblage, la présence de l'ARC, le nombre et les tailles de cellules considérés ou les simulateurs solaires utilisés. Après avoir défini la méthodologie suivie pour les différents tests, les résultats de ceux-ci seront analysés dans la partie suivante.

Tableau 4-1: Paramètres des tests de vieillissement accéléré

Test de vieillissement accéléré	Conditions de test		Dispositifs testés		Simulateur solaire
	Stress thermique	Polarisation en courant	Type	Nombre	
PSSAT	De 85 °C à 185 °C	non	Cellules nues sans ARC	7 cellules 4 tailles	Oriel 1A
	Paliers de 168 h Échelons de 20 °C		Cellules nues avec ARC	6 cellules 3 tailles	
ASSAT	De 65 °C à 185 °C	Équivalente à $1000 \times I_{MPP}$	Cellules assemblées avec ARC	9 cellules 3 tailles	Oriel LCS100

4.3 Variations des performances des microcellules sous vieillissement accéléré

Dans cette partie, les résultats des tests de vieillissement accélérés sont analysés. En particulier, les variations des performances de cellules sans et avec *ARC*, sous tests à stress passif puis des cellules assemblées sous test à stress actif sont comparées.

4.3.1 Variations des performances des microcellules sans *ARC* sous PSSAT

Les figure 4-8.a. et figure 4-8.b. illustrent les changements de performance de sept cellules sans *ARC* (de 0.076 mm² à 12.25 mm²) en fonction de la température du stockage PSSAT. Les points manquants sont relatifs à des erreurs de mesure.

Sur la figure 4-8.a., il peut être observé une relative stabilité de la puissance maximale relative à la puissance maximale initiale (P_{MPP}/P_{MPP0}) puis une chute de celle-ci à 185°C pour les cellules de 1 mm² et moins. À l'issue du PSSAT, la P_{MPP}/P_{MPP0} est comprise entre 0.98 (peu ou pas de dégradation) pour la cellule de 12.25 mm² et 0.82 pour une cellule de 0.076 mm². Bien qu'il semble que les cellules de faibles dimensions (1 mm² et moins) se soient plus dégradées que la cellule de référence (12.25 mm²), aucune relation claire ne se dessine entre la chute de puissance et la taille des cellules.

Sur la figure 4-8.b., les variations de la tension de circuit ouvert V_{OC} sont illustrées. La chute de V_{OC} la plus importante à la fin du test est attribuée aux deux cellules les plus petites, avec un V_{OC}/V_{OC0} de 0.90 et 0.91 pour les cellules de 0.076 mm². Cet effet est discuté au §4.4.1.

Pour cela, les résultats de ces tests ont dû être comparés à ceux de cellules avec *ARC*, ayant subi le même test de vieillissement accéléré. Les résultats de ces dernières sont présentés dans la section suivante.

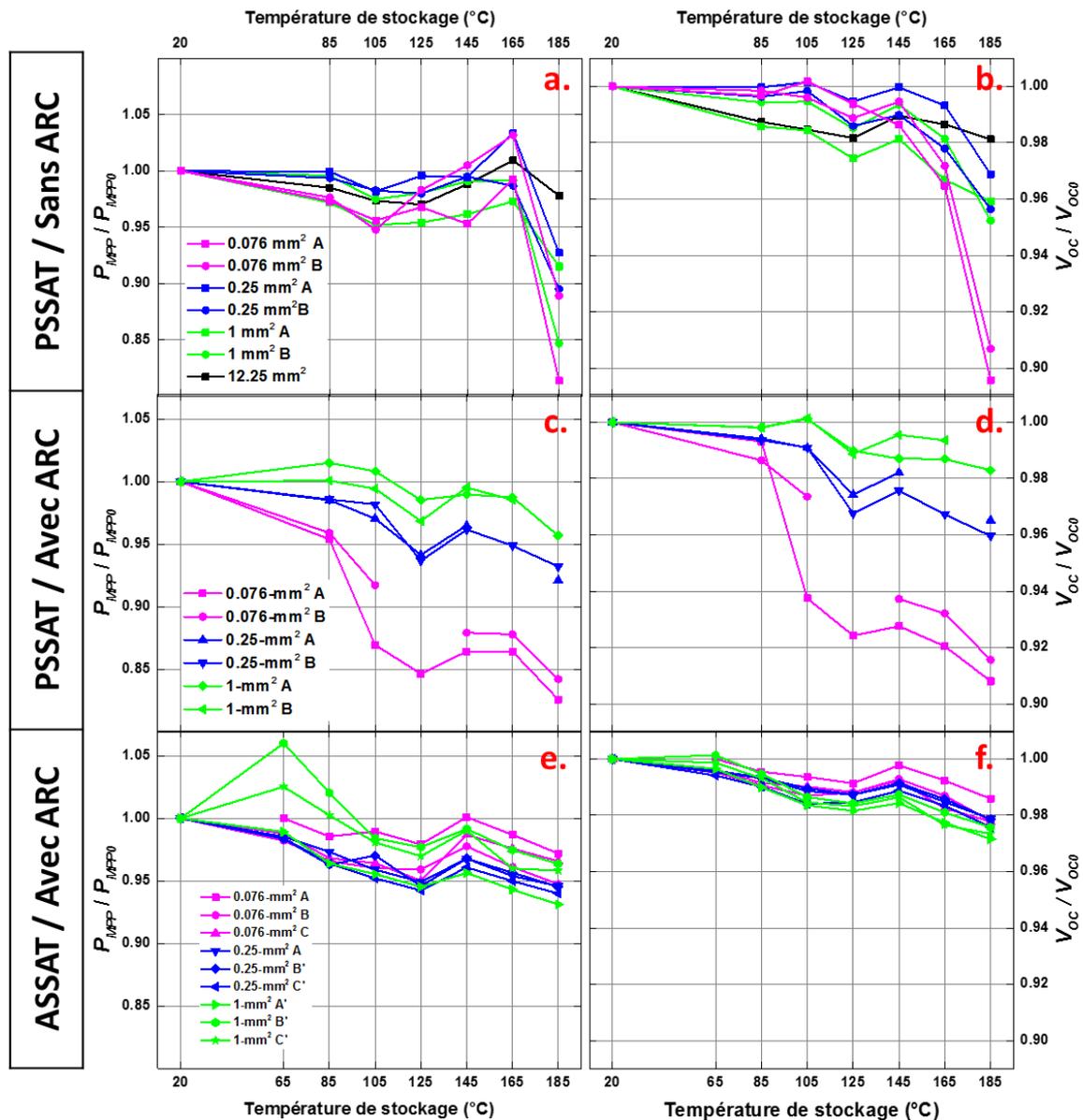


Figure 4-8: Évolution des performances des cellules sous test en fonction de la température avec a., b.: les cellules sans ARC sous PSSAT, c., d.: les cellules avec ARC sous PSSAT et e., f. : les cellules avec ARC sous ASSAT. Les paramètres suivis sont: a., c., e : P_{MPP} en fonction de la valeur initiale P_{MPP0} et b., d., f. : V_{OC} en fonction de la valeur initiale V_{OC0}

4.3.2 Variations des performances de microcellules avec ARC sous PSSAT

Sur la figure 4-8.c. et la figure 4-8.d., les changements de performances de six cellules solaires avec ARC (de 0.076 mm² à 1 mm²) durant le PSSAT, sont illustrés. La cellule de 12.25 mm² n'a pas été considérée dans cette étude car elle présentait initialement de faibles performances.

En figure 4-8.c, la baisse globale de la puissance maximale relative (P_{MPP}/P_{MPP0}) dans tous les cas montre que toutes les cellules ont été dégradées par le test de vieillissement. Le ratio P_{MPP}/P_{MPP0} atteint finalement une valeur comprise entre 0,83 (cellule A de 0,076 mm²) et 0,96 (cellule B de 1 mm²). Bien qu'une baisse des performances ait été relevée, aucun dispositif n'a

4.3 Variations des performances des microcellules sous vieillissement accéléré

subi de défaillance catastrophique malgré l'important stress thermique appliqué. Aussi, une nette dépendance entre la taille des cellules et les changements de P_{MPP} peut être observée. En effet, une tendance apparaît selon laquelle les plus petites cellules sont plus affectées par la diminution de P_{MPP} / P_{MPP0} . La différence de P_{MPP} / P_{MPP0} due à la taille des cellules peut être identifiée dès la première étape de vieillissement à 85°C. L'écart dû à la taille des cellules s'étend jusqu'à l'étape de 125°C, ce qui indique que les processus de dégradation affectant les cellules par leur taille, se produisent à une température relativement basse. Après 125°C, les changements de P_{MPP}/P_{MPP0} sont très similaires, à moins de 5,5% d'évolution, quelle que soit la taille des cellules.

Ces processus affectent également les tensions de circuit ouvert comme on peut le voir dans la figure 4-8.d, lesquels suivent la même tendance que ceux observés pour P_{MPP}/P_{MPP0} . À la fin du PSSAT, on constate que le ratio V_{OC}/V_{OC0} dépend clairement des dimensions de la cellule avec une valeur comprise entre 0,91 pour la cellule A 0,076 mm² et 0,98 pour la cellule A de 1 mm². Ainsi, de manière similaire à ce qui a été observé dans la section précédente, les plus petites cellules sont celles qui démontrent la plus forte chute de V_{OC} .

Une discussion sur l'effet de l'ARC sur les variations de performance des cellules sera faite au §4.4.1. Ces résultats semblent indiquer un impact croissant des recombinaisons de périmètre avec le vieillissement accéléré. Malgré tout, les résultats restent très encourageants pour cette technologie non mature, même sous un niveau de stress élevé induit par le test de vieillissement.

Dans la prochaine partie, sont présentés les résultats concernant l'ASSAT, test qui inclue la polarisation en courant des cellules.

4.3.3 Variations des performances de microcellules avec ARC sous ASSAT

La figure 4-8.e et la figure 4-8.f. illustrent les effets de l'ASSAT (stockage thermique à stress thermique échelonné + injection de courant $\equiv 1000 \times I_{SC}$) sur les performances électriques des cellules, en fonction de leur taille.

La figure 4-8.e. montre une diminution globale du ratio P_{MPP}/P_{MPP0} ce qui illustre le fait que toutes les cellules ont été impactées par le test. Les valeurs finales pour le ratio P_{MPP}/P_{MPP0} sont comprises entre 0,93 (cellule de 1 mm²) et 0,97 (cellule de 0,076 mm²). Ces valeurs sont supérieures à celles observées dans le cas du PSSAT. Considérant l'évolution du ratio P_{MPP}/P_{MPP0} , on peut remarquer qu'aucune tendance claire ne peut être dégagée en fonction de la taille des cellules.

Cependant, bien que le V_{OC} (de toutes les cellules est affecté, celui des cellules de 1 mm² est légèrement plus affecté par le vieillissement voir figure 4-8.f.). Le rapport V_{OC}/V_{OC0} est finalement égal à 0,97 pour la cellule A' de 1 mm² A et 0,99 pour la cellule A de 0.076 mm² à l'issue de l'ASSAT.

Considérant les fortes contraintes prises en compte, les variations de performances électriques restent relativement mineures. Ainsi, dans ces conditions, les résultats démontrent la certaine robustesse des cellules fabriquées, y compris les plus petites.

4.3.4 Synthèse sur les résultats des tests de vieillissement accéléré

Le tableau 4-2 regroupe les résultats majeurs en fonction des tests de vieillissement accéléré appliqués. Il fait également apparaître la structure de la discussion proposée pour l'analyse des résultats de cette étude de robustesse. Cette discussion est proposée dans la partie suivante.

Tableau 4-2: Synthèse sur les résultats des tests de vieillissement accéléré, la comparaison de ceux-ci et les pistes d'interprétation proposées

Test	Présence ARC	Résultats majeurs	Comparaison des résultats	Observations	Pistes d'interprétation
PSSAT (stockage thermique)	NON	<ul style="list-style-type: none"> • $0.81 < P_{MPP0}/P_{MPP}@185^{\circ}\text{C} < 0.98$ • Dégradation brusque à 185 °C • Dégradation plus importante pour les plus petites cellules 	§4.4.1 Impact de la présence de l'ARC passivant	a) Dégradation plus importante pour les plus petites cellules dans les deux cas	Périmètre des cellules plus affecté par la dégradation
PSSAT (stockage thermique)	OUI	<ul style="list-style-type: none"> • $0.83 < P_{MPP0}/P_{MPP}@185^{\circ}\text{C} < 0.96$ • Dégradation graduelle • Dégradation plus importante pour les plus petites cellules 		b) Dégradation graduelle en présence d'ARC	Diminution de l'effet de la passivation avec la température
ASSAT (stockage thermique et polarisation en courant)	OUI	<ul style="list-style-type: none"> • $0.93 < P_{MPP0}/P_{MPP}@185^{\circ}\text{C} < 0.97$ • Dégradation légèrement plus importante pour les plus grandes cellules 	§4.4.2 Impact du type de test	a) Moins de dégradation dans le cas du ASSAT par rapport au PSSAT	Bilan thermique des cellules du ASSAT plus élevé, moins d'effet de périmètre
				b) Tendance de dégradation opposée en fonction de la taille des cellules selon le type de test	Lignes de champs différentes entre petites et grandes cellules en raison des designs de contact

4.4 Analyse des résultats et discussion

Une discussion sur les résultats majeurs des tests de vieillissement accéléré est menée dans cette partie. Celle-ci s'articule autour de l'étude de l'impact de la présence de la couche antireflet sur les résultats recueillis puis de la comparaison entre les types de test de vieillissement accélérés menés. Pour cela, les observations et leurs pistes d'interprétation associées, présentées dans le tableau 4-2 sont détaillées dans cette partie.

4.4.1 Discussion sur l'impact de la présence ou non de l'ARC passivant

a) Impact de la taille des cellules

➔ *Le périmètre des cellules est sensible au vieillissement dans les deux cas.*

Qu'elles soient couvertes d'un ARC ou non, les cellules les plus petites sont celles qui ont été les plus affectées par le vieillissement accéléré passif (PSSAT). Ceci implique que le périmètre s'est particulièrement dégradé ce qui a engendré une hausse du taux de recombinaisons de surface sur les flancs de la cellule. La piste de la modification des flancs du mesa (cellules sans ARC) ou de l'interface cellule-ARC (cellules avec ARC) peut être suspectée.

4.4 Analyse des résultats et discussion

Le périmètre des mesas était incriminé au regard de la baisse des performances des cellules dans plusieurs études recensées dans l'état de l'art dressé au §4.1.3c), avec notamment une baisse de la R_{Sh} ou une augmentation du $J_{02,per}$.

b) Effet de l'ARC sur le taux de dégradation

➔ *L'effet passivant de l'ARC diminue avec l'élévation de la température de stockage*

En considérant la variation du paramètre $PMPP/PMPP0$, la dégradation atteint les mêmes niveaux que l'ARC soit présent ou non. Cependant, une chute abrupte de ce paramètre est observée à partir de 185°C lorsque les cellules n'ont pas d'ARC tandis que la dégradation est graduelle lorsqu'un ARC est présent.

Étant donné que le J_{sc} n'a que très peu évolué pour toutes les cellules testées, il peut être conclu que les propriétés optiques de l'ARC n'ont probablement pas été dégradées. Toutefois, étant donné qu'un lien direct est établi entre la dégradation des cellules avec ARC et la taille de ces dernières, il peut être légitimement envisagé que l'effet passivant de l'ARC a été réduit lors des tests de vieillissement accéléré. De plus, comme la passivation par l'ARC est attribuée à la passivation chimique des liaisons pendantes et à un effet de champ lié aux charges fixes dans l'ARC, on peut suspecter que le stockage passif à haute température conduit soit à une mobilité des charges fixes, soit à une évolution des liaisons chimiques à l'interface, provoquant une réduction de la qualité de passivation. La comparaison de plusieurs ARC voire de plusieurs techniques de passivation permettrait de conforter cette hypothèse et de sélectionner la plus adéquate aux cellules fabriquées, en adéquation avec les performances optiques recherchées pour cette couche.

c) Bilan sur l'impact de la présence ou non de l'ARC passivant

Dans le chapitre 2, il a été montré que l'effet de périmètre impacte clairement les performances initiales des cellules. Cette étude de robustesse a montré que le périmètre joue également un rôle majeur lors du vieillissement accéléré des cellules étant donné que les plus petits dispositifs sont les plus affectés. Les cellules ont subi un test passif (PSSAT) dans les deux cas (ARC ou non) et il serait intéressant de vérifier si les résultats sont similaires dans le cas où des cellules sans et avec ARC sont testées sous ASSAT.

Il a également été mis en évidence que l'effet passivant de l'ARC diminuait au cours du stockage thermique. Néanmoins, on peut souligner que, même après que le PSSAT soit terminé, les cellules avec ARC, y compris les plus petites, restent plus performantes que les cellules sans ARC non « vieilles ».

Enfin, il est important de noter que les cellules sont destinées à fonctionner sous forte concentration, c'est-à-dire dans des conditions de forte injection dans lesquelles les pièges d'interface sont saturés (cf §2.3.4). Il est ainsi attendu que la perte de puissance relative sera donc inférieure à celle observée sous 1 soleil.

4.4.2 Comparaison du type de tests de vieillissement accéléré (passif vs actif)

a) Effet du type de test sur le taux de dégradation

→ *Les cellules ont subi des procédés d'assemblage différents*

Les dispositifs testés ont été assemblés par des techniques différentes qui ont menées à des énergies thermiques cumulées différentes selon le type de test (PSSAT vs ASSAT). En effet, dans le cas du PSSAT, une température d'assemblage de 170°C a été atteinte (cf §4.2.2c) contre 230°C dans le cas du ASSAT(cf §4.2.2d)). En 2009, Gonzalez *et al.* avaient suggéré que les centres de recombinaison pouvaient être saturés par des procédés thermiques [133]. De par les résultats obtenus, une limitation de la dégradation pourrait être observée pour les cellules ayant accumulé plus d'énergie thermique, ce qui est le cas.

Dans le cas du ASSAT, la taille des cellules n'a pas réellement influencé l'évolution des paramètres électriques au cours du vieillissement accéléré. Ceci indique que la dégradation du périmètre des cellules n'est pas le mécanisme dominant dans ce cas.

→ *Observation corrélée avec la bibliographie*

En 2017, Eltermann *et al.* ont montré que le vieillissement accéléré par stockage en température (180°C) était le plus impactant pour les cellules CPV (. En effet, les cellules vieilles par stockage en température combiné à une polarisation en courant ont été moins dégradées. Il en est de même pour les cellules vieilles par polarisation en courant seulement [134]. De tels résultats sont confirmés par notre étude.

b) Effet de la taille selon le type de test

→ *La polarisation en courant induit des lignes de champs variables selon la géométrie des contacts électriques*

Selon la taille des cellules, la géométrie et la surface des contacts d'émetteur varient. Ainsi, une cellule de 1 mm² possède 19.6% de sa surface recouverte par la métallisation et cette valeur atteint 39.5% pour une cellule de 0.076 mm². Avec une surface de métal plus importante, les plus petites cellules sont traversées par une densité de courant plus homogène. Il en résulte une diminution du stress lié au courant moins important traversant les matériaux semiconducteurs, susceptible de limiter la dégradation des cellules.

→ *Les lignes de champs créées sous polarisation directe ne sont pas nécessairement comparables à celles créées sous illumination*

En 2015, Espinet *et al.* ont souligné les différences de fonctionnement qui existaient entre une cellule en mode photogénération et une cellule polarisée directement [148]. La figure 4-9 met en évidence ces différences en particulier au niveau des densités de courant traversant une cellule (a) en mode photogénération sous une concentration de 820 X et (b) sous polarisation avec un courant équivalent à des conditions de concentration solaire identiques. Il peut être observé une différence majeure en termes de distribution géométriques des lignes de courant. En effet, dans le cas de la photogénération, la densité élevée de courant (~12 A/cm²) est

4.4 Analyse des résultats et discussion

répartie de manière homogène sur la surface de la cellule. On remarque que la densité est cependant bien plus faible sous les contacts en raison de l'ombrage induit par ceux-ci. Dans le cas de la polarisation directe de la cellule, les densités de courant les plus importantes se situent sous les contacts et sont particulièrement importantes au périmètre des cellules ($\sim 12 \text{ A/cm}^2$). Ceci pourrait avoir pour conséquence de limiter les recombinaisons de périmètre, justifiant ainsi une plus faible dégradation des plus petites cellules dans le cas du ASSAT.

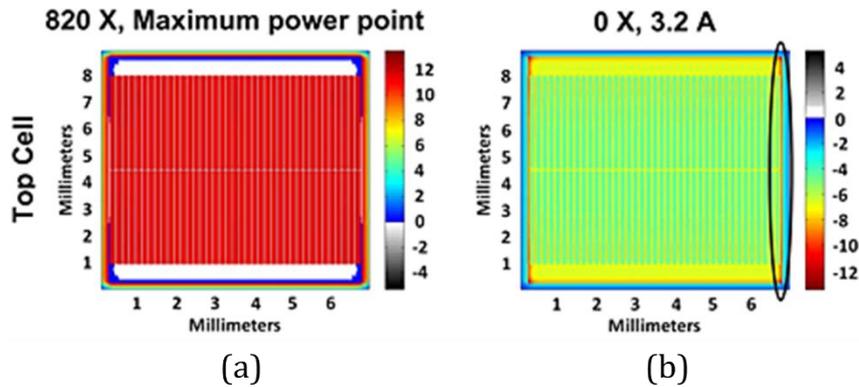


Figure 4-9: Cartographie en couleur des densités de courant dans la sous-cellule supérieure d'une cellule InGaP/InGaAs/Ge (a) en photogénération sous 820 X et (b) en polarisation directe avec un courant équivalent à un fonctionnement sous 820 X [151]

c) Bilan sur la comparaison du type de tests de vieillissement accéléré

Le test de vieillissement accéléré par stockage passif (PSSAT) est plus simple à mettre en œuvre que celui réalisé par stockage dit « actif » (ASSAT). Les deux types de test ont conduit à des résultats différents et il a été montré que le PSSAT impacte (contre intuitivement) plus les cellules, d'autant plus que leur taille était faible. Aussi, les dispositifs testés dans cette étude étaient assemblés avec des procédés différents, menant à une quantité d'énergie thermique cumulée plus importante pour les cellules du ASSAT. Une dégradation moins importante de ces dernières peut être expliquée par cette différence d'assemblage (similarités avec ce qui a été observé dans la bibliographie). De plus, le ASSAT, malgré l'addition du courant pour simuler les conditions opérationnelles présente des différences avec ces dernières. Ces différences, justifiées par une distribution géométrique des lignes de courant dans la cellule, peuvent conduire à une sous-estimation des dégradations. À ce stade, on peut donc conclure sur la l'efficacité de mener des tests actifs et passifs, ceux-ci ayant montré leur complémentarité. Cependant, une augmentation du nombre de dispositifs testés avec et sans ARC et ayant le même quantité d'énergie thermique cumulée permettrait de tirer des conclusions pondérées sur les effets observés.

Finalement, on peut souligner que malgré le fort niveau de stress appliqué dans cette étude et la faible maturité des procédés développés, aucune défaillance catastrophique n'a été observée, mettant en lumière la relative robustesse des cellules, y compris les plus petites. Ces résultats encourageants pour une première étude de robustesse sur ce type de dispositif confirment la nécessité de mettre en place des tests complémentaires mais aussi la complexité de tirer des conclusions directes sur les observations.

Conclusion du chapitre 4

La fiabilité des systèmes à base de micro-CPV et des microcellules qui les composent, doit être démontrée pour que l'accès au marché de cette technologie soit concevable à court terme sous peine de rester à l'état de curiosité technologique. Basés sur l'état de l'art pour les vieillissements accélérés dans le CPV, des tests ont été mis en place pour mettre en lumière, pour la première fois, l'effet de la miniaturisation des cellules sur leur robustesse intrinsèque.

Dans un premier temps, un test sous contraintes échelonnées passives (PSSAT) a été proposé. Celui-ci a consisté en une augmentation graduelle de la température de stockage jusqu'à 185°C tout en effectuant un suivi régulier des variations de performance des cellules sous test. Dans ce cas, des cellules de différentes tailles (de 0.076 mm² à 12.25 mm²), avec et sans ARC passivant, ont été comparées. Il a été montré que les plus petites cellules se dégradent plus fortement, phénomène attribué à une détérioration au périmètre des cellules et à la réduction de l'effet passivant de l'ARC.

Dans un second temps, un test sous contraintes échelonnées actives (ASSAT), qui consiste à ajouter une polarisation en courant équivalente à $1000 \times I_{SC@1sun}$ en plus du PSSAT, a été mis en œuvre. Ce type de test, par ses similarités avec les conditions opérationnelles des cellules CPV, a été plus largement abordé dans la littérature. Les dispositifs testés n'ont cependant pas confirmé les tendances observées avec le PSSAT.

Une discussion a permis de montrer que les différences entre la polarisation directe et les conditions d'opération, notamment sur la distribution géométrique des lignes de courant, pouvaient expliquer cette différence. Finalement, on conclut clairement sur la complémentarité des deux types de tests, et sur la relative robustesse des cellules fabriquées, y compris les microcellules, au regard de l'amplitude des niveaux de stress appliqués.

Conclusion générale

Dans cette thèse le développement de cellules submillimétriques multijonctions pour le micro-CPV (*Concentrator Photovoltaics*) a été réalisé en considérant trois grands axes complémentaires : fabrication, assemblage, et robustesse.

Les contributions majeures de ce travail sont les suivantes :

- Développement d'un procédé de microfabrication complet pour des cellules CPV submillimétriques ;
- Fabrication complète de la plus petite cellule InGaP/InGaAs/Ge de l'état de l'art ($A_{\text{mesa}} = 0.067 \text{ mm}^2$) ;
- Limitation des performances des cellules submillimétriques liée au phénomène de recombinaisons de périmètre nécessitant une passivation des surfaces ;
- Perspective de performances plus élevées pour les microcellules que pour les cellules standards sous très haute concentration ;
- Développement de cellules avec contacts en face avant démontrant des performances similaires aux cellules à contacts standards ;
- Développement d'un procédé d'assemblage des cellules en MIM et démonstration du premier MIM 3J ;
- Record d'efficacité certifié pour un MIM (35.1% sous 798 X) ;
- Mise en place d'essais de vieillissements accélérés adaptés aux cellules CPV et comparaison de ceux-ci ;
- Démonstration de la robustesse des procédés de fabrication développés, quelle que soit la taille des cellules fabriquées.

Dans un premier volet, une mise en contexte du projet a été faite. Après avoir rappelé le principe physique de la photoconversion, les différentes technologies utilisées sur le marché de l'énergie ont été présentées. Le CPV apparaît parmi celles qui ont un fort potentiel pour répondre à la demande mondiale croissante en électricité. Cette technologie utilise des cellules multijonctions très performantes (record d'efficacité à 47.1% sous 143 X) mais peine à concurrencer la technologie très établie basée sur le silicium cristallin. Ceci est dû à des spécificités du CPV (utilisation d'optiques de concentration, *tracking*, dissipation thermique complexe et pertes résistives dues aux forts flux lumineux) qui doivent être adressées pour diminuer les coûts de l'énergie (*LCOE, Levelized Cost of Electricity*). Le micro-CPV a été récemment proposé afin de répondre à cette problématique. Il repose sur une miniaturisation accrue des cellules (sous le mm^2), offrant la possibilité de simplifier la gestion thermique et diminuer les pertes Joule. Le micro-CPV offre également des opportunités en termes d'efficacité optique, de compacité de module et de *tracking* mais aussi en termes d'assemblage des cellules. La littérature propose principalement deux techniques d'assemblage de microcellules : le *transfer printing* et l'auto-alignement fluide. Finalement, les défis liés au développement des microcellules ont été mis en lumière. Le premier défi identifié est le besoin de procédés de fabrication adaptés pour des performances de microcellules III-V/Ge élevées (limitation des recombinaisons de périmètre notamment) et un rendement de *wafers* optimal (peu de perte de matériaux coûteux). Les challenges liés à l'interconnexion et à l'assemblage des microcellules doivent également être adressés. Enfin, le CPV et plus encore le micro-CPV sont des technologies peu matures. Or, pour assurer un faible *LCOE*, les cellules ou

Conclusion générale

microcellules doivent démontrer de hauts niveaux de fiabilité. Il a donc également été proposé de s'intéresser à l'impact de la miniaturisation des cellules sur la tenue des performances sous vieillissement accéléré.

Dans un second volet, cette thèse s'est focalisée sur le développement des procédés de fabrication pour les microcellules multijonctions et dans ce cadre, la structure commerciale GaInP/GaInAs/Ge a été utilisée comme brique de base. Prenant appui sur des procédés utilisés pour la fabrication de cellules CPV standards (*i.e.* > mm²), plusieurs étapes critiques, en ce qui concerne les microcellules, ont été identifiées. Les défis liés à la caractérisation électrique ont également été mis en avant, celle-ci étant nécessaire pour la validation des procédés mis en œuvre pour la fabrication des microcellules (par comparaison avec les performances de cellules de surface supérieure au mm²). Les procédés développés ont principalement porté sur l'isolation électrique, la passivation, le dépôt des contacts électriques et la singulation, en dressant un état de l'art pour chaque technique, de sorte à sélectionner la plus appropriée pour les microcellules. Dans le cadre de ce projet, une isolation électrique à base de gravure plasma a été utilisée. Elle permet notamment une isolation électrique « douce », tout en offrant la possibilité de réaliser des géométries variées en comparaison de la technique classique d'isolation mécanique par scie diamant. De plus, cette technique, en générant peu de défauts, limite la densité de centres de recombinaisons au périmètre, lesquels deviennent critiques pour des cellules de faibles dimensions (cellules jusqu'à 0.068 mm² fabriquées). Malgré cela, une chute des performances liée à la miniaturisation des cellules a été observée en démontrant une relation avec les effets de recombinaisons de périmètre. Pour limiter cet impact, un dépôt PECVD jouant le rôle de couche passivante et antireflet, a été utilisé. Il a été mis en évidence que l'impact des recombinaisons de périmètre est moindre sous forte concentration ($\Delta V_{oc} = 1.09\%$ sous 1231 X). Le dépôt des contacts électriques a également été traité dans cette partie, avec notamment des géométries variées de zones actives de cellules (rectangulaires, circulaires, hexagonales). De plus, les procédés développés ont permis de déposer le contact de base sur la face avant, contrairement au dépôt standard en face arrière. Cette architecture conduit aux mêmes performances électriques mais offrent également une méthode d'assemblage alternative, de type *flip-chip* ou MIM, abordée dans le troisième chapitre. Enfin, la singulation des microcellules a été repensée, et pour laquelle une découpe plasma a été optimisée. Celle-ci offre une grande flexibilité dans les formes de découpe ainsi que des largeurs de découpe pouvant descendre à 15 μm , marges de sécurité comprises. Ce faible impact de la singulation est idéal pour les microcellules puisqu'il permet de garder un rendement de *wafer* élevé (surface utilisable sur surface totale) avec 95% pour des cellules de 500 μm . Les procédés de fabrication ont finalement été validés pour les microcellules avec des mesures certifiées 1 soleil et sous concentration à ISE Fraunhofer en Allemagne. Il a été démontré que des cellules de 500 μm de côté avaient des performances électriques proches de celles des cellules de 1 mm² (-0.6% d'efficacité maximale) et la disposition aux plus petites cellules d'être plus performantes sous très haute concentration (efficacité plus élevée à partir de ~ 700 X). Cette étape a permis de valider la fabrication des microcellules, et leur interconnexion sous forme de MIM (*Monolithic Interconnected Module*) a été traitée par la suite.

Un troisième volet a abordé l'aspect assemblage des microcellules III-V/Ge en MIM. Le MIM est un dispositif qui repose sur un assemblage en série de cellules, lequel est réalisé de manière monolithique, et destiné à fonctionner sous fort flux lumineux tels que ceux rencontrés dans le CPV. Un état de l'art des MIM basés sur silicium, sur matériaux III-V et sur des structures

multijonctions a été dressé, mettant en avant l'absence de MIM fait à partir de structures triple jonctions (3J) ou plus. Ceci est notamment dû à la « complexité » d'isoler électriquement les cellules entre elles, tout en ayant les contacts électriques de base et d'émetteur sur la même face, avec des structures III-V/Ge. Comme cela a été décrit dans le chapitre 2, ce type d'architecture a pu être accompli dans le cadre de cette thèse. Ainsi, basé sur cette architecture, le développement du MIM 3J s'est ensuite articulé autour de la planarisation (isolation électrique), laquelle doit permettre l'interconnexion subséquente des cellules en série. Une discussion a été, par la suite, proposée pour l'optimisation de la surface de MIM. En effet, il convient que la surface nécessaire à l'isolation électrique et à l'interconnexion soit la plus faible possible. Dans ce cadre, les premiers MIM 3J ont été proposés basés sur diverses géométries (rectangulaires, circulaires, hexagonales), dimensions (de 1 mm à 3 mm de côté pour le MIM complet) et configurations (de 2 à 9 cellules interconnectées en série). Les performances de ces prototypes ont ensuite été validées électriquement sous une illumination 1 soleil et ont démontré la flexibilité des procédés développés avec des dispositifs ayant un V_{oc} compris entre 4.42 V et 20.36 V et un J_{sc} compris entre 1.46 mA.cm⁻² et 6.33 mA.cm⁻². Enfin de très bonnes performances ont également été confirmées sous concentration (mesures certifiées ISE Fraunhofer) avec une efficacité maximale à 35.1% sous 798 X (record d'efficacité tous MIM confondus). De plus, l'efficacité mesurée reste aussi élevée que 34.7% sous 1231 X. Ainsi, l'interconnexion des cellules dans le MIM n'a pas généré de pertes résistives supplémentaires par rapport à une cellule simple, validant les procédés mis en œuvre.

La dernière partie de ce travail a adressé l'évaluation de la robustesse des microcellules fabriquées. Le micro-CPV, encore plus que le CPV, est une technologie récente mais doit démontrer une fiabilité importante (durée de mission > 25 ans) pour permettre de réduire le *LCOE*. Pour cela, après avoir défini les termes relatifs à la robustesse et aux vieillissements accélérés de manière générale, les particularités du CPV pour les tests de vieillissement accéléré de cellules ont été exposées. L'état de l'art sur ce type de tests a été étudié et a permis de retenir deux types de tests, adaptés à l'étude préliminaire de l'impact de la miniaturisation et des recombinaisons de périmètre (présence de la couche de passivation ou non). Le premier est un test sous contraintes échelonnées passives (contraintes thermiques échelonnées), et le second correspond à un test sous contraintes échelonnées actives (contraintes thermiques échelonnées et polarisation en courant fixée à 1000 I_{sc}). Il a notamment été montré que l'effet passivant de l'ARC se dégradait durant le test. Aussi, une tendance différente en fonction de la taille des cellules a été observée selon les types de test (passif ou actif). Une discussion a été proposée pour investiguer sur l'origine des variations observées, conduisant à la complémentarité des tests menés. Finalement, du fait que les hauts niveaux de stress appliqués aux dispositifs n'ont pas généré de défaillance catastrophique, la relative robustesse des cellules fabriquées a pu être mise en lumière, y compris celle des plus petites.

Dans ce travail de recherche, il a été démontré que les procédés de fabrication développés ont permis de fabriquer des microcellules performantes, lesquelles pouvaient être interconnectées monolithiquement, et robustes, malgré leur faible maturité. Dans ce projet, l'emphase a donc été mise sur la microfabrication laquelle était toujours en lien avec la caractérisation, l'assemblage et la fiabilité. Ceci a été rendu possible grâce à l'expertise croisée de chaque partenaire : LN2-Université de Sherbrooke / IMS-Université de Bordeaux / Sunlab-Université d'Ottawa. Les études axées selon ces grands piliers technologiques ont permis d'avoir une vision globale sur les dispositifs fabriqués en s'attachant à objectiver une capacité

Conclusion générale

d'industrialisation à moyen terme. Dans la prochaine section, les perspectives proposées pour chaque domaine sont détaillées.

Perspectives

À l'issue de ces travaux, des perspectives sont proposées pour les différents axes étudiés. Celles-ci ainsi que d'autres perspectives, non abordées encore, sont listées dans cette section en considérant les axes microfabrication, assemblage, caractérisation et robustesse/fiabilité.

- Perspectives en microfabrication :
 - Wafers « source » : utilisation de structures triple jonctions plus performantes voire de plus de trois jonctions ; utilisation de *wafers* complets pour le développement des procédés.
 - Isolation électrique : optimisation des procédés pour limiter les recombinaisons de périmètre; Fabrication de cellules plus petites.
 - Passivation : développement d'un procédé plus adapté pour limiter les recombinaisons de périmètre (PECVD, ALD, chimique) ou une combinaison des techniques proposées (*e.g.* passivation chimique puis par PECVD). Optimisation de celui-ci par des mesures capacitives sur des diodes de GaAs.
 - Contacts électriques d'émetteur : modélisation des designs en fonction de l'application ; optimisation des métallisations de contact et du recuit de celles-ci ; possible suppression des *busbars* selon la technique d'assemblage utilisée.
 - Contacts électriques de base : optimisation des métallisations, de la surface de contact en fonction de l'application ; possible amélioration du contact ohmique par dopage local du semiconducteur (sous le contact); étude de l'impact de ces contacts sur la résistance série de la cellule.
 - Singulation : diminution des dimensions de découpe (jusqu'à 10 μm voire moins) ; utilisation d'un support temporaire de *wafer* commun aux étapes de singulation et d'assemblage.
 - Application des techniques développées aux autres dispositifs optoélectroniques voire électroniques
 - Analyse technico-économique comparative des microcellules.

- Perspectives en assemblage
 - Placement : test d'un système de *pick-and-place* sur des cellules avec contacts standard (base en face arrière) pour le placement sur un support métallique voire un PCB. Test de ce même type de système pour les cellules avec contacts en face avant pour un assemblage type *flip-chip*. Assemblage hétérogène avec cellule active de silicium comme support mécanique.
 - Interconnexion sur supports : optimisation des paramètres technologiques des supports (matériaux, dimensions).
 - MIM : optimisation de la surface active par la réduction des pertes de surface liées à l'interconnexion et à l'isolation électrique des cellules constituant le MIM ; utilisation d'un matériau de planarisation dont l'insensibilité aux UV est avérée. Augmentation du nombre de cellules dans les MIM pour atteindre de très fortes tensions et se rapprocher au plus près de la tension de sortie d'un module (généralement 600 V). Tests en extérieur des MIM dans un système CPV standard. Analyse technico-économique des MIM.
 - Intégration d'optiques secondaires microfabriquées.

Perspectives

- Intégration hybride sur silicium actif de cellules ou de MIM. Collage ou *Fan-Out Wafer Level Packaging*.
- Proposition d'assemblage pour le marché du spatial, et plus particulièrement, les nanosatellites.

- Perspectives en caractérisation
 - Caractérisation sous illumination : utilisation de simulateur solaire et flash tester de classe AAA uniquement pour les cellules de faibles dimensions.
 - Caractérisation en obscurité en fonction de la température et modélisation. Proposition d'un modèle incluant l'effet de taille des cellules. Comparaison entre ce modèle et un modèle TCAD (*Technology Computer-Aided Design*).
 - Caractérisation IQE et EQE : développement d'une méthode permettant la caractérisation d'efficacité quantique des microcellules.
 - Autres caractérisations : électroluminescence, système LBIC (*Light Beam Induced Current*) / LBIV (*Light Beam Induced Voltage*), photoluminescence (+ caméra filtrée par sous-cellule), cathodoluminescence, pour l'observation des recombinaisons de périmètre notamment, caractérisation thermique.
 - Utilisation de MIM comme capteurs pour la caractérisation précise (multijonctions, nombre de cellules) de flux lumineux.

- Perspectives pour l'étude de robustesse et fiabilité
 - Dispositifs testés : augmentation du nombre d'échantillons par test ; Comparaison d'échantillons ayant été fabriqués et stockés dans les mêmes conditions ; utilisation de matériaux compatibles avec les hautes températures pour l'assemblage des cellules et le montage.
 - Suivi de l'évolution des performances : mesures *I-V* sous illumination avec simulateur solaire de classe AAA ; mesures *I-V* en obscurité pour s'affranchir des variations d'illumination ; mesures *in-situ*.
 - Analyse des modes de défaillance : *fitting* des caractéristiques *I-V* en obscurité ;
 - Analyse des mécanismes de défaillance : caractérisation morphologique (microscope optique, microscopie électronique à balayage, EDX, ...)
 - Modèle de fiabilité pour les microcellules / cellules CPV / dispositifs optoélectroniques.

Pour conclure, il est important de noter que, par sa pluridisciplinarité, ce projet de thèse a soulevé de nombreuses pistes d'étude pour la suite du développement, au sein du LN2, des cellules submillimétriques dédiées au micro-CPV. Ces pistes ouvrent maintenant la voie à l'établissement de cette technologie novatrice dans le domaine en expansion des énergies renouvelables.

Liste des publications

- [1] P. Albert, A. Jaouad, G. Hamon, M. Volatier, Y. Deshayes, L. Béchou, V. Aimez et M. Darnon “ *Three-junction monolithic interconnected microcells for concentrated photovoltaics* ”, Révisions en cours à Progress in Photovoltaics : Research and Applications, 2020, (ARTICLE DE JOURNAL)
- [2] P. Albert, A. Jaouad, G. Hamon, M. Volatier, C.E. Valdivia, Y. Deshayes, K. Hinzer, L. Béchou, V. Aimez et M. Darnon “ *Micro multijunction solar cells for concentrated photovoltaics (micro-CPV): fabrication and characterization* ”, Accepté avec révisions mineures à Progress in Photovoltaics : Research and Applications, 2020, (ARTICLE DE JOURNAL)
- [3] P. Albert, G. Hamon, M. Volatier, Y. Deshayes, A. Jaouad, V. Aimez, L. Béchou et M. Darnon “*Towards miniaturization of concentrated photovoltaics (CPV): impact on fabrication, performance and robustness of solar cells*”, 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2020 (ARTICLE DE CONFÉRENCE)
- [4] P. Albert, A. Jaouad, M. Volatier, C.E Valdivia, Y. Deshayes, L. Béchou, V. Aimez et M. Darnon “*Area downsizing effects on electrical performance and robustness of triple junction solar cells for CPV applications*”, International Symposium on Reliability of Optoelectronics for Systems (ISROS), 2019 (ARTICLE DE CONFÉRENCE)

Liste des communications

- [1] 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Calgary, Canada, Juin 2020 (ORAL)
- [2] International Symposium on Reliability of Optoelectronics for Systems (ISROS), Toulouse, France, Novembre 2019 (ORAL)
- [3] Journées Nationales de l'Énergie Solaire (JNES), Annecy, France, Juin 2019 (POSTER)
- [4] 15th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-15), Fez, Maroc, Mars 2019 (ORAL)
- [5] Colloque du Laboratoire Nanotechnologies & Nanosystèmes (LN2), Autrans, France, Juillet 2018 (POSTER)
- [6] Journées Nationales de l'Énergie Solaire (JNES), Lyon, France, Juin 2018 (POSTER)
- [7] École d'été de Top-Set, Ottawa, Canada, Mai 2018 (ORAL)
- [8] 14th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-14), Puertollano, Espagne, Avril 2018 (ORAL)
- [9] Journées Nationales des Technologies Émergentes (JNTE), Orléans, France, Novembre 2017 (ORAL)
- [10] École d'été du Réseau Québécois Étudiant sur les Matériaux de Pointe (RQÉMP), Lennoxville, Canada, Juillet 2017 (POSTER)
- [11] 13th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-13), Ottawa, Canada, Mai 2017 (POSTER)

Liste des communications

[12] École d'été du Réseau Québécois Étudiant sur les Matériaux de Pointe (RQÉMP), Lennoxville, Canada, Août 2016 (POSTER)

[13] Colloque du Laboratoire Nanotechnologies & Nanosystèmes (LN2), Orford, Canada, Juillet 2016 (POSTER)

Bibliographie

- [1] International Renewable Energy Agency, “Renewable Capacity Statistics 2020.” 2020, [Online]. Available: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2020.pdf.
- [2] “Trends in PV applications 2019 – IEA-PVPS.” https://iea-pvps.org/trends_reports/2019-edition/ (accessed Apr. 05, 2020).
- [3] “World Energy Outlook 2019 – Analysis,” IEA. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019> (accessed Apr. 05, 2020).
- [4] M. Scott, “Clean energy will continue to hit dirty power as costs continue to fall,” *Forbes*. <https://www.forbes.com/sites/mikescott/2019/10/29/clean-energy-will-continue-to-hit-dirty-power-as-costs-continue-to-fall/>.
- [5] “Le coût de production de l’électricité nucléaire actualisation 2014 | Cour des comptes.” <https://www.ccomptes.fr/fr/publications/le-cout-de-production-de-lelectricite-nucleaire-actualisation-2014> (accessed Apr. 05, 2020).
- [6] SunPower, “SunPower 400-425 W Residential AC Module - A Series.” [Online]. Available: <https://us.sunpower.com/sites/default/files/spr-a-series-425-415-400-g-ac-datasheet-532618-revb.pdf>.
- [7] D. S. Philipps and W. Warmuth, “Photovoltaics Report,” *Fraunhofer ISE*.
- [8] “Standard Solar Spectra | PVEducation.” <https://www.pveducation.org/pvcdrom/appendices/standard-solar-spectra> (accessed Jul. 30, 2020).
- [9] P. Mathieuco |, “Fonctionnement d’un panneau photovoltaïque – BCLT Energie.” https://bcltenergie.com/_home/2017/05/26/fonctionnement-dun-panneau-photovoltaique/ (accessed Jun. 15, 2020).
- [10] M. Y. Levy and C. Honsberg, “Rapid and precise calculations of energy and particle flux for detailed-balance photovoltaic applications,” p. 6, 2006.
- [11] W. Shockley and H. J. Queisser, “Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells,” p. 11.
- [12] I. Rey-Stolle, J. M. Olson, and C. Algora, “Concentrator Multijunction Solar Cells,” in *Handbook of Concentrator Photovoltaic Technology*, C. Algora and I. Rey-Stolle, Eds. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd, 2016, pp. 59–136.
- [13] M. A. Green, “Limiting photovoltaic monochromatic light conversion efficiency,” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 9, no. 4, pp. 257–261, 2001, doi: 10.1002/pip.375.
- [14] A. D. Vos, “Detailed balance limit of the efficiency of tandem solar cells,” *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 13, no. 5, pp. 839–846, May 1980, doi: 10.1088/0022-3727/13/5/018.
- [15] N. V. Yastrebova, “High-efficiency multi-junction solar cells:,” p. 22.
- [16] C. Downs and T. Vandervelde, “Progress in Infrared Photodetectors Since 2000,” *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 13, pp. 5054–5098, Apr. 2013, doi: 10.3390/s130405054.
- [17] R. Homier *et al.*, “Antireflection Coating Design for Triple-Junction III-V/Ge High-Efficiency Solar Cells Using Low Absorption PECVD Silicon Nitride,” *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 2, no. 3, pp. 393–397, Jul. 2012, doi: 10.1109/JPHOTOV.2012.2198793.
- [18] J. F. Geisz *et al.*, “Six-junction III-V solar cells with 47.1% conversion efficiency under 143 Suns concentration,” *Nat Energy*, vol. 5, no. 4, pp. 326–335, Apr. 2020, doi: 10.1038/s41560-020-0598-5.
- [19] NREL, “Best Research-Cell Efficiencies.” Apr. 2020, [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/best-research-cell-efficiencies.20200406.pdf>.

Bibliographie

- [20] "Sharp Develops Concentrator Solar Cell with World's Highest Conversion Efficiency of 44.4% | Press Releases | Sharp Global." <http://www.sharp-world.com/corporate/news/130614.html> (accessed Apr. 19, 2019).
- [21] Azur Space, "Concentrator Triple Junction Solar Cell - 3C44 - 3x3mm2." [Online]. Available: http://www.azurspace.com/images/products/0004357-00-01_3C44_AzurDesign_3x3.pdf.
- [22] M. Ochoa Gómez, "TCAD Modelling, simulation and characterization of III-V multijunction solar cells," PhD Thesis, Universidad Politécnica de Madrid, 2018.
- [23] M. A. Green, "Solar cell fill factors: General graph and empirical expressions," *Solid-State Electronics*, vol. 24, no. 8, pp. 788–789, Aug. 1981, doi: 10.1016/0038-1101(81)90062-9.
- [24] "EnergyTrend - Solar Energy, Electric Vehicle, Power Battery, Wind Energy , Renewable Energy, Green Energy." <https://m.energytrend.com/pricequotes.html> (accessed Apr. 20, 2020).
- [25] V. D. Rumyantsev, "Solar concentrator modules with silicone-on-glass Fresnel lens panels and multijunction cells," *Opt. Express, OE*, vol. 18, no. 101, pp. A17–A24, Apr. 2010, doi: 10.1364/OE.18.000A17.
- [26] R. Mohedano and R. Leutz, "CPV Optics," in *Handbook of Concentrator Photovoltaic Technology*, C. Algora and I. Rey-Stolle, Eds. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd, 2016, pp. 187–238.
- [27] "Concentrating Photovoltaics | Solar Power," *Green Rhino Energy*. http://www.greenrhinoenergy.com/solar/technologies/pv_concentration.php (accessed Jul. 31, 2020).
- [28] I. Luque-Heredia, P. Magalhães, and M. Muller, "CPV Tracking and Trackers," in *Handbook of Concentrator Photovoltaic Technology*, C. Algora and I. Rey-Stolle, Eds. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd, 2016, pp. 293–338.
- [29] Azur Space, "Azur Space Advanced Dense Array Module (ADAM)." [Online]. Available: http://www.azurspace.com/images/pdfs/0003070-01-01_3C30M_ADAM.pdf.
- [30] J. Lasich *et al.*, "A 200kW central receiver CPV system," Aix-les-Bains, France, 2015, p. 030004, doi: 10.1063/1.4931508.
- [31] C. Algora *et al.*, "Reliability," in *Handbook of Concentrator Photovoltaic Technology*, C. Algora and I. Rey-Stolle, Eds. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd, 2016, pp. 521–588.
- [32] N. Bosco, T. Silverman, and S. Kurtz, "Modeling Thermal Fatigue in CPV Cell Assemblies: Preprint," p. 8.
- [33] "World-Record Solar Conversion Efficiency of 40.4% From CPV Startup RayGen." <https://www.greentechmedia.com/articles/read/world-record-solar-module-efficiency-of-40-4-from-cpv-startup-raygen> (accessed Jun. 12, 2020).
- [34] S. Askins and G. S. Pano, "CPV Modules," in *Handbook of Concentrator Photovoltaic Technology*, C. Algora and I. Rey-Stolle, Eds. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd, 2016, pp. 339–405.
- [35] K. Nishioka, T. Takamoto, T. Agui, M. Kaneiwa, Y. Uraoka, and T. Fuyuki, "Evaluation of InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cell and optimization of solar cell's structure focusing on series resistance for high-efficiency concentrator photovoltaic systems," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 90, no. 9, pp. 1308–1321, May 2006, doi: 10.1016/j.solmat.2005.08.003.
- [36] C. Algora, "Influence of Series Resistance on Guidelines for Manufacture of Concentrator p-on-n GaAs Solar Cells," p. 15, 2000.
- [37] A. Tauke-Pedretti *et al.*, "Resistance considerations for stacked small multi-junction photovoltaic cells," in *2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Tampa, FL, USA, Jun. 2013, pp. 2131–2135, doi: 10.1109/PVSC.2013.6744895.
- [38] M. Ochoa, E. Barrigón, L. Barrutia, I. García, I. Rey-Stolle, and C. Algora, "Limiting factors on the semiconductor structure of III-V multijunction solar cells for ultra-high concentration (1000-5000 suns): Limiting factors of multijunction solar cells for ultra-

- high concentration,” *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 24, no. 10, pp. 1332–1345, Oct. 2016, doi: 10.1002/pip.2791.
- [39] C. Kost *et al.*, “Levelized Cost of Electricity Renewable Energy Technologies,” p. 50.
- [40] S. van Riesen *et al.*, “New module design with 4-junction solar cells for high efficiencies,” Aix-les-Bains, France, 2015, p. 100006, doi: 10.1063/1.4931553.
- [41] L.-M. Collin, O. J. Arenas, R. Arès, and L. G. Fréchette, “Thermal Resistance and Heat Spreading Characterization Platform for Concentrated Photovoltaic Cell Receivers,” *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 3, no. 10, pp. 1673–1682, Oct. 2013, doi: 10.1109/TCPMT.2013.2254173.
- [42] C. Domínguez, N. Jost, S. Askins, M. Victoria, and I. Antón, “A review of the promises and challenges of micro-concentrator photovoltaics,” Ottawa, Canada, 2017, p. 080003, doi: 10.1063/1.5001441.
- [43] G. N. Nielson *et al.*, “Leveraging scale effects to create next-generation photovoltaic systems through micro- and nanotechnologies,” Baltimore, Maryland, USA, May 2012, p. 837317, doi: 10.1117/12.919464.
- [44] H. Arase *et al.*, “A Novel Thin Concentrator Photovoltaic With Microsolar Cells Directly Attached to a Lens Array,” *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 4, no. 2, pp. 709–712, Mar. 2014, doi: 10.1109/JPHOTOV.2013.2292364.
- [45] A. Vossier, B. Hirsch, E. A. Katz, and J. M. Gordon, “On the ultra-miniaturization of concentrator solar cells,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 95, no. 4, pp. 1188–1192, Apr. 2011, doi: 10.1016/j.solmat.2010.12.053.
- [46] P. Y. Maeda *et al.*, “Micro chiplet printer for micro-scale photovoltaic system assembly,” in *2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, New Orleans, LA, Jun. 2015, pp. 1–6, doi: 10.1109/PVSC.2015.7356280.
- [47] S. Burroughs *et al.*, “A New Approach For A Low Cost CPV Module Design Utilizing Micro-Transfer Printing Technology,” Freiburg, (Germany), 2010, pp. 163–166, doi: 10.1063/1.3509179.
- [48] T. Nakagawa *et al.*, “High-efficiency Thin and Compact Concentrator Photovoltaics with Micro-solar Cells Directly Attached to Lens Array,” in *Light, Energy and the Environment*, Canberra, 2014, p. RF4B.5, doi: 10.1364/OSE.2014.RF4B.5.
- [49] B. Furman *et al.*, “A high concentration photovoltaic module utilizing micro-transfer printing and surface mount technology,” Jun. 2010, pp. 000475–000480, doi: 10.1109/PVSC.2010.5616766.
- [50] H. Arase and T. Nakagawa, “Fluidic Self-Assembly of Microstructures Using a Blade-Coating Technique: Influence of Volume of Water Droplets on Probability of Microstructure Placement,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 51, p. 036501, Feb. 2012, doi: 10.1143/JJAP.51.036501.
- [51] P.-H. Huang, T.-C. Huang, Y.-T. Sun, and S.-Y. Yang, “Fabrication of large area resin microlens arrays using gas-assisted ultraviolet embossing,” *Opt. Express, OE*, vol. 16, no. 5, pp. 3041–3048, Mar. 2008, doi: 10.1364/OE.16.003041.
- [52] A. Ritou *et al.*, “Micro-concentrator with a self-assembly process,” in *AIP Conference Proceedings*, Sep. 2016, vol. 1766, p. 080005, doi: 10.1063/1.4962103.
- [53] A. Ritou *et al.*, “Mechanical tolerances study through simulations and experimental characterization for a 1000X micro-concentrator CPV module,” Ottawa, Canada, 2017, p. 030007, doi: 10.1063/1.5001418.
- [54] M. Paire *et al.*, “Microscale solar cells for high concentration on polycrystalline Cu(In,Ga)Se₂ thin films,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 98, no. 26, p. 264102, Jun. 2011, doi: 10.1063/1.3604789.
- [55] “Technical Features – Insolight.” <https://insolight.ch/technology/> (accessed Jun. 13, 2020).
- [56] J. P. Price and N. Giebink, “Concentrating photovoltaic panels for the rooftop,” *SPIE Newsroom*, Apr. 2015, doi: 10.1117/2.1201504.005934.

Bibliographie

- [57] J. S. Price *et al.*, “High-concentration planar microtracking photovoltaic system exceeding 30% efficiency,” *Nature Energy*, vol. 2, no. 8, p. 17113, 2017, doi: 10.1038/nenergy.2017.113.
- [58] J. Yoon *et al.*, “Ultrathin silicon solar microcells for semitransparent, mechanically flexible and microconcentrator module designs,” *Nature Mater*, vol. 7, no. 11, pp. 907–915, Nov. 2008, doi: 10.1038/nmat2287.
- [59] “MOSAIC Project Descriptions.” 2015, [Online]. Available: https://arpa-e.energy.gov/sites/default/files/documents/files/MOSAIC_Project_Descriptions.pdf.
- [60] “MOSAIC Program Overview.” 2015, [Online]. Available: https://arpa-e.energy.gov/sites/default/files/documents/files/MOSAIC_ProgramOverview.pdf.
- [61] “Semprius SM-U01 Series Datasheet.” [Online]. Available: <http://energy.asu.edu/jo/images/CPV.pdf>.
- [62] K. Ghosal, B. Fisher, D. Lilly, J. Gabriel, S. Seel, and S. Burroughs, “Ultrahigh Efficiency HCPV Modules and Systems,” *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 6, no. 5, pp. 1360–1365, Sep. 2016, doi: 10.1109/JPHOTOV.2016.2590884.
- [63] X. Sheng *et al.*, “Printing-based assembly of quadruple-junction four-terminal microscale solar cells and their use in high-efficiency modules,” *Nature Materials*, vol. 13, no. 6, pp. 593–598, Jun. 2014, doi: 10.1038/nmat3946.
- [64] M. P. Lumb *et al.*, “GaSb-Based Solar Cells for Full Solar Spectrum Energy Harvesting,” *Adv. Energy Mater.*, vol. 7, no. 20, p. 1700345, Oct. 2017, doi: 10.1002/aenm.201700345.
- [65] A. Itou *et al.*, “High-efficiency thin and compact concentrator photovoltaics using micro-solar cells with via-holes sandwiched between thin lens-array and circuit board,” *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 53, no. 4S, p. 04ER01, Jan. 2014, doi: 10.7567/JJAP.53.04ER01.
- [66] O. Fidaner *et al.*, “High efficiency micro solar cells integrated with lens array,” *Applied Physics Letters*, vol. 104, no. 10, p. 103902, Mar. 2014, doi: 10.1063/1.4868116.
- [67] N. Hayashi *et al.*, “High-efficiency thin and compact concentrator photovoltaics with micro-solar cells directly attached to a lens array,” *Opt. Express, OE*, vol. 23, no. 11, pp. A594–A603, Jun. 2015, doi: 10.1364/OE.23.00A594.
- [68] N. Hayashi *et al.*, “Nonuniformity Sunlight-Irradiation Effect on Photovoltaic Performance of Concentrating Photovoltaic Using Microsolar Cells Without Secondary Optics,” *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 6, no. 1, pp. 350–357, Jan. 2016, doi: 10.1109/JPHOTOV.2015.2491598.
- [69] N. Hayashi *et al.*, “Thin concentrator photovoltaic module with micro-solar cells which are mounted by self-align method using surface tension of melted solder,” Ottawa, Canada, 2017, p. 080005, doi: 10.1063/1.5001443.
- [70] M. Takase *et al.*, “Light plastic integrated micro CPV module: PIC with three-junction PV cells,” in *2018 18th International Workshop on Junction Technology (IWJT)*, Mar. 2018, pp. 1–3, doi: 10.1109/IWJT.2018.8330303.
- [71] K.-T. Lee *et al.*, “Concentrator photovoltaic module architectures with capabilities for capture and conversion of full global solar radiation,” *PNAS*, vol. 113, no. 51, pp. E8210–E8218, Dec. 2016, doi: 10.1073/pnas.1617391113.
- [72] “Sending CPV into Space - News,” *Compound Semiconductor*. /article/106548/Sending_CPV_into_Space/feature (accessed Jun. 13, 2020).
- [73] T. Gu *et al.*, “Wafer integrated micro-scale concentrating photovoltaics,” 2017, p. 080004, doi: 10.1063/1.5001442.
- [74] D. Li *et al.*, “Wafer integrated micro-scale concentrating photovoltaics,” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 26, no. 8, pp. 651–658, 2018, doi: 10.1002/pip.3034.
- [75] T. B. Stellwag *et al.*, “Effects of perimeter recombination on GaAs-based solar cells,” 1990, pp. 442–447, doi: 10.1109/PVSC.1990.111663.
- [76] P. Espinet-González, I. Rey-Stolle, M. Ochoa, C. Algora, I. García, and E. Barrigón, “Analysis of perimeter recombination in the subcells of GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cells:

- Analysis of perimeter recombination," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 23, no. 7, pp. 874–882, Jul. 2015, doi: 10.1002/pip.2501.
- [77] O. Fidaner, "Power Output of Multijunction Solar Cell Wafers," p. 4, 2013.
- [78] W.-S. Lei, A. Kumar, and R. Yalamanchili, "Die singulation technologies for advanced packaging: A critical review," *Journal of Vacuum Science & Technology. B. Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, Jul. 2012, doi: 10.1116/1.3700230.
- [79] Kulicke & Soffa, "Dicing Products Hub Blades and Services for Advanced Material Applications." [Online]. Available: https://www.seas.upenn.edu/~nanosop/documents/dicing_blade_catalog.pdf.
- [80] A. Turala, A. Jaouad, D. P. Masson, S. Fafard, R. Arès, and V. Aimez, "Isolation of III-V/Ge Multijunction Solar Cells by Wet Etching," *International Journal of Photoenergy*, pp. 1–7, 2013, doi: 10.1155/2013/583867.
- [81] O. Fidaner, M. W. Wiemer, V. A. Sabnis, and E. Lucow, "Method for etching multi-layer epitaxial material," US9627561B2, Apr. 18, 2017.
- [82] H. van Houten, B. J. van Wees, M. G. J. Heijman, and J. P. André, "Submicron conducting channels defined by shallow mesa etch in GaAs-AlGaAs heterojunctions," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 49, no. 26, pp. 1781–1783, Dec. 1986, doi: 10.1063/1.97243.
- [83] M. Darnon *et al.*, "Microtechnologies for high efficiency solar cells," May 2016, pp. 1–2, doi: 10.1109/PN.2016.7537907.
- [84] M. de Lafontaine *et al.*, "Impact of Via Hole Integration on Multijunction Solar Cells for Through Cell Via Contacts and Associated Passivation Treatment," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 7, no. 5, pp. 1456–1461, Sep. 2017, doi: 10.1109/JPHOTOV.2017.2711423.
- [85] M. de Lafontaine *et al.*, "Influence of plasma process on III-V/Ge multijunction solar cell via etching," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 195, pp. 49–54, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.solmat.2019.01.048.
- [86] M. A. Green, "Solar cell fill factors - General graph and empirical expressions," *Solid State Electronics*, vol. 24, p. 788, Aug. 1981, doi: 10.1016/0038-1101(81)90062-9.
- [87] L. Zhou, B. Bo, X. Yan, C. Wang, Y. Chi, and X. Yang, "Brief Review of Surface Passivation on III-V Semiconductor," *Crystals*, vol. 8, no. 5, p. 226, May 2018, doi: 10.3390/cryst8050226.
- [88] S. Anantathanasarn, S. Ootomo, T. Hashizume, and H. Hasegawa, "Surface passivation of GaAs by ultra-thin cubic GaN layer," *Applied Surface Science*, vol. 159–160, pp. 456–461, Jun. 2000, doi: 10.1016/S0169-4332(00)00077-5.
- [89] H. H. Lu, J. P. Xu, L. Liu, L. S. Wang, P. T. Lai, and W. M. Tang, "Improved interfacial quality of GaAs metal-oxide-semiconductor device with NH₃-plasma treated yttrium-oxy-nitride as interfacial passivation layer," *Microelectronics Reliability*, vol. 56, pp. 17–21, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.microrel.2015.10.013.
- [90] Yu. V. Medvedev, "Thermodynamic stability of GaAs sulfur passivation," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 64, no. 25, pp. 3458–3460, Jun. 1994, doi: 10.1063/1.111240.
- [91] A. Jaouad, V. Aimez, and C. Aktik, "GaAs passivation by low-frequency plasma-enhanced chemical vapour deposition of silicon nitride," *Electronics Letters*, vol. 40, no. 16, pp. 1024–1026, Aug. 2004, doi: 10.1049/el:20045328.
- [92] A. R. Burgers, "How to design optimal metallization patterns for solar cells," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 7, no. 6, pp. 457–461, 1999, doi: 10.1002/(SICI)1099-159X(199911/12)7:6<457::AID-PIP278>3.0.CO;2-U.
- [93] N. Braslau, J. B. Gunn, and J. L. Staples, "Metal-semiconductor contacts for GaAs bulk effect devices," *Solid-State Electronics*, vol. 10, no. 5, pp. 381–383, May 1967, doi: 10.1016/0038-1101(67)90037-8.
- [94] P. Huo and I. Rey-Stolle, "Al-based front contacts for HCPV solar cell," Ottawa, Canada, 2017, p. 040004, doi: 10.1063/1.5001426.
- [95] VLSI Research, "Session 5.3: Dicing," in *History of the Chip Equipment*, 1987.

Bibliographie

- [96] G. Savriama, "REVIEW OF LASER TECHNOLOGIES FOR DICING MICROELECTRONICS CHIPS," pp. 169–178, 2016, doi: 10.13140/RG.2.1.1159.9129.
- [97] A. Kumar, P. C. Nallan, A. Khan, and D. V. Podlesnik, "Method for dicing a semiconductor wafer," US6642127B2, Nov. 04, 2003.
- [98] Hamamatsu, "Stealth Dicing Technical Information for MEMS." 2014, [Online]. Available: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/SD_tech_forMEMS_TLAS9005E.pdf.
- [99] J.-G. Werthen, "Trends in Solar Cell Technologies and Laser Manufacturing," *Laser Technik Journal*, vol. 8, no. 1, pp. 18–20, 2011, doi: 10.1002/latj.201090100.
- [100] A. Harikai, K. Arita, and T. Iwai, "Plasma dicing apparatus and method of manufacturing semiconductor chips," US7994026B2, Aug. 09, 2011.
- [101] M. Darnon *et al.*, "Deep germanium etching using time multiplexed plasma etching," *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, p. 060605, Nov. 2015.
- [102] V. M. Andreev, E. A. Ionova, V. R. Larionov, V. D. Rumyantsev, M. Z. Shvarts, and G. Glenn, "Tunnel Diode Revealing Peculiarities at I-V Measurements in Multijunction III-V Solar Cells," in *2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference*, Waikoloa, HI, 2006, pp. 799–802, doi: 10.1109/WCPEC.2006.279577.
- [103] H. Helmers, W. Y. Thor, T. Schmidt, D. W. van Rooyen, and A. W. Bett, "Optical analysis of deviations in a concentrating photovoltaics central receiver system with a flux homogenizer," *Appl. Opt.*, vol. 52, no. 13, p. 2974, May 2013, doi: 10.1364/AO.52.002974.
- [104] A. Datas and P. G. Linares, "Monolithic interconnected modules (MIM) for high irradiance photovoltaic energy conversion: A comprehensive review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 73, pp. 477–495, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.01.071.
- [105] R. K. Riel, K. S. Tarneja, F. G. Ernack, and P. M. Kisinko, "Integrated high voltage solar cell panel," US3546542A, Dec. 08, 1970.
- [106] K.-I. Chang and D. R. Lillington, "Monolithically integrated solar cell microarray and fabrication method," US5716459A, Feb. 10, 1998.
- [107] R. M. Warner Jr., E. M. Murray, and W. K. Smith, "A monolithic series-array solar-cell system," *Applied Physics Letters*, vol. 31, no. 12, pp. 838–839, 1977, doi: 10.1063/1.89568.
- [108] R. M. Warner, Jr. *et al.*, "A Monolithic Series Array Solar Battery," 1978, pp. 1116–1117.
- [109] R. I. Frank and R. Kaplow, "Performance of a new high-intensity silicon solar cell," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 34, no. 1, pp. 65–67, Jan. 1979, doi: 10.1063/1.90560.
- [110] S. Peters, R. Leihkauf, and H. G. Wagemann, "Integrated series-interconnected thin-film Si solar cells with 6 V and 12 V output voltage," *3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003. Proceedings of*, vol. 2, pp. 1496–1499 Vol.2, 2003.
- [111] S. Bermejo, P. Ortega, and L. Castañer, "Fabrication of monolithic photovoltaic arrays on crystalline silicon by wafer bonding and deep etching techniques," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 13, no. 7, pp. 617–625, 2005, doi: 10.1002/pip.615.
- [112] A. Hammud, B. Terheiden, R. Auer, and R. Brendel, "Monolithically series-connected crystalline Si wafer cells for portable electronic devices," in *Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2005.*, Jan. 2005, pp. 1328–1330, doi: 10.1109/PVSC.2005.1488386.
- [113] V. J. Kapoor, G. J. Valco, G. G. Skebe, and J. C. Evans, "High-voltage solar-cell chip," *Journal of Applied Physics*, vol. 57, no. 4, pp. 1343–1346, Feb. 1985, doi: 10.1063/1.334537.
- [114] P. Verlinden, R. A. Sinton, R. M. Swanson, and R. A. Crane, "Single-wafer integrated 140 W silicon concentrator module," in *The Conference Record of the Twenty-Second IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 1991*, Oct. 1991, pp. 739–743 vol.1, doi: 10.1109/PVSC.1991.169307.
- [115] P. G. Borden, "A monolithic series-connected Al_{0.93}Ga_{0.07}As/GaAs solar cell array," *Applied Physics Letters*, vol. 35, no. 7, pp. 553–554, 1979, doi: 10.1063/1.91176.
- [116] P. G. Borden, "Monolithic series-connected solar cell," US4278473A, Jul. 14, 1981.

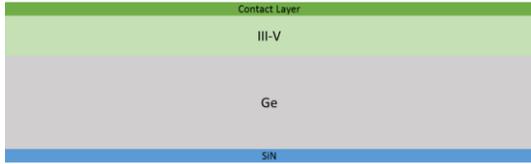
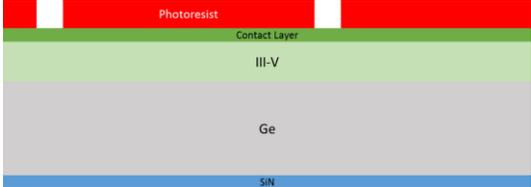
- [117] B. Beaumont, J.-C. Guillaume, M. F. Vilela, A. Saletes, and C. Verie, "High efficiency conversion of laser energy and its application to optical power transmission," 1991, pp. 1503–1507, Accessed: Oct. 08, 2019. [Online]. Available: <http://adsabs.harvard.edu/abs/1991pvs..conf.1503B>.
- [118] D. Krut, R. Sudharsanan, W. Nishikawa, T. Isshiki, J. Ermer, and N. H. Karam, "Monolithic multi-cell GaAs laser power converter with very high current density," in *Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2002.*, May 2002, pp. 908–911, doi: 10.1109/PVSC.2002.1190727.
- [119] R. Loeckenhoff, G. Dibowski, F. Dimroth, M. Meusel, S. Riesen, and A. W. Bett, "1000 Sun, Compact Receiver Based on Monolithic Interconnected Modules (MIMS)," in *2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference*, Waikoloa, HI, 2006, pp. 737–740, doi: 10.1109/WCPEC.2006.279561.
- [120] H. Helmers *et al.*, "Advanced Processing Techniques Used for the Development of Dual-Junction Monolithic Interconnected Modules," Freiburg, (Germany), 2010, pp. 39–42, doi: 10.1063/1.3509227.
- [121] H. Helmers, E. Oliva, W. Bronner, F. Dimroth, and A. W. Bett, "Processing Techniques for Monolithic Interconnection of Solar Cells at Wafer Level," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 57, no. 12, pp. 3355–3360, Dec. 2010, doi: 10.1109/TED.2010.2076190.
- [122] T. Akatsu *et al.*, "Germanium-on-insulator (GeOI) substrates—A novel engineered substrate for future high performance devices," *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 9, no. 4, pp. 444–448, Aug. 2006, doi: 10.1016/j.mssp.2006.08.077.
- [123] Y. B. Cheng, C. K. Chia, Y. Chai, and D. Z. Chi, "High quality Ge epitaxy on GaAs (100) grown by metal-organic chemical vapor deposition," *Thin Solid Films*, vol. 522, pp. 340–344, Nov. 2012, doi: 10.1016/j.tsf.2012.08.044.
- [124] "Nanochrome I." <https://www.intlvacthinfilm.ca/Systems-Processes/Magnetron-Sputtering/Nanochrome-I> (accessed Oct. 31, 2019).
- [125] HD MicroSystems, "HD-4100 Series - Product Bulletin," 2009. http://web.mit.edu/scholvin/www/mq753/Documents/resists.HD-4100_ProcessGuide.pdf.
- [126] HD MicroSystems, "HD-8820 Aqueous Positive Polyimide - Process Guide," 2010. <http://yumpu-download.tiny-tools.com/print.php?id=2066736>.
- [127] MicroChem, "SU-8 2000 - Permanent Epoxy Negative Photoresist - Processing Guidelines." <http://microchem.com/Prod-SU82000.htm>.
- [128] Desert Silicon, "Spin-on Glass NDG-7000R Datasheet." .
- [129] P. Huo, B. Galiana, and I. Rey-Stolle, "Comparison of Ti/Pd/Ag, Pd/Ti/Pd/Ag and Pd/Ge/Ti/Pd/Ag contacts to n-type GaAs for electronic devices handling high current densities," *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 32, no. 4, p. 045006, Apr. 2017, doi: 10.1088/1361-6641/32/4/045006.
- [130] P. Johannesson *et al.*, "A Robustness Approach to Reliability: A ROBUSTNESS APPROACH TO RELIABILITY," *Qual. Reliab. Engng. Int.*, vol. 29, no. 1, pp. 17–32, Feb. 2013, doi: 10.1002/qre.1294.
- [131] D. Crowe and A. Feinberg, *Design for Reliability*. CRC Press, 2017.
- [132] "Accelerated testing and failure of thin-film PV modules - McMahon - 2004 - Progress in Photovoltaics: Research and Applications - Wiley Online Library." <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pip.526> (accessed Jul. 07, 2020).
- [133] J. R. González, M. Vázquez, N. Núñez, C. Algora, I. Rey-Stolle, and B. Galiana, "Reliability analysis of temperature step-stress tests on III-V high concentrator solar cells," *Microelectronics Reliability*, vol. 49, no. 7, pp. 673–680, Jul. 2009, doi: 10.1016/j.microrel.2009.04.001.
- [134] F. Eltermann, L. Ziegler, M. Wiesenfarth, J. Wilde, and A. W. Bett, "Performance and failure analysis of concentrator solar cells after intensive stressing with thermal, electrical, and combined load," Ottawa, Canada, 2017, p. 050002, doi: 10.1063/1.5001432.
- [135] A. Cabarbaye, *Mise en oeuvre des essais accélérés*, Cab Innovation. 2019.

Bibliographie

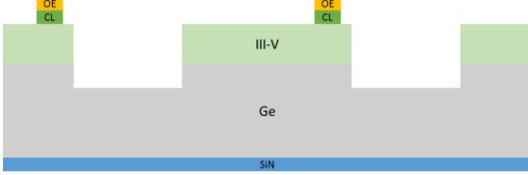
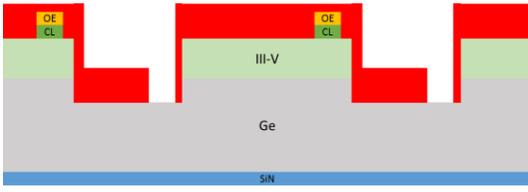
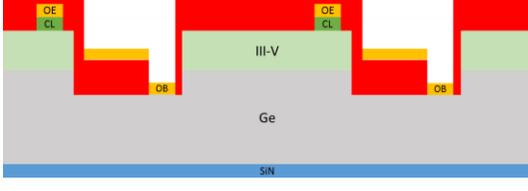
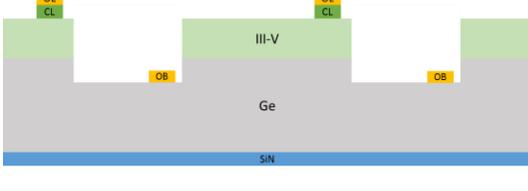
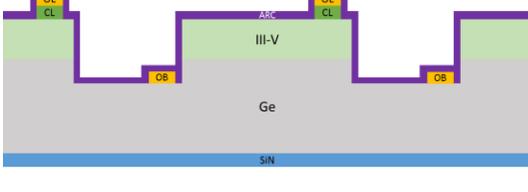
- [136] E. Gouno and N. Balakrishnan, "Ch. 23. Step-stress accelerated life test," in *Handbook of Statistics*, vol. 20, Elsevier, 2001, pp. 623–693.
- [137] V. Orlando *et al.*, "Failure analysis on lattice matched GaInP/Ga(In)As/Ge commercial concentrator solar cells after temperature accelerated life tests," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 25, no. 1, pp. 97–112, 2017, doi: 10.1002/pip.2818.
- [138] M. Muller, "Experience with CPV Module Failures at NREL." 2012, [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/54838.pdf>.
- [139] S. van Riesen and A. W. Bett, "Degradation study of III-V solar cells for concentrator applications," *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 13, no. 5, pp. 369–380, Aug. 2005, doi: 10.1002/pip.603.
- [140] N. Nuñez, M. Vazquez, V. Orlando, P. Espinet-González, and C. Algora, "Semi-quantitative temperature accelerated life test (ALT) for the reliability qualification of concentrator solar cells and cell on carriers: Semi-quantitative temperature accelerated life test," *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 23, no. 12, pp. 1857–1866, Dec. 2015, doi: 10.1002/pip.2631.
- [141] I. Rey-Stolle and C. Algora, "Reliability and degradation of high concentrator GaAs solar cells," Munich, Germany, 2001.
- [142] C. G. Zimmermann, "The Impact of Mechanical Defects on the Reliability of Solar Cells in Aerospace Applications," *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.*, vol. 6, no. 3, pp. 486–494, Sep. 2006, doi: 10.1109/TDMR.2006.881458.
- [143] J. Schöne *et al.*, "Impact of Thermal Cycles on the Material Quality of Metamorphic III-V Solar Cell Structures," *23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 1-5 September 2008, Valencia, Spain*, pp. 118–122, Nov. 2008, doi: 10.4229/23rdEUPVSEC2008-1B0.4.5.
- [144] S. Padovani *et al.*, "Triple junction InGaP/InGaAs/Ge solar cells for high concentration photovoltaics application: Degradation tests of solar receivers," *Microelectronics Reliability*, vol. 50, no. 9–11, pp. 1894–1898, Sep. 2010, doi: 10.1016/j.microrel.2010.07.087.
- [145] C. G. Zimmermann, C. Nömayr, M. Kolb, and A. Rucki, "A mechanism of solar cell degradation in high intensity, high temperature space missions: Mechanism of solar cell degradation," *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, p. n/a-n/a, Nov. 2011, doi: 10.1002/pip.1195.
- [146] R. M. France and M. A. Steiner, "High-Irradiance Degradation Studies of Metamorphic 1eV GaInAs Solar Cells," *MRS Proc.*, vol. 1432, pp. mrss12-1432-g05-03-ii06-03, 2012, doi: 10.1557/opl.2012.1028.
- [147] V. Orlando *et al.*, "Preliminary temperature accelerated life test (ALT) on lattice mismatched triple-junction concentrator solar cells-on-carriers," 2014, pp. 250–253, doi: 10.1063/1.4897072.
- [148] P. Espinet-González *et al.*, "Temperature accelerated life test on commercial concentrator III-V triple-junction solar cells and reliability analysis as a function of the operating temperature: Temperature accelerated life test," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 23, no. 5, pp. 559–569, May 2015, doi: 10.1002/pip.2461.

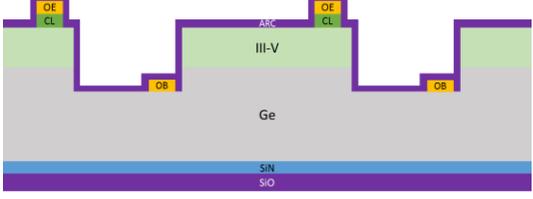
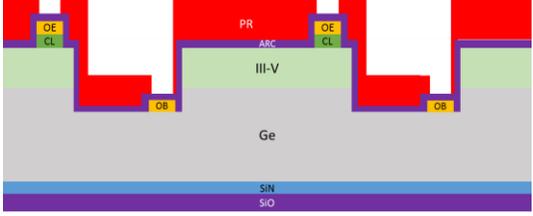
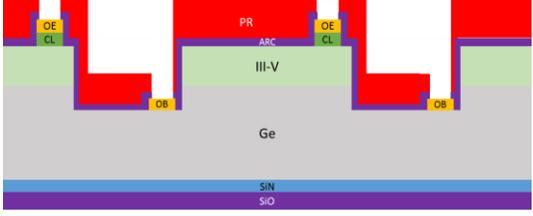
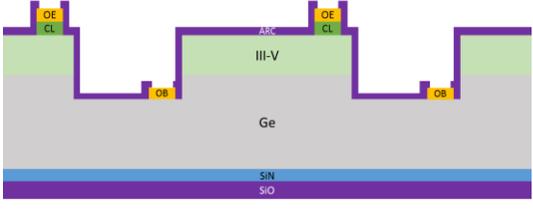
ANNEXE: Procédés de fabrication détaillés

Dans cette section sont détaillés les procédés permettant la fabrication d'un *monolithic interconnected module* (MIM) InGaP/InGaAs/Ge, tel que présentée au chapitre 3. La microfabrication d'une cellule à contacts en face avant suit les mêmes procédés jusqu'à l'issue de l'étape 8. Singulation.

Étape	Sous-étape	Détails	Schéma en coupe
0. Wafer initial		Structure commerciale InGaP/InGaAs/Ge avec SiN en face arrière	
1. Dépôt du contact d'émetteur	Photolithographie #1	<ul style="list-style-type: none"> - Déshydratation : 10 min @ 170°C - Étalement Futurrex NR4-8000P : 45 s @ 3500 rpm - Recuit doux : 1 min @ 130°C - Exposition UV: 580 mJ/cm² - Recuit post-exposition : 5 min @ 80°C - Développement MF319 : immersion 3 min 15 s - Rinçage eau DI, séchage N₂ - Plasma O₂ : 2 min @ 100 W 	

	Évaporation de la métallisation	<ul style="list-style-type: none"> - Désoxydation BOE : immersion 20 s - Rinçage rapide, séchage N₂ - Évaporation e-beam Pd/Ge/Ti/Pd/Al : 50/100/50/50/1000 nm 	
	Lift-off	<ul style="list-style-type: none"> - Immersion dans Remover 1165 : 2 h @ 75°C - Retrait métal libéré - Immersion dans Remover 1165 : 30 min @ 75°C - Retrait métal libéré - Nettoyage solvants : acétone 10 min, IPA 5 min - Rinçage eau DI, séchage N₂ 	
2. Gravure du mesa	Photolithographie #2	<ul style="list-style-type: none"> - Déshydratation : 10 min @ 170°C - Étalement AZ P4903 : 60 s @ 4500 rpm - Recuit doux : 2 min @ 110°C - Exposition UV: 740 mJ/cm² - Développement AZ 400K 1:3 : immersion 2 min 30 s - Rinçage eau DI, séchage N₂ - Plasma O₂ : 2 min @ 100 W, 300 mTorr 	
	Gravure plasma III-V	<ul style="list-style-type: none"> - Collage temporaire de l'échantillon sur wafer support Si avec cire CrystalBond - Gravure plasma III-V SiCl₄/Cl₂/H₂ : 20/10/20 sccm, p = 4 mTorr, P_{coil} = 445 W, P_{platen} = 260 W, V_{DC} = 420 V, V_{PP} = 840 V, t = 10 min 	
	Nettoyage post-gravure plasma et retrait résine	<ul style="list-style-type: none"> - Immersion dans HF 1% pendant 20 s - Rinçage eau DI, séchage N₂ - Plasma O₂ : 5 min @ 150 W, 300 mTorr - Nettoyage solvants : acétone 10 min, IPA 5 min - Rinçage eau DI, séchage N₂ Répétition des trois dernières étapes jusqu'à disparition de tous les résidus 	

3. Gravure de la couche contact	Gravure humide auto-alignée	<ul style="list-style-type: none"> - Immersion dans $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ 9:9:240 pendant 45 s (ou changement de la couleur de la face avant) 	
4. Dépôt du contact de base	Photolithographie #3	<ul style="list-style-type: none"> - Déshydratation : 10 min @ 170°C - Étalement Futurrex NR4-8000P : 45 s @ 3500 rpm - Recuit doux : 1 min @ 130°C - Exposition UV: 580 mJ/cm² - Recuit post-exposition : 5 min @ 80°C - Développement MF319 : immersion 3 min 15 s - Rinçage eau DI, séchage N₂ - Plasma O₂ : 2 min @ 100 W, 300 mTorr 	
	Évaporation de la métallisation	<ul style="list-style-type: none"> - Désoxydation BOE : immersion 20 s - Rinçage rapide, séchage N₂ - Évaporation e-beam Pd/Al : 50/500 nm 	
	Lift-off	<ul style="list-style-type: none"> - Immersion dans Remover 1165 : 2 h @ 75°C - Retrait métal libéré - Immersion dans Remover 1165 : 30 min @ 75°C - Retrait métal libéré - Nettoyage solvants : acétone 10 min, IPA 5 min - Rinçage eau DI, séchage N₂ 	
5. Dépôt de l'ARC	Dépôt PECVD sur la face avant	<ul style="list-style-type: none"> - SiN_xH_y : 66 nm - SiO_xH_y : 69 nm 	

<p>6. Dépôt de la couche « etch stop »</p>	<p>Dépôt PECVD sur la face arrière</p>	<p>- SiO_x: 500 nm</p>	
<p>7. Ouverture de l'ARC sur contacts</p>	<p>Photolithographie #4</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Déshydratation : 10 min @ 170°C - Étalement Futurrex NR4-8000P : 45 s @ 3500 rpm - Recuit doux : 1 min @ 130°C - Exposition UV: 650 mJ/cm² - Recuit post-exposition : 5 min @ 80°C - Développement MF319 : immersion 3 min 15 s - Rinçage eau DI, séchage N₂ - Plasma O₂ : 2 min @ 100 W, 300 mTorr 	
	<p>Gravure plasma de l'ARC</p>	<p>Gravure RIE CF₄ 200 W pendant 2 min, mass flow = 74 %, 30 mTorr</p>	
	<p>Retrait résine</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Nettoyage solvants : acétone 10 min, IPA 5 min - Rinçage eau DI, séchage N₂ - Plasma O₂ : 2 min @ 100 W 	

<p>8. Collage sur wafer support en Si</p>	<p>Dépôt de résine de protection, collage et retrait résine de protection</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Déshydratation : 10 min @ 170°C - Étalement PMMA 9% sur échantillon: 30 s @ 3000 rpm - Recuit doux : 1 min @ 180°C - Étalement CR200 sur support Si: 60 s @ 1000 rpm - Collage manuel échantillon - Recuit doux de l'ensemble : 3 min @ 120°C - Recuit élevé de l'ensemble : 5 min @ 180°C - Nettoyage solvant : acétone 10 min, IPA 5 min - Rinçage eau DI, séchage N₂ 	
<p>9. Singulation</p>	<p>Photolithographie #5</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Déshydratation : 10 min @ 170°C - Étalement Futurrex NR4-8000P : 45 s @ 3500 rpm - Recuit doux : 1 min @ 130°C - Exposition UV: 650 mJ/cm² - Recuit post-exposition : 5 min @ 80°C - Développement MF319 : immersion 3 min 15 s - Rinçage eau DI, séchage N₂ - Plasma O₂ : 2 min @ 100 W, 300 mTorr 	
	<p>Gravure plasma de l'ARC</p>	<p>Gravure RIE CF₄ 200 W pendant 2 min, mass flow = 74 %, 30 mTorr</p>	

	Gravure plasma du Ge	<ul style="list-style-type: none"> - Collage temporaire de l'échantillon sur wafer support couvert de SiO₂ avec cire CrystalBond - Gravure ASE procédé Bosch : 135 cycles, 45 min Phase gravure 13 s: SF₆/O₂ 130/13 sccm, $p = 25$ mTorr, $P_{coil} = 600$ W, $P_{platen} = 0$ W, $V_{DC} = 0$ V, $V_{PP} = 0$ V Phase passivation 7 s: C₄F₈ 85 sccm, $p = 15$ mTorr, $P_{coil} = 610$ W, $P_{platen} = 18$ W, $V_{DC} = 0$ V, $V_{PP} = 300$ V 	
	Retrait résine	<ul style="list-style-type: none"> - Plasma O₂ : 5 min @ 150 W, 300 mTorr - Nettoyage solvants : acétone 10 min, IPA 5 min - Rinçage eau DI, séchage N₂ Répétition des trois dernières étapes jusqu'à disparition de tous les résidus <u>POUR MICROCELLULES À CONTACTS AVANT</u> : À l'issue de cette étape, la CR200 du wafer support doit être gravée par immersion dans du WaferBond Remover à 120°C jusqu'au soulèvement des échantillons (~ 2 h dépendamment de la taille des échantillons). 	
10. Planarisation et remplissage des tranchées	Photolithographie #6	<ul style="list-style-type: none"> - Déshydratation : 10 min @ 170°C - Étalement SU-8 2005 : 60 s @ 2500 rpm - Recuit doux : 3 min 30 s @ 95°C - Étalement SU-8 2005 : 60 s @ 2500 rpm - Recuit doux : 3 min 30 s @ 95°C - Exposition UV: 120 mJ/cm² - Recuit post-exposition : 5 min @ 95°C - Développement SU-8 developer : immersion 3 min 30 s - Plasma O₂ : 2 min @ 75 W, 300 mTorr - Recuit permanent : 30 min @ 200°C 	

11. Interconnexion	Photolithographie #7	<ul style="list-style-type: none"> - Déshydratation : 10 min @ 170°C - Étalement Futurrex NR4-8000P : 45 s @ 3500 rpm - Recuit doux : 1 min @ 130°C - Exposition UV: 580 mJ/cm² - Recuit post-exposition : 5 min @ 80°C - Développement MF319 : immersion 3 min 15 s - Rinçage eau DI, séchage N₂ - Plasma O₂ : 2 min @ 100 W, 300 mTorr 	
	Évaporation de la métallisation	<ul style="list-style-type: none"> - Évaporation e-beam de 3000 nm d'Al avec inclinaison de 10° du porte-échantillon. 	
	Lift-off	<ul style="list-style-type: none"> - Immersion dans Remover 1165 : 2 h @ 75°C - Retrait métal libéré - Immersion dans Remover 1165 : 30 min @ 75°C - Retrait métal libéré - Nettoyage solvants : acétone 10 min, IPA 5 min - Rinçage eau DI, séchage N₂ 	