



HAL
open science

Développement de modules photovoltaïques bifaciaux à haut rendement utilisant le concept i-Cell

Yves Salinesi

► **To cite this version:**

Yves Salinesi. Développement de modules photovoltaïques bifaciaux à haut rendement utilisant le concept i-Cell. Electronique. Université de Strasbourg, 2018. Français. NNT : 2018STRAD038 . tel-04416426

HAL Id: tel-04416426

<https://theses.hal.science/tel-04416426>

Submitted on 25 Jan 2024

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.

ÉCOLE DOCTORALE Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur
UMR 7357

THÈSE présentée par :

Yves SALINESI

soutenue le : **29 Octobre 2018**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université de Strasbourg**

Discipline/ Spécialité : Science des Matériaux

**Développement de modules photovoltaïques
bifaciaux à haut rendement utilisant le concept i-Cell**

THÈSE dirigée par :

M. SLAOUI Abdelilah

Directeur de recherche, ICUBE, CNRS - Université de Strasbourg

RAPPORTEURS :

Mme KAMINSKI-CACHOPO Anne

Professeur, IMEP-LAHC/PHELMA, CNRS–Université de Grenoble

M. PASQUINELLI Marcel

Professeur, IM2NP, CNRS – Université Aix – Marseille

AUTRES MEMBRES DU JURY :

M. GORDON Ivan

Ingénieur de Recherche, IMEC, Leuven, Belgique

M. SOW Alioune

Ingénieur de Recherche, Société S'Tile, Poitiers

TABLE DES MATIERES

Table des matières	5
Table des figures	9
Introduction générale.....	17
Chapitre I : Synthèse & état de l'art.....	21
I-1. Contexte énergétique mondial.....	22
I-1.1. Contexte démographique.....	22
I-1.2. Consommation d'énergie	22
I-1.3. Climat.....	23
I-1.4. Sources d'énergie & alternatives aux énergies fossiles.....	24
I-1.5. Déploiement de l'énergie photovoltaïque.....	25
I-2. Le marché de l'énergie solaire	26
I-2.1. Production mondiale et installation.....	26
I-2.2. Le marché européen.....	27
I-2.3. Le secteur du BIPV : un marché de niche en expansion rapide.....	28
I-3. Les différentes cellules photovoltaïques	29
I-4. La cellule solaire classique.....	30
I-4.1. Procédé de fabrication.....	31
I-5. Les cellules à hauts rendements	35
I-5.1. Cellules PERC.....	35
I-5.2. Cellules IBC.....	36
I-5.3. Cellules HIT.....	38
I-5.4. Les cellules bifaciales.....	39
I-6. La Fabrication de modules.....	40
I-6.1. Structure d'un module PV	40
I-6.2. Effets de l'interconnexion.....	41
I-6.3. Limites à la puissance des modules.....	42
I-7. Le concept i-Cell	43
I-8. Présentation des travaux de thèse.....	46
Références du chapitre.....	47
Chapitre II : Réalisation de cellules PERC et bifaciales	51
Introduction.....	52

II-1. Objectifs	52
II-2. Procédés expérimentaux	53
II-2.1. Implantation ionique.....	53
II-2.2. Adaptation de la couche anti-reflet.....	59
II-2.3. Réduction de l'épaisseur des cellules	68
II-2.4. Réduction du fléchissement et de la quantité d'aluminium utilisé	71
II-3. Réalisation de cellules	74
II-3.1. Cellules PERC implantées avec anti-reflet	74
II-3.2. Cellules implantées sans anti-reflet	84
II-3.3. Conséquence de l'amincissement des plaquettes	86
II-3.4. Cellules PERC bifaciales	89
Conclusion du chapitre	97
Références du chapitre II.....	98
Chapitre III : Réalisation de modules à partir du concept i-Cell appliqué à des cellules avec métallisation à l'avant.....	103
Introduction.....	104
III-1. Objectifs	104
III-2. Procédés expérimentaux	105
III-2.1. Découpe en sous-cellules	105
III-2.2. Développement de motifs de métallisation spécifiques	110
III-2.3. Résultats.....	113
III-3. Réalisation de Modules.....	115
III-3.1. Préparation	115
III-3.2. Intégration en modules.....	119
Conclusion du chapitre	123
Références du chapitre III	124
Chapitre IV : Réalisation de cellules i-Cell IBC	125
Introduction.....	126
IV-1. Objectifs	126
IV-1.1. Optimisation des cellules par modélisation.....	127
IV-1.2. Procédé	128
IV-1.3. Résultats.....	130
IV-2. Réalisation de sous-cellules IBC.....	138
IV-2.1. Procédé	138

IV-2.2. Résultats.....	141
Conclusion du chapitre	146
Références du chapitre IV	147
Chapitre V : Réalisation de modules i-Cell IBC	149
Introduction.....	150
V-1. Objectifs	150
V-2. Développement de techniques d'assemblage.....	150
V-2.1. Etude du nombre de points de soudure nécessaires à la connexion	151
V-2.2. Interconnexion par rubans soudés parallèlement aux busbars	154
V-2.3. Assemblage d'i-Cell IBC amorcées non découpées	155
V-2.4. Interconnexion et assemblage par substrat fritté.....	157
V-2.5. Interconnexion par rubans de cuivre adhésifs	161
V-3. Réalisation de modules	162
V-3.1. Modules réalisés à partir de sous-cellules de 180 μm d'épaisseur avec soudure	163
V-3.2. Modules réalisés à partir de sous-cellules de 120 μm d'épaisseur avec soudure	166
V-3.3. Modules réalisés à partir de sous-cellules de 180 μm d'épaisseur sans soudure.....	168
V-3.4. Modules bifaciaux réalisés à partir de sous-cellules de 180 μm d'épaisseur sans soudure	170
V-4. Etudes des pertes lors de la fabrication de modules	172
V-4.1. Détermination des pertes dues aux surfaces inactives	172
V-4.2. Détermination des pertes optiques.....	173
V-4.3. Détermination des pertes résistives	176
V-5. Conclusion	179
Références Du Chapitre V.....	180
Conclusion et perspectives.....	181
Références.....	183
Annexe A : Histoire des cellules photovoltaïques	185
VI-1. Premières avancées & concept théorique.....	186
VI-2. Guerre froide et conquête spatiale.....	187
VI-3. Crise énergétique	188
Références.....	188
Annexe B : Physique des cellules solaires	191
Introduction.....	192
VII-1. Description atomique du silicium	192

VII-2.	Structure de bandes	193
VII-3.	L'interaction avec la lumière	194
VII-4.	Barrière de potentiel interne	195
VII-4.1.	Les dopants négatifs (donneurs de charge)	195
VII-4.2.	Les dopants positifs (accepteurs de charge)	196
VII-5.	La jonction.....	197
VII-6.	Génération de courant électrique.....	199
VII-7.	Equations des cellules photovoltaïques.....	200
VII-8.	Limites au rendement des cellules.....	202
VII-8.1.	Limites intrinsèques	202
VII-8.2.	Limites extrinsèques.....	208
VII-8.3.	Pertes résistives.....	210
	Références.....	211
Annexe C : La société S'Tile		213
VIII-1.	La société S'Tile	214
VIII-2.	Objectifs de l'entreprise.....	214
VIII-3.	Le frittage de poudre de silicium.....	215
VIII-4.	utilisation du frittage	216
VIII-5.	Le procédé de recristallisation	217
VIII-6.	Cellule solaire mince sur substrat fritté	217
VIII-7.	Les modules sur-mesure de S'Tile	220
	Références.....	220

TABLE DES FIGURES

Figure 0-1 : graphique décrivant les pertes lors de la mise en module de 60 cellules IBC.	17
Figure I-1 : l'expansion de la population mondiale : 2000-2030	22
Figure I-2. : l'expansion de la population mondiale : projection après 2030.....	22
Figure I-3 : consommation d'énergie mondiale par type de source.....	23
Figure I-4 : consommation d'énergie par région du monde.	23
Figure I-5 : émissions mondiales de CO ₂ (1850-2015) en milliers de tonnes de carbone équivalent.....	24
Figure I-6 : part des différentes sources d'énergie dans la production mondiale d'électricité.	25
Figure I-7 : part des différentes sources d'énergie dans la production mondiale d'électricité renouvelable.	25
Figure I-8 : évolution de la capacité photovoltaïque installée dans le monde (2005-2017).....	26
Figure I-9 : évolution de la capacité photovoltaïque installée par région du monde (de bas en haut : Chine, Allemagne, Japon, Etats-Unis, Italie, et reste du monde).	26
Figure I-10 : capacité cumulée installée dans le monde en 2017 et part de l'électricité consommée d'origine photovoltaïque par région.	27
Figure I-11 : installations totales en Europe.....	28
Figure I-12 : projections d'installation pour les systèmes PV standard, et BIPV	29
Figure I-13 : la part des différents types de matériaux utilisés dans la production des modules PV en fonction des années	30
Figure I-14 : Vue en coupe des composants d'une cellule Aluminium-BSF.....	31
Figure I-15 : photographie d'une cellule photovoltaïque conventionnelle	31
Figure I-16 : la texturation anisotrope d'une plaquette multicristalline (photographie au microscope optique, grossissement x 50).	32
Figure I-17 : la texturation isotrope d'une plaquette monocristalline (photographie au microscope optique, grossissement x 50).....	32
Figure I-18 : différentes épaisseurs d'une même couche de matériau antireflet impliquent différentes couleurs pour les plaquettes traitées	33
Figure I-19 : Analyse des pertes par recombinaison pour un exemple de cellule Al-BSF de type p.	34
Figure I-20 : ampleur de ces pertes en fonction de l'épaisseur du BSF.	34
Figure I-21 : Vue en coupe des composants d'une cellule à face arrière passivée.....	35
Figure I-22 : photographie d'une cellule PERC.....	35
Figure I-23 : les cellules IBC permettent la génération d'un courant et d'une tension plus forts que ceux des cellules PERC.....	37
Figure I-24 : ces caractéristiques plus élevées sont principalement dues à la réduction des pertes liées à la métallisation avant (en orange sur le graphique).	37
Figure I-25 : Vue en coupe des composants d'une cellule IBC.....	37
Figure I-26 : photographie d'une cellule IBC.....	37
Figure I-27 : Vue en coupe des composants d'une cellule HIT	39
Figure I-28 : photographies des faces avant et arrière d'une cellule bifaciale.....	40
Figure I-29 : la structure d'un module photovoltaïque.....	41

Figure I-30 : Illustration des effets optiques présents dans un module, et qui contribuent aux pertes supplémentaires.....	43
Figure I-31 : photographie d'une i-Cell, composée de quatre sous-cellules connectées en série. Les faces arrière contactent les busbars avant par recouvrement des sous-cellules.....	44
Figure II-1 : L'implantation ionique (à droite) permet de simplifier le début du procédé de fabrication des cellules PV en retirant les deux étapes notées en orange (étapes du procédé de diffusion décrit dans la colonne de gauche)..	54
Figure II-2 : épaisseur de la couche d'oxyde sec obtenue en fonction du temps de recuit d'implantation	57
Figure II-3 : profondeur de l'émetteur obtenue par diffusion des ions implantés en fonction de la durée de recuit.....	57
Figure II-4 : profil de dopage simulé immédiatement après implantation.....	58
Figure II-5 : un recuit de 15 min à 870 °C sous O ₂ permet l'obtention simultanée de la croissance d'une couche de SiO ₂ de 10 nm et d'un émetteur de 400 nm de profondeur avec une résistance carrée de 80 Ω/□.....	58
Figure II-6 : épaisseur de la couche d'oxyde humide obtenue en fonction du temps de recuit d'implantation	59
Figure II-7 : les effets optiques de l'encapsulation	62
Figure II-8 : illustration de la structure étudiée.....	64
Figure II-9 : réflexion en fonction de la longueur d'onde pour des cellules texturées, non encapsulées et avec différentes couches anti-reflet, calculée avec le programme OPAL2.....	65
Figure II-10 : réflexion en fonction de la longueur d'onde pour des cellules texturées, encapsulées dans de l'EVA et avec différentes couches anti-reflet, calculée avec le programme OPAL2.....	66
Figure II-11 : les échantillons de cellules oxydés et/ou nitrurés (en haut) ont été encapsulés entre une feuille de backsheet et une plaque de verre de 2 mm d'épaisseur avec de l'EVA (en bas)	67
Figure II-12 : réflexion en fonction de la longueur d'onde pour des cellules texturées, encapsulées dans de l'EVA sous une couche de verre standard de 2 mm d'épaisseur, et mesurées par spectroscopie.....	67
Figure II-13 : réflectivité mesurée à la surface des plaquettes texturées de 120 μm (en rouge), comparée à la réflectivité des plaquettes texturées de 180 μm (en noir), en fonction de la longueur d'onde.....	71
Figure II-14 : vue en coupe du motif composé de doigts d'aluminium en face arrière (à droite) comparé au dépôt d'aluminium trouvé sur la face arrière des PERC commerciales (à gauche).....	72
Figure II-15 : représentation des motifs étudiés A, B et C sur une portion de la cellule en comparaison du motif de référence.....	73
Figure II-16 : Structure des cellules PERC réalisées pour les deux lots d'échantillon.	75
Figure II-17 : détail du procédé de réalisation des cellules PERC et acteurs de chaque étape.	76
Figure II-18 : réflectivité, mesurée après texturation et nettoyage des plaquettes, en fonction de la longueur d'onde incidente.....	77
Figure II-19 : épaisseur d'une plaquette le long des deux diagonales, mesurée après nettoyage chimique et texturation.....	77
Figure II-20 : profil de dopage de l'émetteur après recuit mesuré par ECV sur une des cellules réalisées.	78
Figure II-21 : photographie du dépôt de nitrure d'environ 70 nm sur la face avant des cellules de référence.	78

Figure II-22 : photographie de la couche d'oxyde de 15 nm sur la face avant des cellules étudiées.	78
Figure II-23 : photographie du dépôt de nitrure d'environ 180 nm commun à la face arrière de toutes les cellules.	78
Figure II-24 : profil de la face arrière d'une cellule ayant subi l'ablation du diélectrique par laser. La zone ablatée est représentée en gris	79
Figure II-25 : microscopie optique (en haut) et électronique (en bas) d'un détail d'une des ouvertures linéaires.....	79
Figure II-26 : valeurs de résistance série R_s (en noir) et de résistance shunt R_{sh} (en rouge) en fonction de la température de recuit des contacts pour les quatre cellules réalisées.	80
Figure II-27 : valeurs de rendement η (en noir) et de facteur de remplissage FF (en rouge) en fonction de la température de recuit des contacts pour les quatre cellules réalisées.	80
Figure II-28 : valeurs de tension de circuit ouvert V_{oc} (en violet) et de courant de court-circuit I_{sc} (en bleu) en fonction de la température de recuit des contacts pour les quatre cellules réalisées. .	80
Figure II-29 : rendement quantique externe (EQE) mesuré en fonction de la longueur d'onde ..	84
Figure II-30 : structure des cellules réalisées sans anti-reflet.	84
Figure II-31 : profil de température subie par les cellules sans anti-reflet lors du recuit des contacts	86
Figure II-32 : étapes du procédé de fabrication des cellules PERC minces.	87
Figure II-33 : structure des cellules réalisées à partir des plaquettes de 120 μm	87
Figure II-34 : homogénéité de l'épaisseur d'une plaquette de 120 μm le long des deux diagonales, mesurée après nettoyage chimique, amincissement et texturation.....	88
Figure II-35 : le fléchissement observé sur les cellules minces après recuit des contacts est visible à l'œil nu.....	89
Figure II-36 : structure des cellules réalisées.	90
Figure II-37 : étapes du procédé de fabrication des cellules PERC destinées aux tests de métallisations ouvertes en face arrière.....	91
Figure II-38 : microscopie du motif d'aluminium C imprimé sur la face arrière d'une cellule (détail).....	92
Figure II-39 : la largeur d'une bande d'aluminium du motif C est en réalité de 750 μm	92
Figure II-40 : la largeur d'une bande d'aluminium du motif B est en réalité de 370 μm	93
Figure II-41 : microscopie d'un des défauts d'impression observé sur les bandes d'aluminium du motif B après recuit.....	93
Figure II-42 : l'impression des bandes du motif A (gris clair horizontal) n'est pas alignée sur les ouvertures dans le diélectrique (noir).	94
Figure II-43 : la largeur d'une bande d'aluminium du motif A est en réalité de 130 μm	94
Figure II-44 : fléchissement des cellules et rendement mesuré en face arrière en fonction du taux d'ouverture de la face arrière.	96
Figure III-1 : procédure de fabrication de cellules PERC standard, comparée à la fabrication de sous-cellules PERC	105
Figure III-2 : représentation schématique du positionnement des traits d'amorce laser (en rouge) utilisés pour découper des prototypes de sous-cellules à partir de cellules standard à quatre busbars.	106
Figure III-3 : photographie du simulateur solaire modifié pour la mesure de sous-cellules.	107
Figure III-4 : représentation schématique du montage de mesure des sous-cellules	107

Figure III-5 : résistance shunt R_{sh} (à gauche) et résistance série (à droite) mesurées pour les sous-cellules, en fonction de la puissance du faisceau laser utilisé pour leur séparation.....	107
Figure III-6 : une découpe à faible puissance endommage très peu la cellule (2 W, à gauche), tandis que les découpes avec une puissance supérieure à 14 W sont traversantes et endommagent l'émetteur de la cellule (à droite).	108
Figure III-7 : écarts-types calculés pour les valeurs de Voc, Isc, Rs et Rsh mesurées sur les sous-cellules, en fonction de la fréquence des impulsions laser utilisées pour la découpe.	108
Figure III-8 : image microscopique optique (tranche) de l'amorce laser avec une vitesse de déplacement du faisceau de 50 mm.s ⁻¹ (à gauche), et 200 mm.s ⁻¹ (droite).	109
Figure III-9 : mode d'interconnexion d'une cellule standard.	110
Figure III-10 : mode d'interconnexion des sous-cellules développées dans l'étude.....	111
Figure III-11 : la découpe des cellules en sous-cellules permet deux types d'assemblage	111
Figure III-12 : Les motifs de sérigraphie de la face avant des cellules mis au point pour l'étude.	112
Figure III-13 : le motif de sérigraphie de la face arrière est le même pour tous les types de sous-cellules de l'étude.....	113
Figure III-14 : deux motifs de métallisation différents obtenus en modifiant quelques paramètres d'entrée du programme.	114
Figure III-15 : exemple d'un masque de sérigraphie utilisé pour la réalisation d'une cellule mère (ici avec des motifs sunrays) qui sera ensuite découpée en quatre sous-cellules.....	115
Figure III-16 : détail d'une des barrettes spécialement conçues pour contacter les sous-cellules lors de la mesure avec le simulateur solaire.	116
Figure III-17 : les sous-cellules ont été mesurées en fonction de leur emplacement d'origine sur la plaquette par rapport au sens des procédés de sérigraphie et de recuit des contacts.....	117
Figure III-18 : distribution normalisée des rendements mesurés pour chacune des quatre séries de cellules réalisées avec les quatre motifs étudiés.....	118
Figure III-19 : représentation schématique de l'assemblage et de la connexion en série des sous-cellules avec recouvrement.....	120
Figure III-20 : module réalisé avec des sous-cellules « finger droit ».....	121
Figure III-21 : module réalisé avec des sous-cellules « feuille ».....	121
Figure III-22 : module réalisé avec des sous-cellules « sunrays »	121
Figure III-23 : évolution de la puissance électrique mesurée pour les modules après un certain nombre de cycles thermiques.	123
Figure IV-1 : vue de profil schématique d'une portion de cellule Zebra	127
Figure IV-2 : pour la face arrière des sous-cellules IBC, les busbars (traits blancs horizontaux) sont disposés le long des deux grands côtés.....	128
Figure IV-3 : représentation schématique des paramètres pris en compte pour le calcul des performances des sous-cellules IBC.	129
Figure IV-4 : représentation 1D des deux régions de la cellule utilisée pour calculer le profil de courant photogénéré.....	130
Figure IV-5 : La zone intérieure de la cellule (V1) permet d'appréhender la distance entre doigts de la cellule.	130
Figure IV-6 : valeurs de densité de courant de court-circuit Jsc et de tension de circuit ouvert Voc en fonction du pitch des doigts et de la fraction de surface occupée par l'émetteur	131

Figure IV-7 : valeurs de densité de courant de court-circuit J_{sc} et de tension de circuit ouvert V_{oc} en fonction du pitch des doigts et de la fraction de surface occupée par l'émetteur, pour des quarts de cellule d'une largeur de 39 cm.	132
Figure IV-8 : valeurs de rendement calculées en fonction du pitch entre doigts pour des fractions d'émetteur de 50 % et 65 %, et pour une largeur de sous-cellule de 19,5 mm.	132
Figure IV-9 : description de la nouvelle onception de busbar (à droite), comparée à dessin des busbars des cellules Zebra classiques	134
Figure IV-10 : valeurs de courant de court-circuit et tension de circuit ouvert calculées en fonction du nombre de points d'extraction du courant.	135
Figure IV-11 : valeurs de FF et rendement calculées en fonction du nombre de points d'extraction du courant.....	135
Figure IV-12 : caractéristiques électriques mesurées pour les cellules mères i-Zebra en fonction du matériau utilisé et de l'épaisseur des plaquettes.....	136
Figure IV-13 : valeurs de J_{sc} calculées en fonction du type et de l'épaisseur de la plaquette utilisée.	137
Figure IV-14 : valeurs de V_{oc} calculées en fonction du type et de l'épaisseur de la plaquette utilisée.....	137
Figure IV-15 : valeurs de rendement calculées en fonction du type et de l'épaisseur de la plaquette utilisée.....	137
Figure IV-16 : valeurs de FF calculées en fonction du type et de l'épaisseur de la plaquette utilisée.	137
Figure IV-17 : photographie des cellules réalisées.....	139
Figure IV-18 : séquence de fabrication des cellules Zebra classiques et des sous-cellules réalisées pour l'étude.....	139
Figure IV-19 : la face arrière d'une cellule Zebra classique (à gauche), comparée à une i-Cell Zebra destinée à la fabrication de sous-cellules.	140
Figure IV-20 : plan de conception du support développé pendant l'étude pour mesures des cellules et sous-cellules IBC.	140
Figure IV-21 : valeurs de J_{sc} , de V_{oc} , de FF et de rendement mesurées pour les i-Cell et cellules standard réalisées en fonction du type de plaquette utilisé pour la fabrication.....	141
Figure IV-22 : les valeurs de J_{sc} , V_{oc} , FF et le rendement mesurées pour les cellules réalisées en fonction du type de plaquette utilisé.....	143
Figure IV-23 : quand la face avant de la cellule mère est placée vers l'observateur, les quarts de cellules sont nommés de gauche à droite WW, CW, CE et EE.	144
Figure IV-24 : valeurs d' I_{sc} et de V_{oc} mesurées pour les sous cellules en fonction de leur place sur les cellules mères : centrale (condition 1) ou extérieure (condition 2).....	144
Figure IV-25 : valeurs de FF et de rendement mesurées pour les sous cellules en fonction de leur place sur les cellules mères : centrale (condition 1) ou extérieure (condition 2).	145
Figure V-1 : photographie des rubans soudés sur les busbars de la face arrière des cellules (gauche), et photographie de la face avant du même échantillon (droite).	151
Figure V-2 : rendements mesurés pour les sous cellules 1,2 et 3, selon que le courant est extrait selon 3 points de soudure (bleu) ou selon 10 (rouge).....	152
Figure V-3 : valeurs de FF mesurées pour les sous cellules 1,2 et 3, selon que le courant est extrait selon 3 points de soudures (bleu) ou selon 10 (rouge).	153
Figure V-4 : chapelet de quatre sous-cellules assemblées entre elles avec 10 rubans par busbar. 153	

Figure V-5 : assemblage de sous-cellules à l'aide d'un unique ruban soudé le long des busbars (à gauche), ou de deux rubans de 70 mm de long (à droite).	154
Figure V-6 : des sous cellules ont été séparées par amorçage laser au sein d'une même plaquette de silicium, mais non séparées mécaniquement. Elles ont été connectées en série par soudure de rubans.	156
Figure V-7 : images d'électroluminescence d'une plaquette sur laquelle les cellules ont été séparées électriquement par amorce laser.	156
Figure V-8 : l'utilisation d'un substrat fritté permet d'assembler plusieurs sous-cellules entre elles en série et de fournir un support mécanique à l'ensemble.	158
Figure V-9 : assemblage avec ruban de cuivre sur TinPad.	158
Figure V-10 : assemblage avec pâte à braser sur TinPad.	158
Figure V-11 : assemblage avec pâte à braser sur piste d'argent.	158
Figure V-12 : assemblage électrique de deux sous-cellules par le moyen de pistes d'argent (blanc) imprimées sur un substrat fritté.	160
Figure V-13 : assemblage de quatre sous-cellules par les mêmes moyens.	160
Figure V-14 : des rubans de cuivre adhésif de 50 mm de long permettent d'assembler les sous-cellules entre elles sans soudure.	161
Figure V-15 : cliché d'électroluminescence d'un chapelet de sous-cellules IBC assemblées avec de l'adhésif conducteur, avant encapsulation (gauche), et après (droite).	162
Figure V-16 : les cellules IBC sont assemblées par rubans le long des busbars de la face arrière (à gauche), pour former des modules composés de deux chapelets de 12 sous-cellules, toutes connectées en série (à droite).	162
Figure V-17 : photographie d'un des modules réalisés (gauche), et images d'électroluminescence obtenus pour les modules A (au centre) et B (à droite).	164
Figure V-18 : photographie d'un des modules réalisés (gauche), et images d'électroluminescence obtenus pour les modules A (au centre) et B (à droite).	165
Figure V-19 : photographie du module E (gauche), et images d'électroluminescence obtenues pour le même module (centre) et pour le module F (droite).	167
Figure V-20 : l'utilisation d'un plateau aspirant permet de limiter les contraintes et les déplacements lors de l'assemblage.	168
Figure V-21 : l'adhésif conducteur permet l'assemblage des chapelets sans soudure.	168
Figure V-22 : photographie du module G (gauche), et images d'électroluminescence obtenues pour les mêmes modules, avant encapsulation (centre) et après (droite).	170
Figure V-23 : images d'électroluminescence obtenues pour les mêmes modules, pour la face avant (gauche) et arrière (droite).	171
Figure V-24 : disposition et dimensions d'un des modules IBC réalisés pour l'étude. Le module est composé de 2 séries de 12 sous-cellules assemblées en série. Les zones inactives sont représentées en blanc.	173
Figure V-25 : détail des pertes optiques provoquées par l'ncapsulation en module	174
Figure V-26 : dispositif expérimental de la mesure i)	175
Figure V-27 : dispositif expérimental de la mesure ii) qui intègre le rôle du backsheet blanc.	175
Figure V-28 : les rubans verticaux sur la photographie (en haut) servent à la circulation du courant total généré par chaque chapelet.	177

Figure V-29 : la circulation du courant est plus homogène dans les modules réalisés sans soudure (à gauche), que dans les modules où les sous-cellules sont soudées (droite), en raison de la plus grande surface couverte par l'interconnexion.	178
Figure VI-1 : la première installation photovoltaïque mise en place sur les toits de New York par Charles Fritts en 1884.	186
Figure VI-2 : Calvin Fuller des laboratoires Bell diffuse du bore dans du silicium pour créer la première cellule solaire.....	187
Figure VI-3 : les premières cellules soviétiques à avoir volé dans l'espace ont servi à alimenter les instruments scientifiques de Spoutnik et le système de radio.....	187
Figure VII-1 : représentation schématique d'un atome de silicium.	193
Figure VII-2 : la maille cristalline du silicium.....	193
Figure VII-3 : diagrammes de bandes de différents matériaux	193
Figure VII-4 : absorption de la lumière par le silicium	194
Figure VII-5 : les atomes de dopants négatifs.....	196
Figure VII-6 : introduction de niveaux d'énergie intermédiaires dans le gap près de la bande de conduction.....	196
Figure VII-7 : les atomes de dopants positifs	197
Figure VII-8 : introduction de niveaux d'énergie intermédiaires dans le gap près de la bande de valence.....	197
Figure VII-9 : description de la jonction pn.....	198
Figure VII-10 : la mise en contact des zones p et n induit une torsion des bandes d'énergie au niveau de la ZCE.....	198
Figure VII-11 : polarisation de la ZCE.....	199
Figure VII-12 : les propriétés d'une jonction pn sous illumination.....	200
Figure VII-13 : caractéristiques I(V) typique d'une cellule solaire photovoltaïque	201
Figure VII-14 : rendement en fonction de l'énergie du gap pour des matériaux illuminés par un spectre AM 1.5.....	203
Figure VII-15 : coefficient et profondeur d'absorption dans le silicium en fonction de la longueur d'onde de la lumière reçue.	209
Figure VII-16 : en rouge, la puissance spectrale du rayonnement solaire selon la norme AM 1.5G. En noir, la profondeur d'absorption du silicium cristallin en fonction de la longueur d'onde.....	209
Figure VII-1 : Evolution de la porosité des plaquettes frittées de silicium fritté en fonction de la température de frittage sous 21 MPa pendant 15 minutes.....	214
Figure VII-2 : Représentation schématique de deux grains voisins au début du frittage.	215
Figure VIII-3 : Mécanismes de transport de matière : (1) évaporation-condensation, (2) diffusion de surface, (3) diffusion en volume, (4) consolidation à travers le volume des grains, (5) transport par les joints de grains.....	215
Figure VIII-4 : four de frottage sous pression par chauffage inductif développé par S ² Tile (<i>Inductive Heating Hot Press</i> ou IH2P).	216
Figure VIII-5 : des plaquettes de silicium fritté 156 x 156 mm ²	216
Figure VIII-6 : photographie de la machine ZMR.....	217
Figure VIII-7 : coupe MEB d'une plaquette recristallisée en surface.....	217
Figure VIII-8 : Schéma du principe de la cellule RexWE obtenue avec couche de Si déposée par épitaxie.....	218
Figure VIII-9 : photographie des cellules 2 x2 mm ² réalisées.....	218

Figure VIII-10 : cliché MEB en coupe d'une cellule obtenue par report de couche mince sur substrat de silicium fritté.	219
Figure VIII-11 : structure d'une i-Cell.....	219
Figure VIII-12 : représentation schématique de l'interconnexion de deux i-Cell dans un module.	219

Introduction générale

Le défi majeur auquel fait face l'industrie solaire est toujours d'augmenter la puissance électrique produite par les systèmes photovoltaïques tout en réduisant les coûts. Malgré des avancées notoires en termes de coût et d'efficacité ces dernières années, de nouveaux concepts de développement sont encore nécessaires pour aller dans ce sens, et particulièrement à l'échelle des modules photovoltaïques. En effet, alors que des rendements de plus de 26 % peuvent être atteints par des cellules seules, des pertes observées lors de la mise de ces cellules sous forme de modules peuvent résulter en une diminution allant jusqu'à -5 % relatifs, selon le type de cellule.

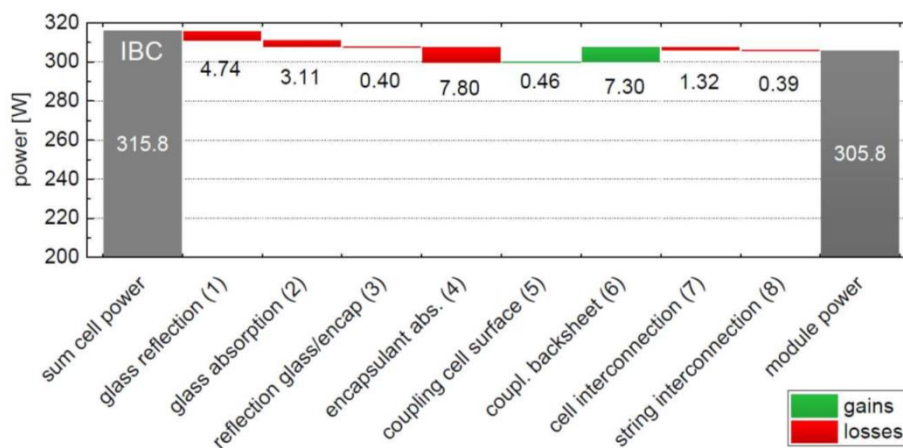


Figure 0-1 : graphique décrivant les pertes lors de la mise en module de 60 cellules IBC, évaluées à -3,2 % relatifs. Source: *Cell to module ratios for various industrial cell types* [1].

Ce travail de thèse vise à développer plusieurs aspects innovants permettant la réduction du coût de fabrication des modules photovoltaïques tout en augmentant la puissance produite. En premier lieu, la réduction de la quantité de silicium utilisé pour la fabrication des cellules, approche préconisée pour la réduction des coûts, a été d'abord étudiée. Les effets physiques d'une telle réduction ayant déjà été montrés, c'est plutôt la compatibilité de cellules minces avec une chaîne de production dotée d'équipements standards qui a été expérimentée ici. Par la suite, la simplification du procédé de fabrication des cellules est proposée. Il est en effet possible de réduire le coût de production en simplifiant certaines étapes de fabrication, comme le dépôt de la couche antireflet des cellules, ou la réalisation de l'émetteur, ou encore le dépôt des électrodes métalliques. Cette simplification est effectuée au détriment des performances individuelles de la cellule, mais l'approche nouvelle proposée ici est d'étudier le produit fini, c'est-à-dire le module dans son ensemble. Il est en fait possible d'obtenir des modules plus performants en utilisant des cellules de qualité moindre, si la conception dudit module est optimisée. Cette approche commence très récemment à être employée dans l'industrie, alors qu'elle était encore très peu répandue au début de ces travaux.

Notre approche est la suivante : afin de produire des systèmes photovoltaïques avec de hauts rendements, la conception des cellules étudiées a été adaptée pour permettre leur bifacialité. En rendant la face arrière des cellules transmissive pour la lumière, du courant électrique peut être généré par les deux faces de la cellule, au lieu de la face avant uniquement dans le cas des cellules solaires conventionnelles. Cette technique permet de réduire la quantité de matériau utilisée et d'augmenter la performance. Pour aller plus loin dans l'augmentation de la puissance des modules, leur conception a été améliorée en utilisant le concept de l'i-Cell développé par la société S'Tile. Il s'agit d'une cellule solaire intégrée, constituée de plusieurs sous-cellules plus petites connectées en série sur un substrat à bas coût. Cette idée a été adaptée en réalisant des modules photovoltaïques à partir de quarts de cellules connectés en série. Une telle structure génère un courant quatre fois plus faible qu'un module photovoltaïque standard, ce qui permet de très fortement diminuer les pertes résistives constatées lors de la production de modules. De cette manière, il est possible de réaliser des systèmes photovoltaïques performants, y compris à partir de cellules de qualité moindre.

Ce manuscrit de thèse est composé de cinq chapitres.

Le premier dresse un état de l'art du marché de l'énergie dans le monde, et particulièrement de l'énergie photovoltaïque. Une description de certains marchés de niche appelés à croître rapidement, comme l'intégration des modules PV au bâtiment, permet de comprendre le contexte économique qui motive l'étude présentée après. Le fonctionnement général d'une cellule solaire conventionnelle est également détaillé, ainsi que les différentes technologies de cellules actuellement disponibles sur le marché. Enfin, le mode de fabrication des modules photovoltaïques est présenté puisqu'il s'agit de l'objet principal de l'étude.

Dans les chapitres II et III, la réalisation de modules inspirés du modèle i-Cells à partir de cellules à face avant métallisée est présentée. Des cellules PERC spécifiques ont été modélisées puis fabriquées pour cette étude. La réduction de la quantité de silicium monocristallin de type p utilisé pour la fabrication des cellules a été étudiée. La simplification du procédé de fabrication a été effectuée en réalisant les émetteurs des cellules par implantation ionique pour diminuer le nombre d'étapes de fabrication et améliorer la qualité de la face avant, ainsi qu'en simplifiant la couche anti-reflet présente en face avant. La face arrière a été métallisée avec un motif d'aluminium spécifique en forme de bandes, permettant l'ouverture et le passage de la lumière. Les conséquences de cette ouverture sur la réduction du fléchissement des cellules après recuit de sérigraphie ont également été étudiées. L'ensemble de cette étude forme le chapitre II.

La séparation de cellules à face avant métallisée en sous-cellules a également été étudiée. Ces sous-cellules ont été connectées en série et assemblées sous forme de modules. Pour ce faire, des motifs de métallisation spécifiques ont été développés pour les faces avant et arrière des sous-cellules. Plusieurs types de motifs ont été étudiés, et les performances des modules obtenus ont été comparées avec des modules standards réalisés dans les mêmes conditions. Ces résultats font l'objet du chapitre III.

Enfin, les deux derniers chapitres de ce manuscrit sont consacrés au développement d'un procédé de fabrication de modules IBC à haut rendement et à bas coût, basé également sur le concept i-Cell. Dans le chapitre IV, la réduction de la quantité de silicium monocristallin pur utilisé pour la réalisation des cellules a été considérée. Le silicium utilisé pour les cellules IBC est

toutefois de type n, contrairement à celui utilisé pour les cellules PERC. Les cellules ont été conçues en collaboration avec l'Institut de l'Énergie Solaire de Constance (ISC) à partir de leurs cellules Zebra. Cette technologie permet la réalisation de cellules IBC à partir de moyens industriels conventionnels et réduit les coûts de production comparativement aux autres modèles disponibles sur le marché.

Par ailleurs, des cellules bifaciales Zebra ont été divisées en sous-cellules plus petites, et intégrées en série dans des modules. La réduction du courant circulant dans le module permet, comme pour les cellules PERC, de fortement diminuer les pertes en ligne. Des quarts de cellules de 39 x 156 mm² ont été réalisés sur des plaquettes de silicium monocristallin. Ces sous-cellules ont été séparées de leurs « cellules mères » par amorces laser et clivage et reliées en série par des moyens compatibles avec l'industrialisation, à savoir des rubans de cuivre, de l'adhésif conducteur, ou encore des substrats de silicium fritté développés par la société S'Tile. Des modules à haut rendement ont été réalisés à partir de ces sous-cellules, en utilisant exclusivement des moyens industrialisables. Ces résultats sont présentés dans le cinquième chapitre.

REFERENCES

1 Haedrich I., Surve S., et Thomson A., « Cell to Module (CTM) Ratios for Varying Industrial Cell Types », *proceedings of the Asia Pacific Solar Research Conference*, 2015, Australian PV Institute, éditeurs: R. Egan and R. Passey.

Chapitre I : Synthèse & état de l'art

I-1. CONTEXTE ENERGETIQUE MONDIAL

I-1.1. Contexte démographique

D'après les estimations de l'ONU, la population mondiale a atteint en 2015 le chiffre de 7,3 milliards d'individus [2] alors qu'elle en comptait 1,8 milliard en 1900 [3]. Suivant une croissance régulière d'un milliard tous les douze ans depuis 1980, elle devrait s'établir aux alentours de 8,5 milliards en 2030. Il est difficile de prédire avec précision des chiffres pour les années suivantes car les projections divergent, mais dans une hypothèse de fertilité moyenne, la population terrienne pourrait être composée de 9,7 milliards d'individus en 2050 et de 11,2 en 2100 [4].

Cette explosion démographique devrait être notamment très marquée en Afrique subsaharienne qui quadruplerait sa population pour arriver à 4 milliards, ainsi qu'en Asie et particulièrement en Inde et au Pakistan, avec une croissance de 570 millions de personnes. Un point commun que partagent ces régions du monde est leur fort taux d'ensoleillement.

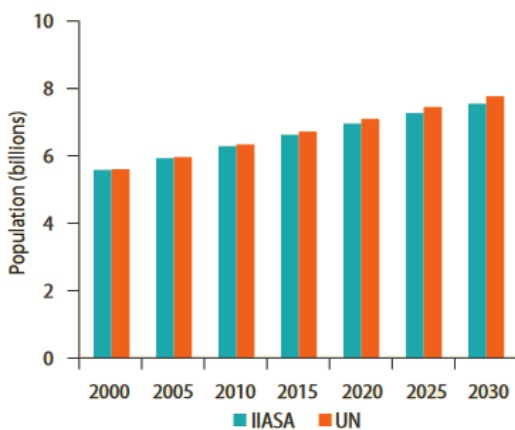


Figure I-1 : l'expansion de la population mondiale : 2000-2030. Source : calculs de la banque mondiale [4]

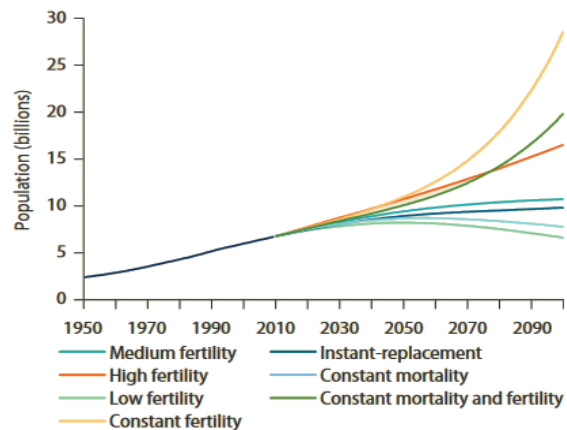


Figure I-2 : l'expansion de la population mondiale : projection après 2030. Source : [4]

I-1.2. Consommation d'énergie

Par ailleurs, les besoins annuels en énergie de l'humanité augmentent de manière drastique. La production d'énergie qui s'élevait à 6400 milliards de kilowattheures (kWh) en 1900 est passée à plus de 150 000 milliards de kilowattheures en 2017 [5]. Ceci revient à dire que la consommation d'énergie par habitant a été multipliée par cinq en un peu plus de cent ans si l'on tient compte de l'expansion de la population pendant la même période. Aujourd'hui, la consommation moyenne d'énergie est donc d'environ 20 500 kWh par personne et par année. Pour autant, des disparités énormes subsistent puisqu'il est estimé qu'environ un Terrien sur cinq n'a pas accès à l'électricité ; qu'un Européen consomme en moyenne environ 37 000 kWh par an et un Américain moyen

83 000 kWh par an [6]. Pour répondre à ces besoins, 3,7 millions de barils de pétrole brut, 932 000 tonnes de charbon et 395 millions de mètres cubes de gaz naturel sont extraits de la Terre chaque heure de chaque jour. Ces sources primaires d'énergie représentent 80 % de la production mondiale en 2014 [7].

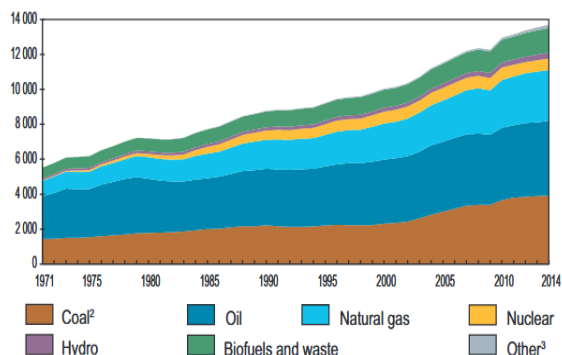


Figure I-3 : consommation d'énergie mondiale par type de source. Source : Agence internationale de l'énergie [6]

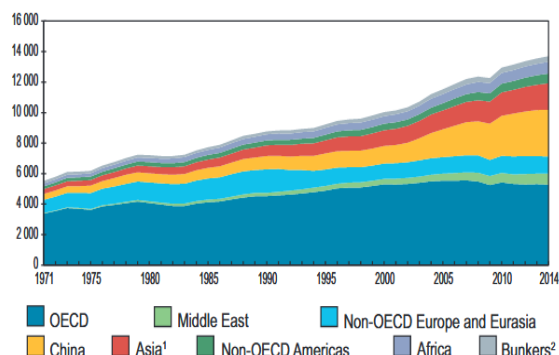


Figure I-4 : consommation d'énergie par région du monde. Source : [6]

I-1.3. Climat

En se basant sur ces chiffres qui tiennent compte à la fois de la hausse de la population mondiale et de la hausse de la consommation énergétique par habitant, il a été estimé que la production globale d'énergie sur terre devrait être multipliée par deux pour un total de 320 000 milliards de kilowattheures en 2100 [8]. Sachant qu'au rythme de consommation actuel, et à un coût d'extraction économiquement acceptable, l'estimation mondiale des réserves conventionnelles d'énergie est de 47 ans pour le pétrole, 64 ans pour le gaz naturel et 156 ans pour le charbon [7]. Il semble donc difficile que la consommation énergétique globale puisse se poursuivre sur le long terme au moyen des sources non renouvelables.

Dans l'hypothèse où cette solution serait malgré tout retenue, ce qui est le cas depuis le début de l'ère industrielle, se pose le problème des conséquences de cette consommation d'énergies fossiles à grande échelle. En 2015, les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) issues de la combustion de ressources fossiles se sont élevées à 36,3 milliards de tonnes (Gt), qui viennent s'ajouter aux 1900 milliards de tonnes produites par les activités humaines depuis 1870 [9]. Environ la moitié de ces émissions est dissoute dans les océans et la biosphère, l'autre moitié étant injectée directement dans l'atmosphère et responsable en partie du réchauffement climatique d'origine humaine évoqué depuis 1967 [10].

L'accord de Paris sur le climat approuvé par 195 pays le 12 décembre 2015 et entré en vigueur le 4 novembre 2016, prévoit de contenir le réchauffement climatique « bien en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels ». Le seuil de 2 °C résulte d'un compromis politique déterminé à Copenhague en 2009. Au-delà de cette limite, des conséquences irréversibles pour l'environnement et l'humain sont redoutées, comme des cyclones, des sécheresses répétées, la chute des rendements agricoles, ou des extinctions d'espèces [11]. En dessous de 2 °C, le monde et surtout les hommes pourront s'adapter. Pour avoir 50 % de chances d'atteindre cet objectif,

L'humanité ne doit pas avoir émis plus de 2900 milliards de tonnes de dioxyde de carbone. Or, si les sociétés humaines parvenaient à stabiliser leur consommation de combustibles fossiles, la barre des 2900 Gt de CO₂ émis serait atteinte en 2038.

En outre, Jones et Warner ont avancé que pour rester sous le cap des 2 °C d'ici 2100, les énergies renouvelables doivent fournir la moitié de l'énergie mondiale d'ici 2028 [12]. De plus, la raréfaction géologique et économique des sources fossiles risque de faire en sorte que les objectifs de dé-carbonisation prévus pour la fin du siècle par les pays du G7 seront atteints indépendamment de toute volonté politique. Dans cette hypothèse, la part des énergies renouvelables en 2100 serait de plus de 87 % de la production mondiale.

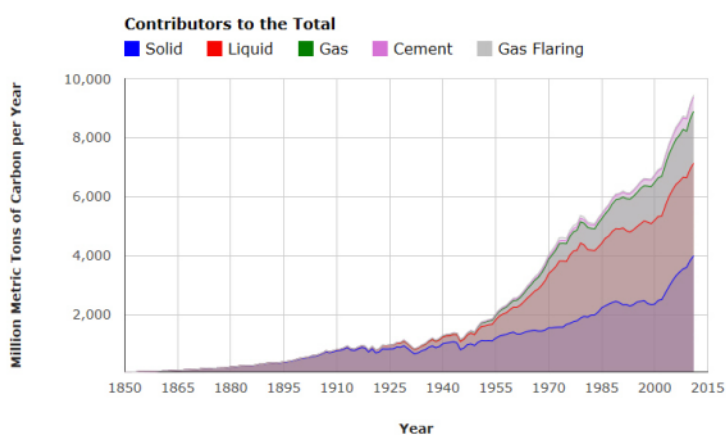


Figure I-5 : émissions mondiales de CO₂ (1850-2015) en milliers de tonnes de carbone équivalent. Source : CDIAC [9]

I-1.4. Sources d'énergie & alternatives aux énergies fossiles

Une source d'énergie est dite renouvelable si elle est régénérée assez rapidement pour être considérée comme illimitée à l'échelle humaine. On identifie cinq sources principales d'énergie renouvelable : l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la biomasse (combustion de bois, de biogaz ou de biocarburants), la géothermie et enfin l'énergie solaire. Par opposition aux sources fossiles, les énergies renouvelables émettent de faibles quantités de déchets et de gaz à effet de serre. En 2015 la part des sources renouvelables dans la production énergétique mondiale était de 19,2 %, et de 23,7 % dans la production électrique seule, pour une capacité installée de 1849 gigawatts (GW). Cependant, avec une augmentation de la capacité de 8,7 % par rapport à l'année précédente, l'expansion des énergies renouvelables est rapide [13] dans le domaine de la production électrique.

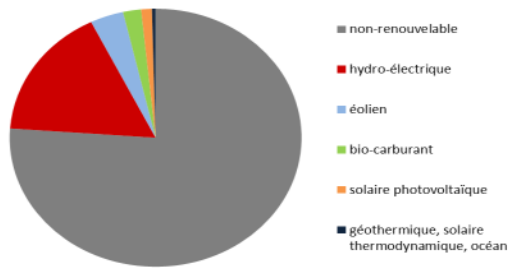


Figure I-6 : part des différentes sources d'énergie dans la production mondiale d'électricité. Source : REN21 [11]

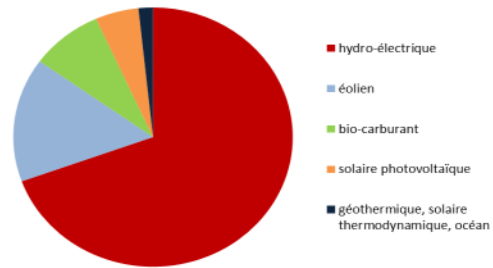


Figure I-7 : part des différentes sources d'énergie dans la production mondiale d'électricité renouvelable. Source : REN21 [11]

De plus, l'augmentation de la capacité installée est accompagnée d'une forte augmentation des investissements mondiaux dans les énergies renouvelables. Ainsi, 286 milliards de dollars ont été investis en 2015, contre 130 milliards seulement pour des installations utilisant le charbon et le gaz. Pour la première fois en 2015, les investissements des pays émergents ont dépassé ceux des pays avancés, avec 156 milliards de dollars contre 130 milliards. Il est intéressant de constater que ces investissements découlent en partie d'une volonté politique, renforcée davantage depuis la COP 21 de Paris, mais aussi du fait que la plupart de ces pays émergents possèdent de grandes sources d'énergies renouvelables, et notamment un ensoleillement fort pour la majorité d'entre eux. Si on prend en compte que ces pays sont également ceux dont la population risque de croître le plus fortement, les besoins en énergies renouvelables vont augmenter exponentiellement dans les années à venir.

I-1.5. Déploiement de l'énergie photovoltaïque

Plus de 40 % de cette croissance globale de l'énergie électrique sont dus principalement à l'énergie solaire photovoltaïque, dont la capacité installée a connu l'essor le plus important par rapport à 2014 (+ 28 %). Cependant, 400 GW seulement ont été produits par des installations photovoltaïques en 2017, ce qui reste très faible comparé à la production mondiale, elle-même très faible devant le potentiel de l'énergie solaire. La Terre reçoit en effet 90 pétawatts (PW) de puissance venant du rayonnement solaire, soit 225 000 fois plus que la production photovoltaïque et 6000 fois plus que la puissance consommée par l'humanité. Alors que la ressource est extrêmement abondante, elle reste peu exploitée. Le coût de production encore élevé de l'énergie photovoltaïque dans la plupart des pays développés constitue la principale explication de cette sous-utilisation. Ce prix élevé est une conséquence d'un facteur environnemental, et notamment du taux d'ensoleillement, mais aussi du coût des installations photovoltaïques et de leur exploitation. Il s'agit du raccordement au réseau électrique, des onduleurs nécessaires à la connexion, de la mise en place des installations, de l'achat du terrain et enfin du coût des modules photovoltaïques. D'autre part, l'énergie solaire est très compétitive dans beaucoup de pays en développement, mais l'essor est très récent et peine encore à avoir des effets visibles.

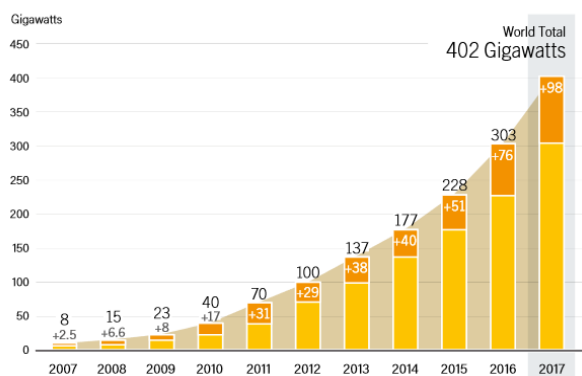


Figure I-8 : évolution de la capacité photovoltaïque installée dans le monde (2005-2017). Source : REN21 [11]

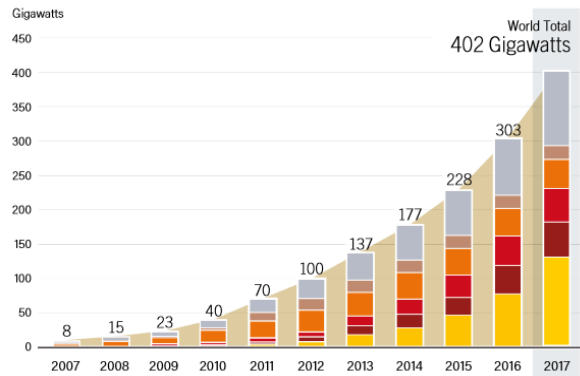


Figure I-9 : évolution de la capacité photovoltaïque installée par région du monde (de bas en haut : Chine, Allemagne, Japon, Etats-Unis, Italie, et reste du monde). Source : REN21 [11]

Si le facteur environnemental permet des installations de masse dans certains pays, comme notamment le Chili et la Chine et laisse entrevoir un très fort potentiel dans une grande partie des pays en développement, le coût écologique et financier des installations nécessite encore d'être diminué afin de rendre la technologie plus accessible globalement, ce qui semble être une urgence au vu du contexte climatique.

I-2. LE MARCHE DE L'ENERGIE SOLAIRE

L'industrie photovoltaïque a besoin de fournir des moyens de génération électrique qui puissent rivaliser avec les sources d'énergie conventionnelles (fossiles, nucléaire) ainsi que les autres sources d'énergie renouvelables afin de pouvoir se développer. Bien que le rapport entre l'efficacité des installations photovoltaïques et leur coût nécessite encore une augmentation pour plus de compétitivité, de grandes étapes ont été franchies ces trente dernières années, tant en termes de puissance installée que de réduction des prix.

I-2.1. Production mondiale et installation

Le marché mondial de l'énergie photovoltaïque progresse de manière exponentielle depuis 2005, y compris pendant les périodes de crise économique, et est en passe de devenir une des sources d'énergie importante au niveau mondial. En 2017, environ 400 GW de systèmes PV étaient installés globalement, de quoi produire au moins 460 térawatts heure (TWh) d'électricité chaque année, soit la quantité d'énergie nécessaire à alimenter 130 millions de foyers européens.

Ces installations sont actuellement concentrées en Asie, avec notamment la Chine qui constitue le marché le plus dynamique. La capacité installée a fait plus que tripler entre 2015 et 2017, avec plus de 53 GW (63 % des demandes d'installations) rien que cette dernière année, pour atteindre plus de 130 GW de capacité cumulée, soit le tiers de la capacité mondiale. En 2017, les Etats-Unis constituent le second marché en termes d'expansion, avec une augmentation de 11,8 GW, suivis

de l'Inde et de ses 9,2 GW. Vient ensuite le marché européen qui est détaillé dans la partie suivante, puis le Japon et la Corée du Sud et enfin des pays à fort potentiel d'ensoleillement qui émergent sur le marché, comme le Chili et l'Afrique du Sud.

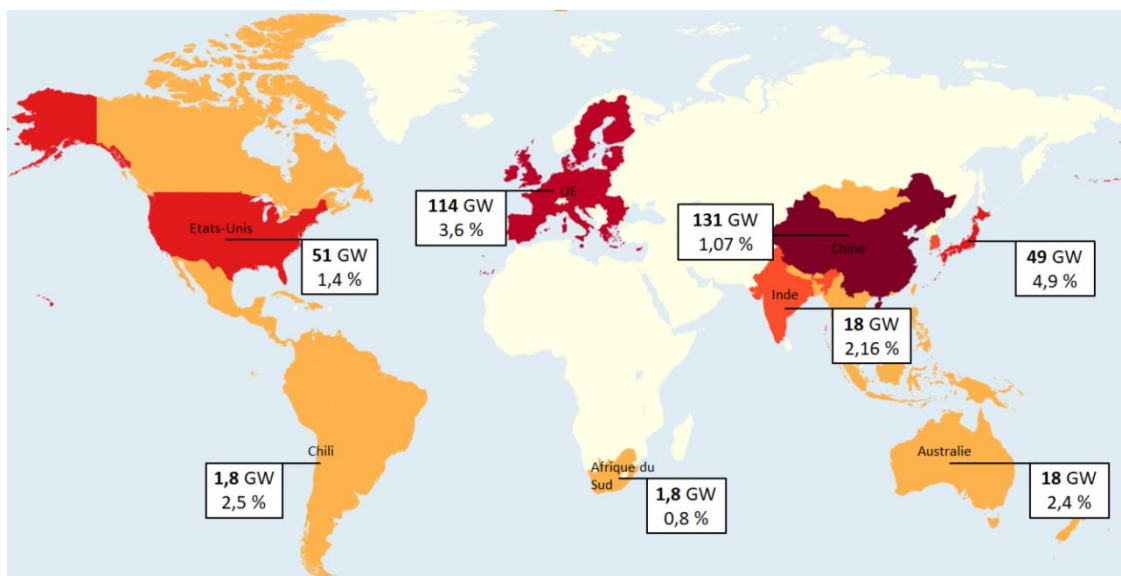


Figure I-10 : capacité cumulée installée dans le monde en 2017 et part de l'électricité consommée d'origine photovoltaïque par région. Source : Solar Power Europe [15]

I-2.2. Le marché européen

Au niveau européen, la production d'énergie renouvelable est également un enjeu majeur. Le prix des énergies a fortement augmenté ces dernières années, et les réserves fossiles facilement accessibles diminuent drastiquement. La confiance dans l'énergie nucléaire a également été ébranlée au vu des événements de Fukushima, et l'importation d'énergie reste chère et incertaine.

L'énergie photovoltaïque présente une solution à ces problèmes d'approvisionnement, et est vue comme un moyen d'atteindre les objectifs de diminution des gaz à effet de serre, qui proviennent à 87 % du secteur énergétique [14]. Elle approche en effet de sa maturité et commence à rivaliser avec les énergies fossiles en termes de coûts. Les réserves de lumière solaire étant virtuellement inépuisables, comme vu dans la partie I-1.5, elles ont le potentiel d'alimenter une grande partie des besoins en énergie et représentent une part importante du plan européen de déploiement de l'énergie renouvelable à grande échelle.

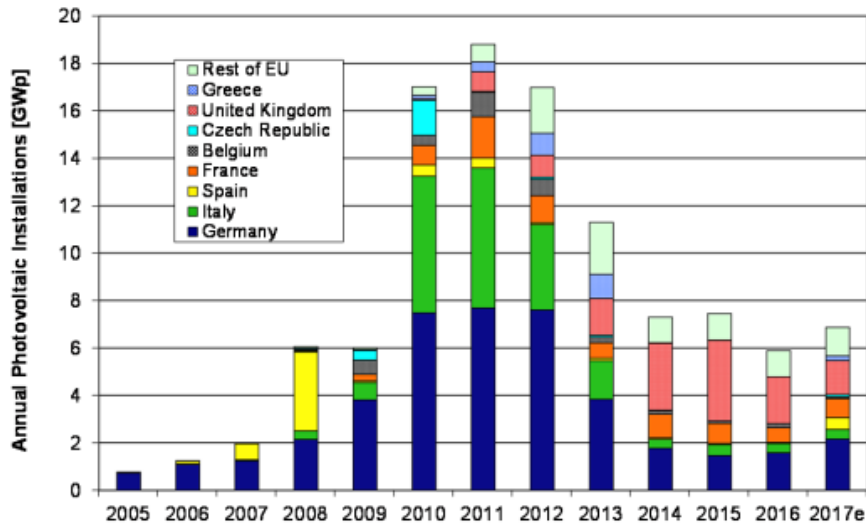


Figure I-11 : le chiffre des installations totales en Europe montre que le secteur du BIPV pourrait fortement relancer le marché européen, dont le nombre de nouvelles installations décroît depuis 2011. Source : [15]

En 2017, l'Europe seule a installé plus de 8,6 GW de systèmes photovoltaïques, marquant la plus forte hausse depuis 2011 dans un marché en berne, et portant le total de capacité installée à plus de 110 GW, soit 43 % de la capacité mondiale et la part continentale la plus importante. Parmi ces installations, l'intégration du photovoltaïque au bâtiment ou BIPV (pour *Building Integrated PhotoVoltaics*) représente potentiellement la part la plus importante. Les bâtiments représentent le secteur avec la plus forte consommation énergétique du marché européen avec un tiers de l'énergie et près de la moitié de l'électricité produite. Ils comptent pour 40 % de l'énergie produite et 36 % des émissions de CO₂. Le fait d'intégrer des moyens de génération photovoltaïque à ce secteur qui dispose par ailleurs de grandes surfaces non utilisées représente assurément un fort potentiel pour l'augmentation du rendement énergétique et pour l'implantation de l'énergie renouvelable.

I-2.3. Le secteur du BIPV : un marché de niche en expansion rapide

On distingue deux façons d'installer des modules photovoltaïques sur des bâtiments, qu'on appelle BAPV et BIPV. La méthode BAPV (*Building Applied PhotoVoltaics*) consiste à disposer les modules en surimposition sur des surfaces existantes, telles que les toitures ou les façades. C'est la technique traditionnellement utilisée depuis le développement de l'énergie solaire photovoltaïque. A contrario, dans le cadre du BIPV, les modules sont substitués aux éléments de construction classique, comme les tuiles, ou le vitrage, tout en produisant de l'électricité.

Il est attendu que le BIPV devienne le secteur du marché européen qui se développera le plus rapidement [16]. La directive sur la performance énergétique des bâtiments (EPBD) que tout nouveau bâtiment construit dans l'Union Européenne d'ici 2020 devra atteindre la quasi-neutralité énergétique (autant de production que de consommation). Ceci implique qu'en moins

de cinq ans, tous les nouveaux bâtiments devront montrer une très haute performance énergétique, et que leurs besoins en énergie seront couverts de manière significative par des sources d'énergie renouvelable.

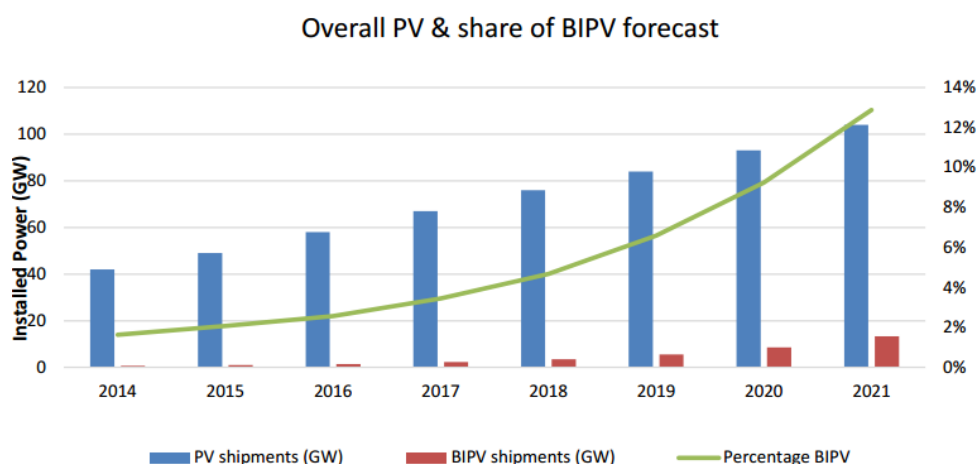


Figure I-12 : projections d'installation pour les systèmes PV standard (en bleu), et BIPV (en rouge). Le BIPV est appelé à occuper une place de plus en plus importante dans un avenir proche (en vert). Source : PV sites

Le domaine du BIPV devrait jouer un rôle crucial dans la réalisation de ces objectifs et évoluer d'un marché de niche vers de très grands volumes de vente. Il permet de construire des ponts entre les domaines très différents que sont l'architecture et l'énergie. L'intégration de systèmes photovoltaïques directement aux bâtiments nécessite des innovations énergétiques et architecturales. Les composants BIPV peuvent être intégrés aux toitures, fenêtres, façades, verrières, ombrières, etc. mais demandent le développement de systèmes photovoltaïques spécifiques, contrairement aux installations standard développées jusqu'ici.

Avant de détailler la fabrication des modules, rappelons les technologies de fabrication des cellules.

I-3. LES DIFFERENTES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

Les cellules solaires sont traditionnellement classées en trois types, en fonction du matériau de base utilisé et du degré de maturité technologique.

Les matériaux inorganiques dominent le marché de l'énergie photovoltaïque depuis le début. Les modules solaires en silicium cristallin (c-Si) constituent la première génération et sont les équipements les plus répandus, de par les aspects financiers et les avantages techniques de ce matériau comparé aux autres absorbeurs photovoltaïques (disponibilité, longue durée de vie, stabilité). Cet élément chimique est en effet le second le plus présent dans la croûte terrestre après l'oxygène et il compose 25,7 % de sa masse. De plus, les modules fabriqués en silicium cristallin ont actuellement une durée de vie de vingt-cinq ans sans perte critique de performance [17]. Les cellules peuvent être constituées à partir de silicium monocristallin (sc-Si) ou multicristallin (mc-Si). C'est de cette génération de cellules qui constitue la très grande majorité de la production actuelle dont il sera par la suite question dans ces travaux de thèse.

Cependant, d'autres matériaux inorganiques sont utilisés, notamment pour l'élaboration de cellules sur films minces, qui constituent le second type de cellules. On peut citer le silicium amorphe (a-Si), le tellure de cadmium (CdTe), et l'alliage cuivre-indium-gallium-sélénium (CIGS). Mais si ces technologies émergent au niveau industriel et peuvent concurrencer le silicium cristallin en termes de coût de production réduit et de hauts rendements, il existe encore des barrières technologiques qui font que la part de marché de ce dernier était de 95 % en 2017 alors qu'elle était encore de 82 % en 2008 [18].

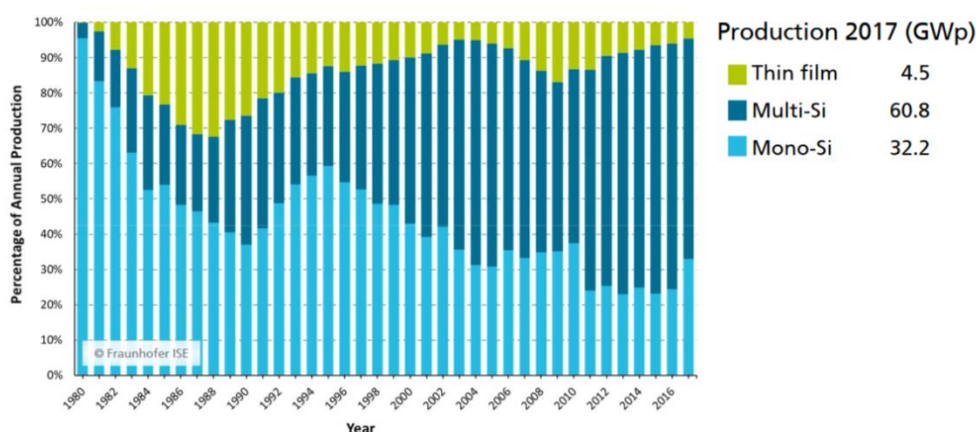


Figure I-13 : la part des différents types de matériaux utilisés dans la production des modules PV en fonction des années. Source : Fraunhofer ISE [18].

Les cellules en matériaux organiques (polymères, petites molécules) sont quant à elles à l'état de développement avancé et de production pilote. Si leur commercialisation a commencé pour des applications nécessitant une faible puissance, leurs rendements, leur stabilité et leur durée de vie ne sont pas encore comparables avec ceux des cellules de silicium cristallin. Elles forment le troisième type de cellules, avec d'autres concepts avancés tels que les cellules à colorants et les perovskites [19].

I-4. LA CELLULE SOLAIRE CLASSIQUE

Il existe plusieurs manières de réaliser une collecte sélective des électrons et des trous à partir d'une plaquette de silicium. La façon la plus classique consiste à introduire des atomes dopants à proximité des deux faces de la plaquette. La majeure partie de la production mondiale est basée sur du silicium de type p, pour des raisons historiques et technologiques, avec une diffusion de phosphore à l'avant pour la formation de l'émetteur et un dopage à l'aluminium à l'arrière pour la formation du champ électrique arrière ou BSF [20]. Cette cellule n^+pp^+ (de l'avant à l'arrière) est appelée aluminium-BSF (pour Back Surface Field ou champ répulsif de face arrière), en référence à la passivation par effet de champ produite par les atomes d'aluminium en face arrière [21].

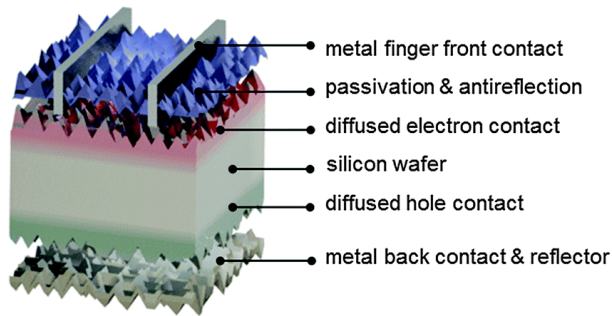


Figure I-14 : Vue en coupe des composants d'une cellule Aluminium-BSF. Les électrons et les trous générés dans le volume de la cellule sont extraits respectivement par les zones dopées au phosphore (en rouge en haut) et au bore (en vert en bas). La face avant est passivée par un dépôt de nitrure qui fait office de couche antireflet. De l'aluminium fait office de contact arrière et agit comme dopant lors du recuit. Source : [20]



Figure I-15 : photographie d'une cellule photovoltaïque conventionnelle. La couche antireflet octroie une couleur bleue à la face avant (à gauche), tandis que le dépôt d'aluminium à l'arrière est gris (à droite).

I-4.1. Procédé de fabrication

Les cellules de type p sont fabriquées à partir de plaquettes de silicium, carrées et dopées au bore dont la taille standard est de 156 x 156 mm² et la résistivité environ 1 Ω .cm. Les plaquettes monocristallines sont issues du sciage de lingots obtenus par la méthode Czochralski (Cz) tandis que les plaquettes multicristallines sont obtenues à partir de blocs de silicium moulés. L'épaisseur standard de ces plaquettes est d'environ 180 μ m.

La fabrication de cellules commence traditionnellement avec la gravure et la texturation des plaquettes. En général, la texturation est obtenue en immergeant les plaquettes dans un bain chimique, qui permet l'obtention des mêmes faces texturées à l'avant et à l'arrière. Cette étape est successive à un décapage des dommages de sciage sur les surfaces de la plaquette réalisé à l'aide d'une solution de KOH concentrée qui permet d'enlever quelques micromètres de matière endommagée. Le silicium monocristallin, d'orientation cristallographique (100) est texturé de manière anisotrope avec de l'hydroxyde de potassium (KOH), ce qui permet l'obtention de pyramides de taille aléatoire dont les faces sont orientées (111) [22]. Ces pyramides réfléchissent et réfractent la lumière incidente selon des angles obliques, améliorant les propriétés de diminution de la réflexion et de capture de la lumière.

Le silicium multicristallin composé de grains d'orientations différentes nécessite quant à lui une texturation isotrope, souvent effectuée à l'aide d'acides [23]. La réflectance du silicium multicristallin après texturation est plus élevée que celle du silicium monocristallin après texturation alcaline. Cependant, après déposition d'une couche antireflet et encapsulation dans un module, cette différence est quasiment estompée [24].

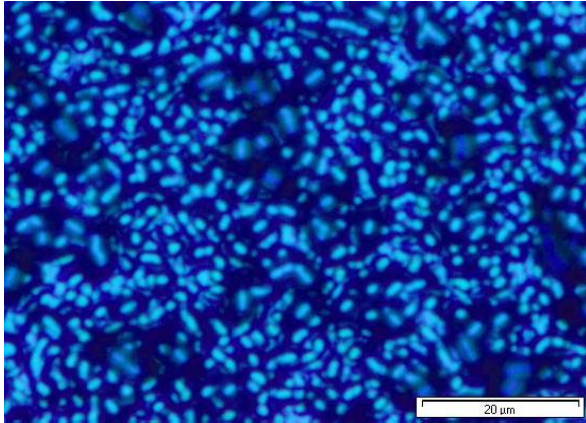


Figure I-16 : la texturation anisotrope d'une plaquette multicristalline (photographie au microscope optique, grossissement x 50).

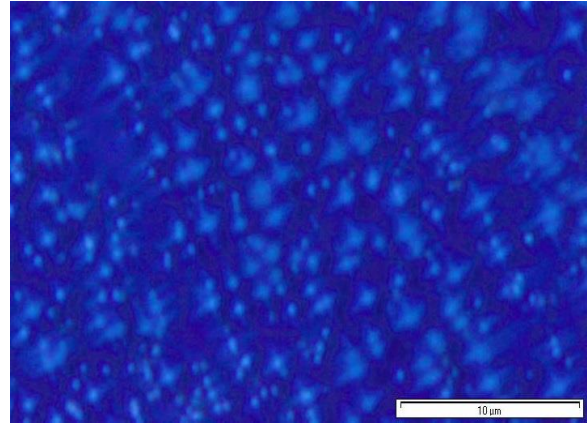


Figure I-17 : la texturation isotrope d'une plaquette monocristalline (photographie au microscope optique, grossissement x 50). Les sommets des pyramides sont visibles en clair.

Après la texturation, les plaquettes sont nettoyées. Premièrement, un agent chimique oxydant, le plus souvent du peroxyde d'hydrogène (ou « Piranha ») forme un oxyde qui « encapsule » des défauts potentiels présents à la surface de l'échantillon. La plaquette est alors rincée à l'eau déionisée et l'oxyde est retiré dans un bain réducteur, le plus souvent de l'acide fluorhydrique. La surface de la plaquette est alors relativement inerte avec des facettes (111) passivées par des atomes d'hydrogène [25]. Il est préparé pour l'étape de diffusion des dopants, du phosphore dans le cas de silicium de type p ou du bore pour du silicium de type n.

La diffusion est effectuée à haute température dans des tubes de quartz. La plaquette est exposée à un environnement gazeux contenant des atomes de phosphore, le procédé le plus répandu mettant en œuvre de l'azote saturé au trichlorure de phosphore (POCl_3). Le tube contient également de l'oxygène de sorte qu'un verre composé de phosphore et de silice (SiO_2) se forme à la surface de la plaquette. C'est à partir de cette couche qu'a lieu la diffusion du phosphore dans le silicium, à des températures situées autour de 750 à 850 °C. Ce procédé n'est pas sélectif, et la région diffusée est également formée sur les bords et à l'arrière de la plaquette et doit être gravée par la suite. Le verre de silice est finalement enlevé à l'aide d'une solution d'acide fluorhydrique. La jonction p-n est ainsi formée en face avant.

La zone diffusée sert également à faciliter le contact électrique entre le silicium et une électrode de métal. Une forte concentration de phosphore ($1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, la limite de concentration active électriquement étant de $3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) est requise afin de réaliser un tunnel à travers la fine barrière de potentiel consécutive à la différence des travaux de sortie des deux matériaux et ainsi diminuer la résistance de contact [26,27]. Néanmoins, cette zone diffusée, ou émetteur, doit être peu profonde afin de minimiser l'absorption des photons ultraviolets et bleus [28] et les recombinaisons des porteurs dans le volume. En général la profondeur de la jonction est actuellement d'environ 300 nm. Cette forte concentration de dopage est également responsable de fortes pertes par recombinaison de surface, et une couche de passivation est systématiquement déposée pour limiter ce phénomène. Enfin, et comme les contacts métalliques ne couvrent que 5 % de la surface avant, la région diffusée doit faciliter le transport latéral des électrons vers les doigts qui forment l'électrode avant. Il faut donc trouver un compromis entre les paramètres

antagonistes que sont la séparation des charges, les recombinaisons de surface et de volume, et le transport de courant latéral ce qui rend l'optimisation de l'émetteur très complexe.

La diffusion de phosphore permet également de piéger les impuretés (par effet de piégeage ou *gettering*) [29]. Durant ce procédé, les atomes de métaux de transition comme le fer, le nickel ou le chrome diffusent depuis le volume de la plaquette vers la zone dopée n^+ . Une fois localisés dans cette zone, ils sont beaucoup moins nuisibles à l'opération de la cellule. Ce phénomène permet d'utiliser des plaquettes pureté relativement faible, et donc moins chers, et a notamment permis le développement des cellules sur silicium multicristallin. Il est cependant limité actuellement pour les cellules monocristallines, car la pureté des plaquettes a été fortement améliorée.

Une couche antireflet, très transparente dans le domaine des radiations visibles et infrarouges du spectre lumineux, est ensuite déposée sur les plaquettes de silicium. L'indice de réfraction du matériau déposé doit être situé entre celui du verre (environ 1,5) et celui du silicium (environ 4 pour la lumière visible) tandis que l'épaisseur de la couche obtenue influe sur la longueur d'onde pour laquelle le minimum de réflexion est obtenu. De manière générale, les films antireflets sont optimisés pour obtenir un minimum de réflectance pour des longueurs d'onde aux alentours de 600 nm [30].



Figure I-18 : différentes épaisseurs d'une même couche de matériau antireflet impliquent différentes couleurs pour les plaquettes traitées. Source : PVEducation

Le nitrure de silicium amorphe hydrogéné, $\text{SiN}_x:\text{H}$, souvent appelé nitrure de silicium, déposé par PECVD (*Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition* ou dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma) à environ 400 °C est le matériau antireflet utilisé en production industrielle [31]. Déposé en général sous la forme d'un film d'indice de réfraction 2 et d'épaisseur de 75 nm, il joue plusieurs fonctions. En plus de ses propriétés antireflets, le nitrure fournit une excellente passivation de la face avant, par deux effets combinés. Il permet premièrement de neutraliser les liaisons pendantes avec des atomes d'hydrogène [32], mais aussi de passiver par effet de champ, grâce à la forte densité de charges fixes positives (environ 10^{12} cm^{-2}) qu'il contient [33]. Ces charges fixes permettent l'accumulation d'électrons à la surface, tout en repoussant les trous, réduisant la probabilité de recombinaison. Des densités de courant de recombinaison de surface faibles, de l'ordre de 100 fA.cm^{-1} ou moins peuvent être obtenues [34].

De manière additionnelle, l'hydrogène contenu dans les films de nitrure diffuse également dans la plaquette de silicium, et notamment lors de l'étape de recuit des contacts métalliques, passivant les défauts de volume de manière importante dans le silicium multicristallin, complémentairement au phénomène de *gettering*.

Finalement, la face avant est achevée avec la sérigraphie d'une grille d'argent par-dessus la couche antireflet. Cette grille est composée de doigts (d'environ 40 μm de large) interconnectés par des busbars (d'environ 1 à 2 mm de large) sur lesquels seront soudés les rubans nécessaires à l'interconnexion des cellules. La pâte de sérigraphie contient un liant qui permet l'agglomération des particules de métal, réagit avec le nitrure de silicium et mouille la surface du silicium pendant un recuit à haute température (aux alentours de 800 $^{\circ}\text{C}$). Durant le refroidissement, les particules d'argent précipitent et adhèrent à la surface de la plaquette [35,36].

Les contacts en face avant doivent être suffisamment fins pour ne pas trop ombrer la surface et ne pas fortement diminuer le courant de court-circuit et générer une tension élevée, mais également suffisamment larges pour ne pas créer trop de pertes résistives.

Dans le même temps, le contact électrique arrière de la cellule est également formé. Un dépôt d'aluminium est sérigraphié sur la totalité de la face arrière [37]. Pendant l'étape de recuit, l'aluminium forme un alliage eutectique avec le silicium, en consommant environ 5 à 20 μm de celui-ci. Pendant le refroidissement, une couche de silicium fortement dopée p à l'aluminium est formée sur la face arrière de la plaquette. La passivation par effet de champ, bien qu'existante, est plus limitée que pour la face avant car la solubilité de l'aluminium dans le silicium est d'environ $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Cependant des phénomènes liés au fort dopage comme les recombinaisons Auger diminuent la mobilité des porteurs minoritaires et compensent partiellement le déficit de champ, si bien que des densités de courant de recombinaison relativement faibles (de l'ordre de 1000 fA.cm^{-2}) [38] peuvent être obtenues.

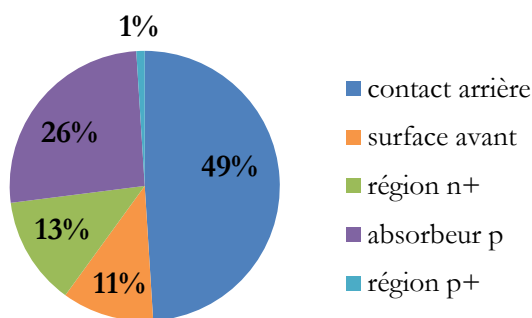


Figure I-19 : Analyse des pertes par recombinaison pour un exemple de cellule Al-BSF de type p. Au point de puissance maximale, la plupart des pertes par recombinaison à l'interface entre le métal et le silicium à l'arrière de la cellule. Source : [20]

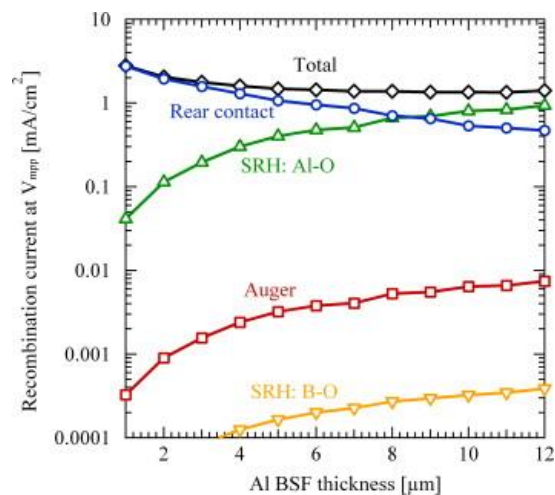


Figure I-20 : ampleur de ces pertes en fonction de l'épaisseur du BSF. Source : [39]

Ce dépôt d'aluminium en face arrière agit également comme un miroir, bien que la qualité de celui-ci ne soit pas optimale [40] et diminue encore par le phénomène d'alliage. Il réfléchit néanmoins une partie de la lumière infrarouge qui n'a pas été absorbée et la renvoie dans la cellule par l'arrière. Des lignes d'argent sont habituellement imprimées par-dessus afin d'établir une soudure et une interconnexion de l'électrode arrière avec d'autres cellules. En dernier lieu, le phosphore parasite présent sur les bords de la plaquette suite à l'étape de diffusion est retiré par gravure laser autour de la cellule.

I-5. LES CELLULES A HAUTS RENDEMENTS

I-5.1. Cellules PERC

Comme vu dans la partie précédente, la face arrière dopée à l'aluminium permet de contrôler le phénomène de recombinaison mais n'est pas idéale du point de vue électrique ou optique. Avec une densité de courant de recombinaison d'environ 1000 fA.cm^{-2} , soit 10 à 50 fois moins que celle de la face avant si elle est passivée au nitrure de silicium, les performances de la cellule sont limitées.

Une solution pour améliorer la passivation et la réflectivité de la face arrière est de limiter l'alliage d'aluminium à environ 1 à 5 % de la surface tandis que le reste est passivé par un matériau diélectrique qui est le plus souvent de l'oxyde de silicium SiO_2 , du nitrure ou de l'alumine (Al_2O_3). Cette technologie est communément baptisée PERC (*Passivated Emitter and Rear Cell*), PERL (*Passivated Emitter, Rear Locally-doped*) ou PERT (*Passivated Emitter, Rear Totally diffused*) [41]. Des ouvertures pour le contact électrique sont réalisées dans la couche isolante le plus souvent avec un laser.

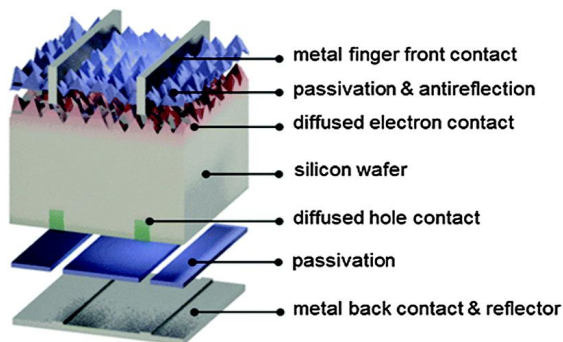


Figure I-21 : Vue en coupe des composants d'une cellule à face arrière passivée. Le dopage à l'aluminium en face arrière (BSF) est localisé au niveau des ouvertures de la couche diélectrique arrière, qui fait office de miroir et de passivation de surface. Source : [20]

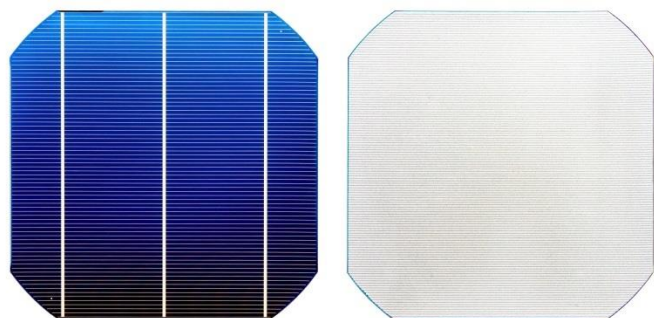


Figure I-22 : photographie d'une cellule PERC. La face avant (en bleu à droite) est identique à celle d'une cellule classique, mais la face arrière présente une meilleure passivation sous le contact d'aluminium (en gris à droite).

De la pâte d'aluminium est sérigraphiée sur la totalité de la face arrière et recuite de sorte que des régions p^+ localisées sont formées à l'intérieur des ouvertures pratiquées dans le film isolant. Un

miroir quasi-idéal est formé sur la face arrière, l'indice de réfraction relativement faible de la couche diélectrique entre le silicium et le métal permettant une forte réflexion interne [42]. L'atout principal de cette technique demeure cependant la qualité de la passivation qu'offre la couche diélectrique déposée en face arrière, qui a permis d'obtenir des rendements de 22,13 % sur des cellules commerciales [43].

Les cellules PERC présentent néanmoins certaines limites qu'il conviendrait de surpasser afin de rendre cette technologie toujours plus attractive. Alors qu'elles permettaient l'obtention de rendements très intéressants sur des plaquettes de qualité moyenne, l'amélioration de la qualité du silicium monocristallin utilisé a contribué à un resserrement des performances des cellules PERC et Al-BSF, alors que ces dernières coûtent moins cher. La forte demande actuelle du marché asiatique pour les cellules à haut rendement entraîne une forte hausse de la production des cellules PERC [44], mais la diminution des coûts de production sera nécessaire à l'avenir. De plus, ces cellules paient le fort courant qu'elles génèrent lors de la mise en module. Lorsqu'elles sont interconnectées par des rubans, on constate des pertes résistives dans les chapelets de cellules qui sont proportionnelles au carré du courant généré (voir partie I-7). Les cellules à haute performance occasionnent donc plus de pertes résistives lors de la mise en module que des cellules Al-BSF standard, car elles génèrent plus de courant. Ainsi, une des meilleures cellules Al-BSF réalisée a été mesurée avec une densité de courant de $38,9 \text{ mA.cm}^{-2}$ (pour un rendement de 20,3 %) par K. Kim et al. [45], contre plus de $41,1 \text{ mA.cm}^{-2}$ pour les cellules PERC avec un rendement de 21,9 % réalisées par J. Zhao et al. [46]. C'est à la réduction de ces pertes qu'est principalement consacré le travail de cette thèse.

I-5.2. Cellules IBC

La cellule IBC (*Interdigitated Back Contact*) a été développée pour des applications de photovoltaïque à concentration à la fin des années 1970 [47], bien que la première cellule mise au point par les laboratoires Bell ait déjà utilisé cette structure. Ce type de cellule a été commercialisé pour la première fois par SunPower, qui a depuis atteint des rendements record de 25,2 % pour les cellules et de 22,8 % pour un module, ce qui constitue le record pour un module de silicium cristallin de grande taille [43].

Les fortes performances de cette technologie sont expliquées par le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert plus élevés que peuvent produire les cellules en éliminant complètement l'ombrage provoqué par les grilles métalliques de la face avant. En effet, dans les cellules IBC les jonctions qui séparent les porteurs et les contacts qui permettent leur collection sont situés exclusivement à l'arrière de la cellule. Ceci permet une plus grande marge de manœuvre dans la conception optique et électronique de la face avant, qui a permis l'obtention de la densité de courant de court-circuit record de $41,33 \text{ mA.cm}^{-2}$. La passivation de la face avant, par exemple par un oxyde de silicium complété par un film de nitrure comme couche antireflet, peut être rehaussée par une couche diffusée de même polarité que le volume de la cellule, mais dopée plus fortement (FSF ou *Front Surface Field*), ou pour une couche diffusée de polarité inverse (jonction flottante) qui repousse les porteurs minoritaires près de la surface [48].

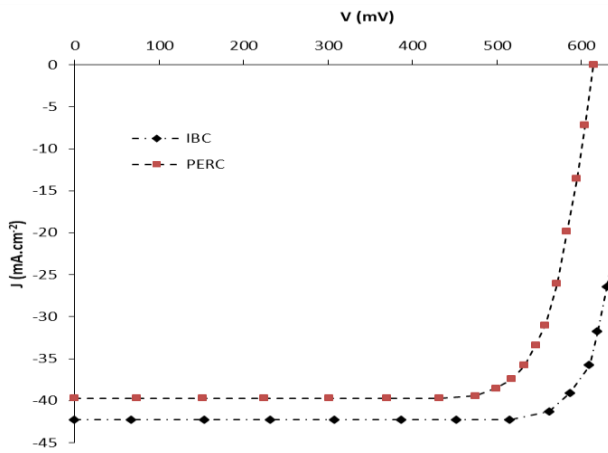


Figure I-23 : les cellules IBC permettent la génération d'un courant et d'une tension plus forts que ceux des cellules PERC. Source [49]

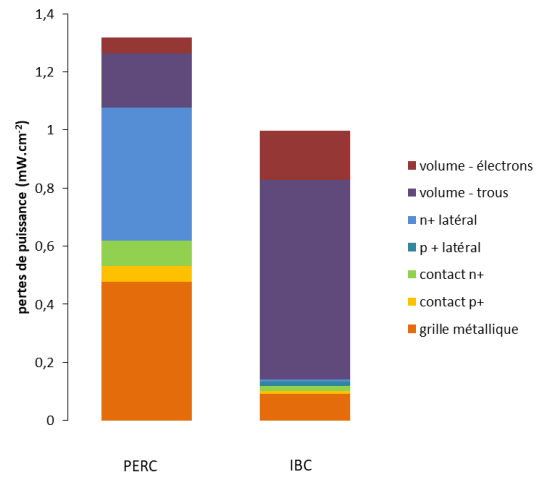


Figure I-24 : ces caractéristiques plus élevées sont principalement dues à la réduction des pertes liées à la métallisation avant (en orange sur le graphique). Source [49]

En général, du bore est diffusé localement en face arrière pour réaliser les zones de transport des trous ; du phosphore est diffusé dans la partie restante de la surface pour réaliser les zones qui collecteront les électrons. La largeur de ces zones est un paramètre important pour l'optimisation de la structure et dépend de la longueur de diffusion et des recombinaisons dans les régions dopées au phosphore et au bore. Les électrons sont plus mobiles que les trous dans le silicium, si bien que la région dopée au bore doit être plus large en proportion.

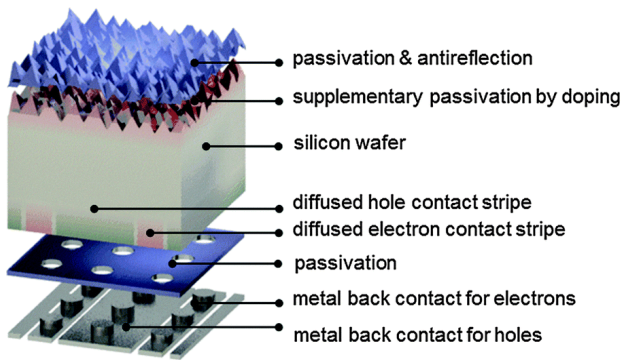


Figure I-25 : Vue en coupe des composants d'une cellule IBC. Les électrons et les trous sont extraits à l'arrière de la cellule par des zones n et p diffusées localement et alternativement et connectées aux doigts métalliques par des ouvertures locales dans la couche de passivation diélectrique arrière. Source : [20]



Figure I-26 : photographie d'une cellule IBC. La face avant (en bleu à gauche) ne présente pas de métallisations, qui sont exclusives à la face arrière (en gris à droite).

Un film diélectrique est déposé en face arrière pour la passivation [50]. Il est ouvert localement comme dans le cas des cellules PERC pour permettre le dépôt de contacts métalliques. Ces contacts doivent être suffisamment espacés pour éviter tout recouvrement avec les contacts

voisins qui créeraient un court-circuit (shunt). Un compromis doit être trouvé entre bonne résistance de contact favorisée par des ouvertures larges et les recombinaisons entre le métal et le silicium réduites par des ouvertures fines.

Néanmoins, le fait de ne pas avoir à composer avec l'ombrage de la face avant permet d'obtenir de très bonnes valeurs de FF – 82,7 % pour la cellule record. Les contacts en eux-mêmes peuvent être assez large et jouer le rôle de miroir en face arrière.

Les cellules IBC présentent les mêmes avantages et défauts que les cellules PERC, c'est pourquoi elles ont également été étudiées dans ces travaux. Une partie importante des améliorations à amener consiste à réduire les coûts de production actuellement élevés, et à faciliter l'industrialisation et la production à grande échelle de ces cellules encore très peu répandues sur le marché. Le second verrou important à lever consiste comme pour les cellules PERC à réduire, les pertes électriques qui peuvent être limitées sans surcoût trop important, comme il le sera montré dans le chapitre III.

I-5.3. Cellules HIT

La cellule à hétérojonction en silicium (SHJ ou *Silicon HeteroJunction*) a été développée par Sanyo au début des années 1990 et commercialisée sous marque déposée HIT (*Heterojunction with Intrinsic Thin layer*) [51]. Le record de rendement est détenu par une cellule de 25,1 % fabriquée par Kaneka [52].

La cellule à hétérojonction est basée sur des couches minces de silicium amorphe hydrogéné qui assurent une excellente passivation de la surface de la plaquette. De plus, ces couches minces sont insérées sous les zones dopées n⁺ et p⁺ qui forment respectivement la zone de collecte des électrons et des trous, diminuant les recombinaisons à un taux quasiment nul, y compris dans les zones contactées par des électrodes de métal [51]. Cette technique permet d'obtenir des valeurs de Voc très fortes ; un record de 750 mV ayant été démontré sur une cellule dont l'épaisseur permettait un rendement maximal théorique de 761 mV met en avant la qualité de la passivation obtenue [53].

Le procédé de fabrication commence comme pour les cellules classiques par la texturation, suivie de la passivation des deux côtés de la plaquette par la couche de silicium amorphe hydrogéné. Ces films sont le plus souvent déposés par PECVD et font 5 nm d'épaisseur environ. Ils sont la pièce maîtresse de la cellule, de par la passivation excellente qu'ils offrent et par le fait qu'ils sont transparents au passage des porteurs de charge.

Les contacts sélectifs ne sont pas réalisés par diffusion de dopant dans le silicium cristallin, mais la combinaison de l'utilisation du dopage et d'un matériau à gap plus large que le silicium, qui permet d'obtenir une séparation des charges mobiles quasi-idéale. Pour ce faire, des couches de silicium amorphe dopées d'environ 10 nm sont déposées de part et d'autre de la plaquette passivée. Le bore est utilisé comme dopant p pour le transport des trous, et le phosphore comme dopant n pour le transport des électrons. Ces couches dopées ne sont pas en contact direct avec le silicium cristallin afin de ne pas dégrader la passivation. Les cellules HIT peuvent être différemment formées à partir de plaquettes p ou n, bien que les plaquettes n offrent des

performances légèrement meilleures dues à une passivation facilitée. Il est également possible de changer leur polarité facilement.

Une électrode transparente composée d'oxyde d'indium-étain (ITO pour *Indium Tin Oxide*) est déposée sur la surface des cellules. Elle permet le transport latéral des porteurs avec la même conductivité que l'émetteur diffusé d'une cellule classique. Ce film sert également de couche antireflet, son indice de réfraction de 2 permettant une bonne adaptation optique.

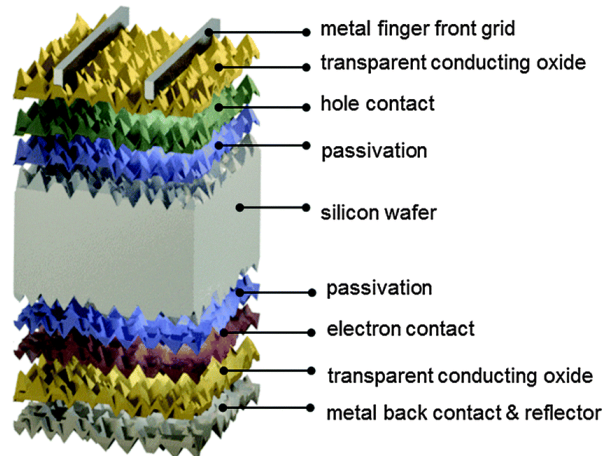


Figure I-27 : Vue en coupe des composants d'une cellule HIT. Les faces avant et arrière de la plaquette sont passivées par une couche de silicium amorphe intrinsèque hydrogéné. Les zones de collecte des électrons et des trous sont réalisées par le dépôt de couches de silicium amorphes dopées respectivement au phosphore et au bore. Le transport latéral des charges vers les doigts de métal est assuré par une couche transparente d'oxyde d'indium-étain qui fait office de couche antireflet. Source : [20]

I-5.4. Les cellules bifaciales

Les cellules bifaciales sont conçues de manière à faire entrer la lumière par les deux côtés. Elles reprennent la face avant des cellules solaires conventionnelles décrites dans la partie I-4, mais diffèrent au niveau de la face arrière. Au lieu de couvrir celle-ci d'un dépôt pleine surface d'aluminium, l'utilisation d'une grille métallique à l'arrière permet à la lumière de rentrer par la face arrière. La bifacialité est plus une caractéristique qui peut être ajoutée à un type de cellule existant (PERC, IBC, Al-BSF) qu'un type de cellule à proprement parler. Le silicium utilisé pour ce type de cellules doit être de bonne qualité notamment pour limiter les problèmes de recombinaison en face arrière. De même, les cellules doivent être encapsulées entre deux plaques de verre dans les modules pour tirer bénéfice de cette technologie, ces deux facteurs entraînant des surcoûts importants.

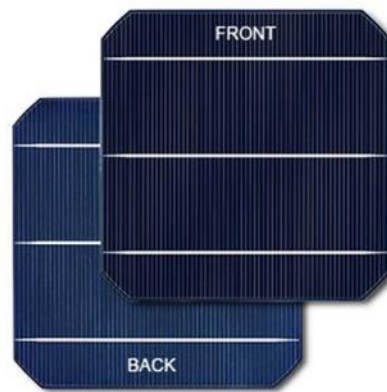


Figure I-28 : photographies des faces avant et arrière d'une cellule bifaciale. Les deux côtés sont traités contre la réflexion et peuvent absorber la lumière de manière optimisée.

Historiquement, ce type de cellules a été développé pour des modules bi-verre (transparents des deux côtés) destinés aux régions où la plupart de l'énergie solaire disponible vient de rayonnement diffus qui a été réfléchi par le sol ou les objets environnants (comme dans les régions sujettes à la neige). Récemment, l'augmentation des rendements des cellules sérigraphiées ainsi que la diminution significative des coûts du verre solaire ont rendu les modules bifaciaux viables et ont stimulé leur production et vente.

L'un des objectifs de ces travaux consiste à exploiter la bifacialité qui peut être obtenue à partir de cellules PERC ou IBC en les modifiant légèrement. Cette solution permet en effet d'augmenter la performance des systèmes photovoltaïques à moindre coût. La progression du marché du BIPV crée de plus un contexte favorable aux modules bifaciaux en Europe qui démontre un réel intérêt économique pour ce genre de technologie, sans parler de son intérêt technique certain.

I-6. LA FABRICATION DE MODULES

Un module consiste en plusieurs cellules photovoltaïques de même type connectées les unes aux autres dans le but d'augmenter la puissance générée. Les cellules sont protégées des intempéries et les usagers d'un choc électrique par des plaques de verre et de polymère qui recouvrent l'ensemble. Il est important de noter que le module est le produit final qui constitue la partie génératrice de courant d'un système photovoltaïque, et non pas les cellules. De très bonnes cellules peuvent mal se comporter une fois assemblées en module et inversement. Les étapes d'interconnexion et d'encapsulation peuvent en effet jouer un rôle non négligeable dans la performance électrique des modules, comme décrit après.

I-6.1. Structure d'un module PV

La plupart des modules sont constitués d'une face avant transparente, d'un encapsulant, d'une face arrière et d'un cadre sur les bords. Dans la majorité des cas, la face avant est en verre,

L'encapsulant est de l'EVA (éthylène-acétate de vinyle, un polymère) et la face arrière est en PVF (polyfluorure de vinyle, également un polymère).

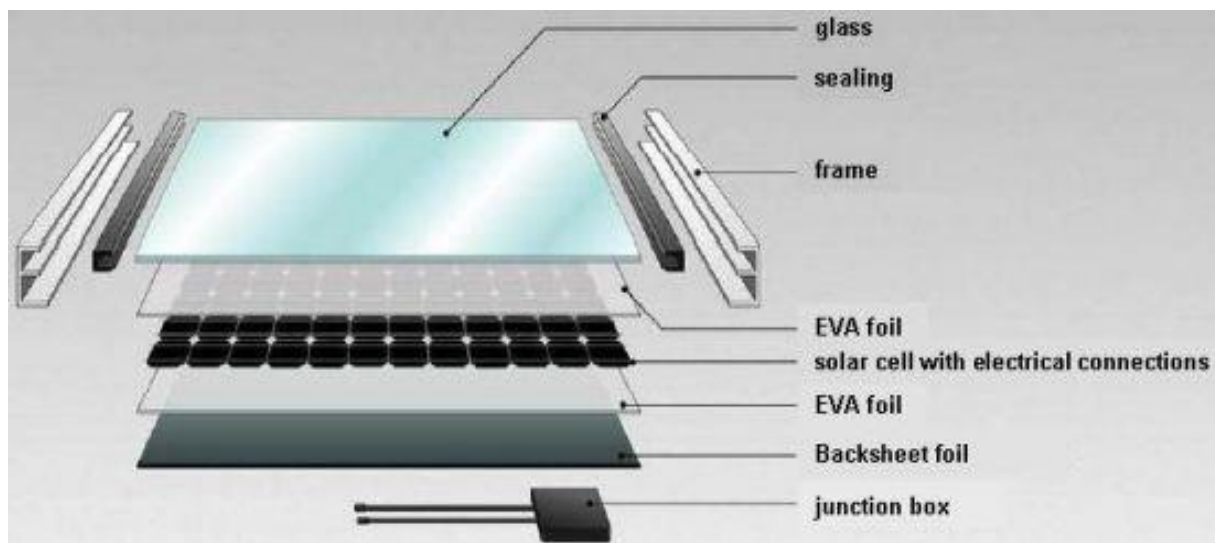


Figure I-29 : la structure d'un module photovoltaïque. Source : Sun Technics.

Pour maximiser les performances, le verre solaire doit bien transmettre la lumière dans la gamme de longueurs d'ondes utilisées par les cellules, à savoir entre 350 et 1200 nm. De la même manière, la réflexion à sa surface doit être la plus basse possible. Deux principales solutions existent pour limiter ce phénomène, soit le dépôt d'un film anti-reflet sur le verre [54], soit la texturation de celui-ci [55]. De plus, la face avant d'un module doit être imperméable à l'eau, avoir une bonne résistance aux impacts, être stable sous rayonnement UV, et avoir une basse résistance thermique. C'est pourquoi le verre solaire (à bas taux de fer pour éviter l'absorption de la lumière IR) est le choix principal. Les matériaux acryliques et polymères peuvent constituer des faces avant alternatives.

Le matériau encapsulant est utilisé pour obtenir une adhésion mécanique entre les cellules solaires, la face avant et la face arrière du module. Comme la face avant, l'encapsulant doit être stable à haute température et sous rayonnement UV, et transparent. L'EVA se présente sous la forme de feuilles qui sont insérées entre les cellules et la face avant, et entre les cellules et la face arrière. L'ensemble est chauffé à environ 150 °C, polymérisé et forme un bloc.

La face arrière doit être résistante à la chaleur et étanche à toute infiltration d'eau. Certains modules bifaciaux sont conçus pour recevoir de la lumière par l'avant et l'arrière. Dans ce cas, la face arrière est également une plaque de verre solaire. On parle de modules bi-verre. Le cadre des modules est généralement en aluminium.

I-6.2. Effets de l'interconnexion

Un module consiste en plusieurs cellules connectées en série et/ou en parallèle, en fonction de la tension et du courant qu'il faut délivrer. Par exemple, une cellule individuelle produit une tension de moins de 0,7 V sous une illumination AM1.5 avec une température de fonctionnement de 25

°C, il faut donc en connecter une trentaine en série pour obtenir une tension habituelle d'un système PV (à savoir environ 15 V). Si la tension dépend du nombre de cellules, le courant, lui, dépend de la taille des cellules et de leur rendement. Une cellule moyenne produit environ 35 mA/cm². Les cellules de dimension standard et de haut rendement peuvent donc produire jusqu'à 10 A chacune. La tension délivrée par un module dépend fortement de sa température de fonctionnement, alors que le courant dépend fortement de son inclinaison par rapport au soleil.

Si toutes les cellules du module ont des caractéristiques identiques et opèrent sous les mêmes conditions, alors elles délivrent toutes les mêmes courants et tensions. Dans ce cas, la courbe I(V) du module a la même forme que celles des cellules, mais avec une tension et un courant accrus. L'équation du circuit devient :

$$I_T = M \cdot I_L - M \cdot I_0 \left[\exp\left(\frac{q \frac{V_T}{N}}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (I.1)$$

Avec : N le nombre de cellules en série, M le nombre de cellules en parallèle, I_T le courant total du circuit, V_T la tension totale du circuit, I₀ le courant de saturation d'une cellule, I_L le courant de court-circuit d'une cellule, n le facteur d'idéalité d'une cellule, et q, k et T les constantes physiques.

I-6.3. Limites à la puissance des modules

Dans la pratique, les modules n'offrent jamais la puissance que pourrait théoriquement délivrer la somme des cellules individuelles. Ces pertes entre les cellules et les modules, ou pertes CTM (cell-to-module) sont causées par plusieurs facteurs.

La compacité, tout d'abord, est moindre dans un module que dans le cas d'une cellule isolée. Ainsi, pour des raisons de sécurité et de praticité, de la surface non-utilisée existe entre les cellules et sur les bords des modules. La couche de verre en face avant, même si elle offre de bonnes performances, réfléchit une portion de la lumière et en absorbe une autre. Ces pertes viennent s'ajouter aux réflexions déjà existantes sur la face avant des cellules. L'encapsulant absorbe également une fraction du rayonnement incident. Les rubans utilisés sur les busbars pour souder les cellules entre elles génèrent de l'ombrage supplémentaire qui diminue les performances. Enfin, des pertes résistives ont lieu dans les rubans d'interconnexion qui transportent des courants forts. Ces pertes sont proportionnelles à la valeur du courant au carré. Le sujet de ces pertes CTM sera abordé plus en détail dans les chapitres suivants, puisque leur réduction constitue un des objectifs de ces travaux de thèse et un des objectifs de la société S'Tile.

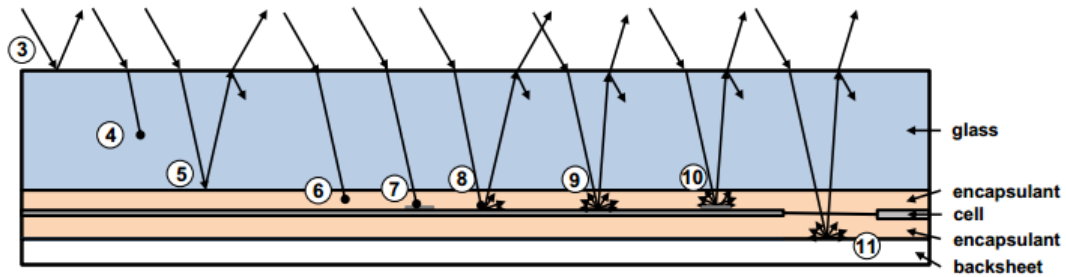


Figure I-30 : Illustration des effets optiques présents dans un module, et qui contribuent aux pertes supplémentaires. Source [56]

I-7. LE CONCEPT I-CELL

L'entreprise S'Tile a développé et breveté la cellule intégrée, ou i-Cell (Figure I.31), concept de recherche qui a été porté au stade de prototype. Comme montré en annexe, cette dernière consiste en plusieurs sous-cellules issues d'un même film mince de silicium monocristallin, séparées physiquement puis connectées en série par le biais du substrat fritté sur lequel elles sont assemblées. Ainsi assemblée, cette cellule présente de nombreux avantages :

- i) L'utilisation de plaquettes minces sur substrat de silicium fritté de qualité métallurgique permet de réduire la quantité de silicium monocristallin de qualité solaire utilisée et ainsi de réduire le coût.
- ii) L'interconnexion des sous-cellules par le biais du substrat permet de réduire les quantités de cuivre et d'argent utilisées pour cette tâche.
- iii) le fait de diviser la cellule en x sous-cellules et de les connecter en série permet de diviser le courant photogénéré par l'ensemble des sous-cellules interconnectées par un facteur x .

L'expression du courant circulant dans la cellule, pour un modèle à deux diodes, dépend linéairement de I_L , le courant photogénéré. Or, une expression d' I_L peut être donnée de la manière suivante :

$$I_L = S \cdot q \int_0^W G(x)CP(x)dx \quad (I.2)$$

Dans cette notation, q est la charge électronique, W l'épaisseur de la cellule, G le taux de génération des porteurs et CP la probabilité de collection de ces porteurs si les recombinaisons sont considérées. De plus, la valeur d' I_L est directement proportionnelle à S , la surface de la cellule considérée. Une surface moindre, pour une cellule photovoltaïque, entraînera donc une diminution linéaire du courant photogénéré par cette cellule. En connectant les sous-cellules en série, la tension générée par l'ensemble est, elle, multipliée par x , si bien que la puissance de la cellule équivalente à une cellule standard (composée de x sous-cellules connectées en série) est identique, malgré un courant et une tension différents.

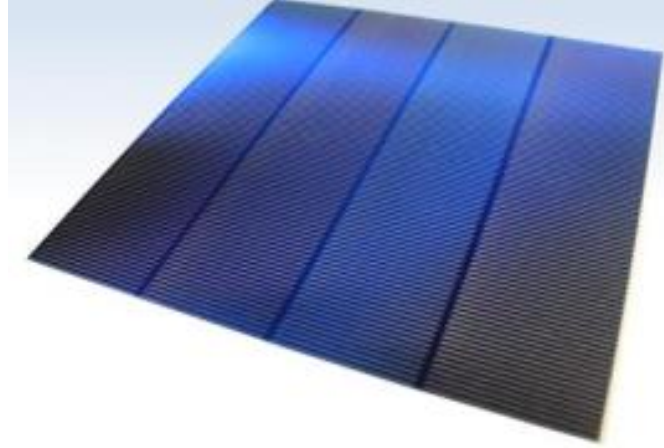


Figure I-31 : photographie d'une i-Cell, composée de quatre sous-cellules connectées en série. Les faces arrière contactent les busbars avant par recouvrement des sous-cellules.

Dans le cas de l'i-Cell, il a été choisi de découper les cellules en quatre segments car cette solution offre un bon rapport entre la largeur des sous-cellules obtenues pour une collection du courant sans pertes résistives trop importantes, et le nombre de découpe et de connexions supplémentaires par rapport à une cellule standard [57].

Le but de la diminution du courant des cellules est de réduire les pertes électriques dans les modules. Les modules photovoltaïques sont en effet composés de chapelets ou *strings* de cellules connectés en série. Ces chapelets constituent des sous-assemblages qui sont ensuite eux-mêmes assemblés soit en série soit en parallèle pour former des modules de tension et de courant donnés. Au sein d'un chapelet, les cellules sont interconnectées au moyen de rubans de cuivre connectés sur les busbars. Le courant qui circule dans les rubans I_R peut être approximé par :

$$I_R = \frac{I_L}{n_R} \quad (I.3)$$

Avec I_L le courant généré par les cellules du chapelet et n_R le nombre de busbars et donc de rubans par cellule. Cette circulation de courant dans les rubans entraîne des pertes résistives ΔP_R , qui sont exprimées de la manière suivante :

$$\Delta P_R = \sum_{k=1}^{n_R} \frac{1}{3} \cdot I_R^2 \cdot R_{bb+r} \quad (I.4)$$

Avec R_{bb+r} la résistance électrique de l'ensemble busbar et ruban. En combinant avec l'équation (I.3), on obtient :

$$\Delta P_R = \sum_{k=1}^{n_R} \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{I_L}{n_R}\right)^2 \cdot R_{bb+r} \quad (I.5)$$

La perte résistive dépend donc de la valeur du courant généré par la cellule élevée au carré. Diminuer le courant généré par une cellule photovoltaïque permet donc de réduire fortement ces pertes résistives. Cet effet est d'autant plus intéressant que pour un module de 60 cellules à 19,9 % de rendement générant 289,8 W, les pertes résistives représentent 10,9 W, soit 3,8 % de la puissance totale du module [1]. Des stratégies alternatives pour réduire ces pertes consistent à augmenter le nombre de busbars des cellules, ou même à changer le matériau qui les compose pour un matériau plus conducteur, mais ces solutions sont extrêmement complexes et coûteuses car elles nécessitent le développement et la mise en place de nouvelles machines sur les lignes de production. La découpe en sous-cellules paraît plus simple et économique puisqu'elle ne nécessite qu'une adaptation des moyens de caractérisation.

Un des autres avantages de l'i-Cell réalisé sur substrat fritté est la limitation de l'ombrage en face avant. L'interconnexion des sous-cellules et des i-Cell entre elles étant réalisée par le moyen du substrat, il n'est nul besoin de busbars en face avant pour cette tâche. Seul des doigts sont présents. Ceci permet de diminuer l'ombrage de 5% à 2 % de la face avant [58] et de faire augmenter proportionnellement le courant photogénéré.

Notons finalement que la conception des sous-cellules de l'i-Cell permet des agencements particuliers. Les sous-cellules peuvent être assemblées avec un recouvrement partiel entre elles, ce qui permet une grande compacité. Toute la surface du module peut être utilisée pour la génération de courant, à l'exception du cadre, ce qui n'est pas le cas des modules standard. Les sous-cellules permettent en outre de réaliser des modules de dimensions particulières qui ne peuvent pas être fabriqués avec des cellules carrées. Ceci implique un avantage pour la réalisation de modules pour applications spécifiques et BIPV, qui nécessitent souvent d'être non standards. Enfin, le fait de ne pas avoir de busbars apparents peut présenter un avantage esthétique, puisque les modules ainsi obtenus sont uniformément sombres.

Pour des raisons pratiques et économiques, l'i-Cell telle qu'elle a été conçue n'est pas produite. Il est en effet extrêmement difficile de manipuler des cellules aussi minces que 40 μm d'épaisseur avec des moyens industriels sans un taux de casse très important ou une cadence très lente [59]. De plus, la baisse des prix du silicium monocristallin rend la cellule intégrée moins intéressante économiquement, puisqu'elle fait économiser des matières premières au prix de l'installation d'une ligne de production spécifique très coûteuse. Il serait donc très difficile d'être compétitif avec une technologie à base de couches minces actuellement, même sur des marchés de niche [60]. Pour autant, certains des éléments industriellement faisables du concept i-Cell ont été réutilisés dans l'étude présentée dans cette thèse, afin de renforcer les avantages des cellules PERC à bas coût développées. La découpe des cellules en sous-cellules, l'interconnexion compacte de ces sous-cellules et la réduction du taux de métallisation en face avant sont en effet des solutions prometteuses pour accentuer les effets des travaux précédemment décrits et réaliser des modules performants à coût modéré.

I-8. PRESENTATION DES TRAVAUX DE THESE

En s'appuyant sur les études réalisées par la société S'Tile, les travaux présentés dans cette thèse consistent à concevoir des modules à haut rendement et à bas coûts compatibles avec le secteur d'activité de la société qui réalise actuellement ses modules majoritairement à base de cellules Al-BSF.

Dans le second chapitre de cette thèse, des modules intégrés réalisés à partir de cellules inspirées des cellules PERC ont été réalisés. La première partie de l'étude a porté sur les cellules en elles-mêmes, et sur la manière de réduire leur coût de production en simplifiant le procédé de fabrication et en diminuant la quantité de matériaux utilisés. L'augmentation des rendements a également été observée en introduisant la bifacialité aux cellules PERC et en utilisant des moyens performants pour la réalisation des émetteurs des cellules. Dans un second temps, l'augmentation de la puissance des modules a été étudiée en s'inspirant de l'i-Cell pour réduire fortement les pertes résistives traditionnellement observées.

La même étude a été réalisée à partir de cellules IBC spécialement conçues pour être divisées en sous-cellules et ainsi assemblées en modules. Ces travaux sont détaillés dans le chapitre III. De cette manière, deux voies possibles sont explorées pour l'amélioration des rendements et la diminution des coûts des modules produits par la société.

REFERENCES DU CHAPITRE

- 2 United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, *World Population Prospects: The 2015 Revision, Key Findings and Advance Tables*, 2015, p. 241.
- 3 McEvedy, C., Jones, R., *Atlas of world population history*, éditeur: Penguin Books Ltd, Harmondsworth, Middlesex, England, 1978, p. 350.
- 4 Banque Mondiale, *Global Monitoring Report 2015/2016: Development Goals in an Era of Demographic Change*, éditeur: la Banque Mondiale, 2015,
- 5 U.S. Energy Information Administration, *International Energy Outlook 2016*, 2016, 276 p.
- 6 International Energy Agency, *Key World energy Statistics 2016*, 2016, 74 p.
- 7 British Petroleum, *Statistical Review of World Energy*, 2016, 44 p.
- 8 Commissariat à l'énergie atomique, *Memento sur l'énergie*, 2016, 101 p.
- 9 Boden, T.A., G. Marland, and R.J. Andres, « Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions », éditeur: Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, 2017, 4 p.
- 10 Syukuro M., and Wetherald R. T., « Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Given Distribution of Relative Humidity », *Journal of Atmospheric Sciences*, n° 24, 1967, pp. 241-259.
- 11 Randalls S., « History of the 2 °C climate target. », *Wiley Interdisciplinary Reviews – Climate Change*, n° 1, 2010, pp. 598-605.
- 12 Jones G.A. et Warner K.J., « The 21st century population-energy-climate nexus », *Energy Policy*, n° 93, 2016, pp. 206-212.
- 13 REN21, *Renewables 2017 Global status report*, 2018, 324 p.
- 14 Le Quéré C. et al., « The Global Carbon Budget 1959 -2011 », *Earth System Science Data*, n° 5, 2013, pp. 165-185.
- 15 Jäger-Waldau A., « PV Status Report 2017 Study », éditeur : Commission Européenne, 2017, 83 p.
- 16 Osseweijer F., Hurk J. van den, Teunissen E., et Sark W. van, « A Comparative Review of Building Integrated Photovoltaics Ecosystems in Selected European Countries », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n° 90, 2018, pp. 1027-1040.
- 17 Jordan D. C. et Kurtz S. R., « Photovoltaic Degradation Rates – an Analytical Review », *Progress in Photovoltaics Research and Applications*, n° 21, 2013, pp. 12-29.
- 18 Fraunhofer ISE, « Photovoltaics Report », éditeur : Fraunhofer ISE, 2018, 45 p.
- 19 Yan J. et Saunders B. R., « Third-Generation Solar Cells: a Review and Comparison of Polymer:fullerene, Hybrid Polymer and Perovskite Solar Cells », *RSC Advances*, vol. 4, n° 82, 2014, pp. 43286-43314.

- 20 Battaglia C., Cuevas A. et Wolf S. de, « High-Efficiency Crystalline Silicon Solar Cells: Status and Perspectives », *Energy and Environment Sciences*, vol. 9, n° 5, 2016, pp. 1552–1576.
- 21 Mandelkorn J., Lamneck J. H., « A new electric field effect in silicon solar cells », *Journal of Applied Physics*, vol. 44, n° 10, 1973, pp. 4785-4787.
- 22 Bean K. E., « Anisotropic Etching of Silicon ». *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol 25, n° 10, 1978, pp. 1185-93.
- 23 Nishimoto Y., Ishihara T., et Namba K., « Investigation of Acidic Texturization for Multicrystalline Silicon Solar Cells », *Journal of The Electrochemical Society*, vol 146, n° 2, 1999, pp. 457-61.
- 24 Greulich J. et al., « Optical Simulation and Analysis of Iso-textured Silicon Solar Cells and Modules Including Light Trapping », *Energy Procedia, 5th International Conference on Silicon Photovoltaics, SiliconPV 2015*, vol. 77, n° Supplément C, 2015, pp. 69-74.
- 25 Kern W., « The Evolution of Silicon Wafer Cleaning Technology », *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 137, n° 6, 1990, pp. 1887-92.
- 26 Kröger F. A., Diemer G. et Klasens H. A., « Nature of an Ohmic Metal-Semiconductor Contact ». *Physical Review*, vol 103, n° 2, 1956, p. 279.
- 27 Loh W. M. et al., « Modeling and Measurement of Contact Resistances », *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 34, n° 3, 1987, pp. 512-524.
- 28 King R. R., Sinton R. A. et Swanson R. M., « Studies of Diffused Phosphorus Emitters: Saturation Current, Surface Recombination Velocity, and Quantum Efficiency », *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 37, n° 2, 1990, pp. 365-71.
- 29 Kang J. S. et Schröder D. K., « Gettering in Silicon », *Journal of Applied Physics*, vol. 65, n° 8, 1989, pp. 2974-2985.
- 30 Zhao J. et M. A. Green. « Optimized Antireflection Coatings for High-Efficiency Silicon Solar Cells », *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 38, n° 8, 1991, pp. 1925-1934.
- 31 Kishore R., Singh S. N. et Das B. K., « PECVD Grown Silicon Nitride AR Coatings on Polycrystalline Silicon Solar Cells », *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 26, n° 1-2, 1992, pp. 27–35.
- 32 Mäckel H. et Lüdemann R., « Detailed Study of the Composition of Hydrogenated SiN_x Layers for High-Quality Silicon Surface Passivation », *Journal of Applied Physics*, vol. 92, n° 5, 2002, pp. 2602-2609.
- 33 Steingrube S. et al., « Interpretation of Recombination at c-Si/SiN_x Interfaces by Surface Damage », *Journal of Applied Physics*, vol. 108, n° 1, 2010, pp. 1-10.
- 34 Hezel, R. et K. Jaeger, « Low-Temperature Surface Passivation of Silicon for Solar Cells », *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 136, n° 2, 1989, pp. 518-523.
- 35 Nakato Y. et al., « A New Approach to an Efficient and Low-Cost Solid Solar Cell by Employing a Semiconductor Coated with Ultrafine Metal Islands », *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 28, n° 2A, 1989, pp. 243-252.
- 36 Ballif C. et al., « Silver Thick-Film Contacts on Highly Doped n-type Silicon Emitters: Structural and Electronic Properties of the Interface », *Applied Physics Letters*, vol. 82, n° 12, 2003, pp. 1878-1880.

- 37 Cheek G. C. et al., « Thick-film Metallization for Solar Cell Applications », *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 31, 1984, pp. 602-609.
- 38 Woehl R. et al., « Evaluating the Aluminum Alloyed p⁺-Layer of Silicon Solar Cells by Emitter Saturation Current Density and Optical Micro-Spectroscopy », *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 58, n° 2, 2011, pp. 441-447.
- 39 Chen Y., Shen H. et Altermatt P. P., « Analysis of Recombination Losses in Screen-Printed Aluminum-Alloyed Back Surface Fields of Silicon Solar Cells by Numerical Device Simulation », *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 120, 2014, pp. 356-362.
- 40 Kray D., Hermle M. et Glunz S. W., « Theory and Experiments on the Back Side Reflectance of Silicon Wafer Solar Cells », *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 16, n° 1, 2008, pp. 1-15.
- 41 Green M. A., « The Passivated Emitter and Rear Cell (PERC): From Conception to Mass Production », *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 143, 2015, pp. 190–197.
- 42 Holman Z. C., Wolf S. de et Ballif C., « Improving Metal Reflectors by Suppressing Surface Plasmon Polaritons: a Priori Calculation of the Internal Reflectance of a Solar Cell », *Light: Science & Applications*, vol. 2, n° 10, 2013, 6 p.
- 43 Green M. A. et al., « Solar Cell Efficiency Tables (version 49) », *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 25, n° 1, 2017, pp. 3–13.
- 44 Ko K., « PERC Cell's Global Production Capacity to Reach 25 GW in 2017, Resulting in Doubling of Total Annual Output », in *EnergyTrend Pv*
https://pv.energytrend.com/research/PERC_Cells_Global_Production_Capacity_to_Reach_25GW_in_2017.html (consulté en juin 2018)
- 45 Kim K. et al., « Record high efficiency of screen-printed silicon aluminum back surface field solar cell: 20.29% », *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 56, n° 8S2, 2017, 4 p.
- 46 Zhao J. et al., « High Efficiency PERT Cells on n-type Silicon Substrates », *Proceedings of the IEEE Photovoltaic Specialist Conference*, vol. 29, 2002, pp. 218-221.
- 47 Lammert M. D. et Schwartz R. J., « The Interdigitated Back Contact Solar Cell: A Silicon Solar Cell for Use in Concentrated Sunlight », *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 24, n° 4, 1977, pp. 337-342.
- 48 Müller R. et al., « Ion Implantation for All-Alumina IBC Solar Cells with Floating Emitter », *Energy Procedia*, vol. 55, 2014, pp. 265–271.
- 49 Fell A. et al., « Input Parameters for the Simulation of Silicon Solar Cells in 2014 », *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 5, n° 4, 2015, pp. 1250-1263.
- 50 Mulligan W. P. et al., « Manufacture of Solar Cells with 21 % Efficiency », *Proceedings of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2004, pp. 387.
- 51 Tanaka M. et al. « Development of a New Heterojunction Structure (ACJ -HIT) and its Application to Polycrystalline Silicon Solar Cells », *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 1, n° 2, 1993, pp. 85–92.
- 52 Adachi D., Hernández J. L. et Yamamoto K., « Impact of Carrier Recombination on Fill Factor for Large Area Heterojunction Crystalline Silicon Solar Cell with 25.1% Efficiency », *Applied Physics Letters*, vol. 107, n° 23, 2015, p. 23256.

- 53 Taguchi M. et al., « 24.7 % Record Efficiency HIT Solar Cell on Thin Silicon Wafer », *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 4, n° 1, 2014, pp. 96–99.
- 54 Bunea G. et al., *Performance and Reliability of Modules with Anti-Reflective Coated Glass*, éditeur: Sunpower, 2010, 10 p.
- 55 Duell M. et al., « Impact of Structured Glass on Light Transmission, Temperature and Power of PV Modules », *Proceedings of the 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2010, pp. 3867-3872.
- 56 Haedrich I. et al., « Unified Methodology for Determining CTM Ratios: Systematic Prediction of Module Power », *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 131, 2014, pp. 14-23.
- 57 Summhammer J. et Halavani Z., « High-Voltage PV Modules with Crystalline Silicon Solar Cells », *Proceedings of the 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2013, pp. 3119-3122.
- 58 Chancerel F. et al., « Integrated Solar Cell Based on Monocrystalline Silicon Thin Films Transferred to Low Cost Sintered Silicon Wafers », *Proceedings of the 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2014, pp. 1937-1940.
- 59 Gurnett K. et Adams T., « Ultra-thin semiconductor wafer applications and processes », *III-Vs Review*, vol. 19, n° 4, 2006, pp. 38-40.
- 60 Future Market Insights, *Thin Film Photovoltaic Modules Market: Global Industry Analysis 2012 – 2016 and Opportunity Assessment 2017 – 2027*, 2018, 130 p.

Chapitre II : Réalisation de cellules PERC et bifaciales

INTRODUCTION

Les cellules PERC (Passivated Emitter and Rear Contact) ont progressé rapidement ces dernières années, au point d'être aujourd'hui couramment produites dans l'industrie et largement installées sous forme de modules. Cependant, de nouveaux concepts innovants sont nécessaires pour continuer à réduire les coûts. Les cellules Al-BSF ont en effet progressé dans le même temps, et grâce à l'amélioration de la qualité des plaquettes notamment, ces dernières produisent des performances de plus en plus élevées à des coûts moindres. Cette différence est encore estompée après mise en module, puisque l'interconnexion des cellules induit des pertes en ligne proportionnelles à la valeur du courant généré au carré. Les cellules plus puissantes sont donc d'autant plus pénalisées, et l'on peut se poser la question de surcoût de la technologie PERC dans un contexte où les gains de puissance sont de plus en plus discutables à l'étape module. Dans ce second chapitre, des moyens de diminuer les coûts de fabrication de modules PERC en réduisant le nombre d'étapes de fabrication ont été étudiés. Une étude d'interconnexion spécifique des cellules dans les modules est également présentée, en s'appuyant sur le concept de l'i-Cell présenté dans le chapitre précédent afin de diminuer drastiquement les pertes résistives inhérentes à la mise en module.

II-1. OBJECTIFS

Dans un premier temps, l'économie des moyens mis en œuvre à la fabrication de cellules PERC a été étudiée. L'objectif est de simplifier le procédé de fabrication de cellules, afin de gagner en temps et économiquement à l'échelle d'une production industrielle. Pour réaliser cet objectif, deux voies ont été ciblées. Premièrement, la fabrication de l'émetteur à l'aide de l'implantation ionique a été étudiée. Ce procédé permet de réduire le nombre d'étapes nécessaires à l'obtention de l'émetteur et assure de meilleures propriétés que le procédé de diffusion traditionnellement utilisé. Le recuit d'implantation permet également de faire croître une couche d'oxyde thermique autour de la plaquette qui assure d'excellentes propriétés de passivation des surfaces. D'autre part, la simplification de la couche anti-reflet a été investiguée. Elle permet de supprimer l'étape de dépôt de nitrure PECVD et de réaliser une couche anti-reflet uniquement composée de l'oxyde obtenu lors du recuit d'implantation ionique. Il est prévu que la perte optique occasionnée par la suppression du nitrure sera partiellement compensée lors de l'étape d'encapsulation des modules composés des cellules développées. Il sera nécessaire de comparer la perte en performance provoquée par cette modification avec le gain économique qu'elle permet de réaliser.

Un autre vecteur de réduction des coûts est l'économie des matériaux nécessaires à la réalisation de cellules. La réduction de l'épaisseur vers 120 μm est étudiée, afin de réduire la quantité de silicium monocristallin utilisée. Un des verrous liés à cette réduction est la manipulation et la compatibilité des cellules avec les procédés industriels car elles sont rendues plus fragiles. Cette compatibilité sera étudiée. Pour réduire le fléchissement des cellules, consécutif au recuit des contacts métalliques et particulièrement prononcé dans le cadre des cellules minces, l'ouverture du contact d'aluminium en face arrière sera examinée. En plus de réduire la déformation, cette conception permet de réduire la quantité d'aluminium utilisée et d'ouvrir la face arrière des

cellules, ouvrant la voie à l'utilisation des deux faces pour générer de l'électricité. La bifacialité ainsi créée sera caractérisée.

II-2. PROCEDES EXPERIMENTAUX

Trois approches ont été retenues pour étudier la simplification de la fabrication de cellules PERC : en premier lieu, l'utilisation de l'implantation ionique pour la réalisation de l'émetteur, et de son recuit pour la fabrication simultanée d'une couche de passivation en oxyde thermique. Dans un second temps, la simplification de la couche anti-reflet de la face avant a été étudiée en retirant l'étape de dépôt de nitrure PECVD. Enfin, la diminution de l'épaisseur des plaquettes utilisées a été étudiée en vue de la réduction de l'utilisation des matières premières. Chacune de ces approches est détaillée ci-après.

II-2.1. Implantation ionique

L'implantation ionique n'est pas un procédé nouveau dans le domaine de la fabrication de cellules photovoltaïques. Une des références les plus anciennes à la fabrication de cellules par implantation ionique date de 1964 [61]. Depuis, plusieurs études ont démontré la possibilité d'obtenir des cellules avec de hauts rendements par cette technique, que ce soit en implantant du bore ou du phosphore [62]. L'originalité des essais présentés ci-après repose la valorisation de cette technique de la réalisation de l'émetteur des cellules à la réalisation des modules, en intégrant cette méthode sur tout le procédé de fabrication jusqu'au produit final.

Actuellement, l'industrie solaire utilise massivement le procédé de diffusion thermique du phosphore pour réaliser les émetteurs des cellules de type p, qui représentent actuellement 95 % du marché et qui devraient rester majoritaires encore au moins une décennie [63]. La méthode de diffusion du phosphore la plus répandue utilise le précurseur gazeux POCl_3 ou trichlorure de phosphoryle. Répandue grâce à son coût modéré, à sa bonne stabilité, sa simplicité et à la forte capacité de production et aux équipements couramment fabriqués [64], la diffusion POCl_3 souffre néanmoins de quelques défauts.

Cette manière de faire ne permet pas en effet d'obtenir un émetteur que d'un côté unique de la cellule ou de réaliser un profil complexe ; la diffusion est réalisée simultanément sur les deux faces et sur les tranches. De plus, et dans le cadre de la diffusion POCl_3 conventionnelle dite « en deux étapes », la réalisation de l'émetteur demande un grand nombre d'étapes de fabrication : le précurseur permet de déposer une couche de verre de silicate de phosphore (PSG ou *PhosphoSilicate Glass*), un oxyde fortement dopé en phosphore formé sous faible pression, à des températures comprises entre 800 et 900 °C [64]. L'étape de pénétration (ou *drive-in*) permet la diffusion du phosphore présent dans l'oxyde vers la plaquette de silicium, et est réalisée sous flux d'azote (N_2) ou d'oxygène (O_2), pendant environ 1 heure et à des températures aux alentours de 900 °C [65]. Pour séparer électriquement l'avant de la cellule (émetteur) du reste de la zone diffusée, on procède à une isolation au niveau des bords dans le cas de cellules Al-BSF, ou bien la zone diffusée à l'arrière de la cellule est retirée à l'aide de HF dans le cas des PERC. Suite à la diffusion du phosphore, une étape d'enlèvement du PSG permet de retirer le verre à l'aide de HF

pour libérer la plaquette. Enfin, la plaquette peut être parfois oxydée pour améliorer la passivation et réduire les recombinaisons de surface, à une température variant entre 800 et 950 °C [66].

L'implantation ionique a de nombreux avantages en comparaison au procédé de diffusion. : i) elle permet un contrôle précis de la dose d'espèces dopantes introduite et rend possible la fabrication de jonction P-N unilatérale sans avoir recours à l'enlèvement du PSG ; ii) Les émetteurs obtenus par implantation présentent une très bonne homogénéité, et notamment en termes de résistance par carré ; iii) La profondeur d'implantation peut être contrôlée indépendamment de la dose et permet d'ajuster précisément le profil et la concentration de dopage. Le procédé a cependant lui aussi un principal défaut qui est la cadence de production limitée. Cette limite est en train d'être surmontée par le développement d'implanteurs industriels capables de produire de grands volumes [67,68]. L'intérêt principal de cette méthode dans la présente étude réside dans la grande simplification du procédé. Là où la diffusion nécessite quatre étapes de fabrication, l'implantation n'en demande que deux : a) l'étape d'implantation à proprement parler et b) une étape de recuit de l'implantation sous une ambiance contrôlée.

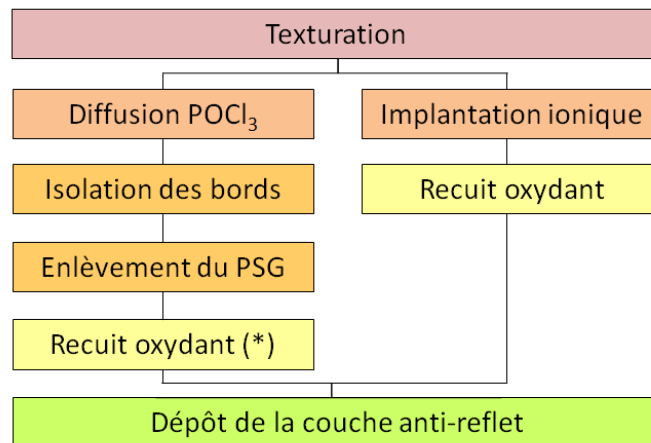


Figure II-1 : L'implantation ionique (à droite) permet de simplifier le début du procédé de fabrication des cellules PV en retirant les deux étapes notées en orange (étapes du procédé de diffusion décrit dans la colonne de gauche). Les étapes optionnelles sont indiquées d'une étoile.

Pendant le procédé d'implantation, des ions dopants sont accélérés et bombardent la surface de la plaquette, à la suite de quoi ils pénètrent le silicium. Ce bombardement occasionne un endommagement du cristal sur une profondeur de plusieurs dizaines de nm, qui peut être réparé par un traitement thermique adapté [69]. Un four tubulaire est souvent utilisé pour le recuit d'implantation. Dans le cadre de l'étude, le but de ce recuit est multiple : i) le recuit sert à réparer la zone implantée qui a été rendue, d'activer les dopants implantés, et de les faire diffuser dans le matériau de manière à obtenir un profil de dopage, ii) le recuit sous ambiance oxydante permet de croître une couche d'oxyde sec utilisant une partie de la surface du silicium et donc réduisant « indirectement » la zone dopée donc la jonction, iii) la couche d'oxyde de silicium formée peut être utilisée comme un excellent passivant de surface pour le silicium si elle est formée dans les bonnes conditions [70,71], et enfin iv) l'oxyde de silicium peut également faire office de couche

anti-reflet, de manière moins efficace que du nitrure de silicium déposé par PECVD [72], mais au prix d'un procédé de fabrication plus simple et d'un coût réduit.

Alors que l'implantation ionique est traditionnellement utilisée pour améliorer le rendement et l'homogénéité des cellules, l'approche abordée dans ces travaux est d'utiliser cette méthode pour réduire les coûts de fabrication en maintenant un niveau de performance élevé, sans être le meilleur possible. En intégrant l'implantation dans la chaîne de fabrication des modules, on peut fabriquer des émetteurs de bonne qualité. Le recuit de ces émetteurs permet la réalisation simultanée d'une couche d'oxyde de silicium qui tient le rôle à la fois de passivation et de couche anti-reflet. Comme expliqué dans la partie II-2.2 suivante, l'encapsulation compense théoriquement une grande partie de la perte optique occasionnée par l'utilisation d'oxyde comme anti-reflet à la place du nitrure PECVD. Finalement, en utilisant le concept de l'i-Cell développé par S'Tile, les pertes CTM sont fortement limitées. L'objectif est donc d'obtenir des modules aussi puissants que des modules PERC conventionnels avec des cellules à moindre coût.

L'implantation permet à la fois des émetteurs homogènes en termes de résistivité et de profondeur, et une couche diélectrique présentant de bonnes propriétés de passivation du silicium monocristallin pendant le recuit de l'implantation. Il a été démontré par V. Titov en 1970 que, dans le cas de l'implantation d'ion phosphore dans du silicium monocristallin, la réparation des défauts cristallins induits par le bombardement a lieu dans les premières minutes du recuit si celui-ci se déroule avec une température supérieure à 600 °C. La redistribution des atomes implantés par diffusion, quant à elle, prend 6 heures à 600°C, 2 heures à 800 °C, et seulement 5 minutes à 900 °C [69]. Si la température est suffisamment élevée, des temps courts de recuit suffisent si l'on considère seulement le recuit d'implantation. Cependant, la température du procédé joue également un rôle sur les qualités de l'émetteur obtenu, et il a été montré que l'augmentation de la température fait diminuer la résistance de contact, car la quantité d'atomes activés par le recuit augmente. La diffusion des dopants est également plus importante vers le volume du matériau dans le cas d'une température élevée, et leur concentration en surface est donc moindre. Pour des cellules de type p avec des émetteurs réalisés par implantation de phosphore, une étude réalisée à l'INES a révélé que la température de recuit de 880 °C est idéale pour la durée de vie des porteurs [70].

De plus, dans le cadre d'un procédé combiné recuit d'implantation/oxydation la température influe également sur la qualité et l'épaisseur de la couche de passivation. Les couches de SiO₂ de référence utilisées en laboratoire pour la passivation de cellules à très hauts rendements sont généralement obtenues par oxydation sèche aux alentours de 1050 °C pendant une ou plusieurs heures. Ces très hautes températures et ces temps d'oxydation longs présentent deux inconvénients : i) ils sont difficilement compatibles avec des procédés industriels, car ils entraîneraient des coûts très élevés. ii) ils ne s'accordent pas avec la température optimale de recuit de l'émetteur établie dans la littérature. Pour surmonter ces obstacles, il a été choisi de pratiquer l'oxydation sèche, mais à des températures moins élevées, et sur des temps plus courts que dans le cadre du procédé idéal.

II-2.1.1. Méthode utilisée

Pour réaliser la faisabilité de cette méthode de fabrication, une étude de l'implantation et de son recuit a été réalisée par simulation, à l'aide du calculateur ATLAS de Silvaco. Dans cette étude, les paramètres simulés sont compatibles avec ceux d'un implantateur ionique industriel [62]. Du gaz PH_3 est utilisé comme source pour fournir des ions P^+ . Ces ions sont accélérés avec une énergie d'environ 15 keV qui sert à implanter une dose de $3.0 \times 10^{15} \text{ P}^+ \cdot \text{cm}^{-2}$ à la surface de plaquettes de silicium monocristallin de type p.

Les plaquettes sont ensuite recuites dans un four tubulaire balayé par du gaz O_2 . Plusieurs durées et températures de recuit ont été testées, en fonction des objectifs en termes de qualité de passivation, épaisseur de la couche anti-reflet, profondeur de l'émetteur, et réparation des défauts induits par l'implantation.

Les différentes conditions de recuit sont données dans le tableau suivant :

Tableau II-1 : température et de durée des différents recuits d'implantation simulés

Condition	Température (°C)	Temps (min)
1	850	5 - 45
2	870	5 - 45
3	900	5 - 45
4	920	5 - 45

L'objectif est d'obtenir une couche d'oxyde thermique d'une épaisseur comprise entre 10 et 30 nm, épaisseur suffisante pour que l'oxyde apporte une bonne passivation à la surface du silicium, et suffisamment mince pour ne quasiment pas détériorer les propriétés optiques de la cellule [72]. Des temps de recuit inférieurs à 45 minutes, permettent d'après ces calculs la croissance de couches minces de l'ordre de la dizaine de nm, comme indiqué sur la Figure II-2.

II-2.1.2. Résultats

A l'aide du calculateur Atlas de Silvaco, l'épaisseur de la couche de SiO_2 obtenue pendant le recuit d'implantation a été calculée pour des temps de recuit variant entre 5 et 45 minutes, et pour quatre température de recuit données : $T_1 = 850 \text{ °C}$, $T_2 = 870 \text{ °C}$, $T_3 = 900 \text{ °C}$ et $T_4 = 920 \text{ °C}$. Pour chacune des températures utilisées, il existe une condition de temps à partir de laquelle il est possible de former au moins 10 nm d'oxyde sec, comme indiqué sur la Figure II-2.

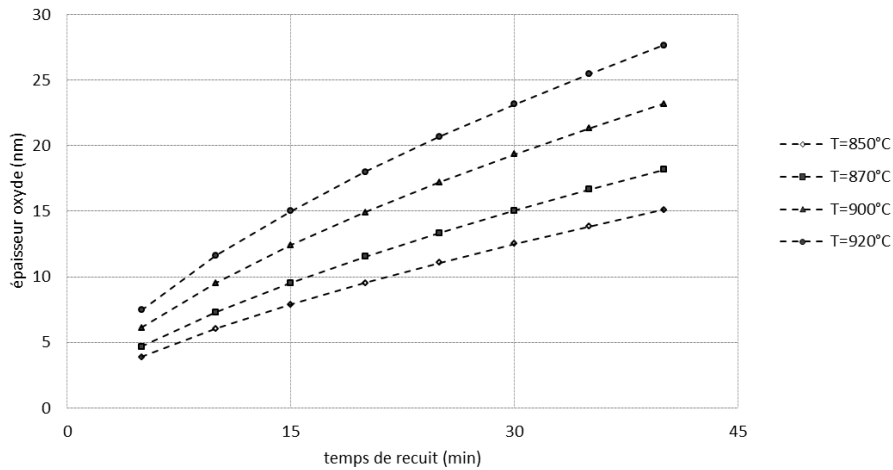


Figure II-2 : épaisseur de la couche d'oxyde sec obtenue en fonction du temps de recuit d'implantation d'ions phosphore implantés avec une dose de $2.10^{15} \text{ cm}^{-2}$ et une énergie de 15 keV.

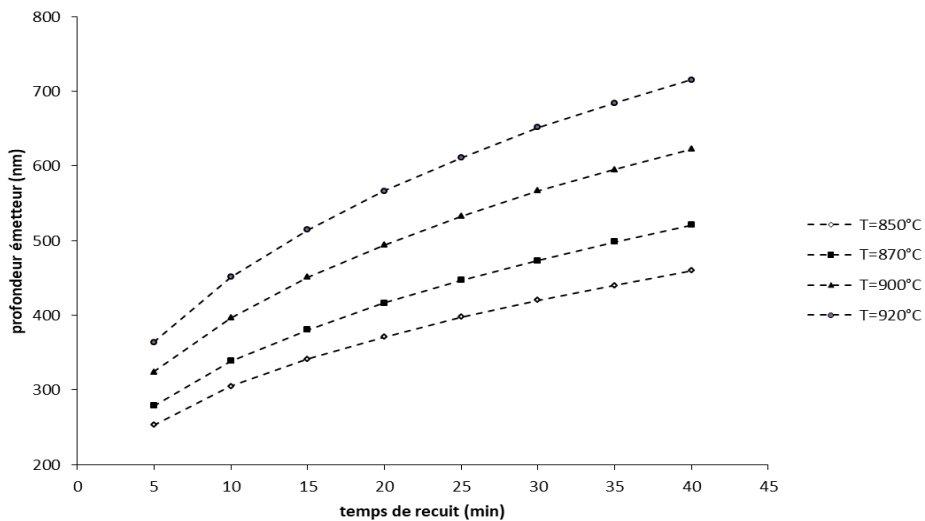


Figure II-3 : profondeur de l'émetteur obtenue par diffusion des ions implantés en fonction de la durée de recuit, pour une dose de $2.10^{15} \text{ cm}^{-2}$ et une énergie de 15 keV.

Dans le même temps, ces conditions de recuit permettent l'obtention d'émetteurs dont la profondeur et la résistance peuvent varier du simple au double. La résistance carrée des émetteurs diminue avec la température et le temps de recuits croissants, car les dopants diffusent plus profondément et créent un émetteur plus large. L'objectif de cette étude est d'obtenir un émetteur avec une résistance carrée d'environ $80 \Omega/\square$. Cette valeur permet en effet un très bon compromis entre performances et compatibilité avec les pâtes de sérigraphie actuellement sur le marché, quant à l'obtention de faibles résistances de contact avant [73]. Dans le cas de la dose de dopant utilisée, cette valeur de résistance correspond à une profondeur d'émetteur d'environ 380 nm.

En croisant les données obtenues pour la croissance de l'oxyde sec avec celles de la diffusion de l'émetteur pendant le recuit, la condition d'un recuit de 15 minutes à 870 °C est déterminée. Elle permet l'obtention simultanée d'environ 10 nm d'oxyde qui garantissent une bonne passivation

tout en perturbant les propriétés optiques le moins possible (voir partie suivante), et d'un émetteur d'une profondeur d'environ 400 nm avec une résistance adaptée pour des cellules à hauts rendements. La température aux alentours de 850 °C est d'autant plus intéressante qu'elle permet l'obtention des meilleures durées de vie après recuit de l'émetteur implanté, d'après plusieurs études [70,74].

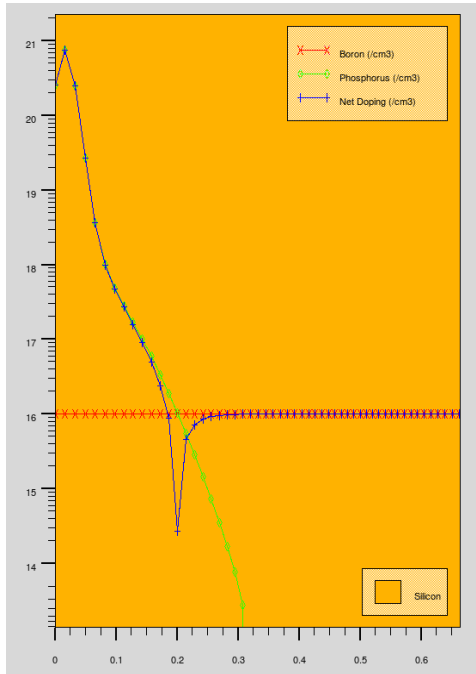


Figure II-4 : profil de dopage simulé immédiatement après implantation d'une dose de 2.10^{15} ions phosphore par cm^2 , avec une énergie de 15 keV.

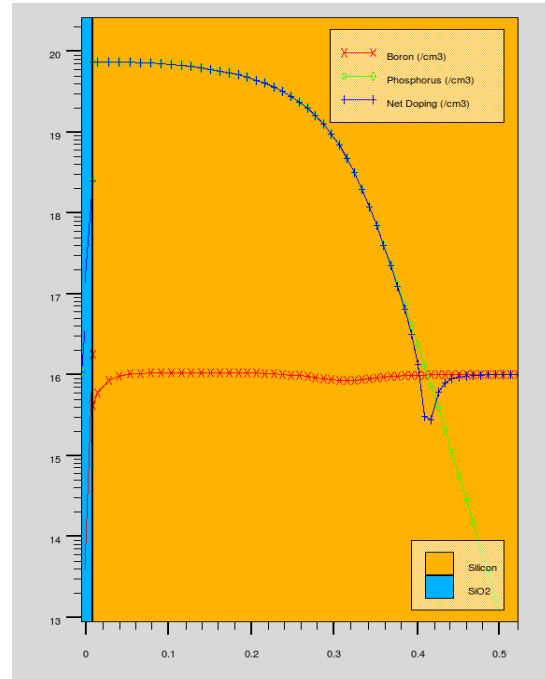


Figure II-5 : un recuit de 15 min à 870 °C sous O_2 permet l'obtention simultanée de la croissance d'une couche de SiO_2 de 10 nm et d'un émetteur de 400 nm de profondeur avec une résistance carrée de 80 Ω/\square .

Une stratégie pour améliorer les propriétés de passivation de la couche de SiO_2 croissant pendant le recuit d'implantation pourrait être d'adopter un procédé d'oxydation humide. Celle-ci est en effet beaucoup plus rapide que l'oxydation sèche, et permet la croissance de couches beaucoup plus épaisses pour le même temps donné. Dans les conditions de l'étude, il est possible de faire croître un film d'oxyde de 110 nm d'épaisseur environ (voir Figure II-6). Sans traitement supplémentaire, l'oxyde humide passive moins bien le silicium que l'oxyde sec. Cependant, il a été démontré qu'il peut être un meilleur passivant à condition d'être déposé en couche suffisamment épaisse (supérieure à 80 nm) et après un recuit sous argon ou un recuit FGA (*Forming Gas Anneal*) [75], ce qui est le cas ici. Cette solution n'est par contre pas idéale du point de vue optique. En effet, si une épaisseur de 110 nm est quasi-idéale pour servir d'anti-reflet à un cristal de silicium exposé à l'air libre (cf. équation (II.11)), l'indice optique plus faible de l'oxyde humide diminue les propriétés anti-reflet d'une cellule encapsulée dans de l'EVA, et ce, d'autant que la couche d'oxyde est épaisse. C'est pourquoi la méthode utilisant l'oxyde sec est préférée. La quantification des pertes optiques est discutée dans la partie suivante.

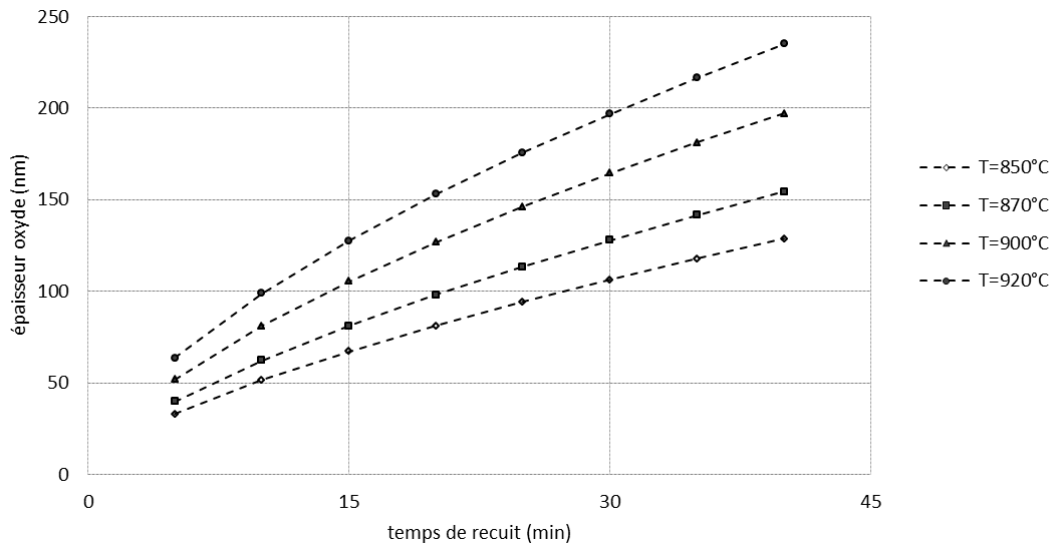


Figure II-6 : épaisseur de la couche d'oxyde humide obtenue en fonction du temps de recuit d'implantation d'ions phosphore implantés avec une dose de $2.10^{15} \text{ cm}^{-2}$ et une énergie de 15 keV.

Il est possible dans tous les cas de combiner la formation simultanée d'un émetteur aux propriétés efficaces et la croissance d'une couche de passivation et anti-reflet au cours de la même étape de recuit d'implantation. Cette technique permet de réduire le nombre d'étapes de fabrication et les coûts, quitte à réduire légèrement les performances de la cellule comparée à une cellule optimisée obtenue par implantation ionique, dans une mesure qu'il reste à déterminer. La réalisation simultanée de l'émetteur et de la couche de passivation amène en effet à un compromis entre l'optimisation de l'un ou de l'autre. Cependant, des études déjà réalisées tendent à montrer que cette méthode est compatible avec de très hautes performances [76]. La seconde interrogation porte sur le comportement anti-reflet du film mince d'oxyde thermique, et est traitée dans la partie suivante.

II-2.2. Adaptation de la couche anti-reflet

Pour optimiser l'absorption de la lumière par les cellules et augmenter l'efficacité de l'effet photovoltaïque, celles-ci sont couvertes en face avant d'une couche anti-reflet. Ce film mince se présente le plus souvent sous la forme d'un dépôt de nitrure hydrogéné d'environ 70 nm formé par PECVD. Cependant, l'encapsulation affecte les propriétés optiques des cellules de plusieurs façons. Il faut donc optimiser les propriétés optiques des cellules en tenant compte du coût et de la performance après encapsulation. Dans la partie suivante, une étude a été menée pour réduire le coût du dépôt de la couche anti-reflet à l'étape cellule, tout en maintenant un haut niveau de performance des modules. Pour ce faire, une simplification du film anti-reflet, en jouant sur la nature et l'épaisseur des espèces déposées, est proposée et discutée.

II-2.2.1. Approche théorique

Un système anti-reflet peut être modélisé en utilisant une méthode matricielle [77]. Chaque couche j du système est représentée par une matrice M_j .

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos \delta_j & -ip_j^{-1} \sin \delta_j \\ -ip_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \quad (\text{II.1})$$

δ_j est le déphasage optique entre le milieu incident et la couche j , et s'exprime sous la forme :

$$\delta_j = (2\pi/\lambda_0) n_j d_j \cos \theta_j \quad (\text{II.2})$$

λ_0 est la longueur d'onde de la lumière étudiée dans l'air (en nm), n_j est l'indice de réfraction du matériau anti-reflet (sans unité), d_j son épaisseur (en nm), et θ_j l'angle d'incidence de la lumière dans celui-ci. θ_j est déterminé par :

$$n_j \sin \theta_j = n_0 \sin \theta_0 \quad (\text{II.3})$$

p_j est défini différemment pour des ondes transverses électriques (TE) et transverses magnétiques (TM). Pour des ondes TE :

$$p_j = n_j \cos \theta_j \quad (\text{II.4})$$

Et pour des ondes TM, p_j devient :

$$p_j = (1/n_j) \cos \theta_j \quad (\text{II.5})$$

Pour obtenir les propriétés optiques d'un empilement de m différents films anti-reflet, il faut calculer la matrice :

$$M = M_1 \cdot M_2 \cdot M_3 \dots M_m \quad (\text{II.6})$$

Pour calculer la réflexion d'un tel empilement de couches minces, trois autres matrices sont utilisées [72,78] :

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_0 & -1 \\ p_0 & 1 \end{bmatrix} M \begin{bmatrix} 1 \\ p_{m+1} \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

La réflexion polarisée R est calculée de la manière suivante :

$$R = |a/b|^2 \quad (\text{II.8})$$

R est différent pour les ondes TE et TM, si l'angle d'incidence est non nul. Le soleil émet de la lumière non-polarisée, si bien que la réflexion totale R provient pour moitié de la contribution des ondes TE et pour moitié des ondes TM.

$$R = 0,5 R_{TE} + 0,5 R_{TM} \quad (\text{II.9})$$

En condition d'incidence normale, et en combinant les équations de (II.1) à (II.9), on obtient une expression simplifiée de R :

$$R = \left(\frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \right)^2 \quad (\text{II.10})$$

A l'interface entre l'air d'indice de réfraction $n_0=1$ et le silicium d'indice de réfraction $n_1= 3,85$, la réflexion vaut environ 35 %, c'est-à-dire que 35 % de la lumière incidente est d'ores et déjà perdue pour la génération de courant. Il est donc nécessaire d'appliquer un film anti-reflet pour diminuer la réflexion aux alentours de 5% ou moins, nécessaire à l'obtention de cellules à haut rendement [79]. Pour un système anti-reflet constitué d'une seule couche, et en se basant sur les équations de **(II.1)** à **(II.9)**, un film d'une épaisseur du quart de la longueur d'onde du rayonnement à absorber donne la réflexion minimale, à savoir une épaisseur de :

$$d_1 = \lambda_0 / (4n_1) \quad (\text{II.11})$$

Dans cette condition et d'un point de vue physique, la lumière réfléchi à l'interface entre le matériau anti-reflet et le silicium (la seconde interface) revient vers la première interface (milieu extérieur-matériau antireflet) avec un déphasage de π radians, ou opposition de phase. Il interfère donc de manière destructive avec la lumière réfléchi par la première interface, et réduit le total de rayonnement réfléchi, du fait des phases opposées. Dans le cas des cellules solaires, la couche anti-reflet est conçue pour limiter la réflexion au maximum aux alentours des longueurs d'onde de 600 nm, pour lesquelles le rayonnement solaire est le plus intense [72]. En appliquant le résultat de l'équation **(II.11)** aux équations de **(II.1)** à **(II.9)**, on obtient une équation liant la réflexion et les indices :

$$R = \left(\frac{n_1^2 - n_0 n_2}{n_1^2 + n_0 n_2} \right)^2 \quad (\text{II.12})$$

On peut en déduire l'indice de réfraction pour lequel la réflexion est nulle :

$$n_1 = \sqrt{n_0 n_2} \quad (\text{II.13})$$

De ce fait, les équations **(II.11)** et **(II.13)** donnent les conditions optimales d'épaisseur et d'indice de réfraction pour annuler la réflexion dans le cas d'une couche anti-reflet simple. Pour un anti-reflet double couche, un film quart d'onde doit être utilisé pour chaque matériau selon les conditions données par l'équation **(II.11)**, mais l'expression de R obtenue par la même méthode que précédemment est la suivante :

$$R = \left| \frac{a}{b} \right|^2 = \left(\frac{n_1^2 n_3 - n_0 n_2^2}{n_1^2 n_3 + n_0 n_2^2} \right)^2 \quad (\text{II.14})$$

On obtient alors une condition sur les indices optiques des deux couches anti-reflet n_1 et n_2 :

$$n_1^2 n_3 = n_0 n_2^2 \quad (\text{II.15})$$

C'est dans cette condition que la réflexion est nulle. Les équations (II.11) et (II.15) donnent les conditions optimales pour une double couche anti-reflet. En résolvant les équations de (II.1) à (II.9) sur l'intégralité du spectre solaire, on peut approximer l'anti-reflet optimal, mais pas l'atteindre, car les propriétés optiques des matériaux et notamment du silicium varient avec la longueur d'onde du rayonnement auquel ils sont soumis [80].

L'encapsulation modifie le comportement optique des cellules par plusieurs effets [81] détaillés ci-après. (i) Premièrement, les indices optiques du verre et de l'EVA sont similaires, aux alentours d'1,5, entre ceux de l'air et du silicium. L'encapsulation agit donc comme un anti-reflet épais. La conception de la couche anti-reflet de la cellule doit néanmoins tenir compte de l'encapsulant pour augmenter ses effets. L'équation (II.13) donne en effet un indice de réfraction optimal de 1,96 environ pour une interface air-silicium et de 2,4 pour une interface EVA-silicium si on considère que l'indice de réfraction du silicium est d'environ 3.85 pour une longueur d'onde de 600 nm [72]. Pour minimiser la réflexion, l'indice de réfraction de la couche anti-reflet de la cellule doit être compris entre celui de l'EVA et du silicium. (ii) Le verre et l'EVA absorbent une partie du rayonnement incident dans le domaine ultraviolet. (iii) Environ 4 % de réflexion ont lieu à l'interface air-verre du module. Un traitement anti-reflet peut être déposé sur le verre, qui peut également être texturé pour augmenter la puissance produite [54]. (iv) Bien que la réduction de la différence d'indices optiques entre la cellule et son milieu entraîne la diminution de piégeage optique dans la cellule, une partie des rayons qui s'échappent sont réfléchis sur le verre et renvoyés vers la cellule, ce qui compense la perte. (v) Si la face arrière du module est blanche, elle permet, de par sa réflectivité diffuse, de collecter de la lumière qui serait autrement passée entre les cellules.

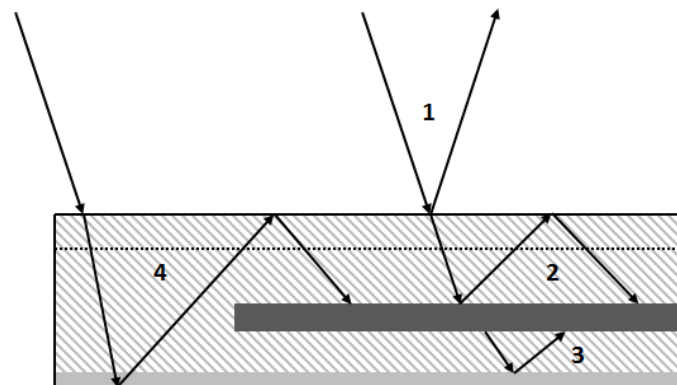


Figure II-7 : les effets optiques de l'encapsulation : (1) réflexion sur le verre, (2) piégeage des rayons réfléchis par la face avant de la cellule, (3) piégeage des rayons transmis à travers la cellule, (4) collection de la lumière périphérique. Source : *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering* [82]

II-2.2.2. Procédé expérimental

Il convient donc de tenir compte de l'encapsulation, et de la réalisation du module pour mettre au point la couche anti-reflet de la cellule. Le point de départ de l'étude est la valorisation de l'implantation ionique. Bien qu'avantageuse pour la réalisation d'émetteurs, il a été vu dans la

partie II-2.1 que cette technique nécessite un recuit pour homogénéiser le profil de dopants et réparer le matériau endommagé. Ce recuit, qui induit une étape de fabrication supplémentaire, se déroule à haute température (au-dessus de 800 °C) et peut être mis à profit pour faire coup triple et oxyder la surface de la cellule, formant ainsi une couche d'oxyde de silicium (SiO₂) qui fera à la fois office de passivation et d'anti-reflet.

L'indice de réfraction d'un oxyde thermique obtenu dans les conditions du recuit d'implantation détaillé dans la partie précédente, à savoir à une température d'environ 880 °C, et pour une épaisseur de 10 nm, peut varier entre 1,46 et 1,55 [78,80]. Il permet une adaptation d'indice moins proche de la condition optimale entre le milieu extérieur (EVA) et le silicium que le nitrure PECVD traditionnellement déposé sur les cellules, et qui présente un indice de réfraction autour de 2,1 en fonction de sa composition [83]. En effet, et comme vu précédemment, pour une couche anti-reflet simple (pas d'empilement de matériaux différents), et en incidence normale, la condition optimale de basse réflexion est obtenue pour un matériau d'indice de réfraction 1,96, en considérant que l'indice de réfraction du silicium est d'environ 3,85 [72]. Dans le cas où sa valeur est inférieure à 1,5, il dégraderait même les propriétés optiques de l'empilement EVA/couche anti-reflet/silicium puisque la variation d'indice ne serait pas progressive. Cependant, en maintenant cette couche d'oxyde très fine, il est intéressant de comparer à quel point cette différence optique va être minimale ou non, et si elle peut être compensée par la simplification du procédé.

L'épaisseur minimale de la couche de SiO₂ anti-reflet peut être déterminée par ses propriétés de passivation. L'oxyde de silicium est en effet un excellent moyen de passiver la surface du silicium, et a d'ailleurs beaucoup été utilisé pour l'obtention de cellules à hauts rendements en laboratoire [84].

Pour vérifier le comportement optique d'une couche mince d'oxyde thermique en comparaison d'une couche anti-reflet standard, une étude théorique a été menée à l'aide du calculateur OPAL 2. Cinq différentes couches anti-reflet, données dans le tableau suivant ont été comparées :

Tableau II-2 : les quatre couches anti-reflet étudiées en simulation et expérimentalement

i)	ii)	iii)	iv)
10 nm SiO ₂	110 nm SiO ₂	70 nm SiN _x	70 nm de SiN _x + 10 nm de SiO ₂

La condition i) correspond à la couche d'oxyde thermique obtenue pendant le recuit d'implantation dans la partie précédente. La condition iii) constitue l'épaisseur d'oxyde optimale pour servir d'anti-reflet pour l'ensemble du spectre AM 1.5g et pour un échantillon de silicium à l'air (d'après l'équation (II.11)). La condition iv) constitue l'anti-reflet le plus courant dans l'industrie photovoltaïque [85], et la condition v) simule un autre anti-reflet de référence, également fréquent et efficace.

Ces différents films anti-reflet ont été comparés dans trois milieux différents : a) à l'interface entre de l'air et du silicium, comme dans le cas d'une cellule non encapsulée ; b) à l'interface entre de l'EVA et du silicium, comme dans le cas d'un module encapsulé à l'EVA ; c) à l'interface entre du silicone et du silicium, comme dans le cas d'un module encapsulé avec du silicone. Il est à noter que, dans les deux derniers cas, le calcul ne prend en compte ni le verre, ni

la face arrière du module, mais que leur effet peut être calculé et intégré à part, et qu'il n'empêche pas la comparaison. La structure étudiée est détaillée dans la figure II.8. Les résultats pour les couches anti-reflet i) à v) ont été croisés avec les résultats pour les encapsulant a) à c) et analysés.

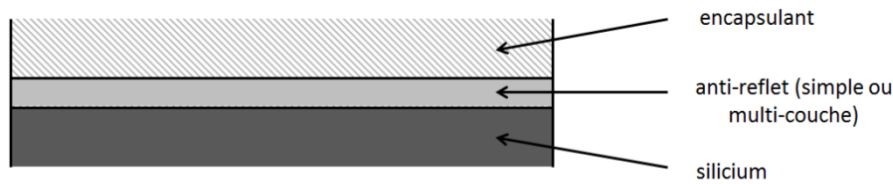


Figure II-8 : illustration de la structure étudiée. Les interfaces air-verre en face avant, ainsi que silicium-anti-reflet, anti-reflet-EVA et EVA-backsheet en face arrière ne sont pas prises en compte dans la simulation mais seront intégrées dans le résultat final.

Pour compléter les données théoriques, un procédé expérimental a été réalisé pour tester les mêmes conditions de couche anti-reflet et d'encapsulant. Pour réaliser des échantillons répondant aux conditions de i) à iii), des plaquettes de silicium ont été oxydées sous atmosphère humide dans un tube d'oxydation à S'Tile suivant les conditions données dans le Tableau II-3. Les conditions d'oxydation sous atmosphère humide diffèrent des conditions d'oxydation choisies pour le recuit d'implantation, et entraînent la formation d'un oxyde physiquement différent. Cependant, l'indice de réfraction de cet oxyde devrait être suffisamment proche de celui d'un oxyde sec obtenu lors d'un recuit d'implantation pour le considérer identique [80].

Tableau II-3 : paramètres d'oxydation pour la réalisation des couches anti-reflet en SiO₂

condition	1)	2)	3)
Température d'oxydation (°C)	880	880	880
Temps d'oxydation (min)	20	19	45
Type d'oxydation	sèche	humide	humide
Épaisseur d'oxyde obtenue (nm)	10	50	110

Pour obtenir des échantillons répondant aux conditions iv) et v), deux types de cellules commerciales ont été utilisées, les unes avec une couche anti-reflet constituée de 70 nm de SiNx, et les autres avec 70 nm de SiNx + 10 nm de SiO₂. L'ensemble de ces plaquettes et cellules a été amorcé à la pointe diamantée puis clivé pour former des échantillons de 1 x 1 cm² environ.

Ces échantillons ont été séparés en trois groupes pour simuler trois conditions différentes :

a) échantillons non encapsulés. Ces échantillons ont simplement été mis en contact avec une plaque de verre à l'aide de ruban adhésif

b) échantillons encapsulés entre une plaque de verre standard et une feuille de *backsheet* noir à l'aide d'EVA. Une feuille d'EVA commerciale de 1 x 1 cm² a été déposée entre l'échantillon et le verre puis chauffée à une température de 148 °C sous une pression de 930 mBar pendant 15 minutes pour permettre à l'EVA de polymériser et d'encapsuler l'échantillon.

c) échantillons encapsulés entre une plaque de verre standard et une feuille de *backsheet* noir à l'aide de silicone. Du silicone liquide a été déposé entre l'échantillon et le verre, puis mis sous

vide afin d'éliminer les bulles d'air. Il a été solidifié par traitement thermique dans une étuve à 80 °C pendant une journée. La réflexion des échantillons a été mesurée à l'aide d'un spectromètre pour des longueurs d'ondes allant de 350 à 1100 nm, soit la plage de fréquence sur laquelle une cellule PV peut générer du courant électrique.

II-2.2.3. Résultats

Les propriétés optiques des deux différentes couches d'oxyde pouvant être obtenues lors d'un recuit d'implantation ont été comparées avec des films anti-reflet de référence à l'aide du calculateur OPAL2. La structure simulée est décrite dans la partie II-2.2. Les résultats sont donnés ci-après pour des cellules à l'air libre, non encapsulées. La couche anti-reflet composée d'un film d'oxyde sec de 15 nm est de loin la moins efficace dans de telles conditions. La réflexion moyenne obtenue pour des longueurs d'onde de 300 à 1100 nm est en effet de 10,3 % dans ces conditions, contre des valeurs variant entre 3,9 % pour les couches intégrant du nitrure et 4,9 % pour la couche de 110 nm d'oxyde humide.

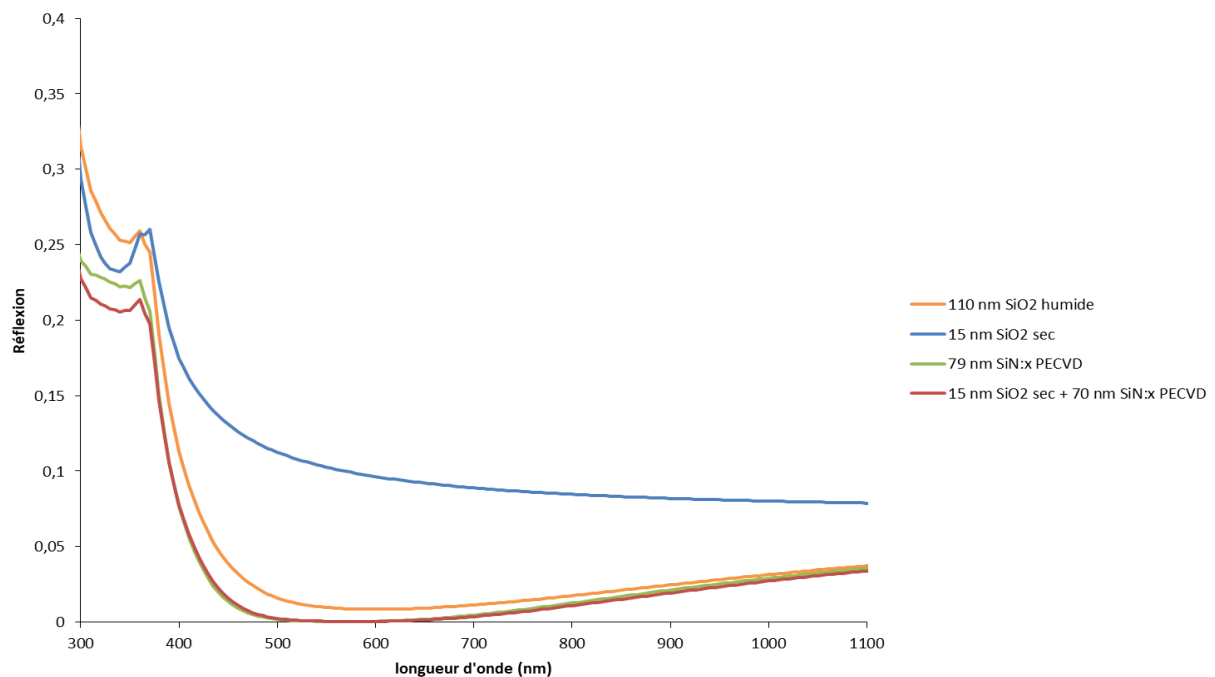


Figure II-9 : réflexion en fonction de la longueur d'onde pour des cellules texturées, non encapsulées et avec différentes couches anti-reflet, calculée avec le programme OPAL2.

Dans des conditions où les cellules sont encapsulées dans de l'EVA, les calculs montrent que les écarts dans les valeurs de réflexion attribuées aux différentes couches se trouvent compressés (cf. Figure II-10). La réflexion obtenue pour une cellule recouverte de 15 nm d'oxyde sec est fortement diminuée et est de 4,4 %. Cette diminution est expliquée par l'apport de la couche d'EVA d'indice optique 1,49 qui permet une variation de milieu moins abrupte avec le silicium. L'épaisseur d'oxyde est suffisamment mince pour que sa contribution soit négligeable, sinon son indice optique de valeur 1,47 contribuerait à l'augmentation de la réflexion. Ce n'est pas le cas de la couche d'oxyde humide dont l'épaisseur est 8 fois plus importante, et l'indice optique

légèrement inférieur, de l'ordre de 1,45. La réflexion diminue globalement par rapport à la situation où les cellules ne sont pas encapsulées, mais devient néanmoins supérieure à la réflexion induite par la couche de 15 nm d'épaisseur. Les valeurs sont toutefois proches, puisque la réflexion calculée pour l'oxyde humide est de 4,7 %. Les films formés à partir de nitrure permettent une meilleure adaptation d'indice, et donnent des valeurs de réflexion de 2,3 % pour le SiNx seul et 2,32 % pour l'empilement oxyde/nitrure.

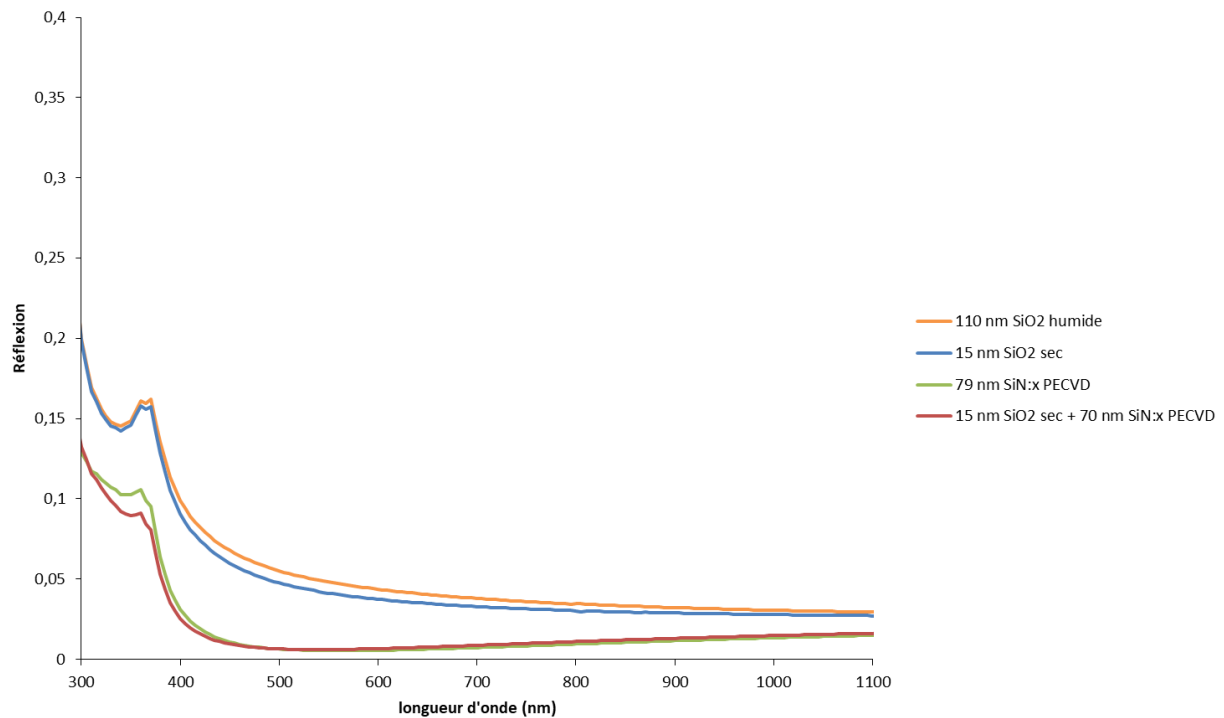


Figure II-10 : réflexion en fonction de la longueur d'onde pour des cellules texturées, encapsulées dans de l'EVA et avec différentes couches anti-reflet, calculée avec le programme OPAL2.

Néanmoins, ces calculs ne tiennent pas compte de trois facteurs: i) l'épaisseur de l'EVA qui est ici considéré comme infinie, ii) la réflexion à l'interface verre-EVA qui existe en conditions réelles, et iii) la réflexion à l'interface air-verre. Pour intégrer ces paramètres avec les moyens à disposition, il a été choisi de réaliser des échantillons de modules photovoltaïques, et de mesurer la réflexion à leur surface, comme décrit dans la partie II-2.2.

La série d'échantillons encapsulés dans de l'EVA montre que la prise en compte des effets optiques induits par le verre tend à compresser encore davantage les différences entre chaque couche anti-reflet. Ainsi, la réflexion mesurée sur les échantillons présentant une couche anti-reflet de 15 nm de SiO₂ est de 7,1 % pour des longueurs d'onde allant de 400 à 1000 nm, où les tendances sont plus stables. Pour les échantillons oxydés sous atmosphère humide sur 110 nm d'épaisseur, la réflexion vaut 7,5 %. Les échantillons traités au nitrure, quant à eux, présentent des valeurs de réflexion de 6,2 % pour la couche de SiNx seule, et 6,0 % pour l'empilement SiO/SiNx.

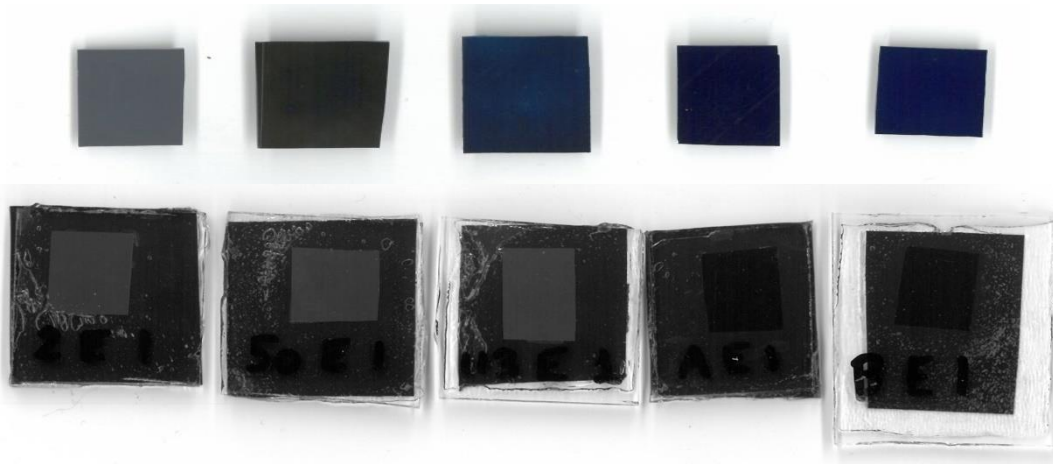


Figure II-11 : les échantillons de cellules oxydés et/ou nitrurés (en haut) ont été encapsulés entre une feuille de backsheet et une plaque de verre de 2 mm d'épaisseur avec de l'EVA (en bas). De gauche à droite : 15 nm de SiO₂ sec, 50 nm de SiO₂ humide, 110 nm de SiO₂ humide, 79 nm de SiN_x, et 15 nm de SiO₂ + 70 nm de SiN_x. Une fois encapsulés, la différence de couleur des cellules provoquée par la différence de l'épaisseur d'oxyde et uniformisée car c'est l'EVA qui joue le rôle d'antireflet.

Ces valeurs absolues de réflexion sont relativement élevées en comparaison des meilleurs films anti-reflet décrits dans la littérature [86]. Ceci est principalement dû au fait que le verre utilisé pour la fabrication des échantillons n'a pas été texturé, ni traité avec anti-reflet, comme ce peut être le cas dans les études précédemment citées ou dans le commerce. Il n'est cependant pas possible de découper ce type de verre sans bris, c'est pourquoi il n'a pas pu être utilisé.

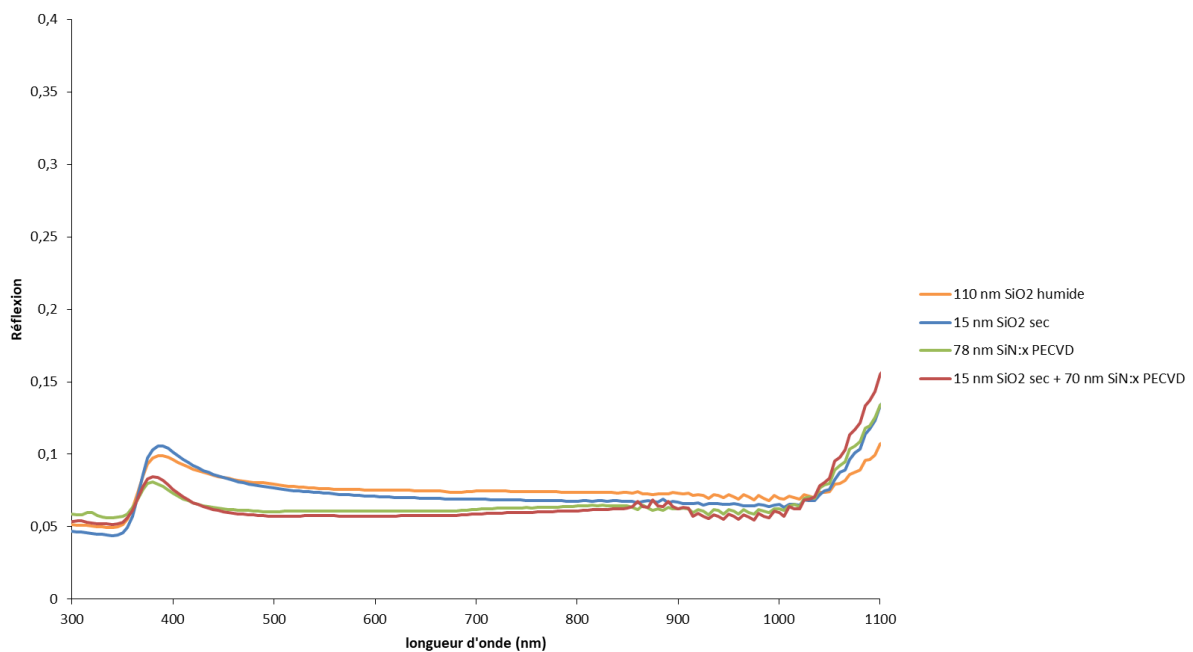


Figure II-12 : réflexion en fonction de la longueur d'onde pour des cellules texturées, encapsulées dans de l'EVA sous une couche de verre standard de 2 mm d'épaisseur, et mesurées par spectroscopie.

Il est intéressant de constater qu'un film mince d'oxyde thermique formé pendant le recuit d'implantation ionique, même s'il ne constitue absolument pas une couche anti-reflet de qualité, peut suffire si l'encapsulant tient le rôle d'anti-reflet. Le fait de disposer de l'EVA devant une cellule sans couche anti-reflet permet en effet de diminuer l'écart des performances optiques comparé à une cellule disposant d'un anti-reflet standard, et cet écart est encore compensé par l'ajout d'une couche de verre de 2 mm d'épaisseur devant l'EVA. Ces derniers étant des composants indispensables des modules sur le marché aujourd'hui, le fait de se passer d'anti-reflet en face avant pourrait permettre de simplifier la fabrication des cellules photovoltaïques développées par S'Tile et ainsi diminuer les coûts de production. La question posée par cette méthode concerne les performances des cellules ainsi obtenues. En considérant une cellule avec une valeur de J_{sc} de $40 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ dans des conditions d'illumination idéales, et en considérant que la variation de courant n'a aucune incidence sur la valeur de sa tension de circuit ouvert V_{oc} , on obtiendrait une différence de puissance de 0,9 % en défaveur de la cellule sans anti-reflet. De plus, une plus forte disparité est constatée entre les valeurs de réflexion pour les longueurs d'onde de moins de 700 nm, avec des écarts allant jusqu'à 1,7 %. Or, c'est entre 500 et 700 nm que se trouve la plus forte intensité lumineuse du spectre AM1.5G, et c'est précisément pour ces longueurs d'onde que la réflexion doit être minimale.

Mais il faut également considérer les différences dans la passivation qu'offrent le SiO_2 thermique d'une part et le nitrure PECVD d'autre part, sachant que l'oxyde thermique formé dans de bonnes conditions de température est un meilleur passivant de surface, notamment pour la face arrière des cellules de type p [87]. Il a également été montré qu'un film mince de SiO_2 formé à l'interface avec le silicium protège ce dernier des dégradations futures induites par des procédés à haute température [88], comme c'est le cas du recuit industriel des contacts sérigraphiés. Un courant généré légèrement inférieur entraîne également des pertes résistives plus faibles lors de la mise en module, comme vu dans la partie I-7. Il faut donc pouvoir évaluer ces différents paramètres avant de savoir si l'on peut trouver un compromis entre performances et coût en simplifiant la couche anti-reflet.

II-2.3. Réduction de l'épaisseur des cellules

Pour aller plus loin dans la réduction du coût par watt de l'énergie photovoltaïque, la diminution de l'épaisseur des plaquettes est également une solution pertinente. Cette dernière permet en effet de réduire la quantité de silicium monocristallin utilisée, qui représente actuellement environ 40 % du prix total d'un module photovoltaïque monocristallin [89]. La réduction de l'épaisseur est une question d'actualité dans l'industrie photovoltaïque et n'est pas spécifique à cette étude. Cependant, la synergie développée avec les autres aspects montrés précédemment et dans les sections suivantes permettrait un avantage concurrentiel certain, à condition d'intégrer cette réduction dans le procédé allant de la cellule jusqu'au module pour maximiser la performance obtenue.

Le récent développement des scies à fil diamanté a permis d'obtenir des plaquettes de silicium d'épaisseur réduite à partir de lingots, diminuant le prix. Cette technique a facilité également le recyclage des chutes de découpe, appelées pertes kerf (*kerf losses*), ce qui permet encore des économies. La réduction du coût des plaquettes par ces techniques a été évaluée en tenant

compte du changement des outils, du recyclage et des consommables entre autres, et montre qu'une plaquette de 80 μm pourrait coûter entre 0,63 \$ et 0,77 \$, contre 1,03 \$ pour une plaquette d'épaisseur standard [90,91].

D'un point de vue électrique, le rendement de conversion des cellules photovoltaïques atteint un pic quand l'épaisseur diminue, en raison de deux facteurs opposés : a) la tension de circuit ouvert V_{oc} augmente et b) le courant de court-circuit I_{sc} diminue. Le silicium est en effet un matériau dispersif et absorbant fortement la lumière de l'ultra-violet jusqu'au vert. Pour les longueurs d'ondes plus grandes que le vert, la lumière peut parcourir plusieurs centaines de μm (soit l'ordre de grandeur de l'épaisseur d'une cellule), avant d'être absorbée. La longueur d'absorption L_α (en nm) du silicium décrit ce phénomène et est définie ainsi :

$$L_\alpha = \frac{\lambda}{4\pi k} \quad (\text{II.16})$$

Avec λ la longueur d'onde du rayonnement étudié (en nm), et k la partie imaginaire de l'indice de réfraction du silicium (appelée aussi coefficient d'extinction). En représentant cette longueur d'absorption en fonction de la longueur d'onde de la lumière (voir Annexe), on s'aperçoit qu'à partir d'une longueur d'onde de 900 nm, il faut plusieurs dizaines de μm voire des centaines de μm pour absorber le rayonnement efficacement. Pour des cellules fines, une partie importante de la lumière solaire ne sera donc pas absorbée, principalement dans le domaine infra-rouge, ce qui entraîne la diminution du courant photogénéré et donc du courant de court-circuit. Ce problème peut néanmoins être surmonté par une amélioration du piégeage optique dans la cellule, notamment par texturation de la face avant et dépôt d'une couche miroir en face arrière.

A contrario, la réduction de l'épaisseur peut faire augmenter la tension d'une cellule. S'il est considéré que la perte des paires électron-trou photogénérés est principalement due aux recombinaisons non-radiatives de type SRH dans la région quasi-neutre du volume de l'absorbeur de la cellule (comme c'est le cas d'une cellule avec bonne passivation des faces avant et arrière, et donc les PERC, alors les pertes par recombinaison dans l'absorbeur vont diminuer quand l'épaisseur de la cellule décroît, puisque le volume de recombinaison sera moindre. Diminuer ces recombinaisons dans l'absorbeur a pour effet d'augmenter la tension induite par les photons dans la cellule, et donc la tension de circuit ouvert. Ainsi, il a été démontré que le rapport entre le rendement d'une cellule et son épaisseur peut être maximisé pour des épaisseurs variant de 30 à 100 μm , dans le cas où la passivation et les propriétés optiques ont été optimisées [92]. On peut donc par une diminution de l'épaisseur d'une cellule diminuer le coût des matériaux et augmenter les performances.

II-2.3.1. Approche expérimentale

Afin de tester la compatibilité de cellules minces avec les procédés nécessaires à la réalisation de cellules PERC intégrées dans des modules S'Tile, deux types de substrats différents ont été utilisés : i) des plaquettes de silicium monocristallin de 180 μm d'épaisseur trouvées dans le commerce et ii) des plaquettes de silicium monocristallin de 100 μm réalisées pour les besoins de l'étude. Il est actuellement difficile pour des raisons techniques de se procurer des plaquettes de

cette épaisseur produites de manière industrielle, c'est pourquoi celles-ci ont été obtenues à partir de l'amincissement chimique de plaquettes standard, dont le procédé est décrit ci-après.

Cette étape de préparation a été menée au CEA-INES par l'équipe Liten. Après avoir subi un nettoyage RCA (*Radio Corporation of America*, du nom de l'entité dans laquelle travaillait l'inventeur), les plaquettes ont été amincies chimiquement par un mélange d'HF et d'acide nitrique HNO₃ pour atteindre une épaisseur de 100 µm environ, suite à quoi elles ont été texturées à l'aide de KOH. L'épaisseur de 100 µm a été choisie car elle permet de se situer dans la zone de rendement maximal tout en maintenant une épaisseur supposément plus compatible avec des procédés standards. Il devient difficile de manipuler des plaquettes d'épaisseur inférieure sans précautions spécifiques, comme il sera montré dans le chapitre III. Ces deux types de plaquettes, d'épaisseur 180 et 100 µm ont servi à la réalisation de cellules de type PERC, dont le procédé de fabrication est décrit dans la partie II-3.1.

II-2.3.2. Résultats

Après amincissement chimique, on constate que la cible de 120 µm est bien atteinte, et que l'homogénéité en épaisseur est équivalente avec celle des plaquettes plus épaisses, avec une déviation de ± 3 µm. L'aspect de surface après la texturation a été mesurée comme dans le cas des plaquettes de 180 µm d'épaisseur. Le profil de la texturation pyramidale est globalement identique à celui de la texturation standard, comme le montrent les résultats de mesure figurant dans le Tableau II-4. Pourtant, la réflectivité mesurée est légèrement plus basse pour les plaquettes de 120 µm (environ 10,9 %) que pour les plaquettes d'épaisseur standard, pour lesquelles elle vaut 11,5 %. Cette différence est principalement visible dans le domaine infra-rouge, à partir de longueurs d'onde de 1000 nm (cf. Figure II-13), et est liée à la différence d'épaisseur des plaquettes [93].

Tableau II-4 : aspect de surface après texturation pour les plaquettes de 120 µm et 180 µm

Plaquette	Moyenne	Taille (µm)			E-type	Moyenne	Hauteur (µm)		
		Min.	Max.	E-type			Min.	Max.	E-type
120 µm	2,91	0,55	6,35	0,96	2,06	0,39	4,3	0,68	
180 µm	2,87	0,84	6,92	0,95	2,02	0,59	4,89	0,67	

Le taux de casse observé pendant la fabrication de cellules à partir de plaquettes de 120 µm est comparable à celui qui a été observé pour des cellules réalisées à partir de plaquettes de 180 µm, et montre que cette technique est compatible avec une production sur des machines industrielles.

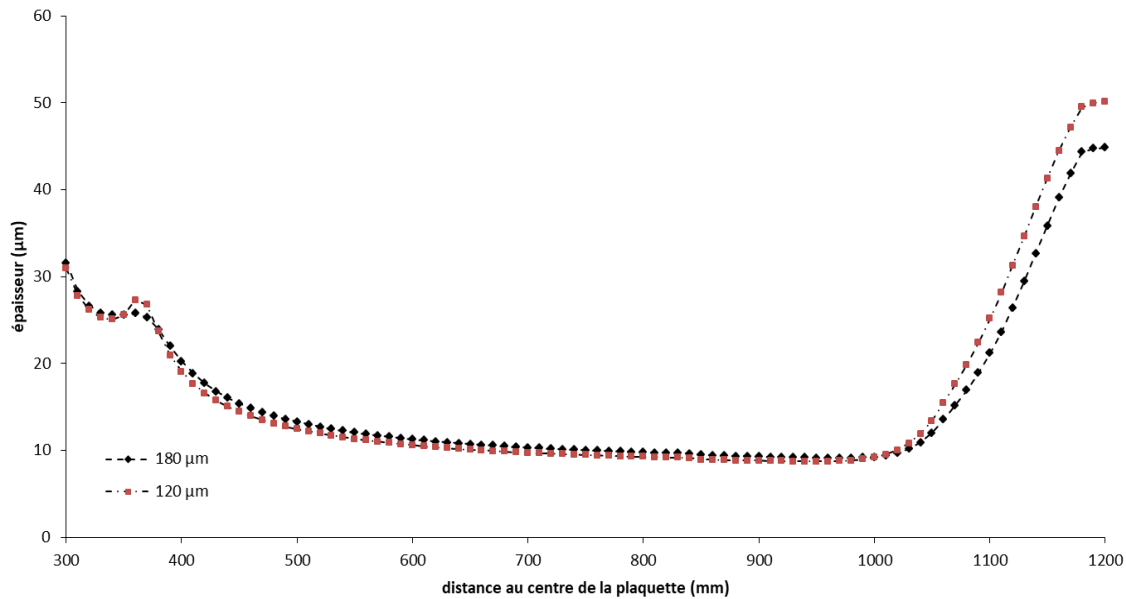


Figure II-13 : réflectivité mesurée à la surface des plaquettes texturées de 120 µm (en rouge), comparée à la réflectivité des plaquettes texturées de 180 µm (en noir), en fonction de la longueur d'onde.

II-2.4. Réduction du fléchissement et de la quantité d'aluminium utilisé

Une des conséquences de la diminution de l'épaisseur des plaquettes de silicium est l'apparition d'un phénomène appelé fléchissement ou *bowing*. Lors de l'étape de recuit des contacts ou *firing* (voir chapitre I), la différence entre les coefficients de dilatation thermique entre le substrat de silicium et la pâte d'aluminium déposée à l'arrière croît de manière exponentielle et entraîne, une fois que l'aluminium est sec, une déformation de la plaquette qui est d'autant plus sévère que cette dernière est fine. Un fléchissement excessif peut causer des dommages aux cellules, qui vont de microfissures à la destruction totale, en passant par l'endommagement du matériau [94]. Dans le cas de cette étude, réduire la déformation des cellules après recuit des contacts est plus important encore que pour des cellules standard, car le mode d'interconnexion spécifique des modules S'Tile nécessite une bonne planéité des cellules pour limiter le taux de casse lors de la production.

Le phénomène de *bowing* a déjà été étudié [95], et une formule liant la flèche du fléchissement δ , en m, aux propriétés de la plaquette et de l'aluminium a été donnée par M. Hilali *et al* :

$$\delta = \frac{3(\alpha_{Al} - \alpha_{Si})(T_f - T_0)(t_{Si} + t_{Al})L^2}{4t_{Al}^2 \left(4 + 6 \left(\frac{t_{Si}}{t_{Al}} \right) + 4 \left(\frac{t_{Si}}{t_{Al}} \right)^2 + \left(\frac{E_{Si}}{E_{Al}} \right) \left(\frac{t_{Si}}{t_{Al}} \right)^3 + \left(\frac{E_{Al}}{E_{Si}} \right) \left(\frac{t_{Al}}{t_{Si}} \right) \right)} \cdot A_f \quad (\text{II.17})$$

Dans cette formule, les α_i représentent les coefficients de dilatation thermique des matériaux i (en K^{-1}), T_f est la température de formation du *glass frit* pendant le recuit de la pâte d'aluminium, et T_0 la température ambiante (les températures sont exprimées en K). Les t_i sont les épaisseurs

des couches de matériau i (en m), les E_i leur module de Young (en GPa). Finalement, L représente la longueur de la cellule (en m) et A_f la fraction de la face arrière recouverte par de l'aluminium. On constate donc que l'amplitude du fléchissement est directement proportionnelle à la surface recouverte par de l'aluminium lors de la métallisation.

II-2.4.1. Approche expérimentale

Pour réduire le *bowing* et rendre compatible des cellules de $100\ \mu\text{m}$ avec le concept de l'i-Cell, il a été proposé dans cette étude de réduire la quantité de pâte d'aluminium déposée sur la face arrière pendant la réalisation des contacts. Pour ce faire, des motifs de métallisation de la face arrière en forme de grille ont été développés. Pour les cellules PERC classiques, et comme vu dans le premier chapitre, un film diélectrique est déposé sur la face arrière, puis est ouvert localement au laser pour permettre la formation d'un contact électrique par le biais de l'aluminium entre le silicium de la cellule et l'argent des busbars. Il n'est donc pas nécessaire de recouvrir la totalité de la face arrière d'aluminium. Des doigts d'aluminium imprimés au-dessus des ouvertures laser et perpendiculairement aux busbars d'argent suffisent théoriquement à contacter l'arrière de la cellule.

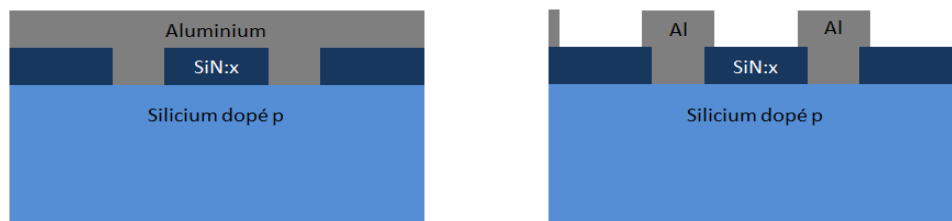


Figure II-14 : vue en coupe du motif composé de doigts d'aluminium en face arrière (à droite) comparé au dépôt d'aluminium trouvé sur la face arrière des PERC commerciales (à gauche).

Cette approche présente théoriquement plusieurs avantages : i) elle permet de diminuer la quantité de pâte d'aluminium utilisée lors de la métallisation de la face arrière ; ii) Elle rend le procédé PERC plus facilement compatible avec des cellules minces de type i-Cell en réduisant le fléchissement de la cellule ; iii) Elle permet à la lumière d'entrer également par la face arrière, rendant les cellules bifaciales et augmentant leurs performances dans des cas particuliers. Ce dernier point est développé dans la partie II-3.4 ; iv) Elle est compatible avec une couche de passivation de la face arrière composée uniquement de SiO_2 .

Il a été vu précédemment que l'oxyde thermique en couche suffisamment épaisse est un excellent passivant de surface. Un de ses inconvénients est cependant qu'il réagit très fortement avec la pâte d'aluminium sérigraphiée sur la face arrière des cellules [87]. Durant cette réaction, le film mince de SiO_2 est entièrement consommé dans la couche d'aluminium, et la cellule ne présente plus de passivation chimique en face arrière dans le cas où de l'aluminium a été déposé sur toute la surface. Elle se comporte au contraire comme une cellule Al-BSF en ce qui concerne la passivation arrière. Utiliser un dépôt local de pâte d'aluminium au-dessus des ouvertures laser permet la formation d'un BSF au niveau des contacts, tout en maintenant une passivation chimique sur les autres zones de la face arrière. On forme ainsi une structure de cellule dite PERL.

(Passivated Emitter and Rear Locally diffused), de la famille PERC, aux performances beaucoup plus élevées que les cellules Al-BSF (voir chapitre I).

Pour étudier la faisabilité de l'impression de tels motifs par sérigraphie sur la face arrière de cellules PERC, trois masques de sérigraphie ont été réalisés. Leur conception a été effectuée à S'Tile, à l'aide des logiciels AutoCAD et SolidWorks. Les motifs ont ensuite été transférés sur les trames de masques de sérigraphie à l'aide de résine photosensible.

Dans l'industrie photovoltaïque, la réalisation des contacts métalliques des cellules se déroule en quatre étapes : i) les busbars qui conduiront le courant en face arrière sont imprimés par sérigraphie avec de la pâte d'argent. ii) Un dépôt de pâte d'aluminium est réalisé sur toute la surface arrière. Il fait office de passivation (BSF) et de miroir pour le confinement optique. iii) une grille d'argent composée de doigts et de busbars est réalisée par sérigraphie également sur la face avant. iv) Les trois pâtes métalliques déposées précédemment sont recuite en même temps (on parle de *co-firing*) en plaçant les plaquettes dans un four, dit four de *firing*.

Les masques de sérigraphie réalisés spécifiquement pour l'étude ne concernent que l'étape ii) du procédé décrit précédemment, le dépôt de pâte d'aluminium en face arrière, et sont tout à fait compatibles avec des masques industriels destinés à la réalisation des étapes i) et iii). A la place d'un dépôt d'aluminium pleine plaque en face arrière, ils permettent d'imprimer un motif de bandes espacées d'1 mm entre elles et superposées aux motifs d'ouverture laser utilisés dans la réalisation de cellule PERC i-Cell. La différence entre chacun de ces trois motifs réside dans la largeur de ces bandes d'aluminium, et donc dans le taux d'ouverture de la face arrière défini par la surface non occupée par de l'aluminium. Les caractéristiques de ces trois masques de sérigraphie sont répertoriées dans le tableau suivant :

Tableau II-5 : largeur des bandes d'aluminium des masques développés et taux d'ouverture

Masque de sérigraphie Al	A	B	C
Espacement entre bandes	1000 μm	1000 μm	1000 μm
Largeur des bandes	80 μm	300 μm	800 μm
Taux d'ouverture face arrière	92,2 %	70,8 %	21,5 %

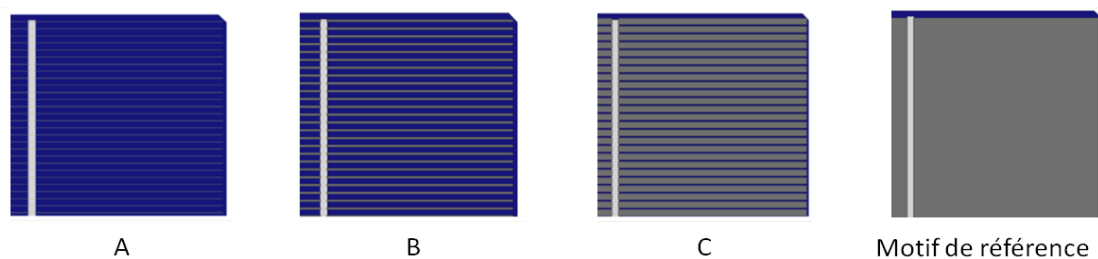


Figure II-15 : représentation des motifs étudiés A, B et C sur une portion de la cellule en comparaison du motif de référence. Les doigts d'aluminium (traits horizontaux gris foncé) viennent collecter les porteurs au-dessus des ouvertures laser (non visibles), et assurent la connexion avec les busbars d'argent (traits blancs verticaux).

Ces masques ont été imprimés sur huit cellules de 100 μm d'épaisseur et fonctionnelles réalisées spécialement pour l'étude. Les détails sur la fabrication de ces cellules sont donnés dans la partie

II-3.3. L'impression des motifs a été réalisée à S'Tile, avec la machine de sérigraphie industrielle de l'entreprise. Les cellules ont été réparties en quatre lots de deux cellules chacun de la manière suivante : i) le premier lot a reçu une impression d'aluminium en face arrière suivant le motif A ii) le second lot a reçu une impression d'aluminium en face arrière suivant le motif B ; iii) le troisième lot a reçu une impression d'aluminium en face arrière suivant le motif C ; iv) le dernier lot a reçu une impression standard d'aluminium sur l'entièreté de la face arrière. Les autres étapes de fabrication des cellules ont été conformes aux standards et identiques pour les quatre lots. Après recuit des contacts métalliques, par un recuit des contacts d'environ 30 secondes à 800 °C, les cellules ont été mesurées afin d'évaluer leur déformation.

II-2.4.2. Résultats

L'utilisation d'une électrode d'aluminium ouverte en face arrière a permis de réduire le fléchissement de cellules de 120 μm d'épaisseur. Celui-ci est divisé par deux si le motif C est utilisé, comparativement au motif de référence. Le fléchissement est quasiment éliminé si les motifs A ou B sont utilisés. Les détails de ces résultats sont donnés dans la partie II-3.4.2, où des cellules ont été réalisées avec ces motifs et caractérisées.

II-3. REALISATION DE CELLULES

Comme expliqué précédemment, un des objectifs principaux de ces travaux est de tenter de réduire le coût des cellules en simplifiant le procédé de fabrication et en économisant les matériaux. L'autre partie de l'étude sur l'intégration de la technologie PERC consiste à produire des modules de haute puissance et esthétiques. Il faut pour cela maintenir un compromis raisonnable entre la réduction du prix et la performance du module. Pour atteindre ce but, deux principaux axes ont été développés. Le premier d'entre eux porte sur l'optimisation des procédés cellule développés précédemment, de manière que, en plus de réduire les coûts, ils s'accordent entre eux pour permettre l'obtention de cellules performantes. Le second objectif porte sur l'optimisation de l'interconnexion de ces cellules, en s'appuyant sur la technologie i-Cell, de manière à obtenir des modules plus performants et plus élégants que le standard à partir de cellules de qualité équivalente.

II-3.1. Cellules PERC implantées avec anti-reflet

Afin d'étudier l'impact sur les performances d'une cellule PERC de la réalisation de l'émetteur par implantation ionique, un lot de cellules avec ces caractéristiques a été réalisé

II-3.1.1. Procédé de fabrication

Dix plaquettes commerciales de silicium monocristallin de type p Cz, de 180 μm d'épaisseur, et de 156 x 156 mm^2 , ont été envoyées à l'institut ECN situé aux Pays-Bas, où les dommages de

sciage présents sur les plaquettes ont été nettoyés, suite à quoi celles-ci ont été texturés dans une solution de KOH. Les émetteurs n ont été réalisés par implantation d'ion phosphore à l'aide d'un implanteur industriel « Ion Solar » de marque Kingstone détenu par Tempres et ECN dans le cadre d'un projet de recherche. La dose d'ions implantés est une dose standard d'environ $2,5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ et l'énergie d'implantation est fixée à 15 keV par la machine. Les cellules ainsi obtenues ont subi un recuit de réparation des dommages de sciage dans les conditions standard utilisées par Tempres et qui permet théoriquement l'obtention d'une couche d'oxyde thermique de 10 nm environ, et d'un émetteur de 500 nm de profondeur environ (voir Figure II-20).

Les cellules ont ensuite reçu un dépôt de nitrure PECVD de 70 nm environ sur la face avant, afin d'optimiser les propriétés de réflexion et de passivation, et de 160 nm sur la face afin de protéger les couches se situant en dessous lors de l'étape de recuit des contacts. Il est à noter que cette étape a été réalisée dans des conditions confidentielles, selon les standards d'INES qui n'ont pas été communiqués. Même si l'épaisseur est connue, la composition du nitrure déposé, elle, ne l'est pas. La technique de PECVD permet en effet de jouer sur la formule chimique du nitrure hydrogéné, qui a elle-même une incidence sur les paramètres optiques et électriques de la cellule [96]. Les films de $\text{SiN}_x\text{:H}$ PECVD riches en silicium présentent en général de bonnes propriétés de passivation de surface mais absorbent fortement le rayonnement lumineux et ne sont pas utilisés pour la fabrication de cellules solaires. A contrario, une couche de $\text{SiN}_x\text{:H}$ plus riche en azote favorisera les propriétés anti-reflet, mais sera moins efficace en ce qui concerne la passivation. Ici, il est supposé qu'un compromis a été trouvé entre les propriétés optiques et électriques, dans la mesure où ce nitrure sert déjà à la passivation de cellules PERC ; cependant il est difficile d'évaluer dans quelle mesure les films déposés s'accordent avec la couche d'oxyde thermique qui, elle, est spécifique à l'étude. La teneur en hydrogène, quant à elle, modifie la passivation de volume qui a lieu pendant le recuit des contacts. Dans tous les cas, il s'agit ici de premiers prototypes, et ces conditions, même si elles ne sont pas optimales, suffiront à mettre en lumière les éventuels obstacles technologiques à la réalisation industrielle de cellules sans film anti-reflet.

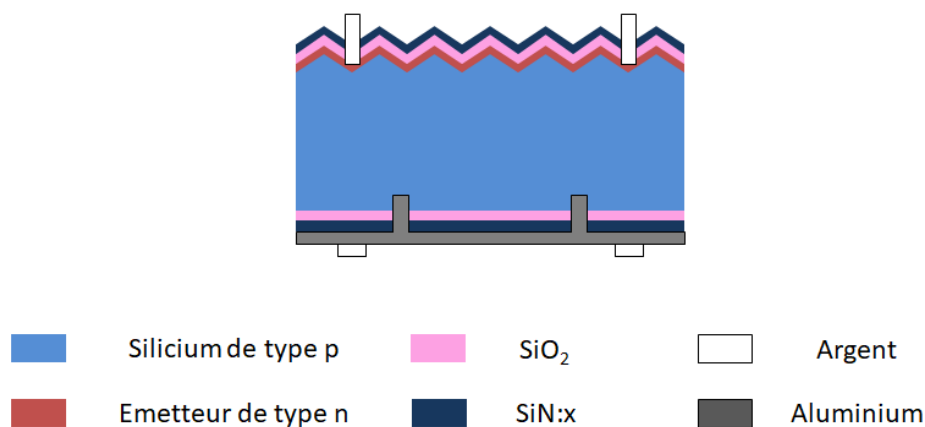


Figure II-16 : Structure des cellules PERC réalisées pour les deux lots d'échantillon. Les échantillons ont une couche anti-reflet et de passivation composée d'un empilement de SiN_x et SiO_2 .

Les ouvertures dans la couche de diélectrique en face arrière ont été également réalisées à l'INES, au moyen d'un laser femtoseconde d'une longueur d'onde de 540 nm, et de manière à former des traits de 50 μm de large. Les cellules des deux lots ont finalement été métallisées par sérigraphie à S'Tile. Elles ont subies, dans l'ordre, l'impression des busbars d'argent en face arrière avec de la pâte métallique de marque Heraeus. Puis la plaque d'aluminium en face arrière a été imprimée à l'aide de pâte spéciale pour cellules PERC fabriquée par l'entreprise Monocrystal. La grille d'argent en face avant a été réalisée à l'aide de pâte standard Heraeus pour face avant. Les trois pâtes métalliques ont été recuites ensemble par un recuit des contacts de 30 s. Différentes températures ont été testées afin d'obtenir les contacts les mieux adaptés à chacune des couches de passivation.

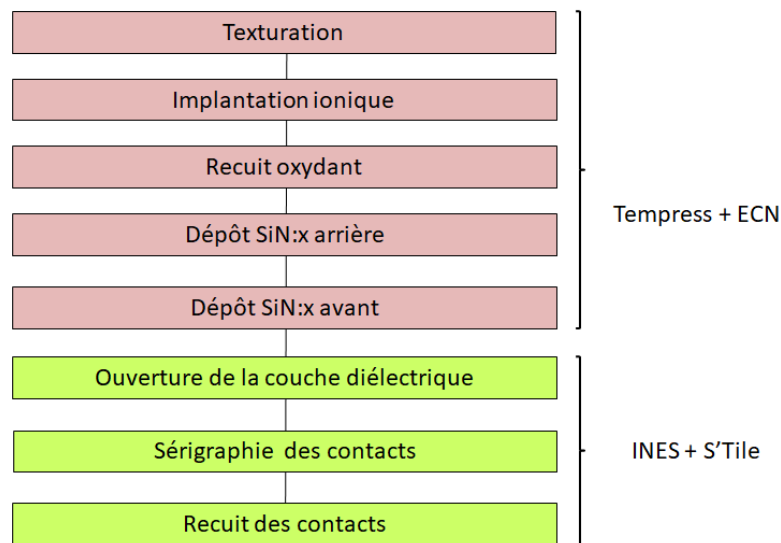


Figure II-17 : détail du procédé de réalisation des cellules PERC et acteurs de chaque étape.

II-3.1.2. Résultats

Après nettoyage chimique et texturation, l'homogénéité des plaquettes en épaisseur a été mesurée, ainsi que la réflexion optique après texturation (cf. Figure II-18). La résistivité des plaquettes est donnée par le fabricant et vaut $4 \pm 0,06 \Omega \cdot \text{cm}$.

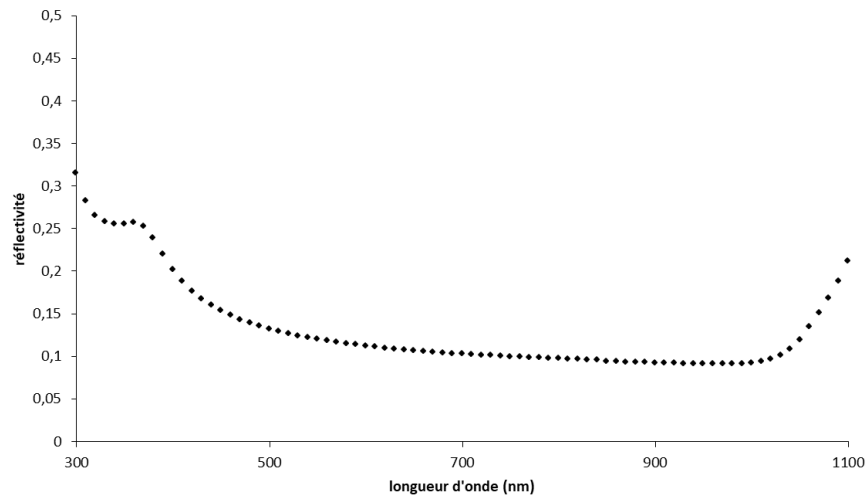


Figure II-18 : réflectivité, mesurée après texturation et nettoyage des plaquettes, en fonction de la longueur d'onde incidente.

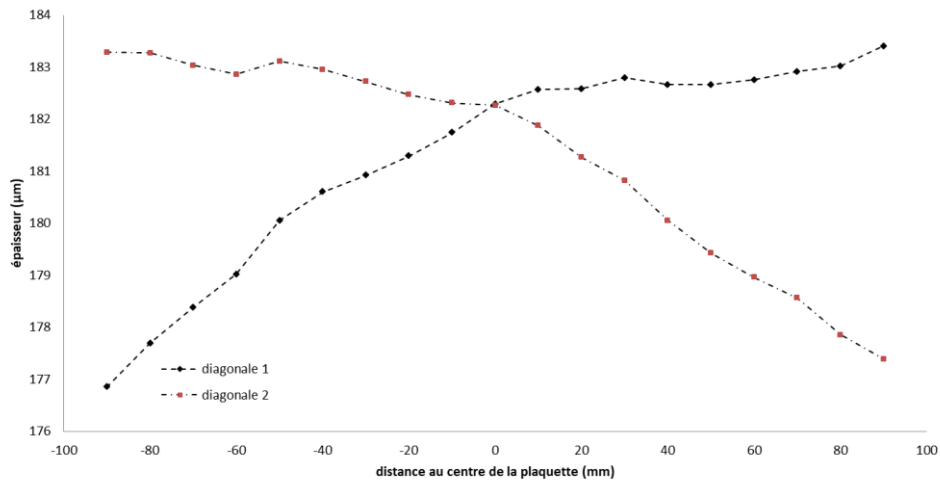


Figure II-19 : épaisseur d'une plaquette le long des deux diagonales, mesurée après nettoyage chimique et texturation.

Les émetteurs des cellules dont la fabrication est détaillée dans la partie II-3.1 ont été analysés par profil ECV (*Electrochemical Capacitance Voltage*), ce qui a permis de déterminer le profil de l'émetteur après recuit, comme montré sur la Figure II-20. Le profil est proche du dopage calculé par simulation, avec le pic de dopage apparaissant légèrement sous la surface, ce qui permet de limiter les courants de recombinaison sur la face avant. La profondeur est de l'ordre de 400 nm, limitant ainsi les dimensions de la zone de fort dopage, et donc les recombinaisons Auger. La résistance de feuille de l'émetteur a été mesurée à $78 \Omega/\square$. Plus la résistance de l'émetteur est forte, et plus la valeur de V_{oc} augmente, en raison de la limitation des recombinaisons. Au-dessus d'un certain niveau de dopage, les ions d'impuretés sont non seulement inactifs électriquement, mais contribuent à l'apparition de recombinaisons SRH. De même, une forte résistance de l'émetteur implique également une augmentation d' I_{sc} , en raison de la meilleure réponse dans le bleu, et de la réduction des recombinaisons, Auger notamment [73].

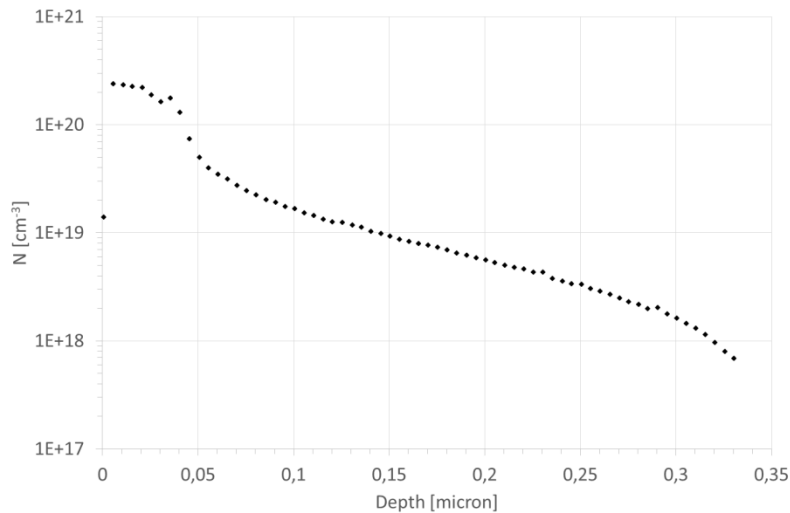


Figure II-20 : profil de dopage de l'émetteur après recuit mesuré par ECV sur une des cellules réalisées.

L'épaisseur de la couche d'oxyde formée pendant le recuit a été mesurée et vaut 10 nm. Cette mesure correspond aux valeurs de la simulation. Des mesures de durée de vie effectuées sur une cellule après recuit de l'émetteur donnent une durée de vie effective moyenne τ_{eff} de 28,4 μs . Cette faible valeur est relativement normale à ce stade de la fabrication des cellules. En effet, dans le cadre d'un procédé classique, le nitrure déposé comme anti-reflet libère des atomes d'hydrogène dans le silicium pendant le recuit des contacts sérigraphiés. Ces atomes permettent de passiver les défauts présents dans le volume et à la surface du matériau, ce qui induit normalement une augmentation de la durée de vie effective d'un facteur 5 à 10 [97,98].

Si ceci ne pose pas de problème pour des cellules standard qui reçoivent un double dépôt de $\text{SiN}_x\text{:H}$ en faces avant et arrière, en revanche se pose la question de la durée de vie pour des cellules qui recevraient uniquement une oxydation thermique. Dans ce cas, aucune diffusion d'hydrogène atomique dans le silicium n'intervient pendant le procédé de fabrication de la cellule. Une manière de compenser partiellement ce manque de passivation de volume pourrait être l'introduction du procédé de FGA (*Forming Gas Anneal*) qui peut être mis en place à la fin du recuit d'implantation.

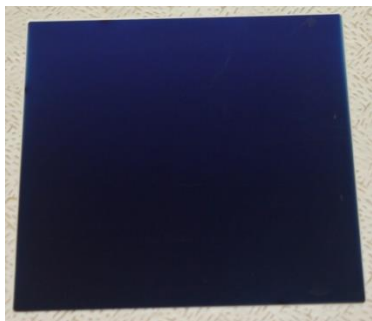


Figure II-21 : photographie du dépôt de nitrure d'environ 70 nm sur la face avant des cellules de référence.



Figure II-22 : photographie de la couche d'oxyde de 15 nm sur la face avant des cellules étudiées.

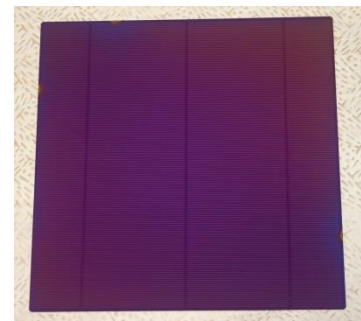


Figure II-23 : photographie du dépôt de nitrure d'environ 180 nm commun à la face arrière de toutes les cellules.

Les cellules ont subi un dépôt de nitrure PECVD de 70 nm d'épaisseur environ sur la face avant et de 160 nm d'épaisseur sur la face arrière. La couche diélectrique arrière a été localement ouverte, suivant des motifs de bande perpendiculaires aux busbars d'argent de la face arrière. Les paramètres de fonctionnement du laser pulsé utilisé, à savoir la longueur d'onde, la puissance, la fréquence des impulsions et la vitesse de déplacement du point focal sont les paramètres standards utilisés par l'INES pour la réalisation de cellules PERC, qui n'ont pas non plus été communiqués, également pour des raisons de confidentialité. Cependant, la mise au point d'un tel procédé déjà maîtrisé et bien documenté [99,100] nécessite un savoir-faire accessible si jamais l'entreprise S'Tile voulait réaliser cette étape elle-même à l'avenir. La cible est une largeur de 50 μm pour ces bandes. Une observation au microscope optique a permis de s'assurer que la couche diélectrique a été correctement retirée dans ces régions, et sur une largeur de 52 μm (voir Figure II-25). Une mesure du profil de surface de la face arrière montre que l'ablation laser n'a pas occasionné de dégâts au niveau du silicium. Cette étape a donc été a priori réalisée dans des conditions qui ne devraient pas dégrader la passivation de la face arrière [101].

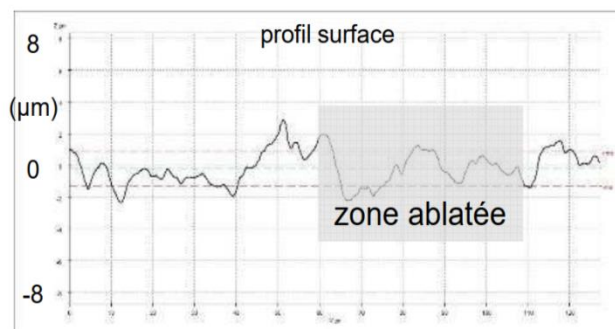


Figure II-24 : profil de la face arrière d'une cellule ayant subi l'ablation du diélectrique par laser. La zone ablatée est représentée en gris

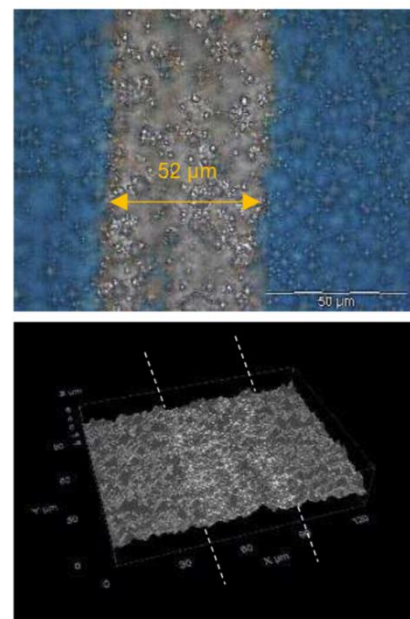


Figure II-25 : microscopie optique (en haut) et électronique (en bas) d'un détail d'une des ouvertures linéaires.

Les électrodes à l'arrière et l'avant ont été réalisées par sérigraphie de pâtes métalliques, comme expliqué dans la partie II-3.1. Après impression des contacts sur les cellules de référence, plusieurs conditions de recuit ont été testées afin d'obtenir les meilleures performances. Le recuit des contacts est en effet déterminant dans la fabrication industrielle puisqu'il influe grandement sur les valeurs de V_{oc} , I_{sc} , R_s et R_{sh} des cellules [102]. Il doit être adapté à chaque nouvel émetteur, puisque des profils de dopage différents impliquent des propriétés de contact différentes.

A cause du nombre limité d'échantillons, seule la variation des températures du pic de recuit des contacts a été étudiée. Même si cette méthode ne permet pas une optimisation fine des performances, elle suffit pour obtenir une observation globale du potentiel des cellules. En balayant quatre différentes températures sur un spectre large (750 °C à 850 °C), quatre cellules ont été obtenues et caractérisées. Il est intéressant d'étudier en premier les valeurs de résistance série et de résistance de shunt, car ce sont elles qui dépendent le plus fortement de la qualité des électrodes. L'objectif est de minimiser la résistance série et de maximiser la résistance de shunt. On constate que R_{sh} diminue fortement de 750 °C à 770 °C, après quoi elle forme un palier avant de chuter à nouveau à partir de 800 °C (cf. Figure II-26 :). La valeur de R_s présente un minimum à 770 °C. On constate que le meilleur compromis entre ces deux valeurs se trouve effectivement aux alentours de 770 °C, puisqu'après des mesures des quatre cellules obtenues au simulateur solaire, c'est pour cette température que l'on obtient la meilleure cellule, avec un rendement de 18,03 %, un V_{oc} de 634 mV, une valeur d' I_{sc} de 9,36 A et un FF de 75,1 %, comme montré dans le Tableau II-7.

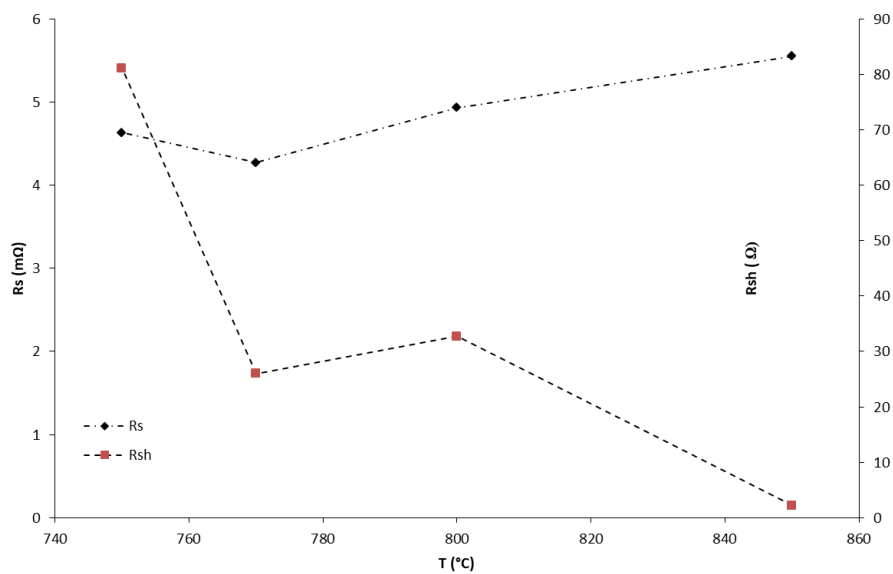


Figure II-26 : valeurs de résistance série R_s (en noir) et de résistance shunt R_{sh} (en rouge) en fonction de la température de recuit des contacts pour les quatre cellules réalisées.

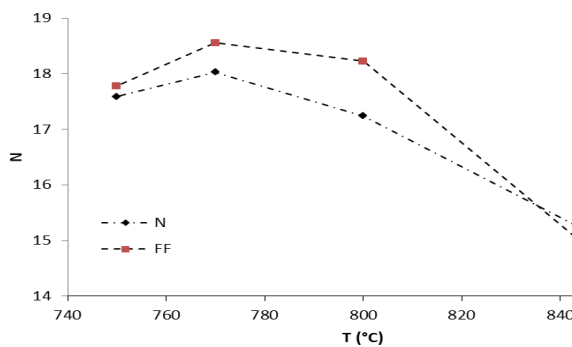


Figure II-27 : valeurs de rendement η (en noir) et de facteur de forme FF (en rouge) en fonction de la température de recuit des contacts pour les quatre cellules réalisées.

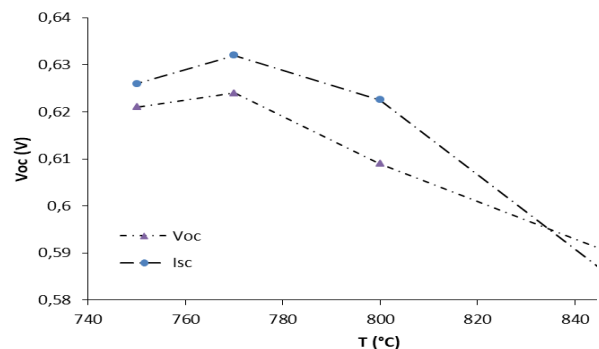


Figure II-28 : valeurs de tension de circuit ouvert V_{oc} (en violet) et de courant de court-circuit I_{sc} (en bleu) en fonction de la température de recuit des contacts pour les quatre cellules réalisées.

Les valeurs de résistance série globalement élevées tendent à montrer que le procédé de recuit des contacts n'est pas optimisé, si on les compare à des valeurs de R_s mesurées sur des cellules PERC présentant de hauts rendements [103]. De même, les valeurs de R_{sh} sont basses comparées aux mêmes standards. En jouant notamment sur la vitesse de montée en température, et sur les températures du début de la zone de recuit des contacts, il est raisonnable de penser que ces valeurs pourraient être améliorées. Une diminution de ces températures permettrait certainement une augmentation de R_{sh} [104]. De plus, le procédé utilisé dans cette étude est un *co-firing*, c'est-à-dire le recuit simultané des trois pâtes de sérigraphie servant à la formation des contacts d'aluminium arrière, argent arrière et argent avant. Or, les conditions de recuit des pâtes utilisées ne sont pas les mieux adaptées pour une utilisation conjointe, comme montré dans le Tableau II-6. La pâte d'aluminium destinée à la formation de l'électrode arrière, notamment, n'est pas utilisée dans sa gamme de température optimale. On peut donc s'attendre à ce que la passivation des contacts aluminium-silicium au niveau des ouvertures dans la couche diélectrique en face arrière soit le siège de recombinaisons passivées de manière suboptimale.

Tableau II-6 : température de recuit des contacts recommandée avec les pâtes d'aluminium et argent arrière, et d'argent avant utilisées

Référence pâte	EFX-85	SOL325A	SOL9621P
T ° recuit des contacts (pic)	830-920°C	740-800°C	740-800°C

Toutefois, les valeurs d' I_{sc} mesurées tendent à montrer que la finesse de l'émetteur obtenu par implantation permet de maintenir les recombinaisons à un niveau suffisamment bas dans celui-ci et dénotent également d'une bonne passivation. Ce sont les valeurs de V_{oc} qui sont finalement les plus faibles comparativement à des cellules PERC de haute performance. Ceci est lié premièrement à la qualité des contacts métalliques, mais pourrait être lié également au profil de dopage de l'émetteur, ainsi qu'à la qualité de la passivation de la face arrière. Globalement, les performances sont satisfaisantes pour une première série de prototypes.

Tableau II-7 : caractéristiques électriques obtenues pour les différentes températures de recuit des contacts étudiées

T (°C)	P_{mpp} (W)	V_{oc} (mV)	I_{sc} (A)	R_s (mΩ)	R_{sh} (Ω)	η (%)	FF (%)
850	3,59	589	8,55	5,55	2,21	14,97	71,5
800	4,19	609	9,21	4,93	32,71	17,24	74,8
770	4,39	624	9,37	4,27	26,03	18,03	75,1
750	4,28	621	9,27	4,63	81,08	17,59	74,4

Afin de vérifier la répétabilité du procédé de fabrication des cellules par implantation, les six cellules restantes du lot ont été sérigraphiées dans les mêmes conditions que précédemment, puis cuites selon les conditions de recuit des contacts ayant permis l'obtention des meilleures cellules. Les résultats sont donnés dans le Tableau II-8. Les cellules ont des caractéristiques électriques proches les unes des autres, avec une grande stabilité notamment pour les valeurs de V_{oc} (± 2 mV) et d' I_{sc} ($\pm 0,06$ A) d'une cellule à l'autre. Les plus grandes variations sont constatées sur les valeurs de R_s et de R_{sh} . Cette variabilité peut être imputée à deux facteurs principaux : i) le procédé de sérigraphie avec des pâtes non optimisées et ii) la mesure au simulateur solaire, dont la

précision sur la mesure de R_s et de R_{sh} n'est pas optimale. Les valeurs de V_{oc} et d' I_{sc} relativement stables tendent à montrer que la fabrication des émetteurs présente une bonne homogénéité.

Tableau II-8 : caractéristiques électriques obtenues avec la meilleure condition de recuit des contacts étudiée

échantillon	P_{mpp} (W)	V_{oc} (mV)	I_{sc} (A)	R_s (m Ω)	R_{sh} (Ω)	η (%)	FF (%)
c1	4,39	624	9,39	4,83	16,47	18,04	74,9
c2	4,41	625	9,39	4,48	15,36	18,15	75,4
c3	4,44	624	9,39	4,03	31,01	18,23	75,7
c4	4,44	625	9,38	3,94	24,97	18,26	75,9
c5	4,41	624	9,37	3,96	24,77	18,14	75,5
c6	4,39	622	9,33	4,08	28,9	18,06	75,8
c7	4,44	625	9,38	3,68	34,67	18,24	75,7
moyenne	4,41	624	9,37	4,14	25,16	18,16	75,6

La meilleure cellule du lot, à savoir l'échantillon c4 a subi des mesures d'EQE et d'IQE dans les laboratoires de l'INL. Il a été mesuré dans les mêmes conditions que deux cellules PERC commerciales de référence, dont les émetteurs ont été réalisés par diffusion, et dont les caractéristiques électriques sont données dans le Tableau II-9. La cellule de référence Ref2 notamment présente d'excellentes caractéristiques même pour une cellule PERC, et fait partie des meilleures cellules disponibles sur le marché. C'est une cellule obtenue à partir d'une plaquette monocristalline. La cellule Ref1 est une cellule PERC obtenue à partir d'une plaquette multicristallin. Les courbes d'EQE, présentées sur la Figure II-29 : montrent un rendement équivalent entre la cellule étudiée et la cellule Ref2 dans le domaine des très courtes longueurs d'ondes, entre 250 et 370 nm. Les courtes longueurs d'ondes, hautement énergétiques, étant absorbées dans les premiers μm du silicium, ce précédent résultat dénote d'une très bonne qualité de la face avant de la cellule étudiée (optique, passivation), comparée aux cellules de référence. La cellule Ref1 présente une courbe d'EQE moins haute de 0,1 point environ dans ce domaine de fréquences, principalement due au fait que le silicium multicristallin, même texturé, possède une réflectivité plus élevée en face avant. De plus, la durée de vie est également moindre, en raison de la présence d'états interstitiels aux joints de grains.

Tableau II-9 : caractéristiques électriques mesurées pour la meilleure cellule PERC obtenue dans les conditions de l'étude, et comparées avec les caractéristiques électriques mesurées pour deux cellules PERC achetées dans le commerce, l'une multicristalline avec un rendement de 19,5 % (Ref 1), et l'autre monocristalline avec un rendement de 21 % (Ref 2).

échantillon	P_{mpp} (W)	V_{oc} (mV)	I_{sc} (A)	R_s (m Ω)	R_{sh} (Ω)	η (%)	FF (%)
c4	4,44	625	9,38	3,94	24,97	18,26	75,9
Ref 1	4,66	652	9,27	4,25	35,07	19,15	76,2
Ref 2	4,95	659	9,33	6,21	39,38	20,72	80,5

A partir de 400 nm en revanche, et jusqu'à 750 nm, la cellule c5 présente un rendement meilleur de 0,1 environ que les cellules Ref1 et Ref2 dans les mêmes conditions de mesure. Ceci pourrait être expliqué par une meilleure durée de vie des porteurs dans la cellule étudiée. La passivation à l'oxyde thermique, combinée à un dépôt de nitrure hydrogéné constitue en effet une meilleure passivation pour la surface et le volume du silicium qu'un seul dépôt de nitrure PECVD, comme montré précédemment. La grande différence qui peut expliquer l'écart de performance entre la

cellule étudiée et les références se fait dans l'infrarouge. Les cellules Ref 1 et Ref 2 présentent une courbe d'EQE bien meilleure à partir de 850 nm, et maintiennent un rendement élevé jusqu'à une longueur d'onde 1050 nm, quand celui de la cellule c5 décroît rapidement à partir de 800 nm. Cette différence dans l'infrarouge peut s'expliquer par la qualité du volume du matériau et par la qualité de la face arrière. La courbe d'EQE de la cellule c5 étant très haute par ailleurs, il peut être supposé que c'est la face arrière qui pose majoritairement problème.

Les cellules de référence présentent une passivation de la face arrière composée d'un empilement $\text{AlO}_x/\text{SiN}_x$ dont les épaisseurs respectives ne sont pas connues. Par ailleurs leur face arrière est polie. La cellule c5, quant à elle, présente une face arrière texturée, et passivée avec un empilement de 10 nm de SiO_2 sous 150 nm de SiN_x environ. Le premier élément qui fait défaut aux cellules étudiées est donc le polissage de la face arrière. Or, il a été montré que le polissage chimique, effectué de manière optimisée permet de diminuer les recombinaisons de surface d'un facteur 3 à 5 sur la face arrière de cellules PERC industrielles, et de faire augmenter les rendements jusqu'à 0,5 % absolu par rapport à des cellules non polies [105]. La seconde explication tient dans l'absence d'une couche d'alumine dans l'empilement de passivation arrière. Le nitrure PECVD contient en effet une grande densité de charges fixes positives ($Q_f \approx 2-3 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) qui induisent une forte courbure de bandes et forment une couche d'inversion (c'est-à-dire ici une zone n) sous la face arrière de la cellule [106]. La jonction ainsi créée n'est pas connectée, elle est dite flottante, et permet l'écoulement d'un courant latéral vers les contacts arrière, qui est vu comme un shunt entre la couche d'inversion et les électrodes. Ce phénomène n'a pas lieu avec de l'oxyde de silicium qui contient une densité de charges fixes positives plus faibles ($Q_f \approx 1 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$), ni avec de l'alumine qui contient des charges fixes négatives. Ici, la couche d'oxyde est trop fine pour empêcher le phénomène, ce qui entraîne probablement une diminution des valeurs d' I_{sc} et de V_{oc} . En éliminant la couche de nitrure en face arrière, qui ne sert ici qu'à protéger la couche d'oxyde pendant le recuit des contacts et pourrait être éliminée moyennant un motif de métallisation spécifique et en n'utilisant que du SiO_2 comme moyen de passivation arrière, il serait possible, d'après la littérature, d'obtenir un gain en rendement jusqu'à 1 % absolu [106]. Il apparaît en tout cas nécessaire de limiter le phénomène de shunt parasite induit en face arrière par le nitrure pour augmenter les rendements.

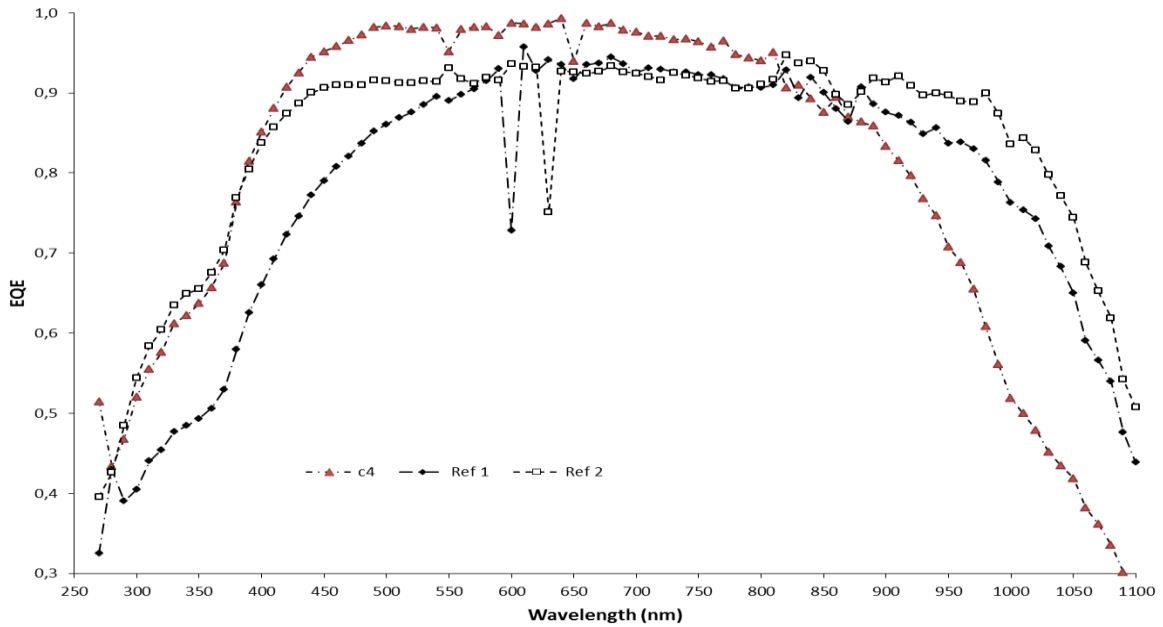


Figure II-29 : rendement quantique externe (EQE) mesuré en fonction de la longueur d'onde du rayonnement incident pour la meilleure cellule PERC obtenue dans les conditions de l'étude (c4), comparé aux EQE mesurés pour deux cellules PERC achetées dans le commerce, l'une multicristalline avec un rendement de 19,5 % (Ref 1), et l'autre monocristalline avec un rendement de 21 % (Ref 2).

II-3.2. Cellules implantées sans anti-reflet

Ces cellules ont été réalisées simultanément et dans les mêmes conditions que les cellules avec anti-reflet décrites dans la partie précédente. La seule différence notable tient dans le fait que ces cellules n'ont pas reçu de dépôt de nitrure PECVD en face avant, comme indiqué sur la Figure II-30.

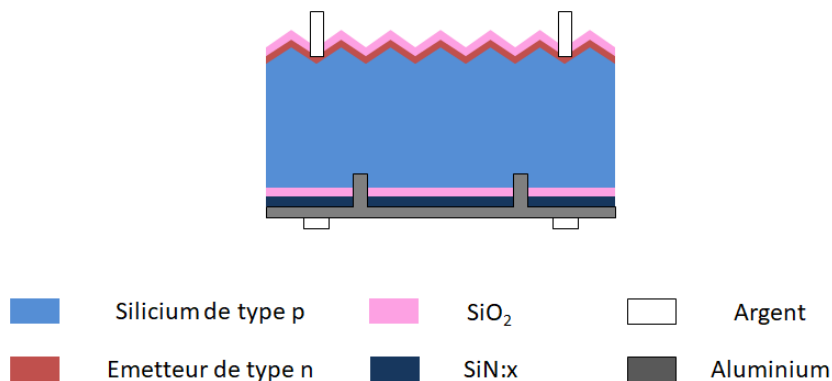


Figure II-30 : structure des cellules réalisées sans anti-reflet. La seule différence avec les cellules de la partie précédente est l'absence de nitrure PECVD sur la face avant.

II-3.2.1. Résultats

Comme pour les cellules avec dépôt de nitrure PECVD en face avant, les cellules ne présentant qu'une couche d'oxyde de 10 nm environ ont été sérigraphiées puis passées au co-recuit des contacts, et sur les mêmes équipements. La différence notable réside dans la pâte de sérigraphie utilisée pour la formation des contacts d'argent en face avant. La pâte d'argent destinée à la face avant des cellules est conçue pour passer à travers la couche diélectrique de la face avant pendant le recuit des contacts, de manière à venir contacter électriquement le silicium se trouvant dessous. Dans le cas de l'étude consistant à réaliser des contacts sur des cellules ne possédant pas cette couche diélectrique en face avant, des essais préliminaires ont montré que l'utilisation d'une pâte d'argent standard provoquait, après recuit des contacts, le shunt complet des cellules, avec des valeurs de V_{oc} et d' I_{sc} valant 0. Ce phénomène est dû au comportement de la pâte de sérigraphie, qui, en l'absence de diélectrique en face avant, pénètre dans le silicium et court-circuite l'émetteur en réalisant le contact électrique très profondément. Plusieurs températures de pic de recuit des contacts entre 700 et 870 °C ont été étudiées avec le même résultat. L'utilisation d'une pâte d'argent destinée à la seconde impression d'un procédé à deux impressions en face avant (*double print*), et au comportement moins agressif lors du recuit des contacts, n'a pas permis d'améliorer le résultat.

Une troisième pâte de sérigraphie destinée à la face avant de cellules standard a permis après recuit des contacts la réalisation d'un contact électrique, bien qu'il n'ait pas été expliqué clairement pourquoi. En appliquant la même méthode que dans la partie précédente, une cellule avec un rendement maximal de 14,3 % a été obtenue. Les valeurs de résistance série sont meilleures que dans le cas de cellules avec anti-reflet, mais la valeur extrêmement faible de la résistance de shunt (0,45 Ω) incite à penser que malgré la réalisation d'un contact électrique, il existe un shunt au moins partiel de l'émetteur, et que l'utilisation d'une pâte de sérigraphie plus adaptée pourrait améliorer encore ces résultats.

Tableau II-10 : caractéristiques électriques obtenues pour les différentes températures de recuit des contacts étudiées pour les cellules sans anti-reflet

T (°C)	P_{mpp} (W)	V_{oc} (mV)	I_{sc} (A)	R_s (m Ω)	R_{sh} (Ω)	η (%)	FF (%)
730	3,08	597	7,87	5,33	0,46	12,96	65,5
770	3,47	611	8,293	3,36	0,45	14,30	68,7
800	3,29	612	8,334	3,31	0,36	13,55	64,7

Tableau II-11 : caractéristiques électriques obtenues après ajustement de la température de début de FF

T (°C)	P_{mpp} (W)	V_{oc} (mV)	I_{sc} (A)	R_s (m Ω)	R_{sh} (Ω)	η (%)	FF (%)
470	3,61	614	8,373	3,14	0,54	14,84	70,3

Pour essayer de réduire d'avantage le shunt de l'émetteur par les contacts de la face avant, une nouvelle condition de recuit a été testée, en diminuant la température du début du recuit des

contacts, correspondant aux zones FF de 1 à 4 du profil de température visible sur la Figure II-31. Cet ajustement a permis une diminution de la résistance série, et une augmentation de la résistance shunt qui induisent une augmentation de la tension V_{oc} et du courant I_{sc} mesurés et permettent l'obtention d'un rendement de 14,84 %. En plus des raisons évoquées dans la partie précédente, ce rendement faible est, semble-t-il, dû au contact métallique avant qui court-circuite en partie l'émetteur de la cellule. Cet obstacle pourrait être simplement contourné par l'utilisation d'une pâte d'argent adaptée pour la face avant des cellules. Il est établi que ce genre de pâte existe, puisque la sérigraphie de cellules solaires sans anti-reflet a déjà été réalisée avec succès par le passé [107,108], mais il est difficile de trouver aujourd'hui un tel produit auprès des fournisseurs. Cependant, la réalisation de la face avant de cellules sans anti-reflet semble réalisable techniquement, même s'il n'a pas été possible de caractériser l'impact d'une telle face avant sur les performances des cellules.

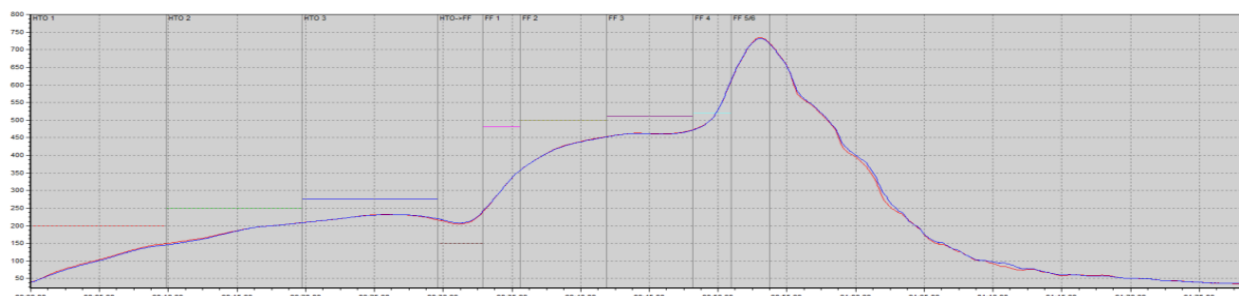


Figure II-31 : profil de température subie par les cellules sans anti-reflet lors du recuit des contacts. La première zone vue par les cellules (les trente premières secondes du procédé) est la zone de séchage de la pâte, qui permet l'évaporation du solvant. Viennent ensuite les zones de FF de 1 à 4 (de 30 à 50 s) qui permettent la pénétration de la pâte dans la cellule, puis la zone FF 5/6 (pic de température entre 50 et 55 s) qui permet la croissance des grains métalliques et la solidification des contacts.

II-3.3. Conséquence de l'amincissement des plaquettes

Pour caractériser la perte de performance occasionnée par l'amincissement des plaquettes dans le cadre du procédé de fabrication de cellules décrit précédemment, des cellules minces ont été réalisées.

II-3.3.1. Approche expérimentale

Les étapes de fabrication sont les mêmes que dans la partie précédente, à une exception près : les cellules ont été nettoyées puis gravées chimiquement, jusqu'à les amincir à 100 μm d'épaisseur. Elles ont ensuite été texturées. Ces étapes ont été réalisées à l'INES, après quoi les cellules ont été envoyées à Tempres pour implantation, après quoi la fabrication est identique.

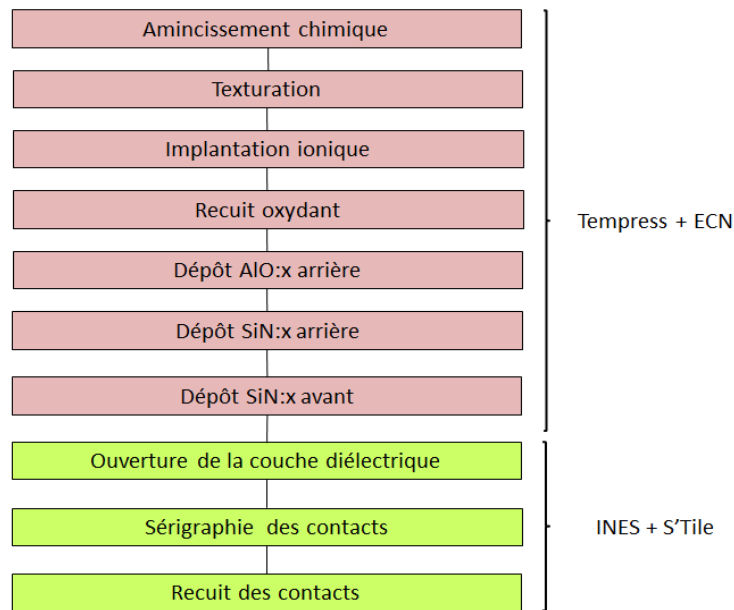


Figure II-32 : étapes du procédé de fabrication des cellules PERC minces.

Les cellules PERC minces ont été mesurées électriquement, par caractérisation de la courbe I(V).. Des mesures de rendement quantique interne et externe ont également été menées avec l'INL. Les cellules minces obtenues ont une structure identique à celle des PERC du lot 1 de l'expérience présentée dans la partie précédente. Elles ont été comparées à ces cellules, qui servent de référence, pour évaluer les variations de performance électriques imputables à la diminution de l'épaisseur des plaquettes.

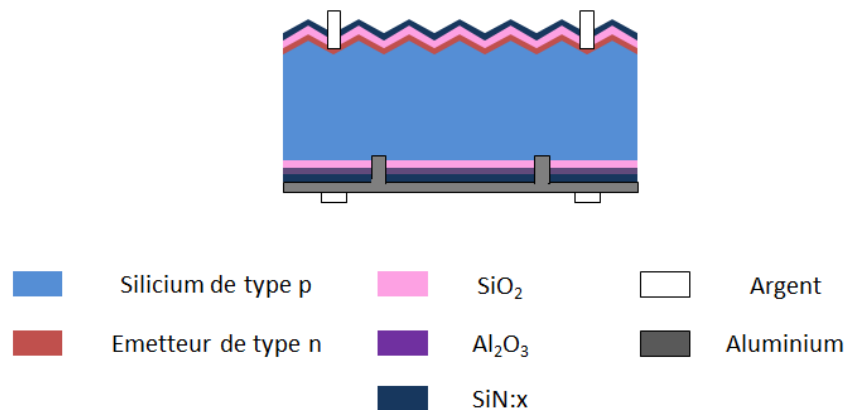


Figure II-33 : structure des cellules réalisées à partir des plaquettes de 120 µm. Leur structure est identique à celle des cellules développées dans la partie 74II-3.1.

II-3.3.2. Résultats

Après amincissement chimique, on constate que la cible de 120 µm est bien atteinte, et que l'homogénéité en épaisseur est équivalente avec celle des plaquettes plus épaisses, avec une déviation de $\pm 3 \mu\text{m}$.

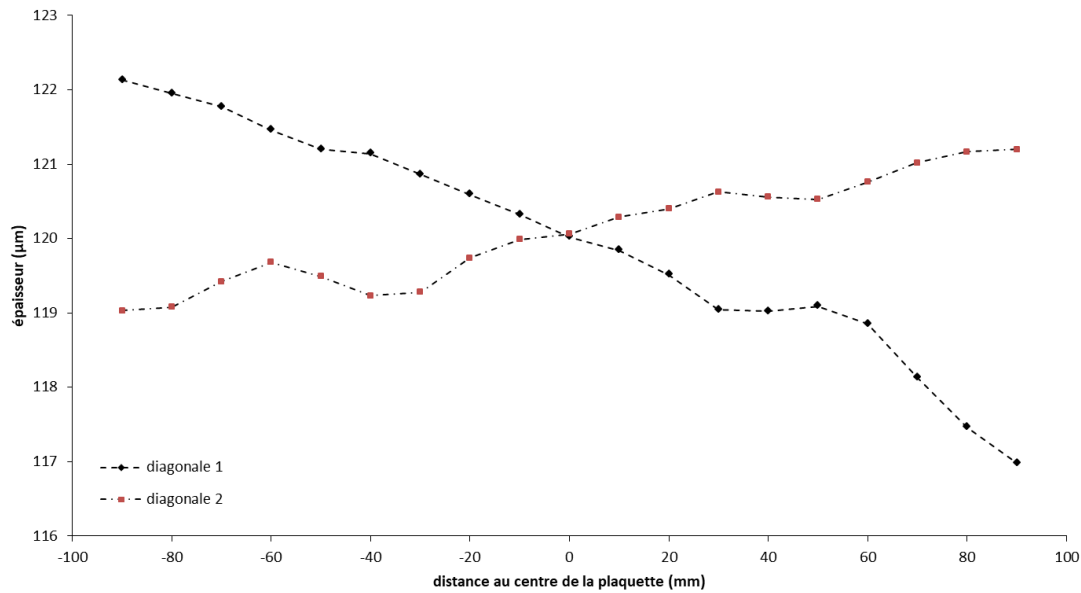


Figure II-34 : homogénéité de l'épaisseur d'une plaquette de 120 µm le long des deux diagonales, mesurée après nettoyage chimique, amincissement et texturation.

Afin d'éviter de trop chauffer les cellules plus minces pendant l'étape de recuit des contacts et de diminuer les performances [109], de nouvelles conditions de recuit ont été testées. Comme précédemment, et à cause du faible nombre d'échantillons, seule la température de pic a été modifiée. La meilleure condition de recuit des contacts sérigraphiés est trouvée pour une température de pic de 770 °C, comme dans le cas des cellules de 180 µm d'épaisseur. L'amincissement ne semble donc pas avoir de conséquences sur les paramètres du procédé de recuit, bien qu'ici seule une partie du réglage ait été étudiée. Le rendement atteint avec la configuration de recuit des contacts la plus favorable est de 17,98 %, contre 18,26 % au maximum pour une cellule de 180 µm réalisée dans les mêmes conditions. Les valeurs de V_{oc} , de R_s et de R_{sh} sont très proches dans les deux cas. La différence principale qui explique l'écart de performance réside dans le courant de court-circuit I_{sc} plus faible de 0,2 A soit 2,3 %. Cette diminution du courant généré peut être expliquée par l'augmentation de la réflectivité de la face avant liée à la diminution de l'épaisseur des plaquettes observée précédemment, ainsi qu'à la diminution de l'absorption liée au même phénomène (voir Annexe).

Tableau II-12 : caractéristiques électriques obtenues pour les différentes températures de recuit des contacts étudiées pour les cellules de 120 µm

T (°C)	P_{mpp} (W)	V_{oc} (mV)	I_{sc} (A)	R_s (mΩ)	R_{sh} (Ω)	η (%)	FF (%)
730	2,61	0,614	8,30	21,14	20,22	10,72	51,1
770	4,377	0,626	9,19	4,18	22,17	17,98	76,1
800	4,369	0,623	9,20	3,71	33,76	17,95	76,2
830	4,297	0,623	9,12	4,01	25,67	17,66	75,6

La diminution de l'épaisseur des cellules entraîne donc, à conditions de fabrication égales, des pertes notamment au niveau du courant généré par les cellules, en comparaison d'autres cellules d'épaisseur standard. Dans le cadre de cette étude, ces pertes ont été évaluées à 0,3 % de rendement absolu, car aucune mesure d'adaptation n'a été prise pour compenser les pertes inhérentes à la diminution d'épaisseur. Il a été démontré dans d'autres études que de telles pertes pouvaient être compensées jusqu'à une épaisseur de 80 μm environ, en optimisant la réflexion en face arrière et si la cellule était correctement passivée [92]. Ici, il va être impossible d'améliorer les propriétés du réflecteur en face arrière, puisque la partie suivante vise à le retirer pour créer de la bifacialité.

Le fléchissement des cellules minces a été mesuré mécaniquement. La flèche est évaluée à 6,25 mm pour les cellules de 120 μm , valeur 3 fois plus importante que pour les cellules de 180 μm d'épaisseur. Cette forte valeur est également liée aux conditions de recuit des contacts dont les températures sont relativement hautes pour les cellules étudiées. La déformation est très nettement visible à l'œil nu (cf. Figure II-35), et rend en l'état toute tentative de connexion par le moyen de rubans compliquée, avec multiplication du risque de casse.



Figure II-35 : le fléchissement observé sur les cellules minces après recuit des contacts est visible à l'œil nu.

Il faudra donc se focaliser sur la passivation des cellules minces pour les approcher d'un niveau de performance équivalent aux cellules d'épaisseur classique, tout en sachant que l'apport de lumière par la face arrière contribuera à l'augmentation des performances. De plus, cette comparaison n'est valable que dans les conditions idéales où la lumière arrive en incidence normale, condition qui n'apparaît quasiment jamais en conditions réelles d'utilisation, et d'autant moins dans le domaine du BIPV. En conclusion de cette partie, pour évaluer réellement l'intérêt de la diminution de l'épaisseur pour des cellules bifaciales, il faudrait comparer l'incidence sur le rendement en conditions réelles aux économies réalisées à l'échelle d'une production industrielle, chose qui n'a pas été faite ici.

II-3.4. Cellules PERC bifaciales

Les motifs de métallisation conçus pour réduire la déformation des cellules ainsi que la quantité d'aluminium sont présentés dans la partie II-2.4. Ils permettent d'ouvrir la face arrière de la cellule pour laisser passer le rayonnement solaire. La bifacialité ainsi induite peut permettre, sous certaines conditions favorables, une augmentation de la performance. Du courant électrique peut en effet être créée à partir des deux côtés de la cellule, augmentant la puissance totale produite. Les modules bifaciaux sont également plus durables une fois installés, car présentant deux côtés résistant aux UV [110].

Le facteur de bifacialité φ caractérise ce type de cellules. Il est donné par le rapport entre le rendement de la face avant et celui de la face arrière :

$$\varphi = \frac{\eta_{arri\grave{e}re}}{\eta_{avant}} \quad (\text{II.18})$$

Dans la plupart des cas, φ est inférieur à 1 car les cellules bifaciales n'ont pas une structure symétrique : l'émetteur et le BSF présente des propriétés différents, et la métallisation reste optimisée pour une maximisation du rendement avant. Malgré cela, la bifacialité permet en général, en récupérant le rayonnement diffus de l'albédo de produire plus de puissance qu'une cellule monofaciale bien optimisée optiquement.

II-3.4.1. Procédé de fabrication

Pour caractériser les conséquences de l'application d'une telle structure sur les cellules PERC développées par l'entreprise S'Tile, quatre groupes de cinq cellules ont été réalisés. Il s'agit de cellules de 156 x 156 mm² et de 120 μm d'épaisseur réalisées à partir de plaquettes de silicium monocristallin de type p. Comme dans la partie II-3.1, ces plaquette ont été envoyées à l'institut ECN, pour décapage des dommages de sciage et nettoyage, puis texturation dans une solution de KOH. Les émetteurs de type n ont été réalisés par implantation de phosphore, toujours avec une dose d'ions implantés d'environ 2,5.10¹⁵ cm⁻² et une énergie d'implantation de 15 keV. Les cellules ont été recuites dans la condition standard, pour former une couche mince d'oxyde thermique.

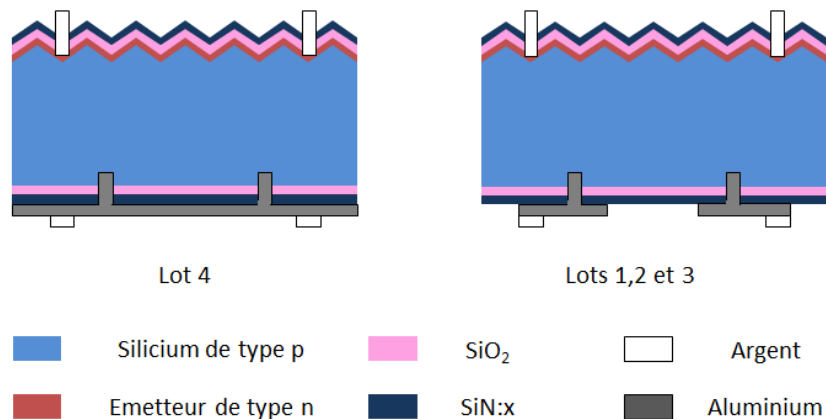


Figure II-36 : structure des cellules réalisées. Les cellules du lot 4 présentent une face arrière fermée, tandis que la face arrière des cellules des trois autres lots est ouverte. Les cellules n'ont pas reçu de dépôt d'alumine en face arrière, pour des raisons de disponibilité de la machine. Cependant, ça ne devrait pas gêner la comparaison des cellules entre elles.

Toutes les cellules ont subi un dépôt de nitrure PECVD de 70 nm environ sur la face avant, afin d'optimiser les propriétés de réflexion et de passivation, et de 120 nm sur la face arrière, dépôt réalisé à l'ISC Konstanz. Les ouvertures dans la couche de diélectrique en face arrière ont

également été réalisées à l'ISC, au moyen d'un laser femtoseconde d'une longueur d'onde de 540 nm.

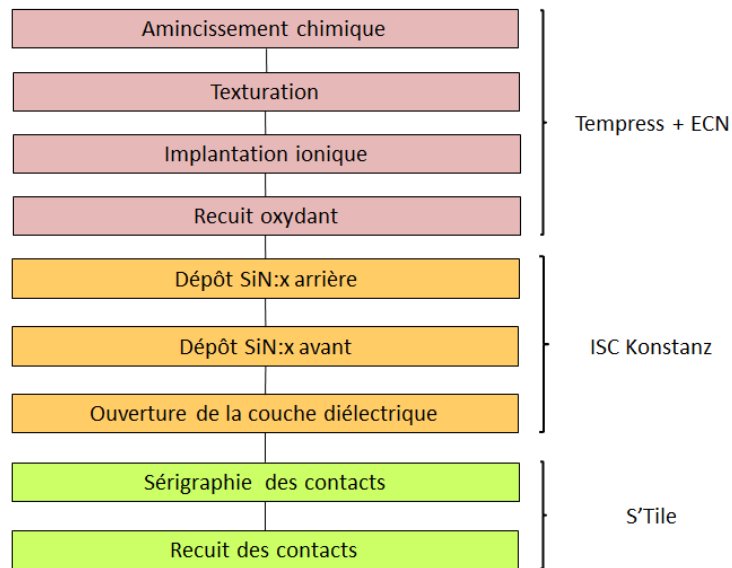


Figure II-37 : étapes du procédé de fabrication des cellules PERC destinées aux tests de métallisations ouvertes en face arrière.

Les cellules ont finalement été métallisées par sérigraphie à S'Tile. Chacun des différents groupes d'échantillons a reçu un des motifs de métallisation décrits dans la partie II-2.4, de la manière suivante : i) le premier lot a reçu une impression d'aluminium en face arrière suivant le motif A, ii) le second lot a reçu une impression d'aluminium en face arrière suivant le motif B, iii) le troisième lot a reçu une impression d'aluminium en face arrière suivant le motif C, iv) le dernier lot a reçu une impression standard d'aluminium sur l'entièreté de la face arrière.

Tableau II-13 : description des masques de sérigraphie utilisés pour la réalisation des motifs ouverts en face arrière.

Masque de sérigraphie Al	A	B	C
Espacement entre bandes	1000 μm	1000 μm	1000 μm
Largeur des bandes	80 μm	300 μm	800 μm
Taux d'ouverture face arrière	92,2 %	70,8 %	21,5 %

Elles ont subi, dans l'ordre, l'impression des busbars d'argent en face arrière avec de la pâte métallique de marque Heraeus. Puis la plaque d'aluminium en face arrière a été imprimée à l'aide de pâte spéciale pour cellules PERC fabriquées par l'entreprise Monocrystal. La grille d'argent en face avant a été réalisée à l'aide de pâte standard Heraeus pour face avant. Les trois pâtes métalliques ont été recuites ensemble pendant 30 s à environ 800 °C.

La qualité des contacts réalisés par sérigraphie a été caractérisée au microscope optique, après quoi les cellules ont été mesurées électriquement. Les courbes I(V) de la face avant ont été mesurées avec le simulateur solaire de S'Tile. Des mesures complémentaires des courbes I(V) des

faces avant et arrière ont été effectuées à l'INL car elles nécessitaient un support qui puisse bien contacter à la fois les faces avant et arrière, indisponible sur le simulateur de S'Tile qui a été modifié pour mesurer des quarts de cellules, comme il le sera expliqué par la suite. Enfin, le fléchissement des cellules a été mesuré.

II-3.4.2. Résultats

Les motifs de métallisation d'aluminium de la face arrière décrits dans la partie précédente ont été sérigraphiés sur des plaquettes minces dans le but de diminuer la quantité de pâte métallique utilisée, d'ouvrir la face arrière pour créer de la bifacialité, et de réduire le fléchissement observé pour les cellules minces après recuit des contacts. Les cellules utilisées sont issues du même lot que les cellules de la partie précédente, et possèdent donc les mêmes propriétés de texturation et de réflectivité en face avant, des émetteurs réalisés dans des conditions identiques, et ne sont pas polies en face arrière. Les motifs A, B, et C (voir Tableau II-14) ont été imprimés sur des lots de six cellules, qui ont par ailleurs reçu une impression des contacts d'argent avant et arrière dans les mêmes conditions que les cellules réalisées précédemment. Les contacts métalliques ont ensuite été recuits dans les conditions déterminées dans la partie II-3.1.

Tableau II-14 : rappel des trois motifs étudiés pour le dépôt d'aluminium en face arrière

Masque de sérigraphie Al	A	B	C
Espacement entre bandes	1000 μm	1000 μm	1000 μm
Largeur des bandes	80 μm	300 μm	800 μm
Taux d'ouverture face arrière	92,2 %	70,8 %	21,5 %

Une observation au microscope optique des cellules imprimées avec le motif C ne montre pas de défaut visible d'impression. Les bandes d'aluminium font en réalité 750 μm de large, soit 50 μm de moins qu'en théorie (cf. Figure II-39). L'étalement naturel de la pâte d'aluminium pendant la sérigraphie a en effet été surévalué, et la largeur des bandes du masque de sérigraphie a été réduite trop fortement. Le taux d'ouverture réel de la face arrière est donc plus proche de 26 %. L'aluminium est correctement aligné avec les ouvertures laser, et contacte les busbars d'argent de manière efficace, comme montré sur la Figure II-38.

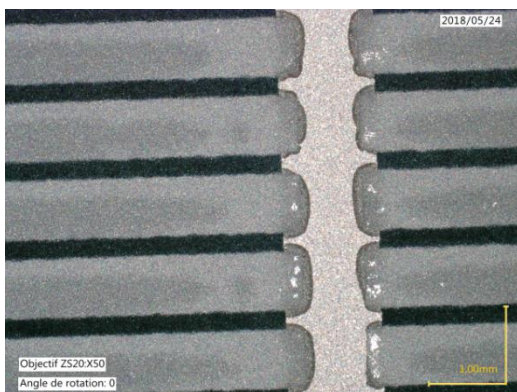


Figure II-38 : microscopie du motif d'aluminium C imprimé sur la face arrière d'une cellule (détail). Les bandes d'aluminium (gris) sont sérigraphiées perpendiculairement aux busbars d'argent (blanc).



Figure II-39 : la largeur d'une bande d'aluminium du motif C est en réalité de 750 μm .

L'impression du motif B est correctement alignée avec les ouvertures dans le diélectrique et également avec les busbars d'argent. La largeur réelle des motifs est cependant de 370 μm , contrairement aux 300 μm prévus initialement, pour un taux d'ouverture réel de 64 % environ de la face arrière. Des défauts locaux d'impression sont constatés, comme des arrachements des bandes d'aluminium sur des longueurs de quelques centaines de μm , comme le montre la Figure II-41. Ces défauts sont relativement fréquemment observés sur les cellules du lot B et semblent liés à la nature même de la pâte d'aluminium utilisée pour l'impression. Celle-ci est en effet prévue pour l'impression de grandes surfaces et a tendance à beaucoup s'étaler (un étalement de 20 % environ a été constaté). Ceci donne naissance à des dépôts peu épais (environ 5 μm de hauteur) qui ont tendance à être fragiles durant le recuit des contacts si les motifs imprimés sont eux-mêmes fins (largeur inférieure à 500 μm). A titre d'exemple, la hauteur d'un finger d'argent en face avant est d'environ 15 à 20 μm [111], ce qui assure une meilleure solidité mécanique, ainsi qu'une meilleure conductivité.

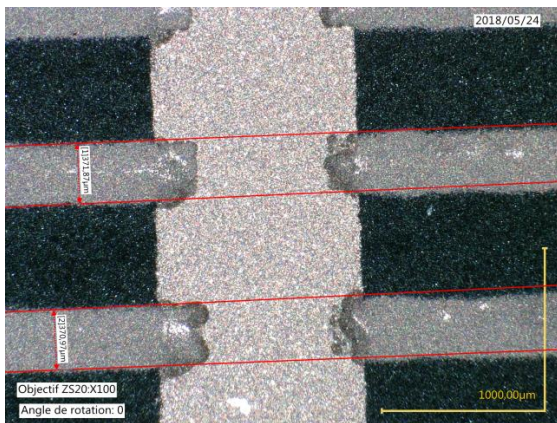


Figure II-40 : la largeur d'une bande d'aluminium du motif B est en réalité de 370 μm .

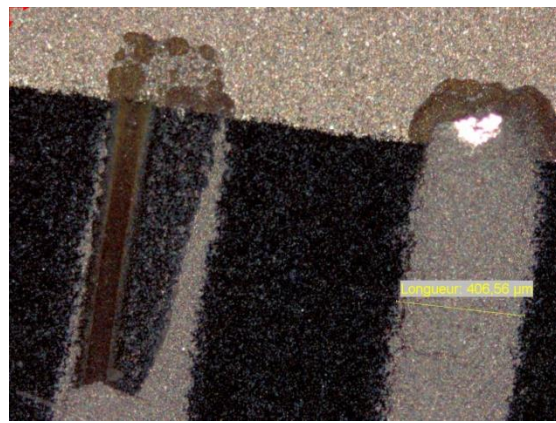


Figure II-41 : microscopie d'un des défauts d'impression observé sur les bandes d'aluminium du motif B après recuit. L'ouverture laser est visible sous la bande d'aluminium (en brun).

Les cellules dont la face arrière a été sérigraphiée suivant le motif A présentent plus de défauts. En plus des arrachements locaux de l'aluminium, similaires à ceux constatés sur le motif B, mais plus fréquents encore, la majeure partie des bandes d'aluminium souffre de défauts d'alignements et n'est pas imprimée au niveau des ouvertures laser, mais directement sur la couche diélectrique. Ce défaut est visible sur la Figure II-42, et est d'ordre technologique. La machine de sérigraphie utilisée ne dispose pas d'outil d'alignement intégré pour une bonne superposition du métal sur les ouvertures conductrices. Cependant, certaines machines en sont équipées, et sont tout à fait capables de réaliser ce genre d'impression, comme cela a d'ailleurs été réalisé dans l'étude du Chapitre IV.

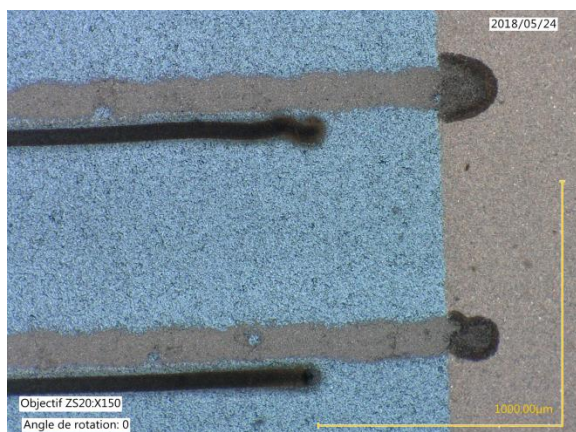


Figure II-42 : l'impression des bandes du motif A n'est pas alignée sur les ouvertures dans le diélectrique (noir).

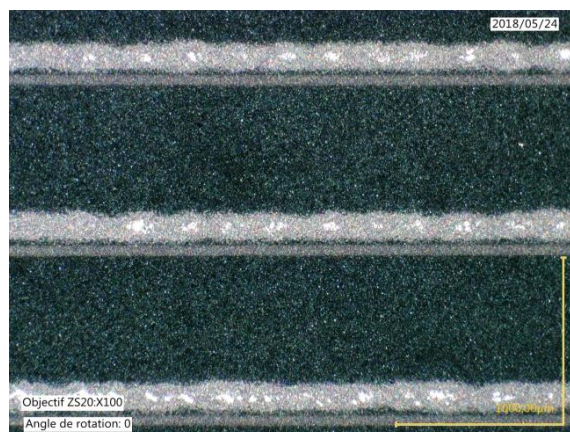


Figure II-43 : la largeur d'une bande d'aluminium du motif A est en réalité de 130 µm.

Les cellules issues des trois lots ont ensuite été mesurées au simulateur solaire et comparées avec un lot de six cellules de référence sérigraphiées avec un dépôt d'aluminium pleine plaque en face arrière et recuites dans les mêmes conditions. Les résultats sont donnés dans les tableaux suivants.

Tableau II-15 : caractéristiques électriques des cellules avec face arrière de référence

échantillon	P_{mpp} (W)	V_{oc} (mV)	I_{sc} (A)	R_s (m Ω)	R_{sh} (Ω)	η (%)	FF (%)
R1	4,37	625	9,19	4,52	15,28	17,98	75,5
R2	4,39	624	9,20	4,07	30,86	18,04	75,8
R3	4,40	625	9,18	3,98	24,85	18,06	76,0
R4	4,37	624	9,17	4,00	24,65	17,96	75,6
R5	4,35	622	9,13	4,12	28,76	17,88	75,9
R6	4,39	625	9,19	3,72	34,50	18,05	75,8
moyenne	4,38	624	9,18	4,07	26,48	17,99	75,7

Tableau II-16 : caractéristiques électriques des cellules avec motif C imprimé en face arrière

échantillon	P_{mpp} (W)	V_{oc} (mV)	I_{sc} (A)	R_s (m Ω)	R_{sh} (Ω)	η (%)	FF (%)
C1	4,33	618	9,14	4,16	27,15	17,78	76,5
C2	4,30	618	9,06	4,06	26,07	17,67	76,7
C3	4,40	624	9,22	4,14	30,53	18,09	76,5
C4	4,37	623	9,15	4,04	35,21	17,98	76,8
C5	4,34	623	9,09	4,24	40,64	17,83	76,6
moyenne	4,35	621	9,13	4,13	31,92	17,87	76,6

Tableau II-17 : caractéristiques électriques des cellules avec motif B imprimé en face arrière

échantillon	P_{mpp} (W)	V_{oc} (mV)	I_{sc} (A)	R_s (m Ω)	R_{sh} (Ω)	η (%)	FF (%)
B1	3,88	611	8,72	5,37	34,07	15,95	72,8
B2	3,90	612	8,74	5,34	33,29	16,03	72,8
B3	3,90	611	8,64	3,83	22,89	16,04	73,9
B4	3,92	611	8,75	5,20	37,52	16,10	73,1
moyenne	3,90	611	8,71	4,94	31,94	16,03	73,2

Tableau II-18 : caractéristiques électriques des cellules avec motif A imprimé en face arrière

échantillon	P_{min} (W)	V_{oc} (mV)	I_{sc} (A)	R_s ($m\Omega$)	R_{sh} (Ω)	η (%)	FF (%)
A1	1,61	601	6,01	37,88	32,07	6,61	44,5
A2	1,98	603	7,19	29,67	26,86	8,13	45,7
moyenne	1,79	602	6,60	33,78	29,47	7,37	45,1

On constate que les séries d'échantillons A et dans une moindre mesure B sont fortement affectées par les défauts d'impression constatés précédemment. Le contact électrique très faible en face arrière se traduit par des valeurs de résistance série très élevées, particulièrement visibles pour la série A, dans laquelle les cellules ne sont quasiment pas fonctionnelles en raison du contact presque inexistant. Ces valeurs de résistance série ont de fortes conséquences particulièrement sur le courant mesuré, mais la tension est également affectée. Il est donc difficile de commenter les effets de la réduction de la largeur des bandes d'aluminium en face arrière des cellules en dessous de 750 μm , tant les limites de la technologie utilisée pour l'étude dénaturent le résultat.

En se concentrant sur la comparaison entre les cellules imprimées avec le motif C et les cellules de référence, on constate une diminution du rendement de la face avant d'environ 0,1 % absolu. Ce résultat semble provenir de la diminution du courant I_{sc} et de la tension de circuit ouvert V_{oc} qui semble liée à la diminution de la réflectivité de la face arrière. L'aluminium constitue en effet un miroir qui renvoie dans la cellule les photons non absorbés lors d'un premier passage. Ce miroir couvre 100 % de la face arrière dans le cas de la cellule de référence, et seulement 69 % de la face arrière des cellules métallisées avec le motif C, ce qui peut expliquer cette différence de courant généré. Il est également constaté que la résistance série des cellules métallisées avec le motif d'aluminium C est plus élevée que celle des cellules de référence. Il est possible d'avancer l'hypothèse que cette différence de résistance série est provoquée par le taux inférieur de couverture de la face arrière par l'électrode de métal, entraînant une circulation du courant plus difficile vers les busbars d'argent.

A contrario, la résistance shunt semble améliorée pour les cellules du lot C. En effet, l'aluminium déposé par-dessus le nitrure en face arrière réagit avec ce dernier et a tendance à dégrader ses propriétés de passivation en créant une structure métal-isolant-semiconducteur (MIS) qui fait augmenter les recombinaisons SRH par la création d'un régime d'inversion faible en surface [112,113]. Le fait d'en déposer moins améliore donc la qualité de la passivation, bien qu'il n'ait pas été possible de quantifier ici dans quelle mesure. L'ouverture de la face arrière des cellules semble avoir de légères conséquences sur la diminution de la puissance électrique générée par la face avant des cellules, au moins en incidence normale. Ces pertes en face avant ne semblent pas pouvoir être compensées d'un point de vue technologique puisque plus d'ouverture de la face arrière signifie de facto moins de miroir en face arrière. Il faut cependant relativiser ce résultat, car la bifacialité qui en découle peut amener à des puissances supérieures pour peu que les conditions s'y prêtent, et parce qu'une fois de plus, les conditions d'incidence normale dans lesquelles l'étude est menée ne sont pas représentatives des conditions réelles d'utilisation des cellules.

De fait, les caractéristiques électriques de la face arrière des différentes cellules ont été mesurées au simulateur solaire et rassemblées dans le Tableau II-19. L'ouverture de la face arrière induit un courant généré par cette dernière qui semblerait proportionnel au taux d'ouverture, si on ne constatait pas de défauts de sérigraphie sur les bandes d'aluminium pour les motifs A et B, dont l'influence est visible de par les valeurs très faibles de FF mesurées, correspondant aux valeurs mesurées en face avant. Le courant de court-circuit s'élève à 1,86 A pour les cellules du lot C et 3,73 A pour les cellules du lot B, pour des rendements correspondant respectivement à 4,3 % et 7,1 %. Avec des coefficients de bifacialité respectifs de $\varphi_C = 0,24$ et $\varphi_B = 0,44$, les cellules obtenues ne sont pas au niveau des meilleures cellules bifaciales industrielles [114], mais l'ouverture de la face arrière permet un gain par rapport aux cellules de référence.

Tableau II-19 : caractéristiques électriques de la face arrière des cellules étudiées

série	Ouverture (%)	V_{oc} (mV)	I_{sc} (A)	η (%)	FF (%)
référence	2,3 %	0,449	0,09	0,1	55,8
C	26 %	0,568	1,86	4,3	75,5
B	64 %	0,587	3,73	7,1	69,7
A	87 %	0,579	2,36	3,5	40,6

Le fléchissement des plaquettes de 120 μm a été mesuré pour chaque type de métallisation arrière, comme montré sur la Figure II-44. L'introduction de motifs en forme de bande, même de 750 μm de large avec un taux d'ouverture de seulement 26 % permet de réduire le fléchissement des plaquettes minces d'un facteur 2. Le fléchissement disparaît quasiment si le taux d'ouverture de la face arrière passe à 64 %, et aucune évolution supplémentaire n'est constatée pour un taux d'ouverture de 87 %.

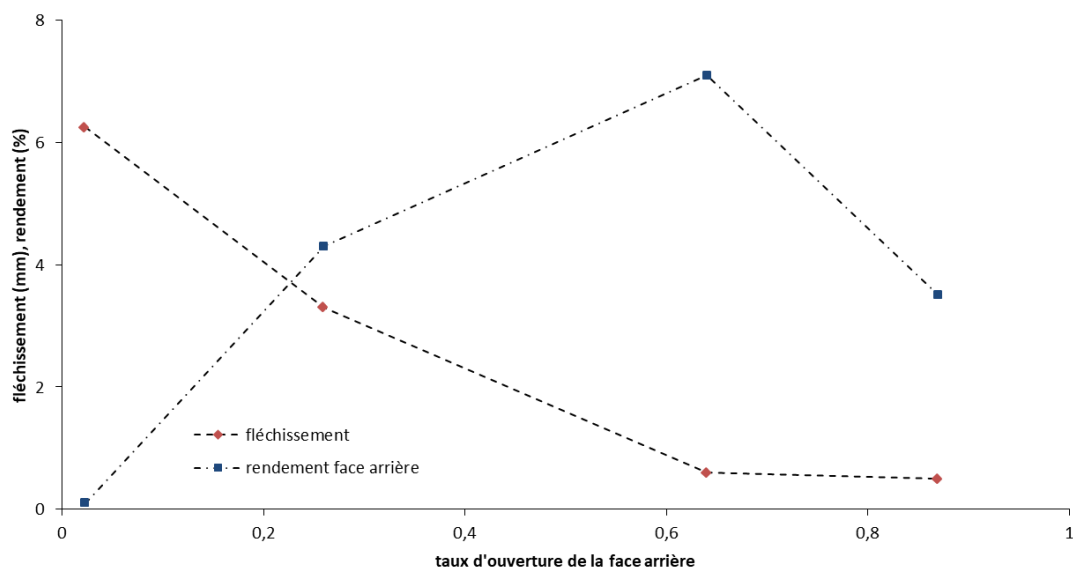


Figure II-44 : fléchissement des cellules et rendement mesuré en face arrière en fonction du taux d'ouverture de la face arrière.

CONCLUSION DU CHAPITRE

Au cours de ce chapitre, un procédé pour la réalisation de cellules à faces avant et arrière passivées à coût modéré a été mis au point.

Les procédés de fabrication qui permettraient une diminution des coûts ont été implémentés. La réalisation d'émetteurs par implantation ionique sur des cellules PERC de dimensions standard a permis l'obtention de meilleures propriétés de la face avant comparativement à des cellules industrielles réalisées par diffusion, tout en diminuant le nombre d'étapes de fabrication. L'implantation ionique est en effet appelée à devenir de plus en plus rentable économiquement, avec le développement de nouvelles machines industrielles. La suppression de la couche de nitrure anti-reflet a permis de vérifier qu'après encapsulation, la différence en termes de performances optiques est fortement atténuée en comparaison d'une couche anti-reflet standard. Cependant, cette différence est encore relativement importante, et il est pour l'instant difficile de réaliser les contacts métalliques par sérigraphie sur une couche anti-reflet composée uniquement d'oxyde.

Des cellules de type PERC ont été obtenues à partir de plaquettes de 180 et de 120 μm d'épaisseur. Le développement de motifs de métallisation en face arrière spécialement conçus pour cette étude a permis d'annuler le fléchissement habituellement observé sur les cellules PERC minces après recuit des contacts métalliques. Ce motif en forme de bandes d'aluminium perpendiculaires aux busbars arrière d'argent permet d'ouvrir plus ou moins la face arrière en fonction de la largeur desdites bandes, et confère la propriété de bifacialité à la cellule, qui génère du courant par la face arrière. L'utilisation de bandes de 800 μm de large espacées de 1 mm semblent diminuer très légèrement les propriétés de la face avant, mais apportent un bénéfice supérieur au niveau de la face arrière. Il n'a cependant pas été possible d'investiguer avec précision les résultats liés à l'utilisation de bandes d'aluminium plus fines, en raison de défauts de sérigraphie, liés aux pâtes et à la machine utilisées. Ces défauts sont améliorables par le changement d'équipement. Les meilleurs prototypes obtenus présentent un rendement de 18,3 % en face avant et de 4,3 % en face arrière. La limitation actuelle des rendements est liée à des limites technologiques et de conception et semble pouvoir être fortement améliorée. Des travaux réalisés simultanément à cette étude montrent un potentiel d'amélioration pour les rendements de ce type de cellules PERC, en face avant comme en face arrière [115]. Il semble donc possible de fabriquer des cellules bifaciales avec des équipement standard, pour un coût à minima équivalent à celui de PERC classique, et sans doute légèrement inférieur.

REFERENCES DU CHAPITRE II

- 61 King W. J. et Burrill J. T., « Solar Cells Produced by Ion Implantation Doping », *Proceeding of the 4th Photovoltaic Specialist Conference*, 1964, 24 p.
- 62 Hieslmair H. et al., « Advantages of Ion Implantation for Solar Cells », *Proceedings of the 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2011, pp. 1252-1256.
- 63 A. Metz *et al.*, *International Technology Roadmap for Photovoltaics 9th Edition*, 2018, 70 p.
- 64 Li H. et al., « POCl₃ Diffusion for Industrial Si Solar Cell Emitter Formation », *Frontiers in Energy*, vol. 11, n° 1, 2017, pp. 42-51.
- 66 Biro D. et al., « Thermal oxidation as a key technology for high efficiency screen printed industrial silicon solar cells », *Proceedings of the 34th IEEE Photovoltaic Specialist Conference*, 2009, pp. 1594-1599.
- 67 Hieslmair H et al., « High Throughput Ion-Implantation for Silicon Solar Cells », *Energy Procedia*, vol. 27, 2012, pp. 122-128.
- 68 Rohatgi A. et al., « High-Throughput Ion-Implantation for Low-Cost High-Efficiency Silicon Solar Cells », *Energy Procedia*, vol. 15, 2012, pp. 10-19.
- 69 Titov V. V., « Diffusion and Defect Annealing in Silicon Doped by Phosphorus Ion Implantation », *Physica Status Solidi*, vol. 2, n° 2, 1970, pp. 203-209.
- 70 Lanterne A. et al., « Annealing, Passivation and Contacting of Ion Implanted Phosphorus Emitter Solar Cells », *Energy Procedia*, vol. 27, 2012, pp. 580-585.
- 71 RASIRC, *Silicon Dioxide Layer Key to High Efficiency Silicon Solar Cells*, éditeur: RASIRC, 2008, 9 p.
- 72 Zhao J. et Green M. A., « Optimized Antireflection Coatings for High-Efficiency Silicon Solar Cells », *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 38, n° 8, 1991, pp. 1925-1934.
- 73 Chen N., Tate K., et Ebong A., « Generalized Analysis of the Impact of Emitter Sheet Resistance on Silicon Solar Cell Performance », *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 54, n° 8S1, 2015, 4p.
- 74 Wu J. et al., « Application of ion Implantation Emitter in PERC Solar Cells », *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 4, n° 1, 2014, pp. 52-57.
- 75 Cheng Y. T. et al., « Efficiency Improved by H₂ Forming Gas Treatment for Si-Based Solar Cell Applications », *International Journal of Photoenergy*, vol. 2010, 2010, pp. 1-6.
- 76 Percec J. L. et al., « 19.3% Efficiency on P-Type Silicon Solar Cells by Pulsion® Plasma-Immersion Implantation », *Energy Procedia*, vol. 33, 2013, pp. 18-23.
- 77 Brickman L. A., « A Unified Thick/Thin-Film Optical Model for Silicon Solar Cells and Modules », *Proceedings of the 7th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 1988, pp. 1050-1054.
- 78 Born M. et Wolf E., *Principles of Optics*, 5^{ème} édition, éditeur : New-York : Pergamon, 1975, 952 p.
- 79 Green M. A., « Higher Efficiency Silicon Solar Cells », *Aedermannsdorf Trans Tech Publications*, 1987, 13 p.

- 80 Chongsawangvirod S., « Refractive Index Profiles of Thermally Grown and Chemically Vapor Deposited Films on Silicon », *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 137, n° 11, 1990, pp. 3536-3547.
- 81 Sopori B. L., « Effects of Encapsulation on the Performance of Silicon Solar Cells », *Proceedings of the 15th IEEE Photovoltaic Specialist Conference*, vol. 17, 1990, pp. 618-623.
- 82 Luque A. et Hegedus S., *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering Second Edition*, éditeur : John Wiley & Sons, 2011, 1132 p.
- 83 Yoon D. H., Yoon S. G., et Kim Y. T., « Refractive Index and Etched Structure of Silicon Nitride Waveguides Fabricated by PECVD », *Thin Solid Films*, vol. 515, n° 12, 2007, pp. 5004-5007.
- 84 Aberle A. et al., « Surface Passivation of High Efficiency Silicon Solar Cells », *Proceedings of the IEEE Conference on Photovoltaic Specialists*, vol. 1, 1990, pp. 233-238.
- 85 Duttagupta S., et al., « Optimised Antireflection Coatings using Silicon Nitride on Textured Silicon Surfaces based on Measurements and Multidimensional Modelling », *Energy Procedia*, vol. 15, 2012, pp. 78-83.
- 86 Cid M. et al., « Improvements in anti-reflection coatings for high-efficiency silicon solar cells », *Surface and Coatings Technology*, vol. 106, n° 2-3, 1998, pp. 117-120.
- 87 Metz A. et al., « Industrial High Performance Crystalline Silicon Solar Cells and Modules Based on Rear Surface Passivation Technology », *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 120, 2014, pp. 417-425.
- 88 McCann M. J., Weber K. J., et Blakers A. W., « Short Communication: Surface Passivation by Rehydrogenation of Silicon-Nitride-Coated Silicon wafers », *Progress in Photovoltaics*, vol. 13, n° 3, 2005, 5 p.
- 89 International Renewable Energy Agency, *Renewable Energy Cost Analysis : Solar Photovoltaics*, éditeur : IRENA, 2017, 45 p.
- 90 Louwen A. et al., « A Coast Roadmap for Silicon Heterojunction Solar Cells », *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 147, 2016, pp. 295-314.
- 91 Goodrich A. et al., « A Wafer-Based Monocrystalline Silicon Photovoltaics Road Map: Utilizing Known Technology Improvement Opportunities for Further Reductions in Manufacturing Costs », *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 114, 2013, pp. 110-135.
- 92 Kowalczewski P. et Andreani L. C., « Towards the Efficiency Limits of Silicon Solar Cells: How thin is too thin? », *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 143, 2015, pp. 260-268.
- 93 Tool C. J. J. et al., « Influence of Wafer Thickness on the Performance of Multicrystalline Si Solar Cells: an Experimental Study », *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 10, n° 4, 2002, pp. 279-291.
- 94 Popovich V. A. et al., « Understanding the Properties of Silicon Solar Cells Aluminium Contact Layers and Its Effects on Mechanical Stability », *Materials Science and Applications*, vol. 4, n° 2, 2013, pp. 118-127.
- 95 Hilali M. M., Gee J. M. et Hacke P., « Bow in Screen-Printed Back-Contact Industrial Silicon Solar Cells », *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 91, 2007, pp. 1228-1233.
- 96 Lamers M. W. P. E. et al., « Interface Properties of a-SiN_x:H/Si to Improve Surface Passivation », *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 106, 2012, pp. 17-21.

- 97 Chen Z. et al., « Defect Passivation in Multicrystalline-Si Materials by Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition of SiO₂/SiN Coatings », *Applied Physics Letters*, vol. 65, n° 16, 1994, pp. 2078-2080.
- 98 S. Kleekajai et al., « Infrared Study of the Concentration of H Introduced into Si by the Postdeposition Annealing of a SiN_x Coating », *Journal of Applied Physics*, vol. 106, n° 12, 2009, 5 p.
- 99 Du Z. et al., « Rear-Side Contact Opening by Laser Ablation for Industrial Screen-Printed Aluminium Local Back Surface Field Silicon Wafer Solar Cells », *Energy Procedia*, vol. 25, 2012, pp. 19-27.
- 100 Cui J. et al., « Localised Back Surface Field Formation via Different Dielectric Patterning Approaches », *Proceedings of the Australian Solar Energy Society Conference*, 2012, 11 p.
- 101 Bounaas L. et al., « Laser Ablation of Dielectric Layers and Formation of Local Al-BSF in Dielectric back Passivated Solar Cells », *Energy Procedia*, vol. 38, 2013, p. 670-676.
- 102 Kwon T. et al., « The Effect of Firing Temperature Profiles for the High Efficiency of Crystalline Si Solar Cells », *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 94, n° 5, 2010, pp 823-829.
- 103 Müller M. et al., « Loss Analysis of 22% Efficient Industrial PERC Solar Cells », *Energy Procedia*, vol. 124, 2017, pp. 131-137.
- 104 Olaisen B. R., Holt A., et Marstein E. S., « Optimization of a Firing Furnace », *Proceedings of the 21th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2006, pp. 1083-1087.
- 105 Cornagliotti E. et al., « How Much Rear Side Polishing is Required? A Study on the Impact of Rear Side Polishing in PERC Solar Cells », *Proceedings of the 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2012, pp. 561-566.
- 106 Dauwe S. et al., « Experimental evidence of parasitic shunting in silicon nitride rear surface passivated solar cells: Shunting in Silicon Nitride Rear Surface Passivated Solar Cells », *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 10, n° 4, 2002, pp. 271-278.
- 107 Yerkes J. W. et Avery J. E., « Solar Cell with Improved Printed Contact and Method of Making the Same », Brevet américain n° 05/890167, 1979, 6 p.
- 108 Ralph E. L., « Recent Advances in Low Cost Solar Cell Processing », *Proceedings of the 11th IEEE Photovoltaic Specialists*, 1975, pp. 315-316.
- 109 Sopori B., Mehta V., et Reedy R., « Using Silicon Injection Phenomenon During Fire-Through Contact Formation to Improve Process Control and Performance of Screen-Printed Multicrystalline-Silicon Solar Cells », *Proceedings of the 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2010, pp. 3614-3617.
- 110 Pickerel K., « What are Bifacial Solar Modules? » in *Solar Power World Online*, <https://www.solarpowerworldonline.com/2018/04/what-are-bifacial-solar-modules/>, consulté en avril 2018.
- 111 Chen Y. et al., « Front Metal Finger Inhomogeneity: Its Influence on Optimization and on the Cell Efficiency Distribution in Production Lines », *Energy Procedia*, vol. 98, 2016, pp. 30-39.
- 112 Dupuis J. et al., « Rear passivation schemes for industrial silicon solar cells », *Proceeding of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2008, 5 p.
- 113 Agostinelli G. et al., « Rear Surface Passivation for Industrial Solar Cells on Thin Substrates », *Proceedings of the 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference*, vol. 1, 2006, pp. 1004-1007.

114 Romijn I., « Bifacial Solar Cells : a Brief Overview », *présentation lors du Bifi PV Workshop, 2017, 28 p.*

115 Lohmüller E. et al., « Bifacial p-type silicon PERL solar cells with screen-printed pure silver metallization and 89% bifaciality », *Proceedings of the 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2017, 6 p.*

Chapitre III : Réalisation de modules à partir du concept i-Cell appliqué à des cellules avec métallisation à l'avant

INTRODUCTION

Les efforts déployés dans le chapitre précédent pour réaliser des cellules à bas coût et à hauts rendements sont aujourd'hui indispensables tant le marché photovoltaïque est concurrentiel. Cependant, l'étude sur les cellules uniquement ne se suffit plus à elle-même. Le temps du progrès constant quant aux performances des cellules et la course aux rendements est révolu, car la technologie devient mature et seuls des gains infimes sont encore possibles dans le cas des cellules de silicium cristallin, à l'exception probables des cellules HIT [116].

Afin de maximiser la puissance générée par effet photovoltaïque, il convient de considérer, en plus de l'optimisation des cellules, l'adaptation de leur interconnexion et de leur intégration dans le module. Cette approche n'a été que très récemment appréhendée [117] mais devient indispensable pour les industriels qui produisent des cellules de plus en plus puissantes. Il est courant de trouver des cellules présentant de très hauts rendements en conditions de laboratoire, mais qui perdent une partie importante de leurs performances dès lors qu'elles sont assemblées en modules [1]. Une partie de ces pertes provient des conditions réelles d'utilisation qui diffèrent des conditions idéales réunies lors des tests, et de la dégradation des performances qu'elles peuvent induire sur les modules. Cependant, les pertes majeures observées entre la puissance générée par une cellule seule et celle générée par la même cellule au sein d'un module proviennent de la manière même dont les cellules sont assemblées et interconnectées, comme montré dans le chapitre I.

III-1. OBJECTIFS

Afin de réduire les pertes résistives liées à l'interconnexion des cellules lors de la mise en module, la conception de modules réalisés à partir de sous-cellules sera étudiée. Inspirée de l'i-Cell développée par S'Tile, la séparation d'une cellule solaire en plusieurs sous-cellules connectées en série permet d'augmenter la tension et de réduire le courant produit par un module photovoltaïque. Cette diminution du courant entraîne théoriquement la diminution des pertes résistives. Cette approche a été étudiée par ailleurs et des modules utilisant des sous-cellules ont été produits de manière industrielle avant la publication de ces travaux [118]. Les modules spécifiques développés dans cette étude se distinguent néanmoins par leur mode de connexion qui permet une plus grande flexibilité d'assemblage et une réduction de la quantité de cuivre utilisée, comme il le sera vu au cours du chapitre. Ces ajustements nécessitent la mise au point de motifs de métallisation pour la face avant des sous-cellules, qui seront conçus et étudiés. Ultiment des modules seront réalisés à partir de sous-cellules, et leurs performances seront comparées à celles de modules réalisés dans les mêmes conditions avec des cellules de forme standard.

Les sous-cellules utilisées pour la réalisation de ces modules auraient dû être issues de cellules PERC spécifiques développées dans le chapitre précédent. Le faible nombre d'échantillons réalisés n'a pas permis de remplir cet objectif, et les modules ont été réalisés à partir de cellules commerciales.

III-2. PROCÉDES EXPERIMENTAUX

La méthode étudiée pour augmenter les performances des modules photovoltaïques présentée ici s'appuie sur deux procédés principaux qui seront décrits ci-après. Il s'agit de la découpe de cellules photovoltaïques carrées en sous-cellules rectangulaires à l'aide d'un laser d'une part, et du développement de motifs de métallisation spécifique d'autre part.

III-2.1. Découpe en sous-cellules

Comme vu précédemment, il a été tenté dans ces travaux de découper des cellules de taille et de forme standard (carrés de $156 \times 156 \text{ mm}^2$), en sous cellules rectangulaires. Comme pour le concept i-Cell original, les cellules ont été découpées en quatre sous-cellules rectangulaires de dimensions identiques ($39 \times 156 \text{ mm}^2$). D'autres dimensions de sous-cellules ont également été réalisées en parallèle de cette étude, et selon les mêmes principes, mais ne seront pas détaillées ici. L'avantage de cette méthode comparée à l'i-Cell est qu'elle apporte les mêmes avantages de réduction de pertes résistives dans les modules et de gain de compacité, tout en étant théoriquement compatible avec n'importe quel type de cellule réalisée sur des plaquettes mono ou multicristallin. Il est donc possible d'adapter ce procédé à des cellules industrielles, actuellement moins chères à produire en masse que des cellules minces et compatibles avec des applications commerciales immédiates.

III-2.1.1. Approche

L'étape de découpe s'insère dans le procédé de fabrication des cellules après les étapes de *front end* qui vont de la texturation jusqu'au dépôt des films de passivation et anti-reflet, et les étapes de *back-end* que constituent la sérigraphie et le recuit des contacts métalliques, comme montré dans la Figure III-1. L'obtention de quarts de cellules ne nécessite donc réellement aucune modification du procédé de fabrication des cellules. Seul le masque de sérigraphie doit être modifié, comme il le sera montré dans la partie III-2.2. Cette méthode peut donc être appliquée aux cellules PERC développées précédemment afin d'augmenter leur performance une fois connectées en modules.

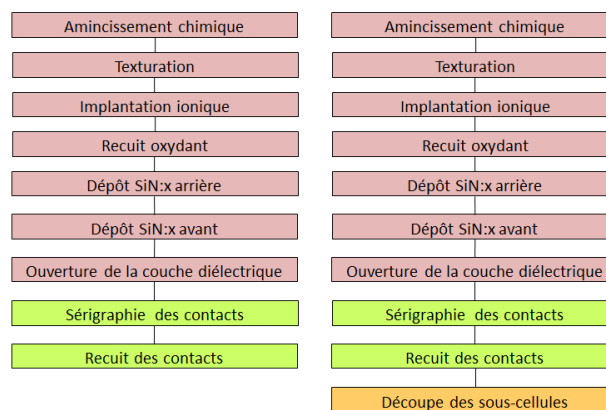


Figure III-1 : procédure de fabrication de cellules PERC standard (à gauche), comparée à la fabrication de sous-cellules PERC (droite). Seule une étape de découpe est ajoutée en fin de procédé (back-end).

Dans le cadre de cette étude, la découpe des cellules en sous-cellules est réalisée par un laser industriel émettant un faisceau pulsé infra-rouge, disponible sur la ligne pilote de la société S'Tile. Il permet de réaliser, en un ou plusieurs passages, un trait d'amorce dans un côté de la plaquette. Il suffit alors de cliver le cristal selon le trait d'amorce pour obtenir une découpe nette.

L'inconvénient majeur de la découpe laser de cellules photovoltaïques est qu'elle peut sous certaines conditions entraîner la dégradation du silicium et une diminution de la performance. Les principaux effets secondaires de la découpe sont les suivants : i) l'amorce par laser entraîne des dégâts d'origine thermique qui précipitent la formation de cavités et de microfissures au niveau du trait de découpe [119] ; ii) après clivage, le rapport bord/surface de la cellule augmente. Les bords de cellules sont des zones de recombinaisons importantes, d'autant plus que les bords créés après découpe laser ne sont pas passivés. Ils entraînent donc une perte modérée de rendement, qui peut aller jusqu'à 0,1 % absolu [120]. Il convient donc d'optimiser cette étape, de manière à limiter la perte au minimum.

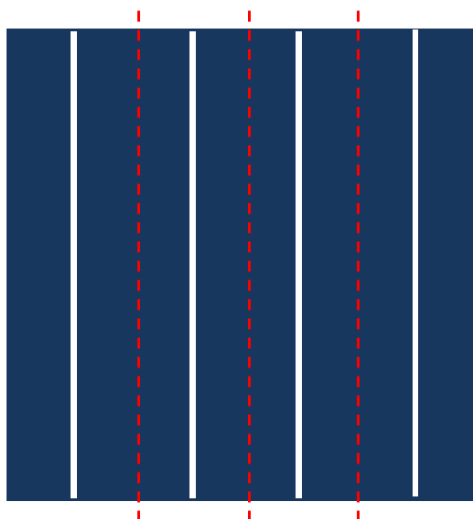


Figure III-2 : représentation schématique du positionnement des traits d'amorce laser (en rouge) utilisés pour découper des prototypes de sous-cellules à partir de cellules standard à quatre busbars.

Pour ce faire, une étude a été menée sur des cellules PERC commerciales. Ces cellules ont été caractérisées au simulateur solaire, puis amorcées à l'aide du laser au ras des busbars, de manière à former des sous-cellules mesurables (voir Figure III-2). La forme, la taille et la qualité des amorces ont été observées au microscope optique. Les sous-cellules ont ensuite été clivées puis caractérisées à l'aide d'un simulateur solaire Berger initialement de classe AAA, modifié spécialement pour pouvoir mesurer des sous-cellules, comme décrit dans la Figure III-3. Les barrettes de mesures destinées à contacter les busbars arrière des cellules ont été remplacées par une plaque conductrice, qui permet de stabiliser la sous-cellule dans le cas où son busbar est centré. En faisant varier les paramètres de puissance, de fréquence des impulsions et de vitesse de balayage du laser et le nombre de passages, comme indiqué dans le Tableau III-1, il a été possible de déterminer les conditions pour lesquelles les pertes de puissance en passant de la cellule à la sous-cellule étaient minimales.



Figure III-3 : photographie du simulateur solaire modifié pour la mesure de sous-cellules. La plaque recouverte d'or permettant de contacter l'arrière des cellules est visible à l'arrière-plan.

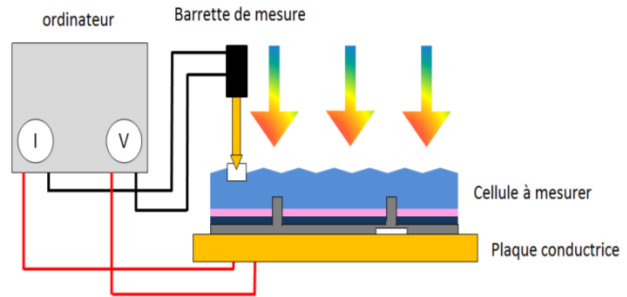


Figure III-4 : représentation schématique du montage de mesure des sous-cellules. La différence par rapport à un simulateur solaire classique provient de la plaque conductrice qui remplace la barrette de mesure en face arrière, assurant la stabilité mécanique de l'ensemble.

Tableau III-1 : paramètres étudiés pour déterminer les meilleures conditions d'amorce laser.

Paramètre de découpe	Fréquence (kHz)	Puissance (W)	Vitesse (m/s)
Plage de valeurs étudiées	10 - 90	2 - 18	50 - 200

III-2.1.2. Résultats

Comme expliqué dans la partie précédente, les sous-cellules présentes sur des cellules standard de quatre busbars ont été caractérisées avant découpe laser. Elles ont ensuite été découpées en faisant varier la puissance du faisceau laser utilisé entre 2 et 18 W, puis caractérisées au simulateur solaire. La résistance shunt et le rendement des sous-cellules obtenues ont été étudiés et sont représentés dans la Figure III-5.

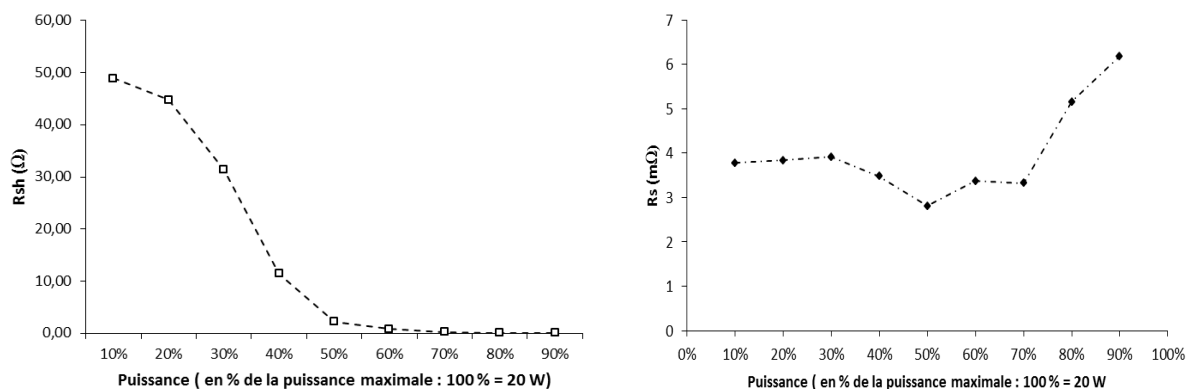


Figure III-5 : résistance shunt R_{sh} (à gauche) et résistance série (à droite) mesurées pour les sous-cellules, en fonction de la puissance du faisceau laser utilisé pour leur séparation.

A partir de 4 W de puissance, les valeurs mesurées pour R_{sh} diminuent rapidement. Le rendement est proche de la valeur de la cellule mère jusqu'à des puissances autour de 10 W, après quoi il chute fortement et est même inférieur à 10 % pour de fortes valeurs de puissance, de l'ordre de 16 à 18 W. Il semble donc préférable de rester dans de faibles gammes de puissance pour l'amorce des cellules afin de limiter la chute de rendement à haute puissance, due en partie à la diminution de la résistance de shunt, qui pourrait être liée au court-circuitage de l'émetteur. La découpe étant en effet réalisée par la face arrière, les découpes à forte puissance sont plus susceptibles de traverser la cellule et d'atteindre la face avant (voir Figure III-6). Une puissance de 8 W a été retenue, car elle permet la préservation des paramètres électriques et une séparation mécanique acceptable lors du clivage.

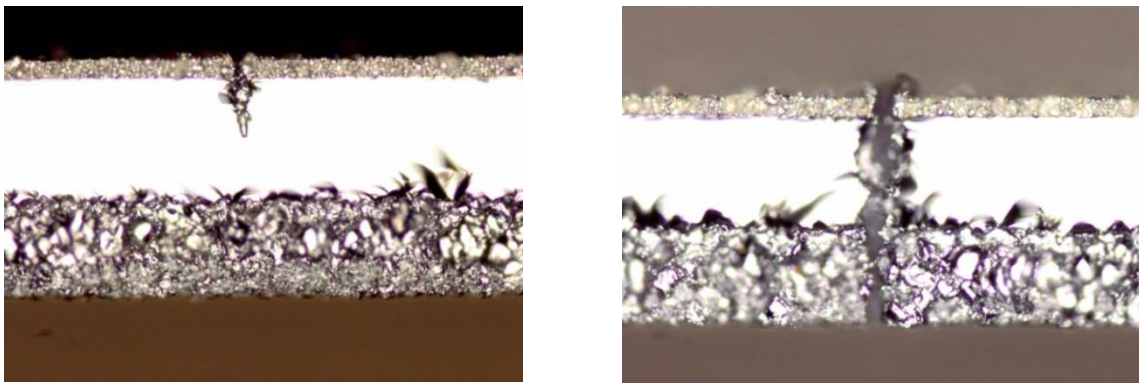


Figure III-6 : une découpe à faible puissance endommage très peu la cellule (2 W, à gauche), tandis que les découpes avec une puissance supérieure à 14 W sont traversantes et endommagent l'émetteur de la cellule (à droite).

Les conséquences de la fréquence des impulsions du laser de découpe ont également été étudiées. Des sous-cellules ont été caractérisées électriquement après découpe laser avec une puissance de 20 % et une fréquence variable. Il est difficile de conclure à partir des valeurs moyennes obtenues qui sont très proches pour chaque valeur de fréquence, c'est pourquoi il a été choisi d'étudier les écarts types entre ces valeurs, qui sont représentés sur la Figure III-7.

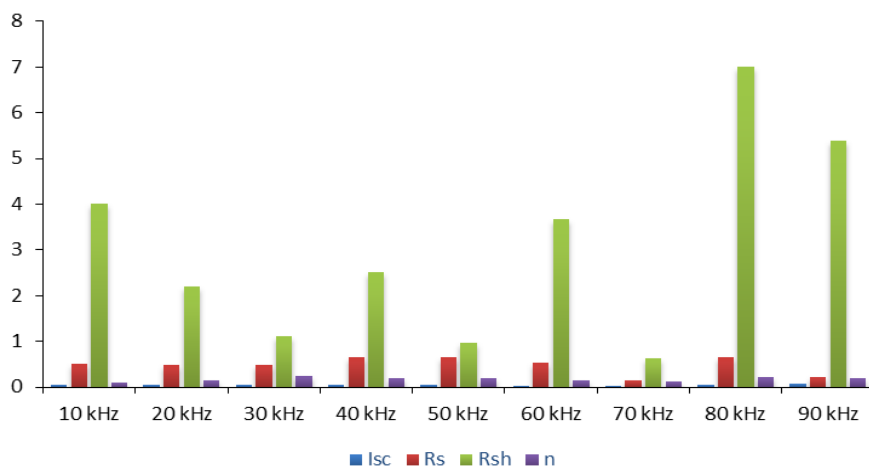


Figure III-7 : écarts-types calculés pour les valeurs de V_{oc} , I_{sc} , R_s et R_{sh} mesurées sur les sous-cellules, en fonction de la fréquence des impulsions laser utilisées pour la découpe.

Une fréquence de 70 kHz permet une meilleure stabilité dans les résultats mesurés, et donc une meilleure homogénéité des propriétés des sous-cellules obtenues, bien qu'il soit difficile d'avancer une hypothèse pour expliquer ce phénomène. Le clivage est néanmoins rendu plus facile par des amorces à des fréquences de 20 ou 30 kHz. Il a été choisi de réaliser les découpes avec une fréquence de 70 kHz pour privilégier la qualité des sous-cellules.

En utilisant les paramètres précédemment définis, des vitesses de déplacement du faisceau variant entre 50 mm.s^{-1} et 200 mm.s^{-1} ont été étudiées. A puissance et fréquence égales, une plus grande vitesse de déplacement donne des amorces moins profondes, donnant des sous-cellules dotées de meilleurs paramètres électriques. Les images microscopiques des amorces obtenues présentées sur la Figure III-8 montrent ce phénomène.

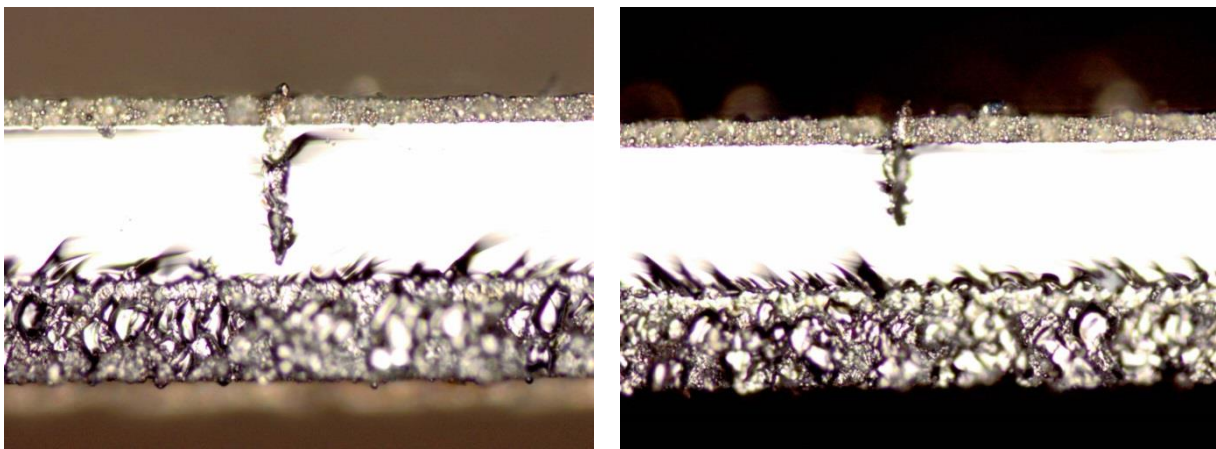


Figure III-8 : image microscopique optique (tranche) de l'amorce laser avec une vitesse de déplacement du faisceau de 50 mm.s^{-1} (à gauche), et 200 mm.s^{-1} (droite).

A la suite de cette étude, des paramètres de découpe favorisant à la fois la qualité du clivage et les caractéristiques électriques de cellules PERC commerciales ont été identifiés. Les meilleurs résultats sont obtenus avec une puissance de 8 W, une fréquence de 70 kHz et une vitesse de déplacement du faisceau de 200 mm.s^{-1} . Ils ont permis l'obtention de sous-cellules générant en moyenne une puissance électrique inférieure de 1 % à celle de la cellule mère dont elles sont issues, pour 40 sous-cellules mesurées. Cette diminution correspond à une perte de rendement de 0,2 % absolu après découpe qui correspond à l'endommagement du matériau ainsi qu'à la formation de zones non passivées sur les tranches découpées. Cette valeur est en accord avec les valeurs minimales données dans la littérature pour des cellules découpées au laser [119,121], et semble proche de l'optimum atteignable. Un ajustement léger semble nécessaire si le type de cellule utilisé change, mais aucun changement drastique de paramétrage ne semble nécessaire, d'après l'expérience acquise sur d'autres campagnes de découpe.

III-2.2. Développement de motifs de métallisation spécifiques

Pour minimiser l'ombrage en face avant des cellules, et ainsi augmenter le courant photogénéré, il a été choisi de ne pas extraire le courant pas des busbars répartis de manière homogène comme c'est le cas pour les cellules conventionnelles (cf. Figure III-9). A la place, trois points d'extraction du courant, ou *pads*, ont été répartis sur le bord gauche de la face avant pour l'extraction du courant d'électrons, et trois ont également été répartis sur le bord droit de la face arrière afin de pouvoir extraire le courant de trous. Ces plots d'argent sont destinés à être utilisés comme supports pour la soudure de rubans de cuivre d'interconnexion. Les deux plots excentrés sont distants de 26 mm du bord de la cellule, et le plot central est espacé de 52 mm par rapport aux deux autres plots, comme indiqué sur la Figure III-10. Ce sont les mêmes distances que les espacements entre busbars dans le cas d'une cellule à 3 busbars.

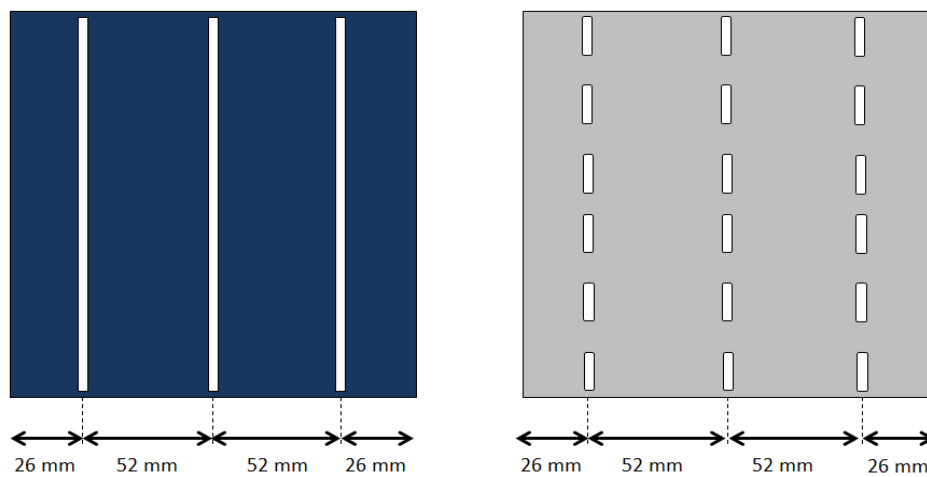


Figure III-9 : mode d'interconnexion d'une cellule standard. Les rubans de cuivre sont soudés le long des busbars (en blanc), en face avant (bleu) comme en face arrière (gris).

Pour réduire le courant circulant dans un chapelet de sous-cellules, celles-ci sont connectées en série, c'est-à-dire que la face avant d'une cellule est connectée à la face arrière de sa voisine de gauche, et ainsi de suite. Le fait de disposer les points servant à la soudure des rubans de part et d'autre de la cellule permet donc de réduire la longueur de ruban nécessaire à l'interconnexion et par conséquent de diminuer la quantité de cuivre utilisée [58]. De plus, cette conception permet l'assemblage des sous-cellules soit de manière plane, soit avec un recouvrement. Elle offre donc plus de flexibilité entre un assemblage qui permet d'utiliser moins de sous-cellules pour une taille de module donnée, et un assemblage dense qui permet de maximiser la puissance sur une surface réduite. Les détails sur la technique d'assemblage des sous-cellules sont donnés dans la Figure III-11.

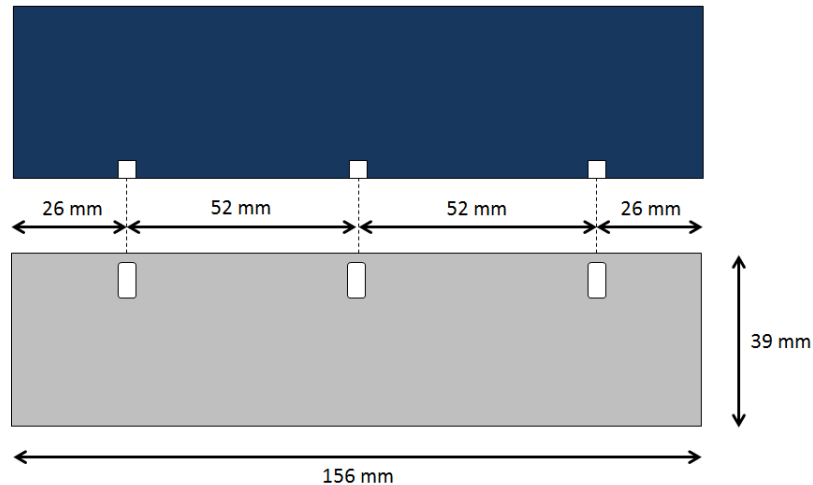


Figure III-10 : mode d'interconnexion des sous-cellules développées dans l'étude. Les rubans sont soudés sur des plots d'argent (en blanc) présents au nombre de trois sur la face avant (bleu) et la face arrière (gris).

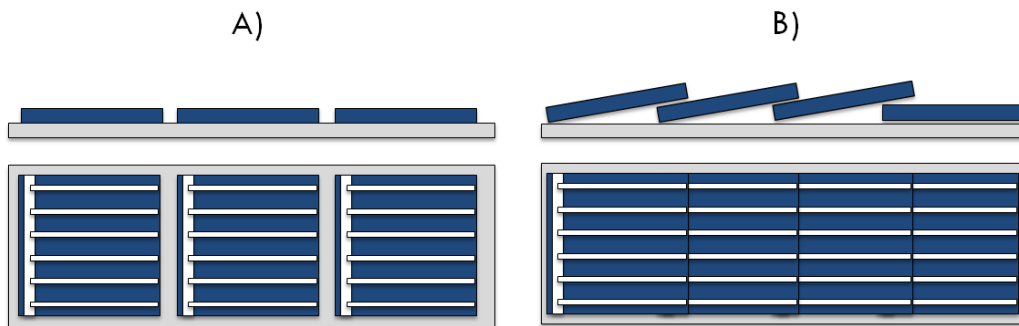


Figure III-11 : la découpe des cellules en sous-cellules permet deux types d'assemblage : A) l'assemblage plan permet d'utiliser la totalité de la surface des cellules et B) l'assemblage en recouvrement permet une plus grande densité de cellules dans les modules et le masquage des busbars ou plots de soudure.

Des motifs de métallisation spécifiques pour les faces avant des sous-cellules ont été réalisés avec les programmes de dessin industriel AutoCAD et SolidWorks pour certains, et conçus et optimisés avec le programme SolarCellDesigner développé par le TUWien et S'Tile pour d'autres. Ces motifs ont deux objectifs : i) tirer le meilleur parti des conditions d'interconnexion à trois points utilisés pour les sous-cellules et ii) constituer une différenciation visuelle par rapport aux modules concurrents. Ces motifs ont été testés en simulation, à l'aide du programme Griddler qui a été développé par le SERIS pour optimiser la forme des grilles de métallisation des cellules solaires classiques [122]. Par modifications empiriques et tests successifs, trois motifs ont été développés de manière avancée. Ces motifs sont représentés dans la Figure III-12 et ont été classés comme suit :

A) le premier motif développé a été nommé « doigts droits ». Il simule une cellule standard qui aurait été coupée au ras d'un des busbars.

B) Le second motif désigné comme le motif « feuille » constitue une curiosité visuelle et permet de connaître le potentiel d'un motif de métallisation dont la structure formelle elle-même n'est pas optimisée.

C) Le dernier motif dessiné pour métalliser des sous-cellules a été nommé « *sunrays* », et est constitué de doigts qui convergent vers les points de collection de la face avant par le chemin le plus court.

Il est une tentative d'optimisation de la collection du courant en face avant des sous-cellules. Ils ont été comparés, pour les besoins de l'étude, à un motif D) qui est la grille de métallisation optimisée d'une cellule commerciale à trois busbars.

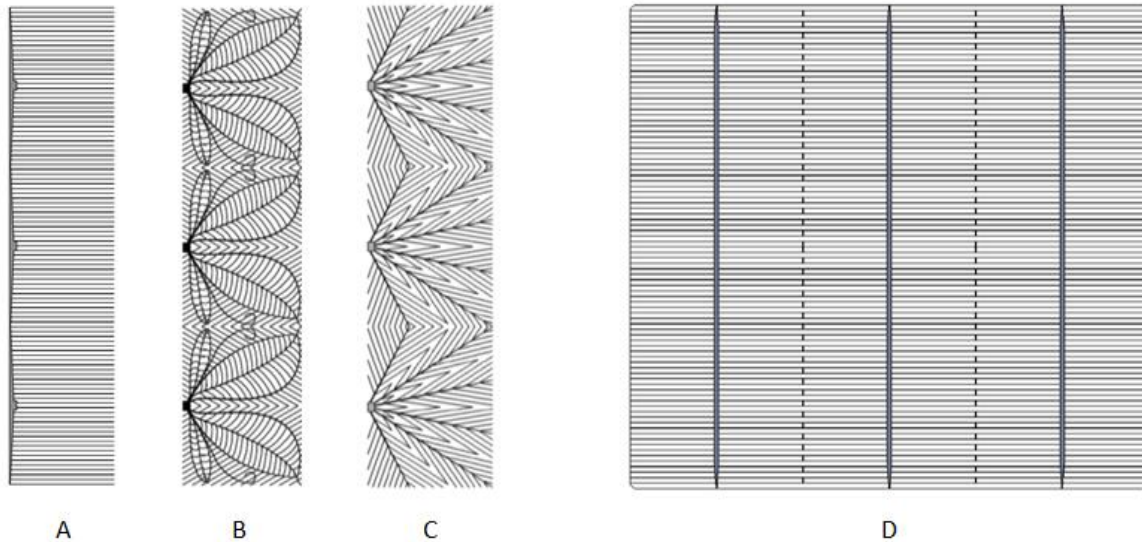


Figure III-12 : Les motifs de sérigraphie de la face avant des cellules mis au point pour l'étude. De gauche à droite : le motif « droit », le motif « feuille », le motif « sunrays » ainsi que le motif de métallisation optimisé pour la face avant d'une cellule standard.

La métallisation de la face arrière des sous-cellules est la même quelle que soit la forme de la grille en face avant. Le motif, qui a été désigné sous la lettre E) est décrit dans la Figure III-13. Il est constitué d'un dépôt pleine plaque d'aluminium, avec trois plots d'argents excentrés sur le bord droit, et séparés de 52 mm entre eux dans le sens de la hauteur, comme pour les plots de la face avant. Il a été comparé au motif F) de la métallisation de la face arrière d'une cellule standard.

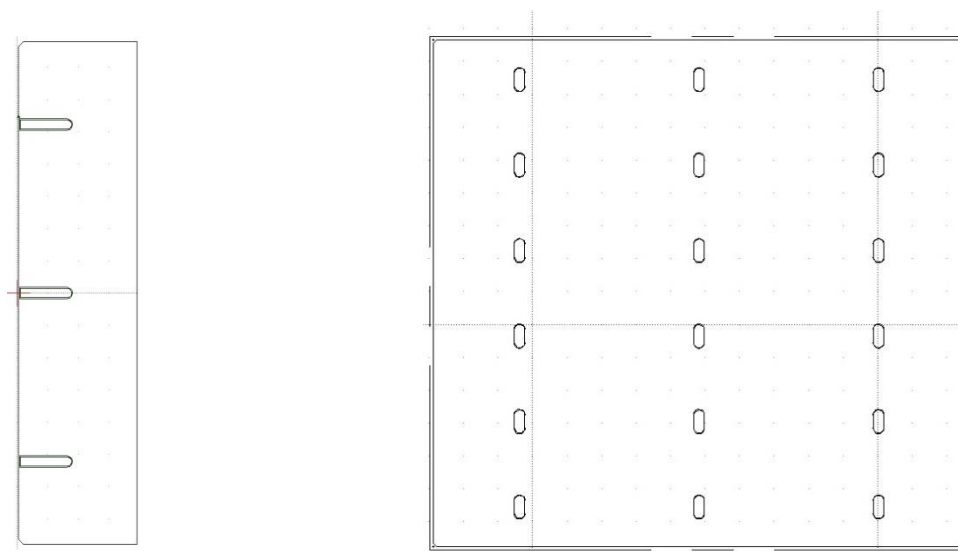


Figure III-13 : le motif de sérigraphie de la face arrière est le même pour tous les types de sous-cellules de l'étude (à gauche). Il est semblable au motif de métallisation de la face arrière des cellules de référence (droite).

III-2.3. Résultats

Dans un premier temps, l'utilisation du programme Griddler a permis d'évaluer les performances de chaque motif, qui ont ensuite été modifiés manuellement par itérations successives, en identifiant les zones limitant la circulation du courant par la simulation d'images d'électroluminescence. Les résultats sont donnés dans le Tableau III-2, en modélisant les propriétés des cellules al-BSF qui sont utilisées pendant cette étude. Ils sont comparés aux performances d'une grille de métallisation classique déposée sur une cellule carrée de dimension standard.

Tableau III-2 : comparaison des performances des trois motifs de métallisation pour la face avant des sous-cellules, avec le motif de métallisation classique d'une cellule de taille standard

Motif	Taux d'ombrage (%)	η (%)	FF (%)
standard	4,91	17,82	75,00
finger droit	5,23	17,56	73,75
feuille	6,52	17,52	74,64
sunrays	4,94	17,67	74,94

Aucun des motifs destinés aux sous-cellules n'atteint le niveau de performance du motif de métallisation de la face avant d'une cellule standard dont la forme intrinsèque permet des chemins de collection plus courts vers les busbars. La nature même de l'interconnexion des sous-cellules par des points de contact excentrés limite le facteur de remplissage et le rendement. En tenant compte de ces contraintes, le motif sunrays est le plus performant car les doigts d'argent sont répartis de manière plus régulière et offrent des chemins en ligne droite depuis n'importe quel endroit de la sous-cellule vers un point de soudure. Aucun des nouveaux motifs étudiés ne présente un taux de couverture par l'argent inférieur à celui de la cellule standard, ce qui augmente légèrement dans tous les cas la quantité de matériau utilisé. En revanche, aucun des

motifs des sous-cellules n'a été optimisé, contrairement au motif de la cellule standard, ce qui laisse une marge de progression pour réduire l'écart.

Le programme SolarCellDesigner développé par le TU Wien conjointement avec S'Tile pendant l'étude permet de générer automatiquement des motifs de métallisation destinés à la face avant de sous-cellules, découpées à partir de cellules carrées standard de $156 \times 156 \text{ mm}^2$, comme montré dans la partie précédente. Le but du programme est de générer des doigts à partir du ou des points d'interconnexion situés sur un côté de la cellule, qui sont répartis de manière à collecter le courant de la façon la plus homogène possible. En modifiant plusieurs paramètres d'entrée, des conceptions très différentes peuvent être obtenues, comme le montre la Figure III-14.

Le programme génère automatiquement un fichier .dxf qui peut être directement utilisé par la fabrication d'écrans de sérigraphie. Pour chaque paramètre généré, le programme calcule la performance attendue de la cellule, et peut étudier automatiquement des classes entières de motifs en conjonction avec le programme Griddler, et sélectionner celui qui maximisera la puissance de sortie de la sous-cellule.

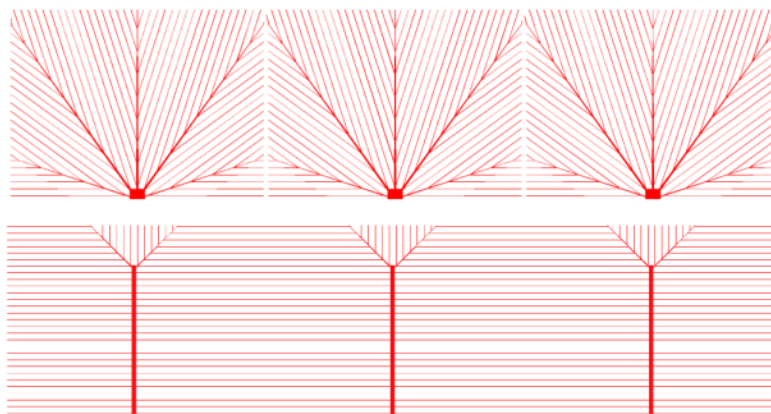


Figure III-14 : deux motifs de métallisation différents obtenus en modifiant quelques paramètres d'entrée du programme.

Le programme a été utilisé pour améliorer les motifs existants, et notamment le motif sunrays. En traitant de manière automatisée des paramètres tels que le nombre de points de connexion, le nombre de busbars, le nombre de doigts, et la connexion ou non entre doigts, une modification du dessin (cf.

Figure III-14 en haut) a permis l'obtention d'un rendement théorique de 17,78 %, soit très proche de la valeur donnée pour une cellule standard optimisée. En réalisant cette optimisation, plusieurs règles pour l'amélioration du motif à base de points de connexion ont été déterminées de manière empirique : i) le courant électrique doit être dirigé directement vers le point de connexion le plus proche. De cette manière, la collecte est plus efficace que dans le cas où le courant converge vers le busbar le plus proche. Les busbars peuvent ainsi garder des largeurs relativement faibles ; ii) une légère amélioration est constatée quand les busbars sont répartis de manière équiangulaire ; iii) l'augmentation de l'épaisseur des busbars en approchant du point de connexion ne nécessite que d'être linéaire ; iv) Des doigts connectés de part et d'autre du busbar offrent une meilleure performance.

III-3. REALISATION DE MODULES

Les procédés décrits précédemment ont été mis en application pour la fabrication de petits modules photovoltaïques, composés de 24 sous-cellules connectées en série. Leur réalisation ainsi que la comparaison avec des petits modules composés de cellules standard sont décrites ci-après.

III-3.1. Préparation

Les motifs conçus dans la partie III-2.2 ont servi à la réalisation de prototypes de sous-cellules. Des empreintes pour masques de sérigraphie ont été réalisées en dupliquant les différents motifs réalisés, et en en disposant quatre sur une surface de 156 x 156 mm² à l'aide du programme SolidWorks (voir Figure III-15). Ces empreintes ont été transférées sur des masques de sérigraphie recouverts de résine photosensible par l'entreprise PVF. Quatre différents masques ont été réalisés : A) un masque permettant d'imprimer le motif « doigts droits » ; B) un masque permettant d'imprimer le motif « feuille » ; C) un masque permettant d'imprimer le motif « sunrays » ; D) un masque de référence a été obtenu en transférant la grille de métallisation d'une cellule standard. Il permettra de comparer les performances des sous-cellules à des cellules de taille normale.

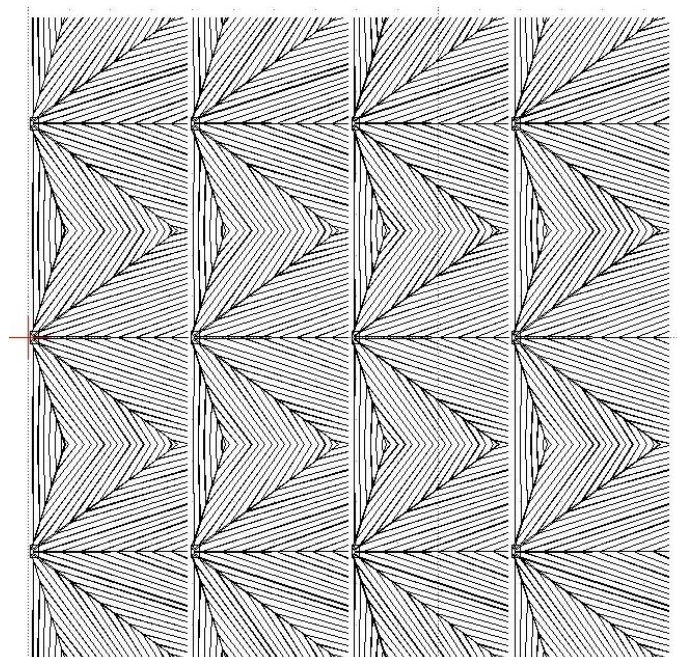


Figure III-15 : exemple d'un masque de sérigraphie utilisé pour la réalisation d'une cellule mère (ici avec des motifs sunrays) qui sera ensuite découpée en quatre sous-cellules.

III-3.1.1. Fabrication de sous-cellules

Les quatre différents motifs ont été imprimés sur quatre lots de 50 cellules issues d'une même série de fabrication. Les cellules qui ont été utilisées sont des cellules commerciales Al-BSF non

métallisées. Le choix des cellules Al-BSF a été motivé par des raisons de disponibilité et d'économie. De plus, ce type de cellules ne présente que peu de différences avec les cellules PERC, dont toutes sont localisées en face arrière. Comme l'étude ne portait que sur la comparaison de motifs de sérigraphie de la face avant, il est possible de considérer que les résultats seront très proches de ceux obtenus avec des cellules PERC. Toutes les cellules ont été imprimées dans l'ordre suivant : i) argent en face arrière, ii) aluminium en face arrière, iii) argent en face avant avec la machine de sérigraphie industrielle de S'Tile, et lors de trois sessions continues correspondant aux trois pâtes métalliques différentes. Les seules interruptions dans le procédé ont correspondu aux changements de masques : un changement de masque pour l'impression de l'aluminium arrière du lot D, un également pour l'impression de l'argent en face arrière du même lot, et enfin un changement de masque à chaque changement de lot pour l'impression de la face avant.

Les cellules des lots A, B et C ont ensuite été amorcées par laser, selon les conditions optimales déterminées détaillées en III-2.1.2. Les sous-cellules ont été séparées les unes des autres par clivage, à la suite de quoi elles ont été caractérisées. Les sous-cellules ont été mesurées électriquement à l'aide du simulateur solaire modifié spécialement et présenté dans la partie III-2.1.1. Pour contacter les sous-cellules en face avant, des barrettes spécifiques ont été développées par S'Tile. Elles ont été conçues pour établir un bon contact électrique avec des cellules classiques dotées de busbars, mais également avec les motifs spécifiques développés dans le cadre de l'étude, qui comportent trois plots de soudure en face avant (cf. Figure III-16). Les performances des sous-cellules et des cellules entières ont été comparées avec leurs équivalents simulés pour valider le modèle, et comparées également en fonction du motif imprimé.

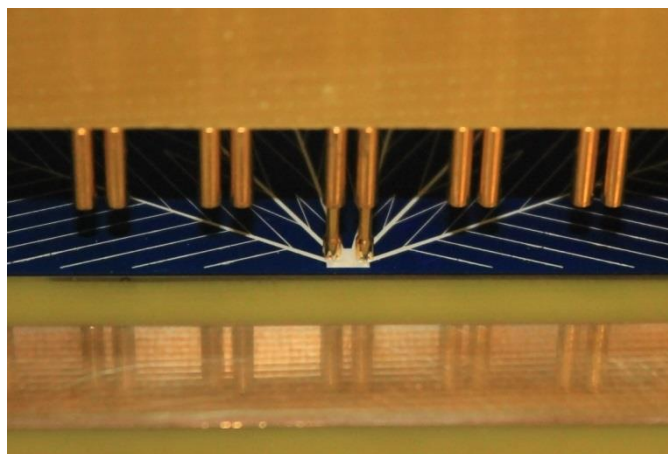


Figure III-16 : détail d'une des barrettes spécialement conçues pour contacter les sous-cellules lors de la mesure avec le simulateur solaire. Seuls les points de soudure sont contactés.

III-3.1.2. Résultats

Plus de 200 échantillons ont ainsi été caractérisés par motif sur la ligne de production pilote avant d'être éventuellement utilisés pour la réalisation de modules commerciaux. Leur emplacement sur la plaquette d'origine a été noté A, B, C ou D en fonction du sens de sérigraphie et de recuit des contacts, comme indiqué sur la Figure III-17.

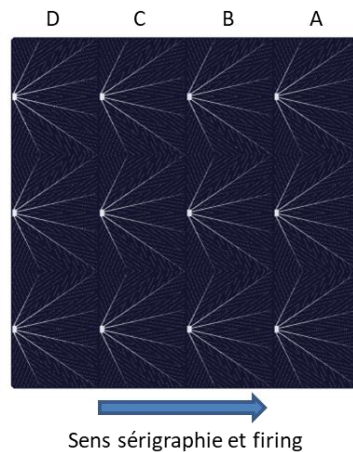


Figure III-17 : les sous-cellules ont été mesurées en fonction de leur emplacement d’origine sur la plaquette par rapport au sens des procédés de sérigraphie et de recuit des contacts.

On constate des disparités dans les performances de sous-cellules en fonction de leur emplacement d’origine sur la plaquette de silicium avant découpe. Les sous-cellules issues du centre de la plaquette présentent des rendements meilleurs de 0,3 à plus de 1 % supérieurs aux sous-cellules extérieures en fonction du motif imprimé. Ces disparités sont induites par de grandes variations des valeurs de résistance shunt, elles-mêmes causées par l’hétérogénéité des procédés de sérigraphie et de recuit des contacts. Les résultats de ces mesures sont visibles dans le Tableau III-3, et justifient l’introduction d’une étape de tri des sous-cellules, au lieu de caractériser et trier les cellules entières avant découpe. Il en résulte une multiplication par quatre des mesures et de la tâche de tri à l’échelle d’une ligne de production, qui peut être compensée partiellement par une automatisation, mais qui engendrera un surcoût par rapport à des cellules standard.

Tableau III-3 : les sous-cellules mesurées présentent de fortes disparités de performance en fonction de leur emplacement d’origine sur la plaquette, A, B, C, ou D.

caractéristiques		A	B/C	D
« droit »	η (%)	17,83%	18,04%	17,22%
	R_{sh} (Ω)	305,6	9867,7	133,7
« feuille »	η (%)	17,65%	17,82%	17,51%
	R_{sh} (Ω)	155,7	41033,1	146,5
« sunrays »	η (%)	17,09%	18,12%	17,88%
	R_{sh} (Ω)	95,8	4558,1	141,8

La distribution des performances pour un motif donné dépend assez fortement dudit motif. Comme le montre la Figure III-18, ce sont les cellules sérigraphiées avec le motif feuille qui présentent la meilleure homogénéité au sein d’une série. Contrairement aux autres motifs, le motif feuille présente en effet des redondances et des connexions entre doigts qui préviennent des conséquences d’une rupture de finger lors de l’impression. Les deux autres séries de sous-cellules présentent plus d’hétérogénéités en performances que les cellules standard, à cause notamment des disparités observées au sein des sous-cellules issues d’une même plaquette.

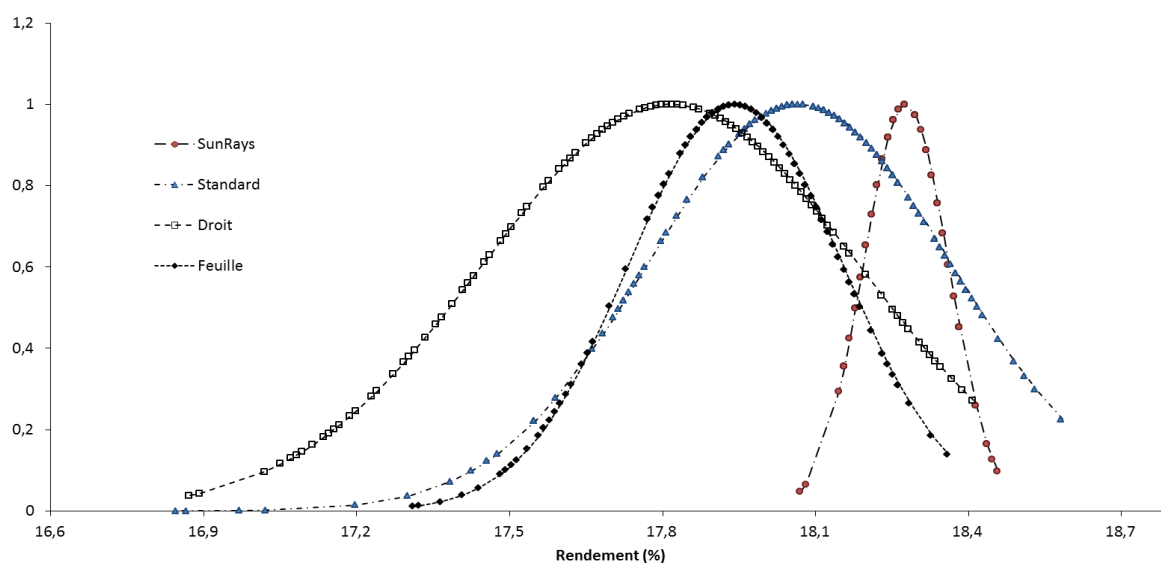


Figure III-18 : distribution normalisée des rendements mesurés pour chacune des quatre séries de cellules réalisées avec les quatre motifs étudiés. La série des cellules Sunrays n'est pas prise en compte car les cellules avaient été pré-triées, et n'ont pas toutes été caractérisées.

Les performances réelles des sous-cellules feuilles et sunrays ont été comparées avec les valeurs théoriques obtenues par simulation, dans le but de vérifier la justesse des prédictions du programme SolarCellDesigner, comme montré dans le Tableau III-4. Une différence d'environ 1 % relatif de rendement est trouvée, ce qui dénote d'une bonne cohérence entre le modèle de simulation et les cellules obtenues. Des travaux sont en cours pour affiner encore le modèle. Ce dernier peut être adapté à des cellules PERC et PERC bifaciales, et prédit globalement les mêmes écarts de performance qu'avec les cellules Al-BSF. Les résultats de cette modélisation sont donnés dans le Tableau III-5.

Tableau III-4 : comparaison des paramètres électriques simulés et expérimentaux pour les motifs feuille et sunrays

	Motif sunrays		Motif feuilles	
	théorique	expérimental	théorique	expérimental
Voc (mV)	621	623	620	622
Isc (A)	2,31	2,32	2,31	2,31
FF (%)	74,9	74,7	74,6	75,4
η (%)	17,67	17,81	17,52	17,71
$\Delta \eta$ (%)		0,8		1,1

Tableau III-5 : paramètres électriques simulés pour les motifs feuilles et sunrays appliqués sur des cellules PERC commerciales utilisées pour d'autres études.

	Motifs sunrays	Motifs feuilles
Voc (mV)	631	629
Isc (A)	2,37	2,36
FF (%)	74,8	75,3
η (%)	19,89	19,78

Les caractéristiques expérimentales obtenues pour chaque motif sont très proches des valeurs obtenues par simulation. Les cellules standard présentent, à matériau de fabrication égal, les meilleurs rendements et puissances produites. La manière intrinsèque dont est collecté le courant sur ces cellules par le moyen de trois busbars répartis de manière symétrique, donne un avantage de rendement insurpassable par les sous-cellules, quel que soit le motif, si leur mode de collection du courant se fait par des dispositifs excentrés. Le fait que la grille de métallisation des cellules standard soit optimisée, et que celle des sous-cellules ne l'est pas, apporte un avantage de 0,15 % de rendement de plus pour les premières citées. Les résultats de simulation avec le programme spécifique développé montrent néanmoins que cet écart peut être partiellement comblé par l'optimisation du motif des sous-cellules.

Parmi ces dernières, c'est le motif sunrays qui permet d'obtenir les meilleures performances. Il est en effet celui dont la forme se rapproche le plus d'une structure optimisée et dispose d'une marge d'amélioration d'environ 0,1 % dans les conditions simulées. D'un point de vue esthétique, l'argent est mieux réparti à sa surface et n'est pas visible à l'œil nu dès que la distance d'observation dépasse plusieurs mètres. Ceci donne aux cellules une apparence noire unie qui peut constituer un argument commercial. Le motif feuille offre les performances les plus réduites, malgré le taux de métallisation le plus fort. Ceci est dû aux formes courbes des busbars qui allongent les chemins de collection des porteurs en face avant et ne sont pas optimisés, ainsi qu'à l'ombrage plus important. L'intérêt de ce dessin, malgré ses limites, est de montrer qu'il est possible de prendre quelques libertés esthétiques aux prix d'un rendement réduit. D'un point de vue économique, il fait utiliser plus d'argent en face avant pour des rendements inférieurs de 0,3 % à un motif standard à 3 busbars, mais son aspect original peut être un argument pour des projets de BIPV notamment. Enfin, le motif doigts droits induit des rendements globalement similaires à ceux du motif feuille. Il a été conçu pour être assemblé en modules avec recouvrement. De cette manière, le busbar d'une sous-cellule est caché par la sous-cellule située à sa gauche. Le module ainsi obtenu revêt une apparence noire uniforme.

D'un point de vue global, les sous-cellules offrent des rendements minorés de 0,2 % à 0,4 % par rapport à des cellules standard. Le motif sunrays a un potentiel qui pourrait amener son rendement à des valeurs inférieures de 0,1 % à 0,15 % à des cellules standard, en prenant en compte les pertes liées à l'étape de découpe laser. Par ailleurs, la réduction des pertes résistives lors de l'interconnexion de sous-cellules pourrait amener à un gain supérieur à ces pertes. Les pertes résistives représentent en effet 3 % de la puissance totale générée par un module [1]. Dans le cas d'un module réalisé avec des cellules d'un rendement de 17,8 %, cela équivaut à une perte de rendement de 0,5 %. Si les quarts de cellules permettent effectivement une forte réduction de ces pertes résistives, ils peuvent permettre la réalisation de modules plus performants. Dans le cas de cellules bifaciales à hauts rendements, les fortes valeurs de courant généré peuvent provoquer des niveaux de pertes résistives encore supérieurs. Dans ce cas de figure, la découpe en quarts de cellules permettrait de prendre un avantage encore plus conséquent.

III-3.2. Intégration en modules

Suite à la caractérisation, les sous-cellules et des cellules entières ont été triées par valeurs de courant au point de puissance maximale I_{mpp} et de rendement η . Au sein des lots de A à C, deux

séries de 24 sous-cellules et deux séries de 26 sous-cellules dont les valeurs de courant étaient proches ont été sélectionnées par lot pour réaliser des modules. A l'intérieur du lot D, douze cellules de courants proches ont été retenues pour la réalisation de deux modules.

III-3.2.1. Procédé

Quatre modules ont donc été réalisés pour chaque lot de sous-cellules, et deux modules pour le lot de cellules D. Les sous-cellules issues des lots de 24 ont été connectées entre elles de manière plane et en série, pour former 2 chapelets de 12 sous-cellules connectés eux même en série. Pour connecter les sous-cellules en série, les plots de soudure de la face avant d'une sous-cellule sont reliés aux plots de soudure de sa voisine de gauche par le moyen de rubans de cuivre étamé, comme montré dans la figure ci-après. Les sous-cellules issues des lots de 28 effectifs ont été connectées en série, pour former 2 chapelets de 14 sous-cellules connectés eux-mêmes en série. Cependant, ces chapelets n'ont pas été assemblés de manière plane, mais avec un recouvrement de 3 mm entre deux sous-cellules. Ainsi, chaque sous-cellule chevauche sa voisine de droite sur 3 mm, masquant la zone des plots de soudure avant. Le détail de cet assemblage est décrit dans la Figure III-19. Ces interconnexions ont été réalisées à l'aide d'une machine d'assemblage industriel spécialement développée pour ce genre d'applications et disponible sur la ligne pilote de S'Tile.

Les cellules entières du lot D ont été assemblées en série par chapelets de trois cellules, eux-mêmes connectés en série. L'interconnexion est réalisée de manière classique, en soudant les busbars de la face avant d'une cellule aux busbars de la face arrière de sa voisine de gauche par le moyen des mêmes rubans de cuivre que pour les sous-cellules. Ces soudures ont été réalisées à la main.

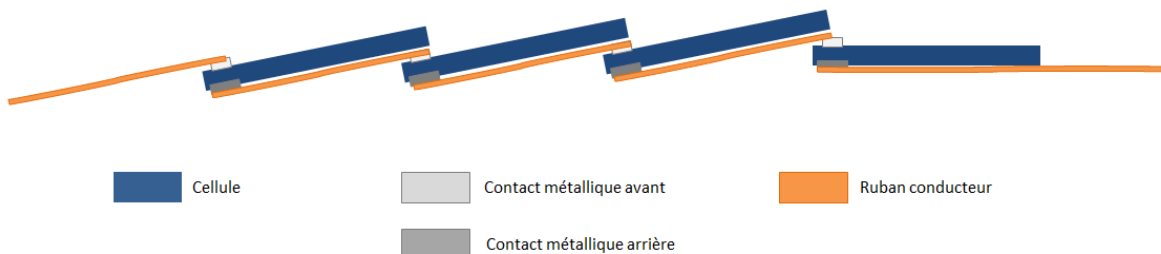


Figure III-19 : représentation schématique de l'assemblage et de la connexion en série des sous-cellules avec recouvrement.

Le procédé d'encapsulation a été identique pour tous les modules. Les deux chapelets ont été encapsulés entre une plaque de verre de 520 x 350 mm² et une feuille de backsheet noir de même dimension. Deux feuilles d'EVA situées entre les cellules et le verre pour la première, et entre les cellules et le backsheet pour la seconde assurent l'étanchéité et la cohésion de l'ensemble. La lamination a eu lieu sous une pression de 930 mbar et pour une température de 150 °C pendant 15 minutes. L'opération a été réalisée grâce à un laminateur industriel. La qualité des interconnexions et des cellules au sein des modules a ensuite été caractérisée par électroluminescence. Les modules ont finalement été mesurés électriquement à l'aide d'un simulateur solaire de classe AA destiné spécialement aux modules.

III-3.2.2. Résultats

Des modules d'une taille équivalente à celle de modules composés de six cellules standard ont été réalisés avec les cellules de la partie précédente qui ont été triées par courant au point de fonctionnement et par rendement. Quatre modules ont été réalisés pour chaque motif de sous-cellules : deux modules de 24 sous-cellules assemblés de manière plane et deux modules de 28 sous-cellules assemblés en recouvrement. L'assemblage en recouvrement permet en effet une plus grande densité de cellules pour la même surface.



Figure III-20 : module réalisé avec des sous-cellules « finger droit ».

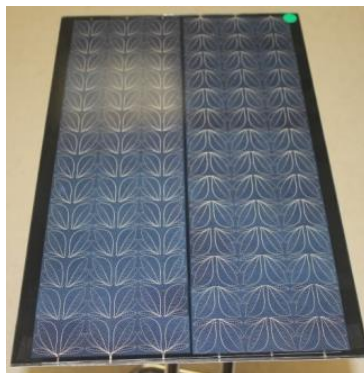


Figure III-21 : module réalisé avec des sous-cellules « feuille ».

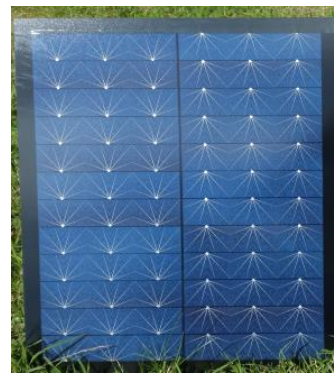


Figure III-22 : module réalisé avec des sous-cellules « sunrays ».

Tableau III-6 : moyenne des puissances électriques obtenues pour chacun des types de module, en fonction du motif sérigraphié sur les sous-cellules, et du type d'assemblage.

	« droit » Puissance (W)	« feuille » Puissance (W)	« sunrays » Puissance (W)
assemblage plan	25,3	25,3	26,1
assemblage recouvrement	26,9	26,5	27

Après avoir été mesurées au simulateur solaire, les puissances moyennes générées ont été comparées par type de motif. De manière liée aux performances des cellules, ce sont les modules fabriqués avec les sous-cellules sunrays qui permettent d'obtenir les puissances les plus élevées. L'assemblage en recouvrement permet un léger gain de puissance (1 W environ) par rapport à l'assemblage plan, mais qui n'est cependant pas à la hauteur du nombre de sous cellules supplémentaires (quatre sous-cellules, soit 4,3 W en situation idéale). Ceci laisse penser que la connexion des sous-cellules n'est pas optimale pour ces premiers prototypes. Les motifs doigts droits offrent la plus grande différence entre l'assemblage plan et l'assemblage en recouvrement (+ 1,3 W). Ceci est lié au fait que le recouvrement qui masque une partie des cellules, masque la zone du busbar des sous-cellules avec motif finger droit, zone qui n'est de toute façon pas active pour la génération du courant. Comme pour les mesures de cellules, ce sont les motifs feuille qui donnent les modules les moins puissants, indépendamment du type d'assemblage.

Tableau III-7 : comparaison des meilleurs modules obtenus à partir de sous-cellules (motif « sunrays ») avec des modules assemblés à partir de cellules standard de mêmes propriétés.

Module	Puissance (W)	FF (%)
« sunrays » plan	26,1	78,1
« sunrays » en recouvrement	27	77,4
standard	23,2	71,8

La comparaison des modules sunrays avec des modules de 6 cellules standard permet d'établir que les modules composés de sous-cellules génèrent une puissance pouvant être supérieure de 4 W, soit 17 %. Ce résultat est bien meilleur que les valeurs attendues et doit être relativisé. En effet, les modules composés de sous-cellules ont été assemblés avec une machine de soudure industrielle, tandis que les cellules des modules standard ont été soudées à la main. Les autres conditions de fabrication sont par ailleurs identiques. Néanmoins, des images d'électroluminescence montrent des microfissures sur les cellules standard, résultant du procédé d'assemblage. Les modules composés de sous-cellules, eux, ne semblent pas avoir souffert de ce type de dégât. De plus, les cellules standard ont été interconnectées avec des rubans de 2 mm de large, qui semblent après coup sous-dimensionnés pour le courant généré par les modules [123]. Ces deux facteurs contribuent à expliquer cet écart de performance plus grand qu'attendu. Des mesures sont en cours, pour affiner l'évaluation de la différence de puissance générée par la réduction des pertes en lignes dans les modules composés de sous-cellules.

Après cyclage thermique, on constate une très légère diminution des performances des modules sunrays. Ceux-ci perdent environ 0,5 W de puissance après 60 cycles thermiques, et quasiment 1 W après 80 cycles, soit une perte de 3,5 % de puissance. Les modules standard quant à eux, perdent 3 W dès 60 cycles, valeur qui reste stable après les cyclages ultérieurs. Cette plus grande instabilité en température peut être partiellement expliquée par les contraintes mécaniques plus grandes qui s'exercent au niveau des rubans soudés directement sur les busbars. Les images d'électroluminescence prises après le cyclage thermique montrent que la densité de défauts présents sur les cellules a été accrue au niveau des soudures sur les busbars (cf.). De ce point de vue, l'assemblage des sous-cellules par des soudures ponctuelles permet de limiter ce type de dégât.

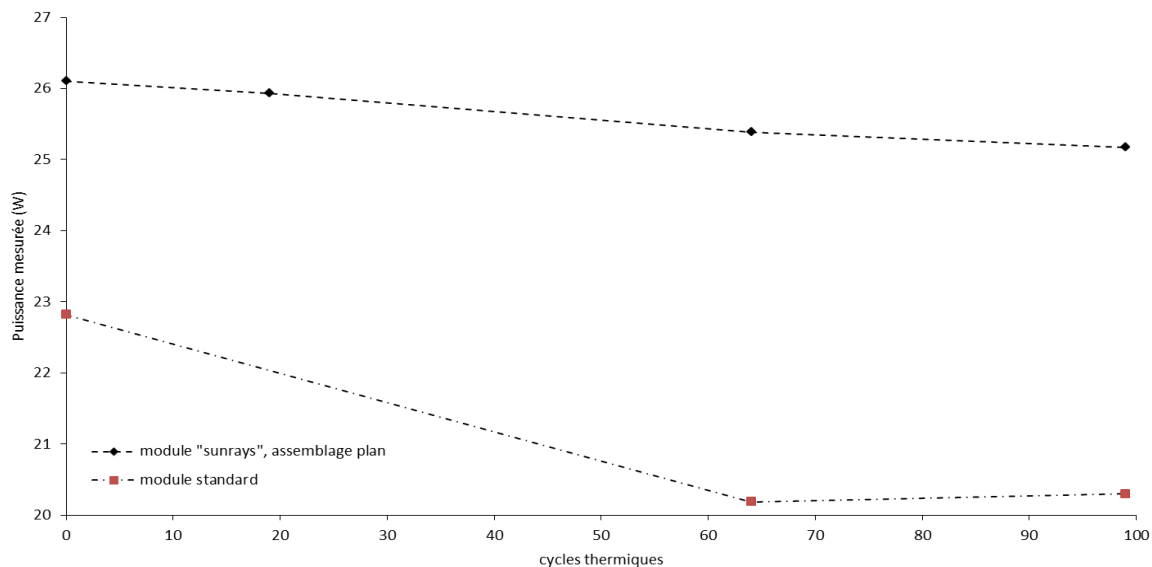


Figure III-23 : évolution de la puissance électrique mesurée pour les modules après un certain nombre de cycles thermiques.

CONCLUSION DU CHAPITRE

Des mini-modules équivalents à six cellules ont été réalisés à partir des sous-cellules développées pour l'étude, et dans des conditions industrielles. Des motifs de métallisation spécifiques permettent l'interconnexion des sous-cellules par points de soudures localisés. Cette technique offre de la flexibilité et peut être utilisée pour des assemblages réalisés de manière plane ou avec recouvrement entre sous-cellules. L'optimisation de la géométrie des motifs spécifiques réalisés permet de limiter les pertes de collection électrique en comparaison de motifs de métallisation standard, composés de busbars et de doigts d'argent.

Une limitation des pertes résistives lors de la mise en module a été obtenue par la découpe en sous-cellules inspirée de l'i-Cell. Ce phénomène, combiné à une compacité d'assemblage plus élevée que pour un module standard permettent de compenser la collecte du courant légèrement plus faible liée aux contraintes de connexion des sous-cellules.

Les procédés de fabrication standard, et la comparaison avec des modules de même taille réalisés à partir de cellules entières ont permis de mettre en évidence un gain de puissance de 12 % pour les modules composés de sous-cellules. Ce gain doit être relativisé en raison des conditions de mesure et de réalisation des modules standards, légèrement différentes, mais est déjà prometteur pour la suite du développement.

REFERENCES DU CHAPITRE III

- 116 NREL, *Best Research Cell Efficiencies*, éditeur : National Renewable Energy Laboratory, 2018, 1p.
- 117 TrinaSolar, « Why half-cut solar cells make a smart addition to the PV world », in *TrinaSolar.com*
<https://www.trinasolar.com/us/resources/blog/why-half-cut-solar-cells-make-smart-addition-pv-world>,
consulté en juin 2018.
- 118 Hanifi H. et al., « Optimized Tab Width in Half-cell Modules », *Energy Procedia*, vol. 92, 2016, pp. 52-59.
- 119 Oswald M. et al., « Evaluation of Silicon Solar Cell Separation Techniques for Advanced Module Concepts », *Proceedings of the 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2013, pp. 1807-1812.
- 120 Fell A. et al., « Modeling Edge Recombination in Silicon Solar Cells », *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 8, n° 2, 2018, pp. 428-434.
- 121 A. Fell, « Modeling of Edge Recombination Losses in Half-Cells », *Proceedings of the 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2017, 4p.
- 122 Wong J., « Griddler : Intelligent Computer Aided Design of Complex Solar Cell Metallization Pattern », *Proceedings of the 39th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2013, pp. 933-938.
- 123 Zarmai M. et al., « A review of interconnection technologies for improved crystalline silicon solar cell photovoltaic module assembly », *Applied Energy*. Vol. 154, 2015, pp. 173-182.

Chapitre IV : Réalisation de cellules i- Cell IBC

INTRODUCTION

Malgré les avancées notoires en termes de coût et d'efficacité de la technologie Interdigitated-Back Contact (IBC) ces dernières années [124], de nouveaux concepts innovants sont nécessaires pour continuer à réduire les coûts. De plus, alors que l'efficacité des cellules solaires IBC peut atteindre aujourd'hui plus de 25%, les pertes CTM observées peuvent diminuer la puissance des modules finaux de plus de 3 % [1]. Dans le quatrième chapitre de cette thèse, le développement d'un procédé efficace de fabrication de modules composés de sous-cellules IBC à haut rendement et à moindre coût a été étudié. L'objectif final est d'obtenir des modules i-Cell IBC avec des hauts rendements, et des pertes CTM réduites par rapport à des modules composés de cellules IBC carrées de taille standard.

IV-1. OBJECTIFS

Dans un premier temps, la réduction de la quantité de silicium monocristallin de type n pur a été étudiée. D'autre part afin de réduire les pertes CTM, la cellule solaire i-Cell IBC a été conçue et développée. Comme dans le chapitre précédent, la technique consiste à intégrer plusieurs cellules de petite taille, en lieu et place d'une cellule standard, qui sont ensuite connectées en série dans les modules. Comparé aux modules solaires IBC standard où le courant de chaque cellule est très élevé (plus de 10 A), un courant nettement inférieur circulerait en théorie dans un module IBC i-Cell, ce qui permettrait, comme pour les cellules PERC de fortement réduire les pertes de ligne. Dans la présente étude, des quarts de cellules monocristallines IBC (39 x 156 mm²) ont été réalisés sur une même plaquette. Les quarts de cellules sont ensuite séparés des "cellules mères" et reliés en série par différentes techniques qui ont été comparées, et qui servent à la fois de support mécanique et de connexion électrique.

Contrairement aux modules IBC classiques, les modules fabriqués à partir de sous-cellules IBC peuvent en théorie utiliser des rubans de cuivre qui remplacent la plaque conductrice (Conductive Foil) traditionnellement utilisée. Cet aspect technique permet ainsi de réduire le coût de fabrication des modules et de créer de la bifacialité. Les cellules IBC en effet ne présentent pas de contacts métalliques en face avant, permettant la génération d'un fort courant par l'élimination de l'ombrage normalement provoqué par la grille d'argent, et leur métallisation arrière est équivalente en termes de surface couverte à une métallisation de face avant de cellule PERC (environ 5 % de la surface). Ces cellules sont donc d'excellents candidats à la réalisation de modules bifaciaux qui permettraient une augmentation du courant généré. La segmentation en sous-cellules prend alors tout son sens dans ce contexte.

Comme pour les cellules PERC étudiées dans le chapitre précédent, la réduction de l'épaisseur des plaquettes de silicium monocristallin est le premier axe développé. L'objectif fixé est de réduire par paliers successifs l'épaisseur des plaquettes de silicium de 160 à 60 µm contre les 180 µm rencontrés habituellement dans l'industrie photovoltaïque.

La production de cellules solaires IBC (Interdigitated Back Contact) permet aujourd'hui l'obtention de rendements très élevés avec des moyens issus de la micro-électronique. Le procédé

de fabrication IBC dans cette étude utilise des étapes usuelles de l'industrie photovoltaïque, dont la sérigraphie. En s'appuyant sur une simulation numérique, une optimisation a été mise en œuvre avec l'objectif de produire des cellules présentant de hauts rendements.

IV-1.1. Optimisation des cellules par modélisation

La cellule Zebra est une cellule IBC mise au point par l'ISC Konstanz. Elle est obtenue à l'aide de procédés exclusivement industriels, comme la diffusion de BBr₃ et POCl₃ pour l'obtention des zones p⁺ et n⁺, l'oxydation thermique et le dépôt de nitrure PECVD pour la formation des couches minces de passivation, ainsi que la sérigraphie et le recuit des contacts pour l'obtention des contacts à l'aide de pâte d'argent. Ces procédés sont réalisés sur des plaquettes standard de silicium Cz de 156 x 156 mm² et de type n [125]. Des rendements supérieurs à 21 % ont été obtenus avec des cellules Zebra, qui sont produites avec des moyens moins onéreux que les cellules Sunpower, record de la catégorie IBC avec 25,1 % [126]. Les courants produits par ces cellules sont supérieurs à 10 ampères et engendrent de fortes pertes lors de la mise en module [127]. De plus, les cellules Zebra peuvent être bifaciales, ce qui augmente d'autant plus le courant généré : il a été constaté que la bifacialité permet un gain d'environ 13 % pour de telles cellules connectées en modules, comparativement aux mêmes cellules dans un module monofacial [125]. La structure de telles cellules est détaillée dans la Figure IV-1.

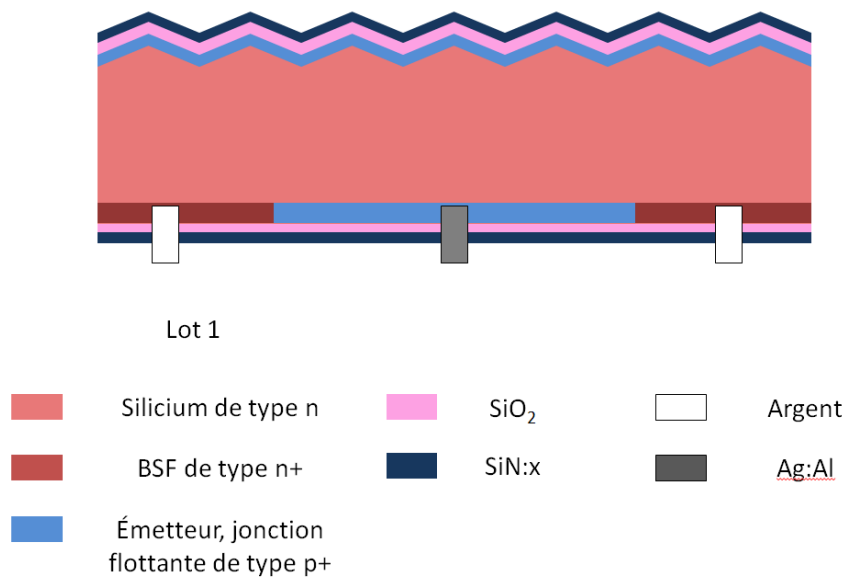


Figure IV-1 : vue de profil schématique d'une portion de cellule Zebra. Des zones dopées p⁺ et n⁺ sont présentes alternativement en face arrière, et connectées par des doigts d'argent. La face avant n'est pas métallisée.

IV-1.2. Procédé

Afin de diminuer les pertes résistives inhérentes aux très forts courants générés par ces cellules IBC, il a été proposé dans cette étude de segmenter les cellules carrées originales en sous-cellules, en s'appuyant sur le concept i-Cell comme pour les PERC du chapitre précédent. Les connexions entre cellules IBC se faisant exclusivement par la face arrière et étant donc moins visibles, il n'a pas été proposé d'en changer la conception initiale. Les motifs en forme de grilles interdigitées (voir la partie I-5.2 sur les cellules IBC) avec busbars et doigts, plus efficaces n'ont pas été modifiés.

Il est cependant nécessaire d'adapter la conception des Zebra pour des quarts de cellules. Les segmenter permet de les interconnecter par des morceaux de ruban, ce qui donne l'occasion de réaliser des modules bifaciaux et à pertes résistives réduites. Il faut pour cela tenir compte de plusieurs paramètres : i) pour correctement réaliser les interconnexions entre sous cellules rectangulaires, deux busbars contactant respectivement les zones p et n doivent être positionnés le long des deux grands côtés (cf. Figure IV-2). Ceci entraîne une contrainte sur la longueur des doigts, disposés de manière perpendiculaire aux busbars, qui dépendra donc de la largeur des cellules. De la longueur des doigts dépendra partiellement la valeur de résistance série des sous-cellules. ii) pour compenser les effets liés à la longueur des doigts, il est possible de jouer sur l'espacement (ou pitch) entre ceux-ci. De cette manière, les effets néfastes liés à une forte résistance série peuvent être limités. Cette limitation s'applique néanmoins au prix d'une augmentation de la surface métallisée, qui fait augmenter les recombinaisons en face arrière et diminue les performances électriques des cellules. iii) pour limiter les recombinaisons, il est également possible de modifier les propriétés des busbars. Leur largeur peut être réduite, mais pas trop afin de garantir la possibilité de souder des rubans dessus. De même, une pâte d'argent ne traversant pas la couche diélectrique peut être utilisée. iv) l'arrière d'une cellule IBC est composée de zones p et n alternées qui forment des jonctions. La mobilité des porteurs est différente dans chacune de ces zones, ce qui entraîne des valeurs de recombinaison différentes. En modifiant la proportion de chacune de ces zones entre deux doigts, les propriétés des cellules évoluent. v) afin de réduire les coûts, la réduction de l'épaisseur des plaquettes de silicium est étudiée. Certains paramètres, comme le courant généré doivent être évalués afin de vérifier quelle est l'épaisseur optimale, sachant que la jonction est située en face arrière de la cellule.

Des calculs ont également été menés afin de déterminer quelle configuration d'interconnexion est souhaitable afin de limiter au maximum les pertes lors de la mise en module. Le nombre de points de soudures ainsi que leur largeur a été étudié.

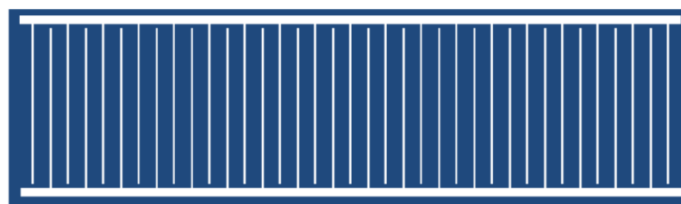


Figure IV-2 : pour la face arrière des sous-cellules IBC, les busbars (traits blancs horizontaux) sont disposés le long des deux grands côtés. Les doigts (traits blancs verticaux) sont répartis perpendiculairement le long des busbars. Cette représentation schématique ne respecte ni l'échelle ni les proportions.

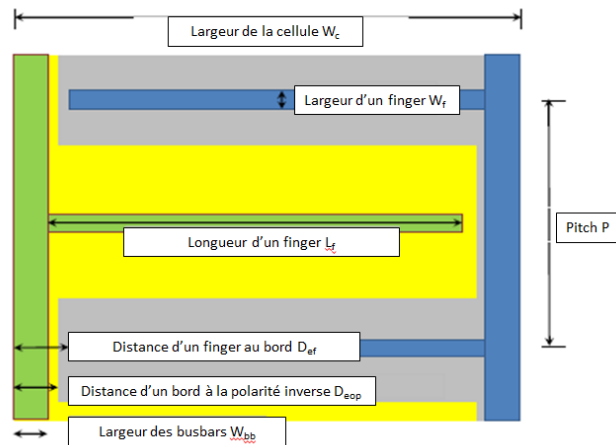


Figure IV-3 : représentation schématique des paramètres pris en compte pour le calcul des performances des sous-cellules IBC. Les valeurs de ces paramètres sont données dans le **Tableau IV-1**.

Tableau IV-1 : valeurs étudiées pour chacun des paramètres pris en compte dans la simulation

paramètre	symbole	valeur
Largeur de la sous-cellule	W_c	39 mm
Largeur des doigts	W_f	60 μm
Longueur des doigts	L_f	37,2 mm
Distance d'un finger au bord	D_{ef}	1800 μm
Distance d'un finger à la polarité inverse	D_{eop}	1500 μm
Largeur des busbars	W_{bb}	1200 μm
Pitch	P	800 à 1400 μm
Fraction de l'émetteur	-	64 ou 50 %

Il est donc nécessaire de trouver un compromis entre ces différents paramètres, en vue d'établir la conception d'une cellule générant la puissance maximale. Pour ce faire, les sous-cellules i-Cell Zebra ont été modélisées à l'aide du logiciel Quokka. Des données supplémentaires de profil de génération des porteurs en fonction de la profondeur de la cellule ont été calculées à l'aide du traceur de rayon disponible sur le site PV Lighthouse, et des calculs liés à la métallisation ont été établis grâce au programme Griddler. La résistance série des contacts a été calculée plus en détail grâce au modèle analytique développé par A. Mohr en 2005 [128]. Il permet l'obtention de la résistance externe de la cellule.

Les structures simulées numériquement avec Quokka sont montrées dans les Figure IV-4 et Figure IV-5 . Les résultats de simulation sont issus de trois zones distinctes de la cellule d'environ 1000 μm par 500 μm qui ont été modélisées. La première zone est située entre deux doigts de même type, et permet de simuler les effets de la variation d'écartement entre doigts. Les deux autres zones sont modélisées respectivement autour des busbars p et n et permettent d'intégrer les effets liés à cette partie de la métallisation. Une estimation des performances est obtenue en

moynnant les résultats de chaque zone simulée en fonction du taux de surface occupé par ces dites zones sur une sous-cellule.

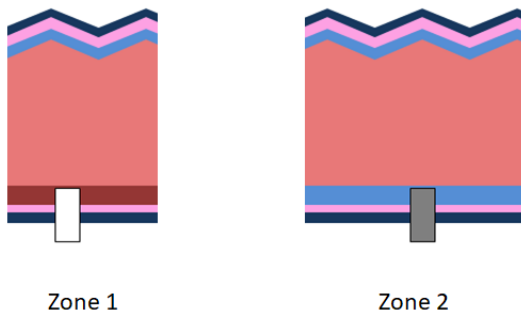


Figure IV-4 : représentation 1D des deux régions de la cellule utilisée pour calculer le profil de courant photogénéré.

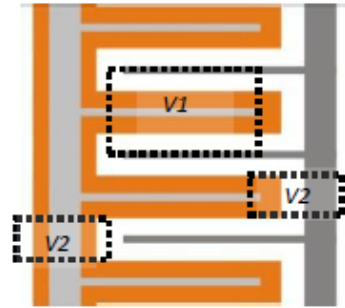


Figure IV-5 : La zone intérieure de la cellule (V1) permet d’appréhender la distance entre doigts de la cellule. Les zones extérieures (V2) permettent de visualiser les zones sous les busbars p et n. Le résultat de simulation électrique obtenu avec Quokka est une combinaison des résultats des trois zones.

IV-1.3. Résultats

Dans le cas de la réalisation des sous-cellules IBC développées dans l’étude, le choix des dimensions n’est pas anodin, comme il a été vu précédemment. En effet, la largeur de la sous-cellule dicte la longueur des doigts, puisque les deux busbars sont disposés sur chaque grand côté. Pour des raisons de simplification de l’assemblage, et de valeur de tension de sortie pour les modules assemblés avec des sous-cellules IBC, deux valeurs ont été choisies pour la largeur des cellules : 19,5 mm ou 39 mm. Ces largeurs correspondent respectivement à un huitième de cellule et à un quart de cellule.

IV-1.3.1. Dimensionnement

Pour chacune de ces largeurs, différentes valeurs de pitch ont été étudiées. Il s’agit de la distance entre deux doigts consécutifs de même polarité. Plus la valeur de pitch est faible, plus les doigts sont disposés de manière serrée. Enfin, pour chaque largeur de cellule et pour chaque valeur d’espacement des doigts, la fraction de surface occupée par l’émetteur a été étudiée. Il s’agit du rapport entre la demi-longueur d’une zone occupée par un émetteur par la valeur du pitch, comme montré sur la Figure IV-3.

Pour chacune des deux largeurs de sous-cellules, les courbes de densité de courant de court-circuit J_{sc} et de tension de circuit ouvert V_{oc} ont été calculées en fonction des valeurs d’espacement des doigts et de fraction de l’émetteur, et sont illustrées sur les figures ci-dessous.

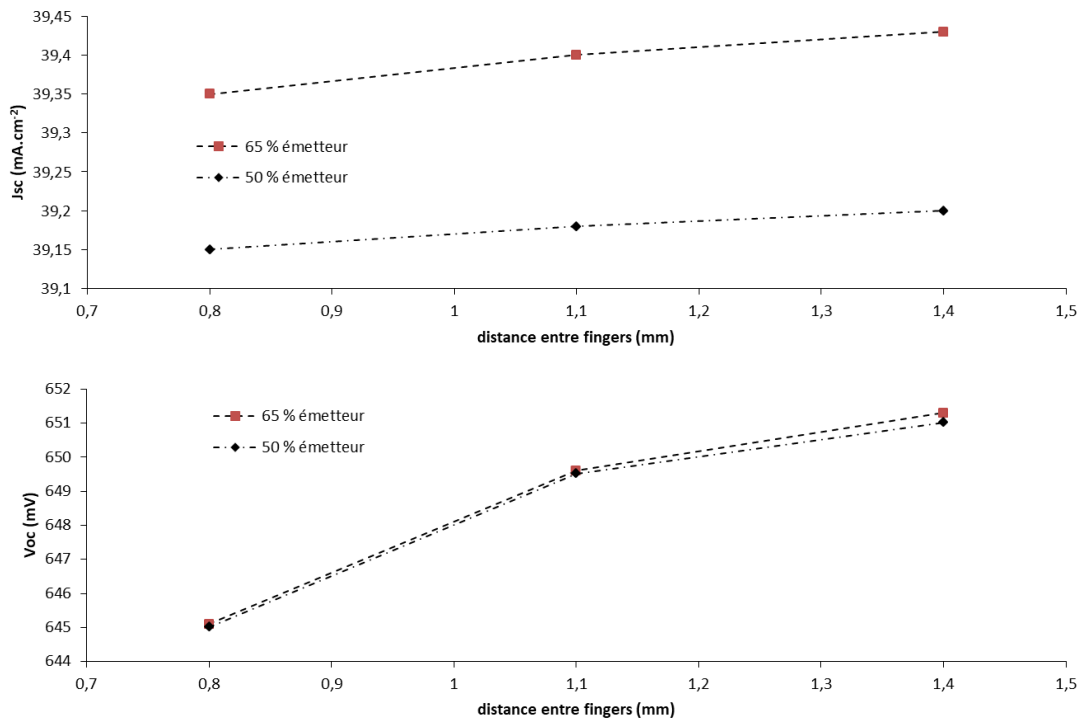


Figure IV-6 : valeurs de densité de courant de court-circuit J_{sc} et de tension de circuit ouvert V_{oc} en fonction du pitch des doigts et de la fraction de surface occupée par l'émetteur, pour des huitièmes de cellule d'une largeur de 19,5 cm.

Plus les valeurs d'espacement des doigts sont grandes, plus l'augmentation des valeurs de courant et de tension générées par la cellule est constatée. Le fait d'espacer les doigts tend en effet à diminuer la portion de la face arrière métallisée. Cette diminution de la portion de la face arrière métallisée contribue à la diminution des recombinaisons de surface, qui sont en effet beaucoup plus faibles à l'interface silicium/oxyde qu'à l'interface silicium/métal des doigts [129]. Cependant, l'augmentation de l'espacement des doigts et la diminution de la proportion de la face arrière métallisée entraîne une augmentation de la résistance série qui induit une diminution du FF. En traçant la courbe du rendement en fonction du pitch pour des cellules d'une largeur de 19,5 cm, comme montré sur la Figure IV-8, il est possible d'observer que le meilleur compromis entre ces deux effets antagonistes est atteint pour une valeur de pitch de 800 μm , ou 0,8 mm. Il est donc intéressant de diminuer l'espacement entre doigts afin d'augmenter les performances de la cellule. Des valeurs d'espacement inférieures à 0,8 mm n'ont pas été investiguées, car il est en l'état impossible d'obtenir de tels motifs par sérigraphie.

En revanche, la fraction de la surface arrière couverte par l'émetteur influe grandement sur la densité de courant. Le passage de 50 % à 65 % d'émetteur entre deux doigts de polarité inverse permet une augmentation de J_{sc} d'environ 0,2 mA.cm⁻², indépendamment de la valeur du pitch. Cet effet déjà observé dans des études sur des cellules IBC de forme carrée [130,131], est en partie lié à un phénomène appelé « *electrical shading* » qui a lieu au niveau des régions formant la base, près des doigts. Les résultats de ces études montrent qu'en augmentant encore la fraction de l'émetteur, il serait théoriquement possible d'obtenir une augmentation de la valeur de J_{sc} . Actuellement, une telle évolution est difficile en raison des contraintes techniques liées à la diffusion des régions formant la base et l'émetteur en face arrière.

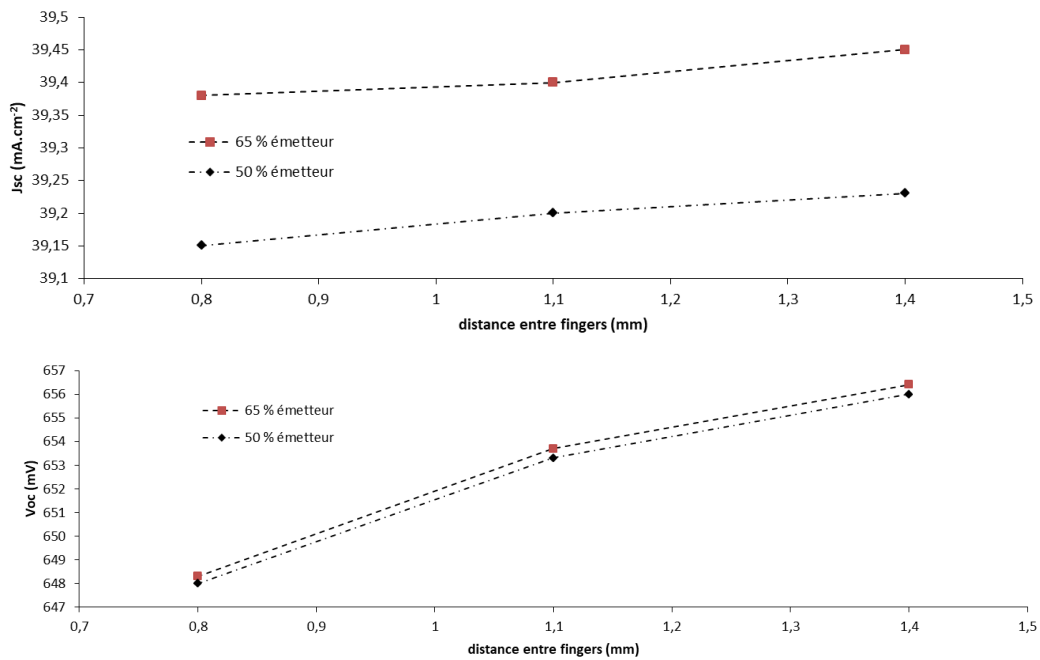


Figure IV-7 : valeurs de densité de courant de court-circuit J_{sc} et de tension de circuit ouvert V_{oc} en fonction du pitch des doigts et de la fraction de surface occupée par l'émetteur, pour des quarts de cellule d'une largeur de 39 cm.

On observe les mêmes effets sur les sous-cellules modélisées avec une largeur de 39 mm. L'espacement des doigts tend à diminuer le rendement par augmentation de la résistance série R_s des cellules. Cependant l'effet est plus brusque puisque les doigts sont plus longs, et génèrent d'ores et déjà plus de résistance série. Une diminution du rendement de 0,2 % est ainsi constatée pour une augmentation de l'espacement des doigts de 0,8 à 1,4 mm pour des sous-cellules de 39 mm de large, contre seulement 0,1 % de rendement pour des sous-cellules de 19,5 mm de large dans les mêmes conditions. La variation fraction de la face arrière couverte a en revanche les mêmes conséquences quantitatives, indépendamment de la largeur des sous-cellules : passer de 50 à 65 % permet un gain 0,1 % de rendement environ, pour les cellules de l'étude.

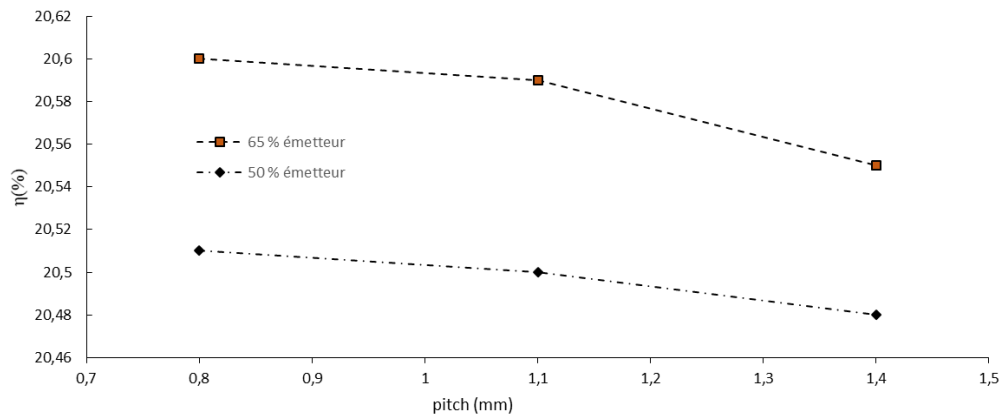


Figure IV-8 : valeurs de rendement calculées en fonction du pitch entre doigts pour des fractions d'émetteur de 50 % et 65 %, et pour une largeur de sous-cellule de 19,5 mm.

Le fait de découper les cellules en huitièmes plutôt qu'en quarts permet un gain de rendement de 0,3 % dans le cas où l'espacement entre les doigts est le plus large possible, à savoir 1,4 mm. Cette différence est fortement réduite pour des faibles valeurs d'espacements, avec une différence de rendement de 0,07 % calculée pour une valeur de pitch de 0,8 mm. Il a été choisi dans un premier temps de réaliser des quarts de cellules, car cette approche limite le nombre d'opération de découpe, et surtout d'assemblage des sous-cellules. En effet, il a été choisi de réaliser les busbars d'argent avec de la pâte métallique non traversante pour limiter les recombinaisons en face arrière. Or, ces pâtes adhèrent peu à la face arrière de la cellule, et des risques d'arrachement sont d'autant plus présents que les opérations de soudure sur ces busbars sont nombreuses. De plus, cette étude de simulation ne tient pas compte de la création de zones non-passivées lors de la découpe des cellules en sous-cellules. Lors de la découpe de huitièmes de cellules, le rapport entre la surface des côtés non passivés créés et la surface totale de la cellule est 2,3 fois plus élevé que pour des quarts de cellules, et il est possible que les performances électriques soient affectées. Cet aspect est en cours d'étude au moment de la rédaction, en vue de réaliser ultérieurement des huitièmes de cellules.

IV-1.3.2. Nombre de points de connexion nécessaires

L'utilisation de pâte d'argent non traversante pour la réalisation des busbars permet de meilleurs résultats quant aux performances des cellules. Cependant, cette solution présente deux limites : premièrement, elle induit une étape de métallisation supplémentaire. En effet, les doigts d'argent doivent contacter le silicium et sont réalisés avec une pâte d'argent traversante quoi qu'il arrive. Il faut donc imprimer les doigts en une étape, puis les busbars en une seconde étape puisque les pâtes ne sont pas les mêmes. Ensuite, comme vu précédemment, la pâte non traversante est simplement déposée sur la couche diélectrique de la face arrière et tient donc moins solidement sur la cellule qu'un busbar réalisé à partir de pâte traversante. La tenue mécanique à l'arrachement est moindre. Pour remédier à cela, tout en limitant les pertes par recombinaisons liées à une grande surface de contact entre le métal et le silicium, une nouvelle conception de busbar réalisé à partir de pâte traversante a été proposée (voir Figure IV-9). Le busbar est moins large, sauf sur certains plots de 3 mm de long par 2 mm de large répartis régulièrement sur sa longueur et destinés à la soudure des rubans.

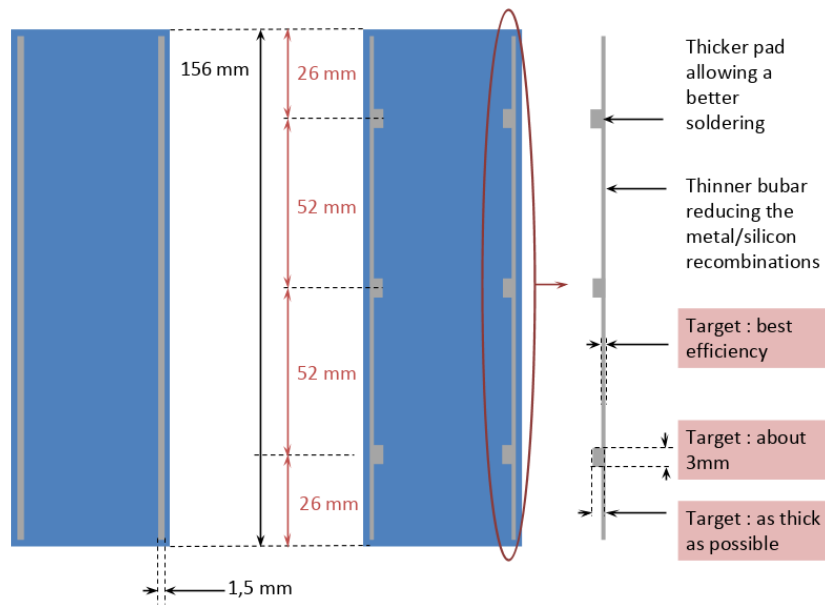


Figure IV-9 : description de la nouvelle onception de busbar (à droite), comparée à dessin des busbars des cellules Zebra classiques (à gauche). Le nombre de busbars est indicatif sur ce schéma de pré-conception et doit être calculé afin d’optimiser l’extraction du courant.

Afin de maximiser la quantité de courant extraite de telles cellules, il est nécessaire de calculer le nombre minimal de points d’extraction suffisant à limiter les pertes à un niveau négligeable. Pour cela, la résistance série dans les busbars a été calculée grâce au modèle détaillé dans la partie IV-1.1, et à des valeurs de résistivité des busbars mesurées sur des cellules Zebra par ISC. A partir de ces valeurs, la résistance totale de la grille de métallisation arrière a été calculée en considérant un pitch de 800 μm entre les doigts. Les résultats sont disponibles dans le Tableau IV-2. Ces valeurs ont ensuite été intégrées dans le modèle électrique réalisé avec Quokka, pour obtenir l’incidence sur le FF et le rendement de la cellule, présentés sur la Figure IV-10. Les valeurs de résistance série sont exprimées en $\Omega.\text{cm}^{-2}$ car ce sont les unités utilisées par défaut par le logiciel.

Tableau IV-2 : valeurs de résistance calculées pour les busbars et l’ensemble de la métallisation en fonction du nombre de points de soudure utilisés.

Pitch (μm)	Largeur bb (μm)	Points extraction	$R_{\text{sbb}} (\Omega.\text{cm}^{-2})$	$R_{\text{total}} (\Omega.\text{cm}^{-2})$
800	1,2 / 0,8	11	0,04	0,31
		9	0,07	0,33
		7	0,11	0,37
		5	0,21	0,48
		3	0,66	0,86

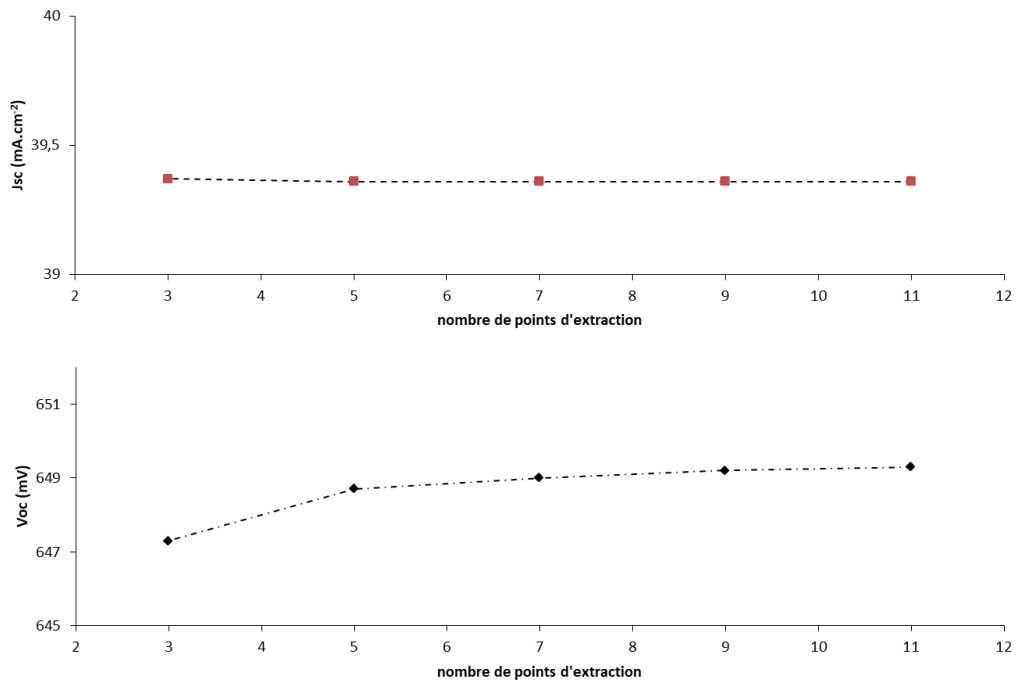


Figure IV-10 : valeurs de courant de court-circuit et tension de circuit ouvert calculées en fonction du nombre de points d'extraction du courant.

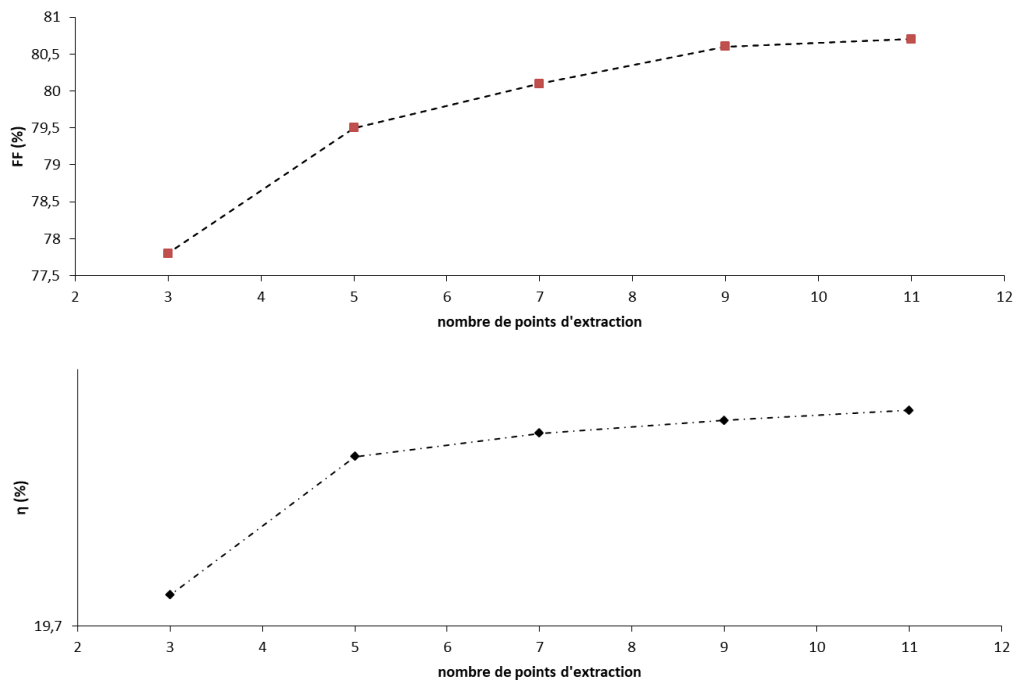


Figure IV-11 : valeurs de FF et rendement calculées en fonction du nombre de points d'extraction du courant.

La résistance série des busbars augmente fortement quand le nombre de points d'extraction diminue, à partir de moins de sept points. La résistance totale de la métallisation est fortement influencée par cette variation. Les conséquences sont faibles sur les valeurs de courant et de tension générées, qui diminuent faiblement, cependant l'impact sur le FF est fort, ce qui entraîne

une forte diminution du rendement. Ainsi, le rendement passe de 20,5 à 19,8 % quand on passe de 10 points d'extraction du courant à seulement 3. Cette étude montre qu'il serait a priori nécessaire de connecter les sous-cellules entre elles par au moins 7 points, voire 10 pour obtenir des modules performants. La solution optimale consisterait en l'assemblage des sous cellules entre elles par un ruban qui couvrirait l'ensemble de la longueur des busbars, non traversants de préférence, afin de limiter les pertes par recombinaison en face arrière.

IV-1.3.3. Validation du modèle

Après réalisation des premiers lots de cellules, le modèle numérique mis au point pour l'étude a été utilisé pour simuler des cellules de mêmes caractéristiques. En comparant les résultats théoriques avec les mesures, il a été possible d'évaluer la précision de la simulation. Deux types de plaquettes ont été simulés, les plaquettes Sun Edison de qualité microélectronique utilisées habituellement par ISC pour les cellules Zebra, et les plaquettes Pillar fournies pour la réalisation des premières cellules de l'étude. Des rendements autour de 20 % ont en effet été obtenus pour les premiers lots fabriqués, et l'objectif est de démontrer qu'une partie de cette diminution des performances peut être attribuée au matériau utilisé.

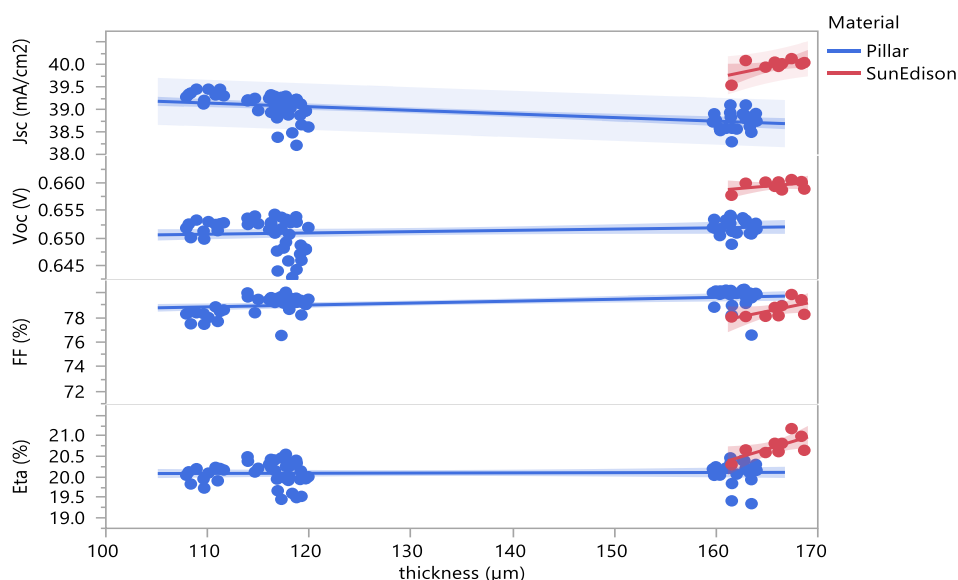


Figure IV-12 : caractéristiques électriques mesurées pour les cellules mères i-Zebra en fonction du matériau utilisé et de l'épaisseur des plaquettes.

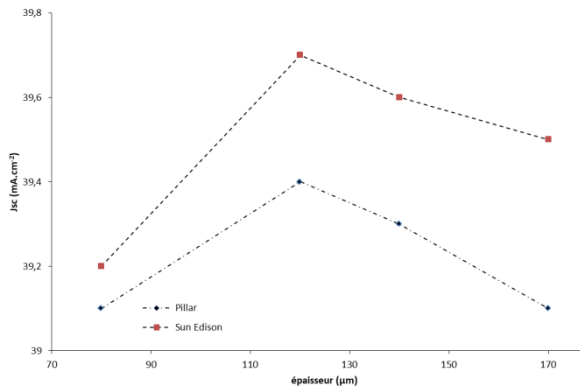


Figure IV-13 : valeurs de J_{sc} calculées en fonction du type et de l'épaisseur de la plaquette utilisée.

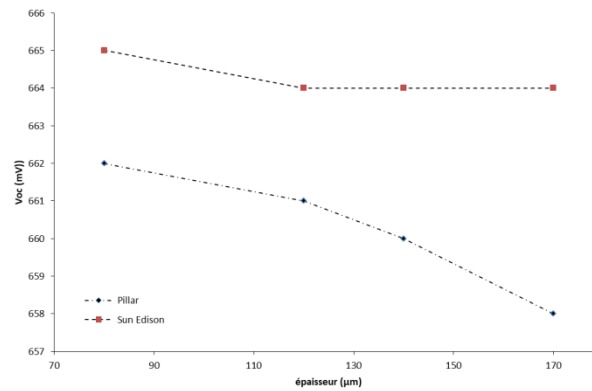


Figure IV-14 : valeurs de V_{oc} calculées en fonction du type et de l'épaisseur de la plaquette utilisée.

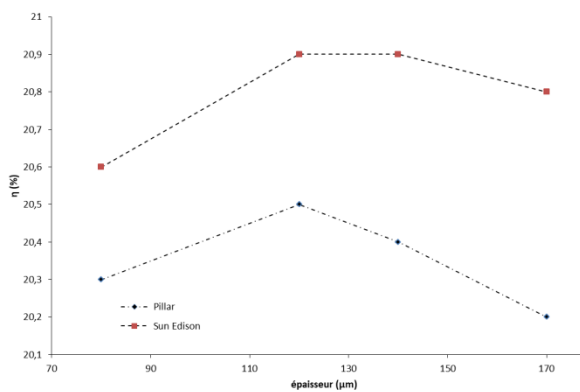


Figure IV-15 : valeurs de rendement calculées en fonction du type et de l'épaisseur de la plaquette utilisée.

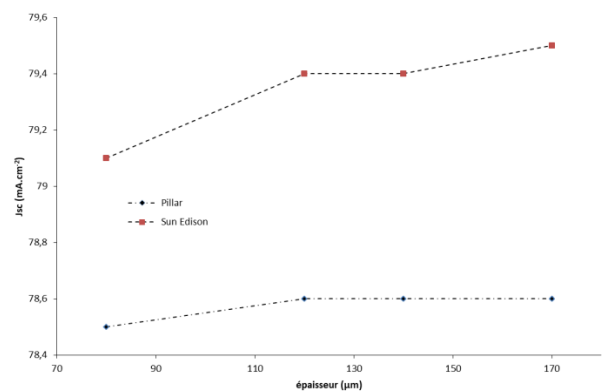


Figure IV-16 : valeurs de FF calculées en fonction du type et de l'épaisseur de la plaquette utilisée.

Les résultats obtenus en simulation pour des plaquettes Pillar sont globalement assez proches des résultats mesurés sur le premier lot de quarts de cellules IBC (run 1891). Les densités de courant de court-circuit mesurées sont légèrement plus faibles que la prévision théorique ($39,2 \text{ mA.cm}^{-2}$ en moyenne contre une prévision de $39,4 \text{ mA.cm}^{-2}$ pour les cellules de $120 \text{ }\mu\text{m}$ d'épaisseur) mais sont très proches avec moins de 0,5 % de différence. Les tensions de circuit ouvert V_{oc} sont en revanche plus faibles en réalité que par simulation, avec des différences de 10 mV constatées en faveur de la simulation. Cette différence peut en partie s'expliquer par la durée de vie dans le volume et de surface qui ont sans doute été légèrement surestimées dans le modèle numérique. La seconde explication tient dans la différence constatée entre les valeurs de FF calculées et mesurées. Celles-ci sont dues au procédé de sérigraphie pas encore optimisé pour les premiers lots de cellules, qui entraîne une diminution du FF d'environ 1 % par rapport à la théorie. Certains doigts n'ont en effet pas été imprimés de manière alignée ni centrée avec les zones de BSF et d'émetteur en face arrière, ce qui tend à faire augmenter la résistance série. Aucun shunt n'a en revanche été constaté, il semble donc qu'aucun court-circuit n'ait été créé par ces défauts d'alignement. Cette diminution influe elle-même sur la diminution des valeurs de courant et de tension mesurées. En conséquence, le rendement mesuré est environ 0,2 % plus faible que les prédictions pour les premiers lots de cellules, mais pourrait être amélioré quand le procédé de sérigraphie sera mieux maîtrisé.

En ce qui concerne la simulation avec les paramètres des plaquettes Sun Edison, le modèle théorique semble également assez proche des résultats obtenus. La différence au niveau du FF est cependant encore plus notable que pour les cellules réalisées à partir de plaquettes Pillar. Là aussi, le procédé de sérigraphie peut être mis en cause, puisque les cellules réalisées à partir de plaquettes Sun Edison ont été réalisées les premières, avant les cellules Pillar du même lot. Elles permettent de constater une amélioration dans le procédé de sérigraphie entre les premières cellules réalisées et les suivantes.

IV-2. REALISATION DE SOUS-CELLULES IBC

IV-2.1. Procédé

Des centaines de plaquettes de silicium de type n ont été fournies à ISC. Ces plaquettes proviennent de différents fabricants. Les caractérisations expérimentales de la longueur de diffusion, de la durée de vie et du niveau de dopage ont été menées sur les plaquettes avant la réalisation des cellules IBC. Au total 9 groupes de cellules ont été réalisés dans le cadre d'un projet de recherche européen Solar Eranet baptisé HVolt-PV. Ces différentes séries de cellules ont permis de tester plusieurs conceptions de métallisation testées numériquement. Hormis la sérigraphie et l'éventuelle découpe des sous-cellules, le procédé de fabrication des cellules est identique quel que soit le lot, et est détaillé dans la Figure IV-18.

Tableau IV-3 : caractéristiques des 9 lots de cellules fabriqués. Les busbars ont été sérigraphiés avec des pâtes traversant la couche diélectrique et contactant le silicium (*firing through*, ft), ou avec des pâtes non traversantes (*non firing through*, nft).

Lot	Plaquette	Quantité	Type	Epaisseur (µm)	Fraction émetteur	Pitch	busbars
1891	SunEdison	126	Zebra	180/120/60	65%	1.4	nft
1894	Pillar	126	i-Cell	180	50%/65%	0.8	nft
1897	Pillar	44	i-Cell	120	65%	0.8	nft/ft
2042	Bai'er 1	128	i-Cell	180	65%	0.8	nft
2043	Bai'er 1	128	i-Cell	120	65%	0.8	nft
2044	Bai'er 1	126	Zebra	180	65%	1.1	nft
2155	Bai'er 2	128	i-Cell	180	50%/65%	0.8	nft
2126	Bai'er 2	126	Zebra	180	65%	1.1	nft

Toutes les étapes ont été réalisées à ISC pour des raisons de confidentialité du procédé de fabrication. Cependant, les grandes lignes du procédé de fabrication peuvent être décrites, car elles ont déjà été révélées dans la littérature scientifique [132]. Après enlèvement des dommages de sciage, les plaquettes ont été amincies à 160 µm, 120 µm ou 60 µm d'épaisseur selon les fournées d'échantillon. Dans la foulée, les échantillons ont subi une texturation alcaline, suite à quoi ils ont été nettoyés en suivant le protocole RCA.

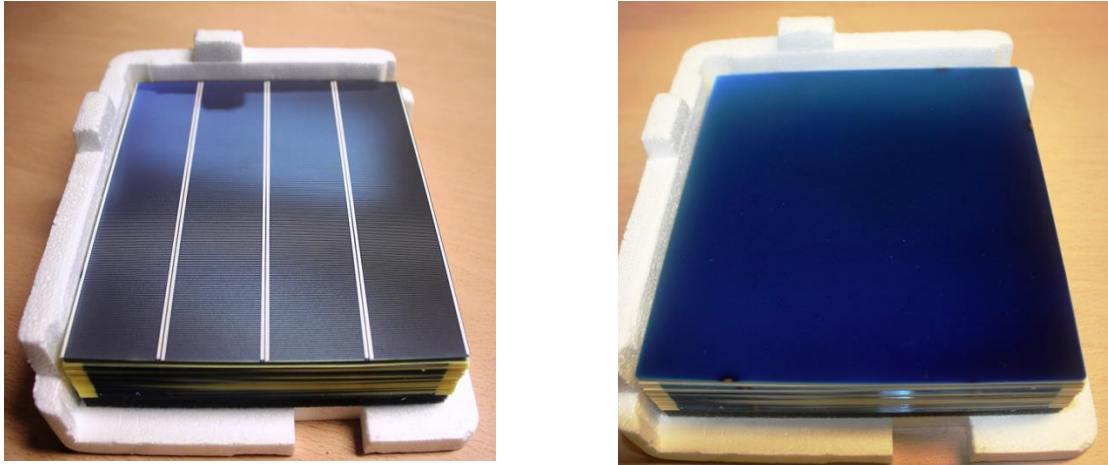


Figure IV-17 : photographie des cellules réalisées. Comme pour les autres cellules IBC, la face avant (à droite) ne comporte aucune électrode métallique ; celles-ci sont exclusivement déposées en face arrière (à gauche).

Une première diffusion de POCl_3 permet la réalisation de la zone dopée n^+ à l'arrière de la cellule qui fait office de BSF. L'ISC utilise par la suite une technique de masquage local dont les données sont confidentielles, selon un motif spécifique réalisé par le dépôt d'un masque par PECVD ouvert localement au laser. Ce masque sert à définir des zones dopées p^+ qui sont réalisées par diffusion de BBr_3 en face avant de la cellule, formant une jonction flottante de passivation [133] et localement en face arrière, donnant naissance à l'émetteur. Les zones p^+ et n^+ alternées en face arrière forment autant de jonctions qui servent à la conversion de l'énergie photovoltaïque. Un film mince composé d'un empilement de SiO_2 et de SiN_x déposés selon des épaisseurs inconnues est réalisé afin de passiver les surfaces avant et arrière de la cellule et de faire office d'anti-reflet. L'oxyde de silicium croît selon un procédé d'oxydation thermique, et le nitrure est déposé par PECVD. Enfin, les contacts métalliques p et n sont réalisés en face arrière et sérigraphiés.

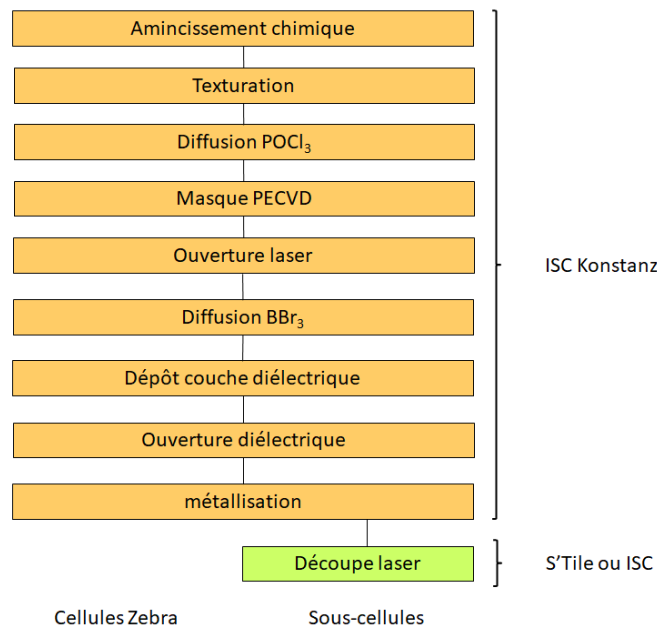


Figure IV-18 : séquence de fabrication des cellules Zebra classiques et des sous-cellules réalisées pour l'étude.

Un total de 1060 cellules IBC a été produit durant l'étude à partir des différentes plaquettes. Pour chaque type de plaquette, des cellules IBC standard (ZEBRA) ont été fabriquées en même temps que des cellules destinées à la découpe en sous-cellules, pour faire office de référence. La Figure IV-19 montre une cellule Zebra classique comparée à une i-Cell Zebra. Les i-Cell ont été séparées en sous-cellules par amorçage au moyen d'un laser femtoseconde industriel, de marque Rofin, en 20 passages, puis par clivage manuel.

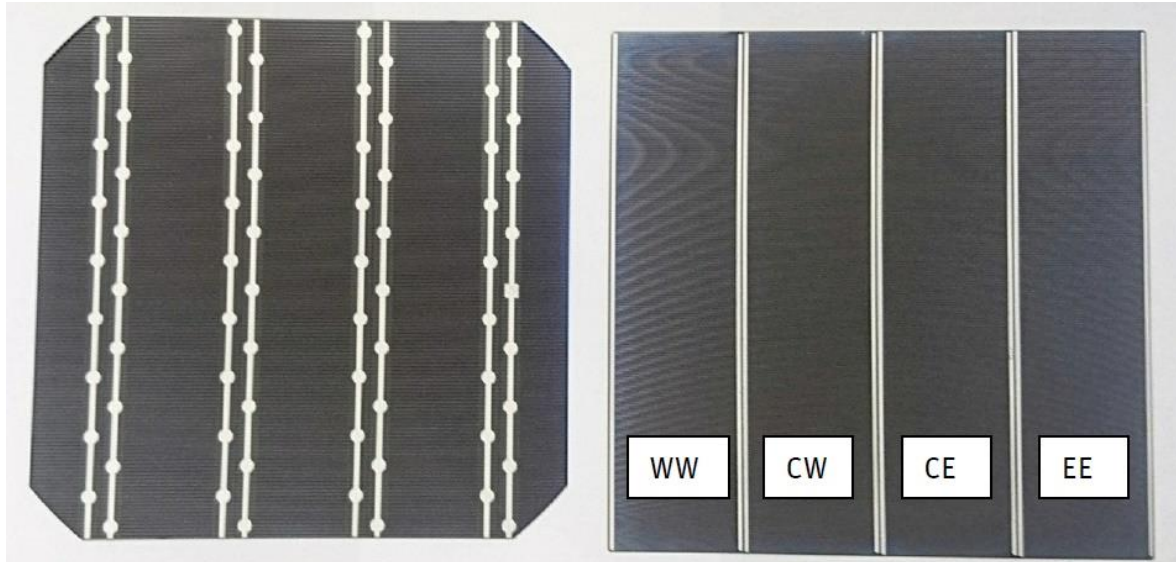


Figure IV-19 : la face arrière d'une cellule Zebra classique (à gauche), comparée à une i-Cell Zebra destinée à la fabrication de sous-cellules. Les sous-cellules sont identifiées par leur emplacement sur la plaquette originale : plein ouest (WW), centre-ouest (CW), centre-est (CE), et Extrême-Orient (EE).

Une partie des cellules a été caractérisée électriquement lors de déplacements à l'ISC. Les cellules IBC nécessitent en effet un simulateur solaire modifié qui dispose d'un moyen de contacter les électrodes arrière. Le support du simulateur solaire disponible à Constance a été remplacé par un support spécialement conçu pour contacter les plaquettes avant découpe et les sous-cellules, comme montré sur la Figure IV-20.

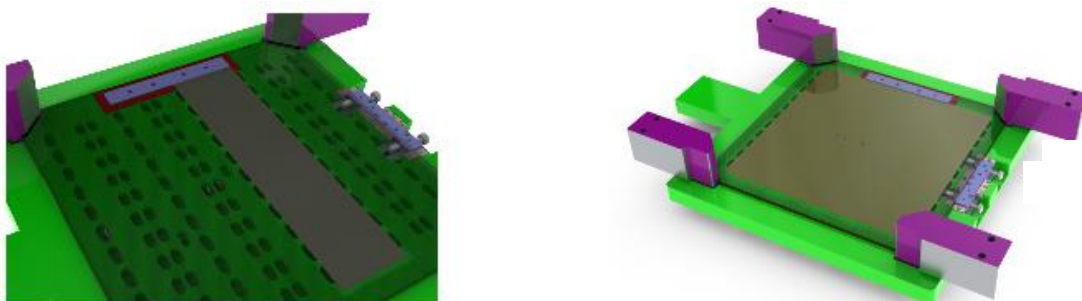


Figure IV-20 : plan de conception du support développé pendant l'étude pour mesures des cellules et sous-cellules IBC.

Une mesure avant et après découpe des caractéristiques électriques permet, comme pour les cellules PERC, d'évaluer les pertes inhérentes à l'éventuel endommagement du matériau, et à la création de zones non-passivées sur les bords des sous-cellules ainsi créées. Toutefois, il semble que les recombinaisons par les bords ont des effets plus dramatiques pour les cellules à contact arrière, qui demandent à être évalués avec attention [134].

Tableau IV-4 : caractéristiques électriques des plaquettes utilisées pour la réalisation des cellules (données fabricants).

fournisseur	Sun Edison	Pillar	Bai'er 1	Bai'er 2
Résistivité ($\Omega.cm$)		3	1	5
Durée de vie (μs)		≥ 700	≥ 700	≥ 700

IV-2.2. Résultats

Les résultats de mesure I-V par simulateur solaire pour les cellules entières (i-Cell IBC et IBC Zebra) sont donnés dans la Figure IV-21 pour chacun des types de plaquettes utilisés (Pillar, Bai'er 1 ohm cm, Bai'er 5 ohm cm, pour les plaquettes de qualité photovoltaïque, et Sun Edison pour les plaquettes de qualité microélectronique).

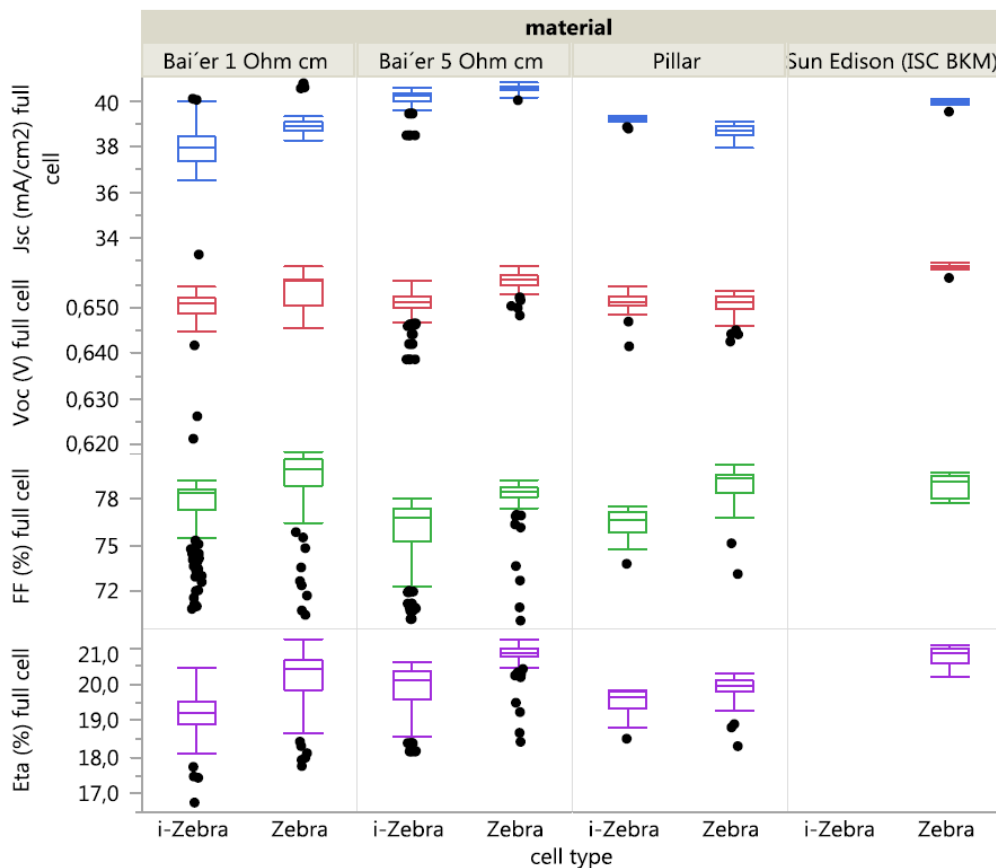


Figure IV-21 : valeurs de J_{sc} , de V_{oc} , de FF et de rendement mesurées pour les i-Cell et cellules standard réalisées en fonction du type de plaquette utilisé pour la fabrication.

Indépendamment du type de plaquette choisi, les cellules Zebra carrées présentent de meilleures caractéristiques que les sous-cellules réalisées dans les mêmes conditions. Pour les plaquettes présentant de bonnes valeurs de résistivité, un écart de 0,3 % de rendement est constaté entre sous-cellules et cellules, écart qui est plus important lorsque la résistivité des plaquettes est plus faible (Bai'er avec $\rho = 1\Omega.cm$). Cette légère différence peut être expliquée premièrement par la distance entre deux busbars qui est plus longue dans le cas des cellules i-Cell IBC (ou i-Zebra) que dans le cas des cellules Zebra. Ceci entraîne une résistance série plus importante et donc un « fill factor » plus faible pour i-Zebra ; d'où leur rendement légèrement plus faible.

La seconde explication possible a déjà été évoquée dans la partie précédente, et concerne la maîtrise du procédé de sérigraphie sur les i-Cell IBC, qui nécessite de nouveaux masques pour imprimer des doigts avec un espacement qui n'était pas utilisé jusqu'alors. Ce procédé n'est pas encore totalement optimisé au moment de la rédaction, et des défauts d'alignement lors de l'impression des doigts d'argent ont été constatés sur tous les lots de cellules réalisés. Ces défauts ne sont pas systématiques d'une plaquette à l'autre, ce qui tend à provoquer la plus grande dispersion dans les mesures des i-Cell IBC également.

Un rendement moyen de 20,2 % est néanmoins mesuré pour le meilleur lot d'i-Cells, réalisées sur les plaquettes Bai'er d'une résistivité de 5 $\Omega.cm$. Ce résultat semble prometteur pour des premiers prototypes, bien qu'il ne s'agisse pas des sous-cellules et qu'il existe des doutes sur les méthodes de caractérisation. Les cellules sont en effet mesurées dans une configuration totalement différente de leur utilisation dans un module, et il est difficile d'estimer à quel point la caractérisation est fidèle dans ces conditions. Le simulateur solaire permet en effet de mesurer les i-Cell non découpées comme si elles étaient quatre sous-cellules connectées en parallèle par leurs bords, alors que les sous-cellules sont censées être connectées en série par les busbars. D'éventuels courants de fuite pourraient apparaître entre sous-cellules durant la caractérisation et sous-évaluer la mesure.

IV-2.2.1. Effets de la découpe laser

Afin de préparer l'interconnexion, les sous-cellules ont été séparées des « cellules mères » par amorçage laser et clivage. Elles ont ensuite été testées par mesure I-V sur le même simulateur solaire et dans les mêmes conditions, un support spécial ayant été conçu et fabriqué spécialement (voir partie IV-2). La Figure IV-22 donne les paramètres électriques des sous-cellules IBC après leur séparation pour les deux types de matériaux (Bai'er 5 Ohm cm et Pillar) pour lesquels l'opération a été réalisée.

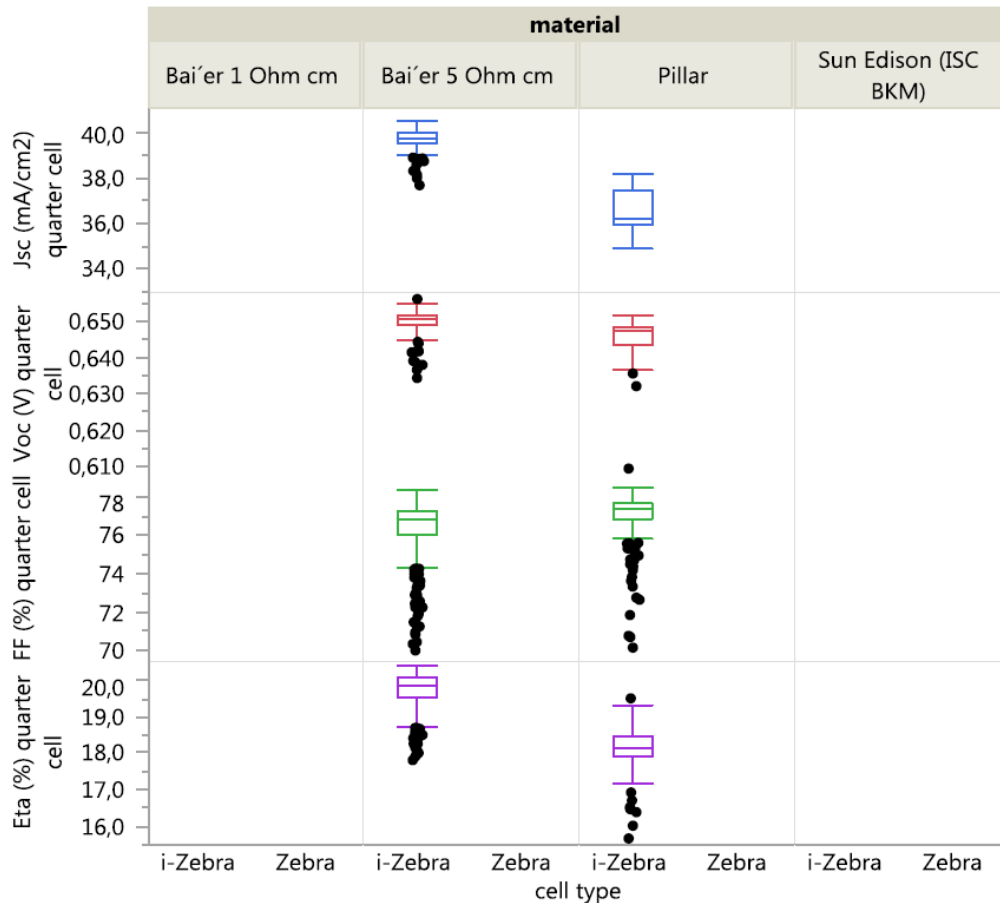


Figure IV-22 : les valeurs de J_{sc} , V_{oc} , FF et le rendement mesurées pour les cellules réalisées en fonction du type de plaquette utilisé.

Une légère diminution du rendement est observée sur les cellules issues des plaquettes Baier, puisque le rendement moyen passe de 20,2 à 20,1 %. L'étape de découpe laser semble dans ce cas de figure entraîner une diminution du rendement dans des proportions similaires à celles déterminées dans le chapitre II pour des cellules PERC, à savoir de 0,1 à 0,2 % de rendement absolu. La perte en rendement semble néanmoins beaucoup plus sévère pour les cellules issues de plaquettes Pillar. Une des explications mises en avant pour ce résultat est que ces cellules-ci ont servi à la mise au point du procédé de découpe et ont davantage subi de dommages pendant cette étape. Il est cependant difficile d'affirmer qu'il s'agit de la seule raison de cette forte diminution, bien qu'aucune autre n'ait été observée. Les rendements passent en effet de 19,5 % à 18,6 % en moyenne avant et après découpe, de manière partiellement inexpliquée.

Pour évaluer plus en détail les pertes liées à la découpe, les sous-cellules ont été classées selon leur position initiale sur plaquette de silicium. La Figure IV-23 explique ce placement, et la comparaison des paramètres électriques des « cellules mères » et de ceux des sous-cellules en fonction de leur position est donnée dans la Figure IV-24. Les mesures faites sur les quarts de cellules extérieurs WW et EE ont été regroupées ensemble, de même pour celles des quarts de cellules intérieurs (CE et CW).

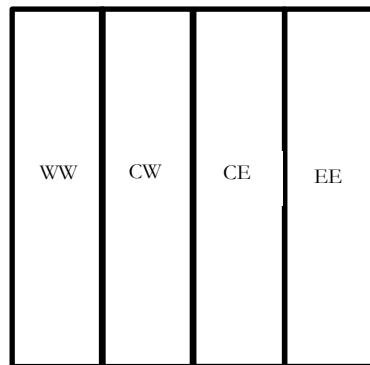


Figure IV-23 : quand la face avant de la cellule mère est placée vers l'observateur, les quarts de cellules sont nommés de gauche à droite WW, CW, CE et EE.

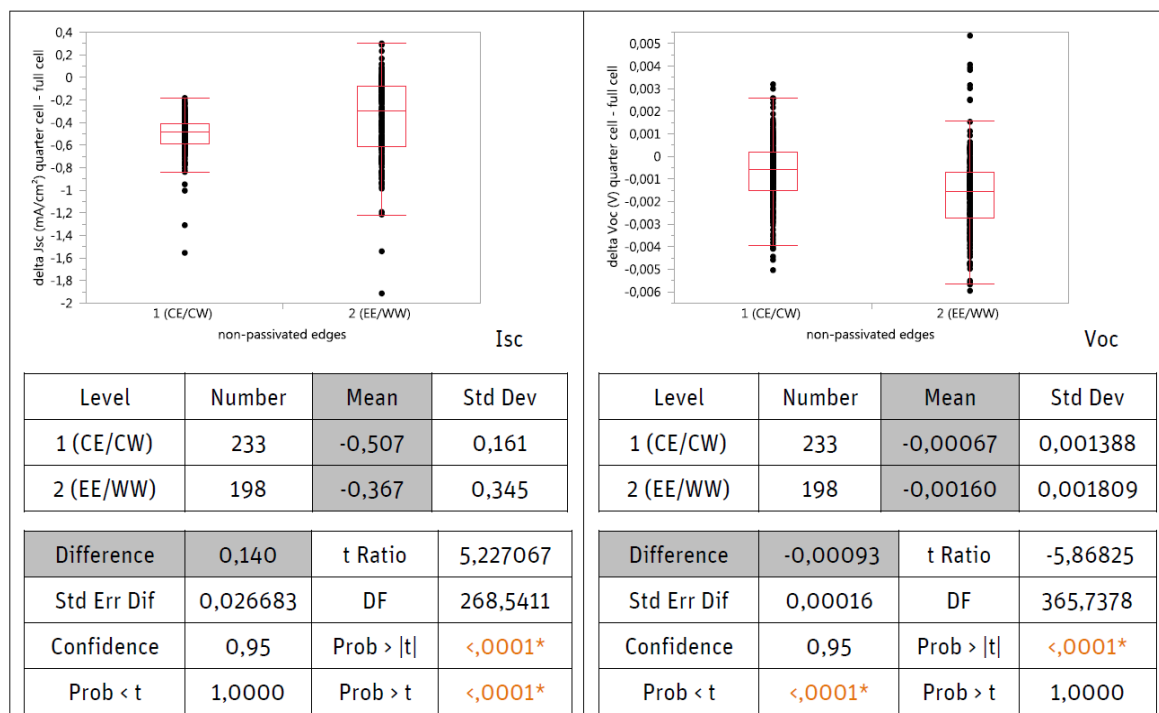


Figure IV-24 : valeurs d' I_{sc} et de V_{oc} mesurées pour les sous cellules en fonction de leur place sur les cellules mères : centrale (condition 1) ou extérieure (condition 2).

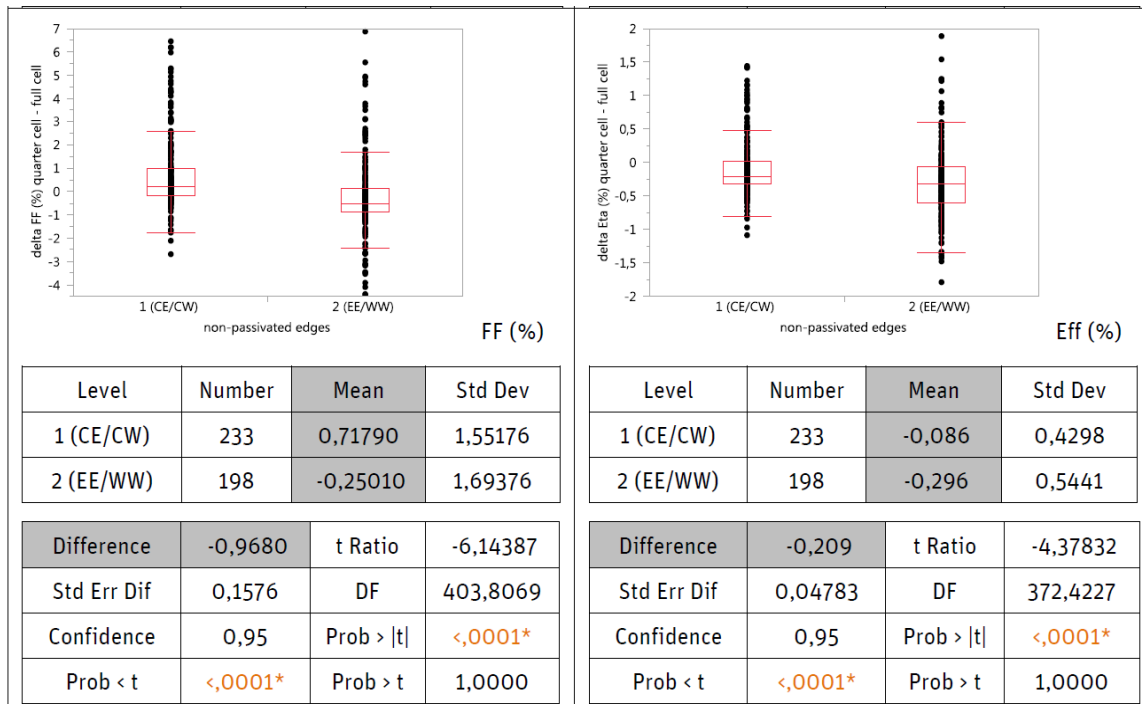


Figure IV-25 : valeurs de FF et de rendement mesurées pour les sous cellules en fonction de leur place sur les cellules mères : centrale (condition 1) ou extérieure (condition 2).

La comparaison des résultats obtenus pour les quarts de cellules avec les résultats des plaquettes dont ces dernières sont issues montre que les pertes dues à la découpe diffèrent en fonction de la position des quarts de cellules. Pour les sous-cellules dont la position initiale est à l'extérieur de la plaquette, on observe une perte moyenne de 0,3 % de rendement après découpe. Cette perte de rendement est liée à une forte diminution du courant de court-circuit ($-0,36 \text{ mA.cm}^{-2}$), alors que la tension de circuit ouvert reste inchangée après découpe, conjuguée à une perte en FF par rapport à la mesure de la plaquette entière. Les sous-cellules situées à l'intérieur de la plaquette initialement subissent une perte de rendement plus faible, de l'ordre de 0,9 % en moyenne, pourtant provoquée par une très forte diminution d' I_{sc} ($-0,5 \text{ mA.cm}^{-2}$). Cette diminution est cependant compensée par un fort gain en FF, de 0,7 % par rapport à la mesure de la plaquette entière. La valeur de V_{oc} ne varie elle non plus quasiment pas.

Deux effets qui agissent ici peuvent expliquer ces différences de performance avant et après découpe. La diminution du courant constatée peut être liée directement au phénomène de découpe. Comme pour les cellules PERC, l'amorce puis le clivage donnent naissance à un bord de sous-cellule non passivé. Or, les sous-cellules du centre, après découpe, voient la formation de deux bords non passivés, tandis que les cellules situées à l'extérieur voient la formation d'un seul bord non passivé. Ces bords non passivés sont le siège de recombinaisons de bord qui limitent le courant des cellules. Il semble donc logique que les sous-cellules du centre soient plus fortement affectées. Il est difficile cependant de quantifier l'effet tant l'incertitude demeure sur les valeurs absolues de mesure, de par la configuration particulière des cellules.

Le second effet qui intervient est toujours lié au défaut de sérigraphie. S'agissant d'un défaut d'alignement d'un masque, les cellules les plus éloignées du centre de la plaquette sont plus

affectées que les cellules de l'intérieur. C'est pourquoi un gain de FF est même constaté pour ces dernières après découpe, comparativement à la mesure de la plaquette entière. Les sous-cellules de l'extérieur, qui concentrent la majeure partie des défauts d'impression subissent, elles, une perte de la valeur de FF mesurée après découpe. Il semble donc que le résultat obtenu ne devrait pas avoir lieu d'être si le procédé de sérigraphie est optimisé. Les sous-cellules de l'intérieur de la plaquette devraient être normalement moins performantes après découpe que les sous-cellules de l'extérieur, comme cela a été observé pour les cellules du chapitre II.

Globalement, les i-Cell IBC sont légèrement moins performantes avant découpe que les IBC standard réalisées dans les mêmes conditions. Une partie de cet écart est lié à la structure intrinsèque des quarts de cellules, qui possèdent des doigts longs qui augmentent la résistance série. Les résultats de simulation montrent cependant que cette différence pourrait être au moins partiellement compensée par la réalisation de sous-cellules plus petites (huitièmes de cellule par exemple). L'autre aspect qui limite le rendement de ces premiers prototypes réalisés est technologique et lié à l'alignement des masques de sérigraphie par rapport aux plaquettes de silicium. Moyennant un ajustement du procédé, il semble raisonnable d'affirmer que ce problème pourra être surmonté. Il semble donc théoriquement possible de produire des i-Cell IBC dont les rendements approchent ou égalent ceux d'IBC standard réalisées dans les mêmes conditions.

La principale limite de cette méthode réside donc dans la formation d'un ou de deux bords non passivés après l'étape de séparation des sous-cellules. D'après l'expérience, ces pertes ne semblent pas plus élevées que pour le cas de cellules sérigraphiées en face avant (0,1 à 0,2 % de rendement), mais ne sont toutefois pas négligeables. Il apparaît toutefois qu'elles peuvent être compensées par la limitation des pertes résistives lors de l'interconnexion, qui permettrait théoriquement d'obtenir des modules plus performants à partir de cellules produites dans les mêmes conditions.

CONCLUSION DU CHAPITRE

L'adaptation en quarts de cellules des cellules IBC Zebra développées par ISC a été présentée dans ce chapitre.

Il a été démontré par simulation que l'adaptation de cellules IBC en sous-cellules ne nécessite pas de bouleversement de la conception. Seuls des ajustements légers sont nécessaires, principalement au niveau du dessin des métallisations. Le modèle théorique montre que des rendements de 22 % à l'échelle industrielle sont atteignables moyennant de bonnes plaquettes et un procédé de fabrication optimisé. La diminution de l'épaisseur semble théoriquement possible, avec même des gains de performances moyennant une bonne passivation, comme dans le cas de cellules IBC de taille standard.

Des sous-cellules IBC de 160, 120 et 60 μm d'épaisseur ont été réalisées à partir de différents silicium monocristallin de type n. L'influence de la matière première utilisée pour la réalisation des plaquettes a été étudiée. Il est important de choisir des plaquettes avec des paramètres de résistivité et de durée de vie optimaux ; des écarts de rendement de plus d'1% absolu ont été

mesurés en fonction du type de plaquette utilisé. Les sous-cellules de 160 et 120 μm d'épaisseur présentent des rendements inférieurs à ceux des cellules entières de même épaisseur produites dans les mêmes conditions. Cette différence est expliquée par les limites intrinsèques des quarts de cellules en termes de résistance série, et par un procédé de sérigraphie pas encore optimisé pour les sous-cellules. Des rendements maximum de 20,4 % pour des sous-cellules de 160 μm et de 20,2 % pour des sous-cellules de 120 μm ont été obtenus.

REFERENCES DU CHAPITRE IV

- 124 Verlinden P., « Interdigitated Back Contact Solar Cells », *Photovoltaic Solar Energy: From Fundamentals to Applications*, éditeur : John Wiley & Sons, 2017, pp. 92-103.
- 125 Halm A. et al., « The Zebra Cell Concept - Large Area n-Type Interdigitated Back Contact Solar Cells and One-Cell Modules Fabricated Using Standard Industrial Processing Equipment », *Proceedings of the 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2016, pp. 567-570.
- 126 Osborne M., « SunPower Hits Average Cell Conversion Efficiencies of 25 % at Fab 4 », *PV Tech*, 2017,
<https://www.pv-tech.org/news/sunpower-hits-average-cell-conversion-efficiencies-of-25-at-fab-4>, consulté en mai 2018.
- 127 Hanifi H. et al., « Investigation of cell-to-module (CTM) ratios of PV modules by analysis of loss and gain mechanisms », *Photovoltaics International*, vol. 32, 2016, pp. 90-98.
- 128 Mohr A., *Silicon concentrator cells in a two-stage photovoltaic system with a concentration factor of 300X*, thèse de l'Université de Fribourg-en-Brisgau, 2005, 156 p.
- 129 Inns D., « Understanding Metal Induced Recombination Losses in Silicon Solar Cells with Screen Printed Silver Contacts », *Energy Procedia*, vol. 98, 2016, pp. 23-29.
- 130 Mewe A. A. et al., « BSF Islands For Reduced Recombination In IBC Cells », *Proceedings of the 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2017, 4 p.
- 131 Desrues T., et al., « Influence of the Emitter Coverage on Interdigitated Back Contact (IBC) Silicon Heterojunction (SHJ) Solar Cells », *Proceedings of the 40th IEEE Photovoltaic Specialists Conference 2014*, pp. 857-861.
- 132 Galbiati G. et al., « Results on n-type IBC solar cells using industrial optimized techniques in the fabrication processing », *Energy Procedia*, vol. 8, 2011, pp. 421-426.
- 133 Granek F., Hermle M. et Glunz S. W., « Analysis of the current linearity at low illumination of high-efficiency back-junction back-contact silicon solar cells », *Physica Status Solidi*, vol. 2, 2008, pp.151-153.
- 134 Verlinden P., « High-Efficiency Back Contact Silicon Solar Cells for One-Sun and Concentrator Applications », *Solar Cells, Materials, Manufacture and Operation : Second Edition*, éditeur : Academic Press, 2012, 641 p.

Chapitre V : Réalisation de modules i- Cell IBC

INTRODUCTION

Les sous-cellules i-Cell IBC réalisées dans le chapitre précédent sont légèrement moins performantes que leurs homologues standard de forme carrée réalisées dans les mêmes conditions. Cependant, et comme dans le cadre des chapitres précédents, c'est la fabrication et les résultats obtenus sur des modules qui sont les plus pertinents. Comme le laissent penser les résultats du chapitre III, il semble que l'assemblage de cellules plus petites qui permettent une réduction du courant induisent également une diminution des pertes résistives et participent à l'augmentation des performances des modules photovoltaïques. Il convient donc de vérifier ce principe avec la fabrication de modules i-Cell IBC.

V-1. OBJECTIFS

Dans un premier temps, il est nécessaire d'étudier quelles techniques d'assemblage fonctionnent pour interconnecter les quarts de cellules i-Cell IBC réalisés. Ces cellules ont été conçues pour être connectées de busbar à busbar par des rubans de cuivre disposés perpendiculairement et soudés. Cependant aucun essai pratique n'a été réalisé, et il convient de vérifier quelle technique d'assemblage fonctionne et donne les meilleurs résultats, tant du point de vue électrique que mécanique.

Une fois la technique d'assemblage maîtrisée, le but de l'étude est de réaliser des modules à partir de quarts de cellule IBC. Ces modules seront d'une taille équivalente à des modules composés de six cellules standard, pour des raisons de facilité de caractérisation, et de nombre de sous-cellules limité. Les performances de ces modules seront mesurées et comparées à des modules de référence, fabriqués à partir de cellules IBC Zebra standard, fabriquées dans les mêmes conditions, et avec les mêmes matériaux que les quarts de cellules étudiés.

Dans une troisième partie, une étude théorique sera menée afin de quantifier les différences de caractéristiques électriques entre les sous-cellules, et ces mêmes sous-cellules une fois mises en module. Le but recherché est de minimiser les pertes CTM, ou même d'obtenir du gain après encapsulation.

V-2. DEVELOPPEMENT DE TECHNIQUES D'ASSEMBLAGE

Afin de développer un module i-Cell IBC avec un rendement de conversion maximal, il est nécessaire de réduire les pertes qui peuvent avoir lieu lors de l'interconnexion des sous-cellules. Afin d'y parvenir, différentes techniques d'interconnexion et d'assemblage des sous-cellules IBC en module ont été étudiées. Cette partie décrit les différents essais d'interconnexion qui ont été réalisés, ainsi que leurs avantages et inconvénients.

V-2.1. Etude du nombre de points de soudure nécessaires à la connexion par rubans soudés

Ces essais ont été menés dans le but de déterminer si le nombre de points d'interconnexion nécessaires à l'obtention de bonnes performances calculé par simulation est valide, et d'évaluer la sévérité des conséquences sur les performances électriques des cellules si la condition n'est pas remplie. Les simulations montrent en effet que les performances diminuent pour moins de 9 points d'interconnexion. Cette étude est réalisée en complément, en vue de valider le modèle.

V-2.1.1. Procédés

Dans ce but, une cellule entière sérigraphiée avec les motifs nécessaires à l'obtention de quatre sous-cellules a été amorcée puis découpée selon les paramètres laser les plus favorables déterminés avec la même méthode que dans la partie III-2.1.2, et donnés dans le tableau suivant. Le rendement de la cellule, avant l'amorce et la séparation des sous-cellules, a été mesuré à 20 %. Trois rubans de cuivre de 0,8 mm d'épaisseur par 2 mm de largeur répartis de manière homogène sur chaque busbar ont alors été soudés sur les quarts de cellule ainsi obtenus. Chaque quart de cellule a alors été mesurée électriquement. Après cette mesure, 7 rubans supplémentaires ont été soudés sur chaque busbar de chaque sous-cellule, pour un total de dix points de connexion par des rubans disposés perpendiculairement aux busbars, comme montré sur la Figure V-1. Les quarts de cellules ont alors de nouveau été caractérisés, et les résultats ont été comparés à ceux obtenus pour trois points de connexion. Il est à noter que les mesures électriques des sous-cellules ont été réalisées à l'aide du simulateur solaire de S'Tile, pour des raisons pratiques. Elles n'ont donc pas été mesurées dans les mêmes conditions que la cellule entière dont elles sont issues. Ceci n'a pas d'importance puisque le but est seulement de comparer les sous-cellules entre elles. Néanmoins, cette expérience n'apporte pas de détail sur l'évaluation des pertes induites par l'étape de découpe en sous-cellules.

Tableau V-1 : paramètre utilisés pour la découpe des sous-cellules par laser

Fréquence (kHz)	Vitesse (mm.s ⁻¹)	Puissance (W)
30	100	12

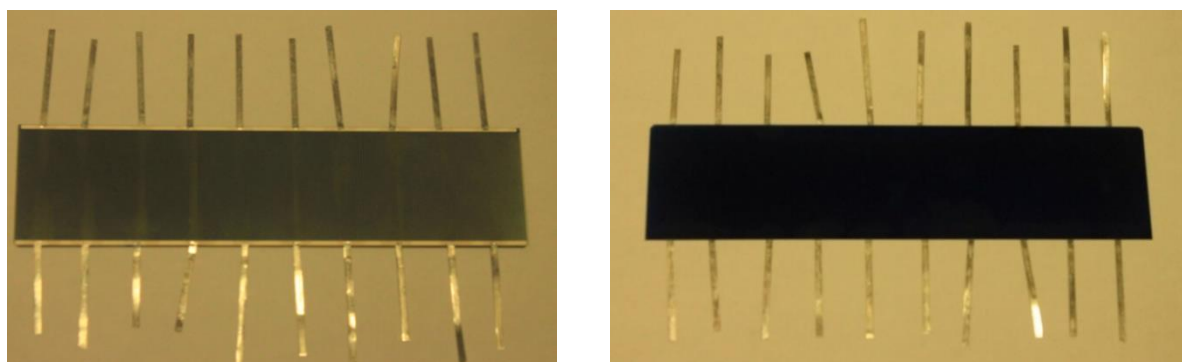


Figure V-1 : photographie des rubans soudés sur les busbars de la face arrière des cellules (gauche), et photographie de la face avant du même échantillon (droite).

V-2.1.2. Résultats

Une chute des rendements est observée pour les sous-cellules soudées avec seulement trois points d'interconnexions. La valeur de cette perte varie entre -4,4 et -1,4 % de rendement selon l'échantillon. Ces pertes sont beaucoup plus fortes que les résultats de simulation ne le prédisaient. La différence avec la théorie s'explique par des ruptures du busbars d'argent constatées au niveau de certaines soudures pour l'échantillon 1. Lors de la soudure, qui a lieu aux alentours de 250 °C, les matériaux se dilatent, puis se rétractent pendant le refroidissement. Ceci induit des contraintes au niveau du point de soudure. Les busbars d'argent sont réalisés avec une pâte non traversante et sont facilement arrachés par les rubans qui se déforment. Cet effet observé à deux endroits sur la première sous-cellule explique le faible rendement mesuré.

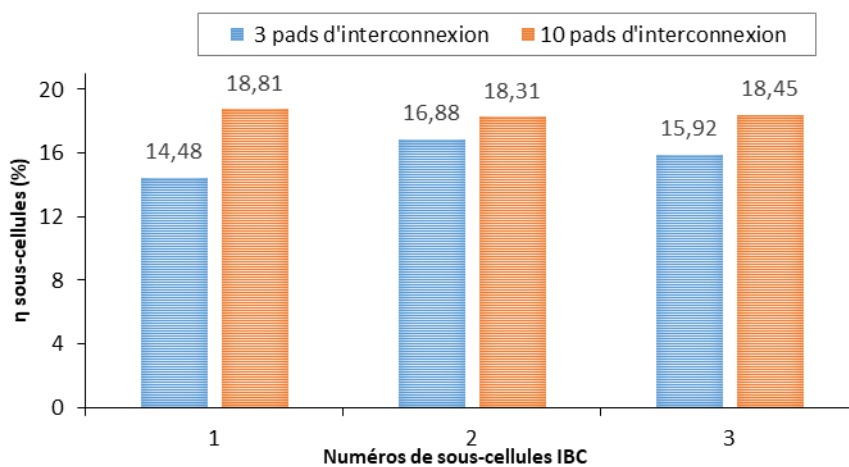


Figure V-2 : rendements mesurés pour les sous cellules 1,2 et 3, selon que le courant est extrait selon 3 points de soudure (bleu) ou selon 10 (rouge).

Le reste de la perte (environ 1,5 % de rendement) est expliqué essentiellement par une mauvaise collecte du courant photogénéré. Ceci se traduit par une forte résistance série R_s visible sur la courbe de l'évolution du FF en fonction du nombre de pads d'interconnexion, représentée dans la Figure V-3. Cette figure montre que le FF est fortement amélioré avec les cellules à 10 pads de soudure, car la R_s y est fortement diminuée. Ces résultats sont deux fois plus sévères que la prévision par simulation, et justifient d'autant plus l'utilisation d'au moins 10 points de connexion.

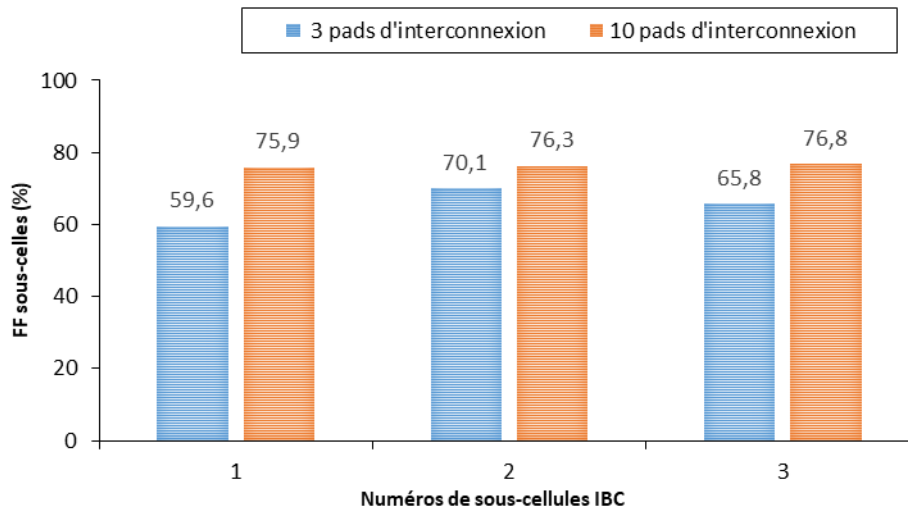


Figure V-3 : valeurs de FF mesurées pour les sous cellules 1,2 et 3, selon que le courant est extrait selon 3 points de soudures (bleu) ou selon 10 (rouge).

Cependant, cette dernière solution apparaît longue, fastidieuse et difficilement industrialisable avec des coûts raisonnables. Elle nécessite en effet une machine capable de réaliser dix opérations de soudure simultanément, contre 3, 4 ou 5 au grand maximum actuellement dans l'industrie. De plus, la soudure manuelle, comme cela a été le cas pour l'étude, ne peut pas être compétitive en termes de rapidité.

La

Figure V-4 illustre un chapelet de quatre sous-cellules assemblées chacune avec 10 points de connexion. Les sous-cellules sont donc interconnectées par 10 rubans de cuivre (2 mm x 0.08 mm). Ceci permet de mettre en évidence la complexité de cette méthode à cause du nombre conséquent de pads de soudure.

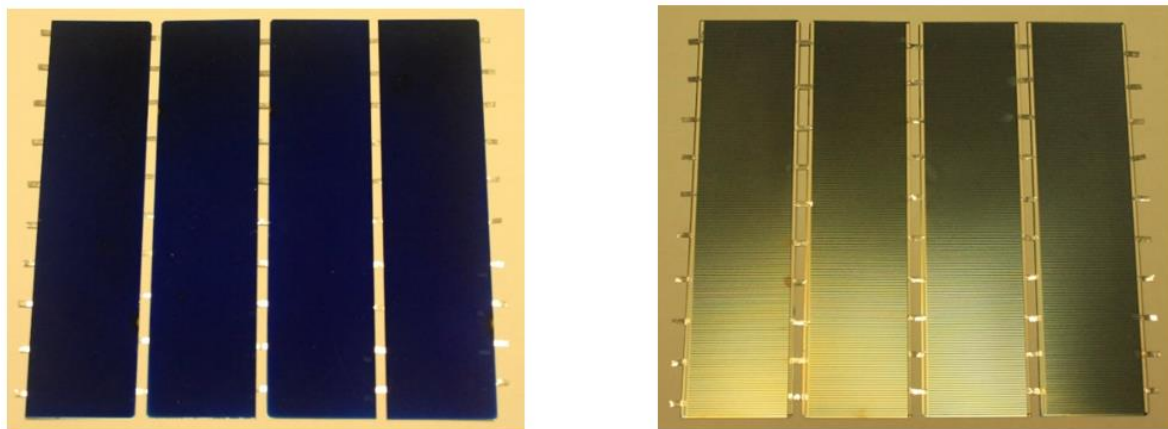


Figure V-4 : chapelet de quatre sous-cellules assemblées entre elles avec 10 rubans par busbar.

Par ailleurs, le problème de décollement du busbar au niveau des soudures observé pendant les mesures, semble arriver très fréquemment avec la pâte d'argent choisie pour la réalisation des

busbars. Il se pose alors un dilemme, si 10 rubans sont soudés par busbar, entre l'utilisation d'une pâte d'argent traversante qui provoquera de toute façon une diminution des performances des cellules, et l'utilisation d'une pâte d'argent non traversante qui contribuera à des décollements locaux qui diminueront eux aussi les performances. Dans ces conditions, la soudure de rubans perpendiculairement aux busbars ne semble pas constituer une solution d'assemblage satisfaisante.

V-2.2. Interconnexion par rubans soudés parallèlement aux busbars

Pour remédier à la complexité d'assemblage induite par la soudure de rubans perpendiculairement aux busbars (voir partie précédente), l'assemblage de sous-cellules par rubans de cuivre soudés parallèlement aux busbars a été étudié.

V-2.2.1. Procédé

Les rubans font 0,08 mm d'épaisseur pour 4 mm de largeur et sont des rubans de cuivre standard utilisés dans l'industrie photovoltaïque. Le but est de déterminer la longueur de ruban nécessaire permettant à la fois une circulation du courant efficace et des contraintes mécaniques limitées lors de la soudure. Trois configurations ont été testées principalement : i) soudage d'un unique ruban tout le long des busbars ii) soudage de deux rubans d'une longueur de 70 mm iii) soudage de trois rubans d'une longueur de 50 mm.

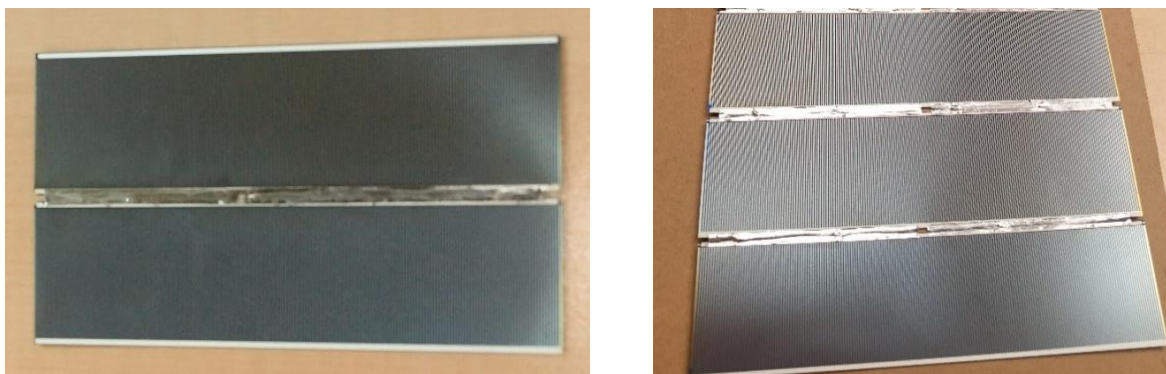


Figure V-5 : assemblage de sous-cellules à l'aide d'un unique ruban soudé le long des busbars (à gauche), ou de deux rubans de 70 mm de long (à droite).

Les cellules ont été caractérisées au simulateur solaire en contactant les rubans afin de déterminer les conséquences de chaque type d'assemblage sur les performances électriques. Des observations pendant le procédé d'assemblage ont permis de caractériser les conséquences mécaniques de chaque méthode sur la tenue et les déformations des cellules.

V-2.2.2. Résultats

Souder des rubans larges le long des busbars permet théoriquement d'éliminer les contraintes liées au nombre de points de soudure et aux décollements locaux du busbar d'argent. En effet, le fait de réaliser une seule longue soudure permet de mieux répartir la circulation du courant extrait de la cellule, et les contraintes mécaniques sur tout le busbar. Dans cette optique, plusieurs sous-cellules ont été interconnectées deux à deux en utilisant cette technique. Les contraintes liées au mécanisme de soudure et de refroidissement ont occasionné la déformation et la casse des sous-cellules dans tous les cas.

A la suite de ces essais préliminaires il a été choisi d'interconnecter les sous-cellules avec deux rubans de 70 mm soudés longitudinalement. Cette solution permet en effet d'atténuer les contraintes thermiques et le fléchissement induits par la soudure. De plus, des images d'électroluminescence montrent que les pertes de courant collectées sont d'un niveau équivalent à celles obtenues pour des sous-cellules interconnectées avec 10 rubans. Aucun décollement de ruban ou arrachement de busbar n'a été constaté sur des interconnexions simples (quatre sous-cellules connectées entre elles), et cette technique semble fonctionnelle. Pour aller plus loin dans les caractérisations, il a été choisi d'utiliser cette technique pour assembler des modules qui sont décrits dans la partie V-3.1.

V-2.3. Assemblage d'i-Cell IBC amorcées non découpées

Ces essais ont pour but d'étudier la faisabilité d'assemblage des cellules sérigraphiées en module sans découper les sous-cellules. Celles-ci sont simplement séparées électriquement les unes des autres par un trait d'amorce réalisé au laser. Ce dernier enlève de la matière sur la moitié d'une cellule environ, comme vu dans le chapitre II. Les sous-cellules restent tout de même solidaires mécaniquement sur la même plaquette de silicium. Cette méthode présente l'avantage d'économiser l'étape de clivage et l'étape de caractérisation des sous-cellules qui lui succède, en vue de simplifier le processus de fabrication et de diminuer les coûts.

V-2.3.1. Procédé

Différents essais d'assemblage ont été réalisés dans ce contexte. Tous les amorçages ont été pratiqués avec le laser industriel de S'Tile. Plusieurs paramètres ont été testés afin de déterminer le paramètre optimal. L'objectif est d'avoir une séparation électrique nette de chaque sous-cellule avec ses voisines de la même plaquette. Le risque d'une mauvaise isolation est l'apparition de courants de court-circuit entre sous-cellules qui augmentent la valeur de résistance shunt R_{sh} et font diminuer les valeurs de V_{oc} et $d'I_{sc}$. Les cellules i-Cell IBC amorcées obtenues par amorce laser ont été connectées en série par des rubans de cuivre selon les trois mêmes méthodes que dans la partie précédente, et la qualité de l'isolation entre sous-cellules a été caractérisée par électroluminescence.

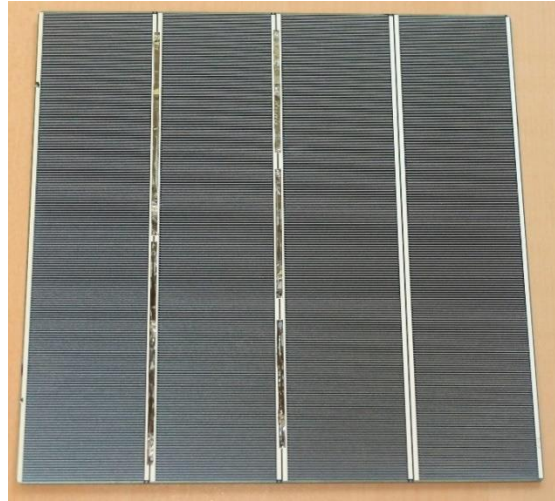


Figure V-6 : des sous cellules ont été séparées par amorçage laser au sein d'une même plaquette de silicium, mais non séparées mécaniquement. Elles ont été connectées en série par soudure de rubans.

V-2.3.2. Résultats

Une cellule imprimée avec les motifs de quatre sous-cellules a été amorcée au laser, mais non séparée physiquement (les quatre sous-cellules sont toujours d'un même tenant). Comme utilisé précédemment avec les quarts de cellules IBC, les interconnexions ont été réalisées par 3 rubans de 50 mm de long, et permettent d'atténuer les contraintes et de diminuer le fléchissement. Une photographie infrarouge d'électroluminescence a été prise, afin d'évaluer la qualité d'amorçage et donc la séparation électrique des sous-cellules amorcées au sein de la même plaquette. Cette image est montrée sur la Figure V-7. Il semble donc que les quarts de cellules, bien que solidaires mécaniquement, soient bien séparés électriquement, comme le montrent les zones sombres entre sous-cellules, où aucun courant ne semble circuler.

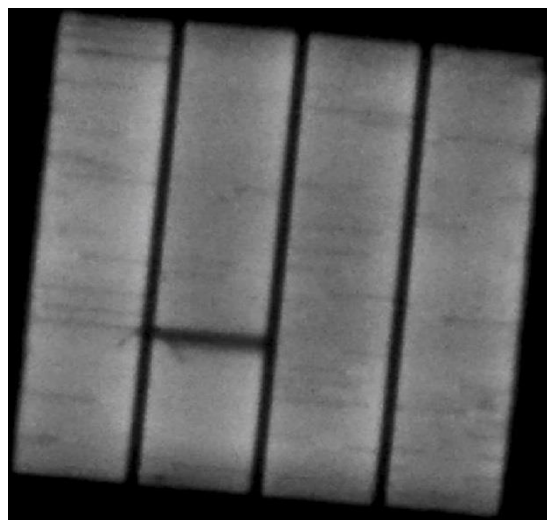


Figure V-7 : images d'électroluminescence d'une plaquette sur laquelle les cellules ont été séparées électriquement par amorce laser.

Cependant, des mesures réalisées sur le mini-module composé des quatre sous-cellules de la même plaquette connectées en série semblent indiquer l'existence de courants de fuite. La valeur de résistance shunt est en effet très basse. Cependant, il est difficile de trouver un point de comparaison pour cette valeur puisqu'il est également très difficile de caractériser avec précision les sous-cellules à même la plaquette, sans séparation laser. Cette valeur de résistance shunt pourrait provenir des propriétés intrinsèques des sous-cellules de la plaquette, comme de la qualité d'assemblage. La répétition de l'expérience avec une seconde plaquette amorcée, et connectée en série donne les mêmes résultats quant aux valeurs de résistance shunt. Les sous-cellules découpées issues de la même série de production que ces plaquettes présentant des valeurs de shunt plus élevées, il est possible de supposer qu'une partie au moins de pertes vient de la non-séparation physique des sous-cellules qui entraîne des courants de court-circuit entre celles-ci, mais en l'état il est impossible d'en être certain. La découpe des sous-cellules est donc utilisée dans la suite de l'étude, car elle permet d'obtenir de meilleurs résultats.

Tableau V-2 : caractéristiques électriques des mini-modules obtenus à partir de cellules non-séparées physiquement.

plaquette	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)	R_s (m Ω)	R_{sh} (Ω)	η (%)	FF (%)
1	9,49	2,41	2,34	12,81	15,49	61,8
2	9,53	2,40	1,96	16,03	15,57	61,5

V-2.4. Interconnexion et assemblage par substrat fritté

En prévision de l'assemblage de cellules très fines (60 μ m), des essais d'interconnexions de sous-cellules au moyen d'un substrat de silicium fritté à bas coût développé par la société S'Tile ont été réalisés.

V-2.4.1. Procédé

Ce substrat est composé de parties isolantes et de pistes conductrices alternées. En déposant et en soudant deux busbars de polarité opposée sur une même piste conductrice du substrat, on réalise la connexion en série de deux sous-cellules (voir Figure V-8). Cette méthode permet de s'affranchir de la soudure de rubans directement sur les cellules, qui entraîne des contraintes et des déformations, particulièrement si les cellules assemblées sont très fines. Elle permet également de renforcer l'assemblage, car le substrat fritté fait office de support mécanique, et permettrait ainsi une réduction supplémentaire du taux de casse lors de l'assemblage de cellules minces.

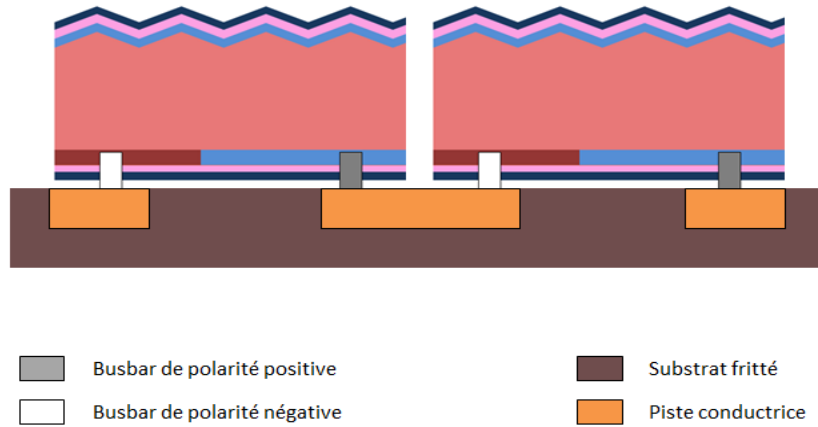


Figure V-8 : l'utilisation d'un substrat fritté permet d'assembler plusieurs sous-cellules entre elles en série et de fournir un support mécanique à l'ensemble.

Des pistes conductrices ont été réalisées sur des substrats frittés avec deux techniques différentes, le dépôt d'étain *TinPad* produit par l'entreprise Schmidt d'une part et par sérigraphie de pâte d'argent d'autre part. La sérigraphie a été réalisée de façon manuelle sur les substrats frittés, à l'aide d'un écran réalisé spécifiquement pour l'étude. La pâte utilisée est de la pâte d'argent destinée à la face avant de cellules solaires Al-BSF et PERC. Elle est en effet compatible avec la soudure de ruban de cuivre, ce qui n'est pas le cas des pâtes d'aluminium par exemple, sur lesquelles on peut très difficilement souder. Après sérigraphie, la pâte est recuite aux alentours de 750 °C, dans le four de recuit des contacts de la ligne pilote de S'Tile. Dans les deux cas, les pistes conductrices formées sont rectangulaires, de longueur 154 mm et de largeur 4 mm, comme montré sur la Figure V-9. En contactant les deux busbars de polarité opposée de deux sous-cellules sur la même piste conductrice, on réalise leur connexion en série (voir Figure V-10).



Figure V-9 : assemblage avec ruban de cuivre sur TinPad.



Figure V-10 : assemblage avec pâte à braser sur TinPad.



Figure V-11 : assemblage avec pâte à braser sur piste d'argent.

Des essais ont été menés afin de souder les busbars arrière des cellules IBC sur ces pistes conductrices, au moyen de rubans ou de pâte d'assemblage à base d'étain. La pâte est déposée manuellement sur les pistes conductrices, puis les busbars des cellules à assembler sont disposés sur la pâte. L'ensemble est chauffé à environ 250 °C dans le four de recuit des contacts en ligne

pour réaliser la soudure. L'assemblage par ruban est réalisé en intercalant un ruban de cuivre entre la piste conductrice et le busbar. La soudure est pratiquée en chauffant l'ensemble au fer à souder à travers la cellule. Une caractérisation mécanique a permis de qualifier la solidité d'assemblage de chacune des méthodes, suite à quoi les assemblages obtenus ont été mesurés électriquement au simulateur solaire.

V-2.4.2. Résultats

Parmi, les quatre méthodes testées, la méthode consistant à assembler les sous-cellules entre elles via le substrat fritté par de la pâte d'étain sur les pistes d'argent a été retenue, car les assemblages sont les plus solides mécaniquement. Les autres méthodes ne permettent pas une tenue mécanique suffisante et se décollent très facilement. Elle met en œuvre des méthodes simples, la sérigraphie ainsi qu'un dépôt manuel de pâte qui soude après un recuit à 250 °C. De plus, aucune déformation ou endommagement des sous-cellules n'est constaté avec cette méthode.

Deux assemblages ont été réalisés grâce à cette méthode, un assemblage de deux sous-cellules (1 et 2) de 120 μm d'épaisseur et d'un rendement moyen de 16 % connectées entre elles, et un assemblage de quatre sous-cellules de la même épaisseur (3, 4, 5 et 6), réalisé dans les mêmes conditions. Les caractéristiques électriques mesurées pour ces sous-cellules sont données dans le Tableau V-3 .

Tableau V-3 : caractéristiques électriques des sous-cellules utilisées pour assembler les mini-modules sur substrats frittés.

échantillon	Voc (mV)	Isc (A)	Rs ($\text{m}\Omega$)	Rsh (Ω)	η (%)	FF (%)
1	0,63	2,04	1,81	15,47	15,2	70,4
2	0,64	2,06	1,93	12,35	15,2	68,8
3	0,64	2,07	0,92	9,48	15,7	71,0
4	0,64	2,16	1,17	13,27	15,7	67,8
5	0,64	2,06	1,23	11,25	15,7	71,7
6	0,64	2,08	1,01	7,89	15,6	70,3

Ces sous-cellules sont connectées entre elles et fixées au substrat grâce à la pâte à souder à base d'étain, qui les relie aux pistes d'argent, puis des rubans ont été placés aux extrémités des assemblages pour permettre la caractérisation au simulateur solaire (voir Figures V-12 et V-13). Après caractérisation mécanique de la solidité de l'assemblage, les caractéristiques électriques des petits modules ainsi formés ont été mesurées et sont données dans les tableaux suivants.

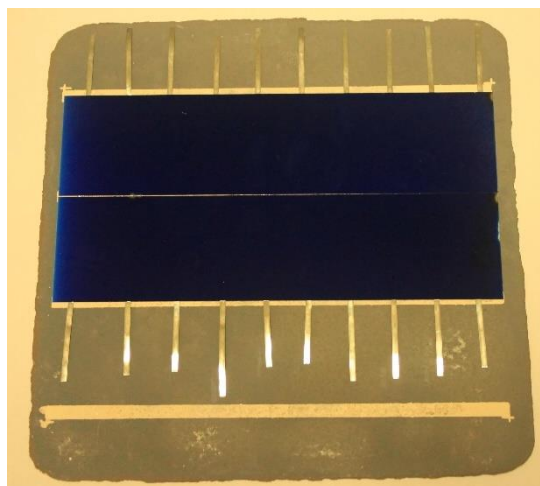


Figure V-12 : assemblage électrique de deux sous-cellules par le moyen de pistes d'argent (blanc) imprimées sur un substrat fritté.

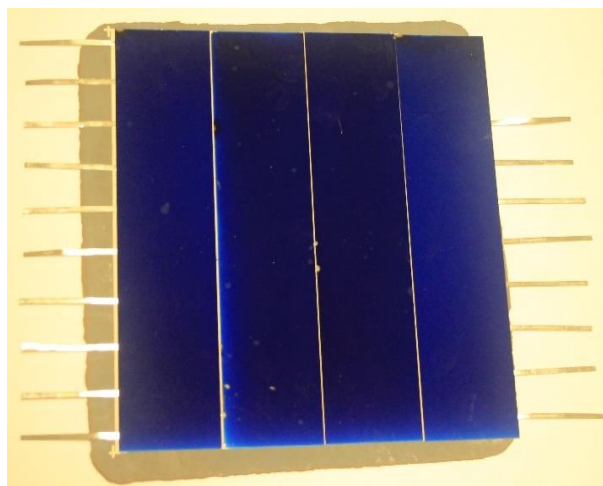


Figure V-13 : assemblage de quatre sous-cellules par les mêmes moyens.

Tableau V-4 : caractéristiques électriques mesurées pour le module de deux sous-cellules

Voc (V)	Isc (A)	Rs (mΩ)	Rsh (Ω)	η (%)	FF (%)
1,26	2,187	12,29	3,02	14,88	65,7

Tableau V-5 : caractéristiques électriques mesurées pour le module de quatre sous-cellules

Voc (V)	Isc (A)	Rs (mΩ)	Rsh (Ω)	η (%)	FF (%)
2,684	2,177	16,64	3,6	15,6	69,2

Il semble donc que la méthode consistant à assembler des sous-cellules au moyen d'un substrat fritté puisse être perfectionnée. Le point critique est la disposition et l'étalement de la pâte à braser. Si trop peu de pâte est appliquée, on peut assister à une augmentation de la résistance série du module ainsi formé, et si de la pâte, au contraire, est appliquée de manière trop large localement, et déborde du busbar pour se loger vers les zones d'émetteur et de BSF des cellules, elle peut créer des court-circuits qui diminuent fortement la résistance shunt. Toutefois, moyennant une qualité d'assemblage maîtrisée, cette méthode présente plusieurs avantages : elle élimine les contraintes d'assemblage liées au soudage des rubans, elle fournit un support mécanique pour les cellules minces plus fragiles, et elle réduit le nombre de manipulations puisqu'on peut réaliser les interconnexions par « *pick and place* ». En revanche, le substrat étant opaque, une limite majeure de cette technique est qu'elle ne peut être utilisée que pour la réalisation de modules monofaciaux. La question du coût économique du substrat se pose également. Bien que peu cher, il faudrait comparer le prix d'une telle méthode à celui d'un assemblage par rubans.

V-2.5. Interconnexion par rubans de cuivre adhésifs

Une solution alternative au soudage de rubans de cuivre étamé a également émergé sous la forme de l'utilisation de rubans de cuivre adhésifs. Ce moyen d'assemblage est disponible sur le marché et adapté pour la réalisation de modules photovoltaïques. Il permet de s'affranchir du soudage qui crée des contraintes mécaniques au niveau des busbars des cellules, pouvant résulter en un arrachement de l'argent, en microfissures dans les cellules, ou plus dramatiquement en une casse.

V-2.5.1. Procédé

Pour caractériser cette technique, des sous-cellules de 180 μm ont été assemblées avec des rubans adhésifs de cuivre d'une longueur de 50 mm disposés le long des busbars, comme montré sur la Figure V-14. A raison de trois rubans par busbar, les cellules sont connectées bord à bord. Ces assemblages ont ensuite été caractérisés grâce au simulateur solaire destiné aux modules, avant encapsulation. Ils ont ensuite été encapsulés entre deux feuilles de backsheet transparent, à une température de 148 ° C et pour une durée de 15 min, puis caractérisés à nouveau.

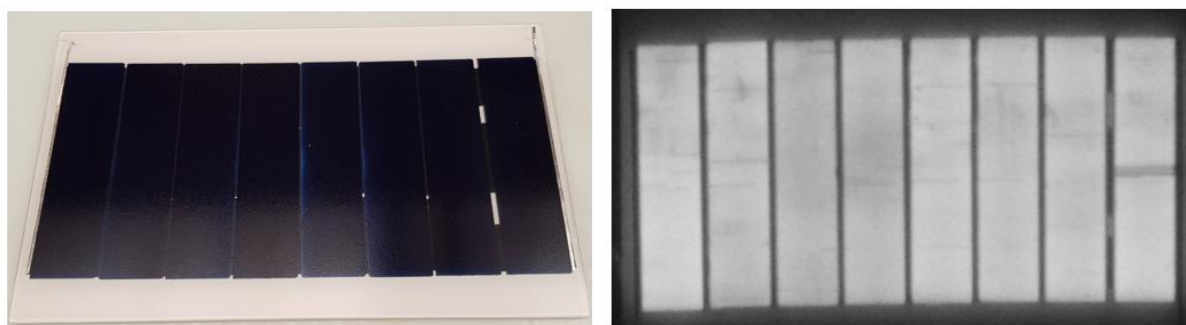


Figure V-14 : des rubans de cuivre adhésif de 50 mm de long permettent d'assembler les sous-cellules entre elles sans soudure.

V-2.5.2. Résultats

L'utilisation de rubans de cuivre adhésifs permet également une élimination des contraintes induites par la soudure de rubans standard. Ils sont simples à utiliser, sont déjà produits industriellement, et commencent à être utilisés dans le domaine photovoltaïque. Toutefois, cette technique ne permet pas un assemblage mécanique très solide. Il faut absolument encapsuler le module, pour que les sous-cellules soient maintenues en place par l'EVA polymérisé conjointement aux rubans. Il est néanmoins possible de manipuler les chapelets de sous-cellules interconnectées sans risque avant encapsulation, mais cette dernière est absolument nécessaire pour l'utilisation de rubans adhésifs. De même, le contact électrique n'est pas bien établi sans la lamination et l'encapsulation sous pression du module, comme le montrent les images d'électroluminescence de la Figure V-15.

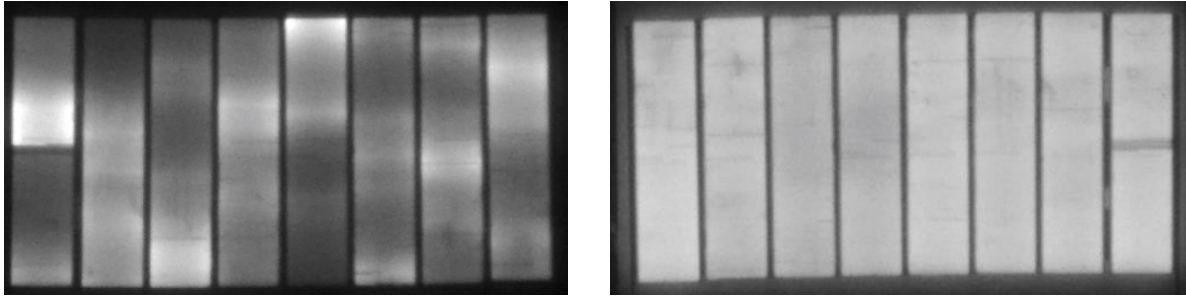


Figure V-15 : cliché d'électroluminescence d'un chapelet de sous-cellules IBC assemblées avec de l'adhésif conducteur, avant encapsulation (gauche), et après (droite).

L'assemblage par rubans de cuivre adhésifs représente néanmoins la solution la plus prometteuse pour l'assemblage de sous-cellules IBC. En utilisant un support aspirant pour maintenir les sous-cellules en place, elle permet une grande précision même pour un assemblage manuel. Les contraintes liées à la soudure de rubans qui induise le fléchissement et la casse des sous-cellules sont éliminées, et cette solution n'est pas plus chère qu'un assemblage classique. Enfin, elle est compatible avec des cellules minces, et permet également la réalisation de modules bifaciaux. Cette technique a été employée pour la fabrication de modules, dont les résultats sont discutés en partie V-3.3.2.

V-3. REALISATION DE MODULES

Après avoir essayé plusieurs techniques d'assemblage, des modules d'une taille équivalente à des modules de six cellules standard ont été réalisés à partir de sous-cellules IBC. Les quarts de cellules utilisés pour la réalisation de ces modules sont séparés électriquement et mécaniquement. Les essais d'assemblage en module ont été réalisés avec des sous-cellules d'épaisseur 180 μm et 120 μm . Comme illustré sur la Figure V-16, les modules sont constitués de deux chapelets (ou strings) connectés en série. Chaque chapelet étant lui-même constitué de 12 quarts de cellules connectées en série. Les modules obtenus en définitive sont donc constitué de 24 quarts de cellules connectées en série.

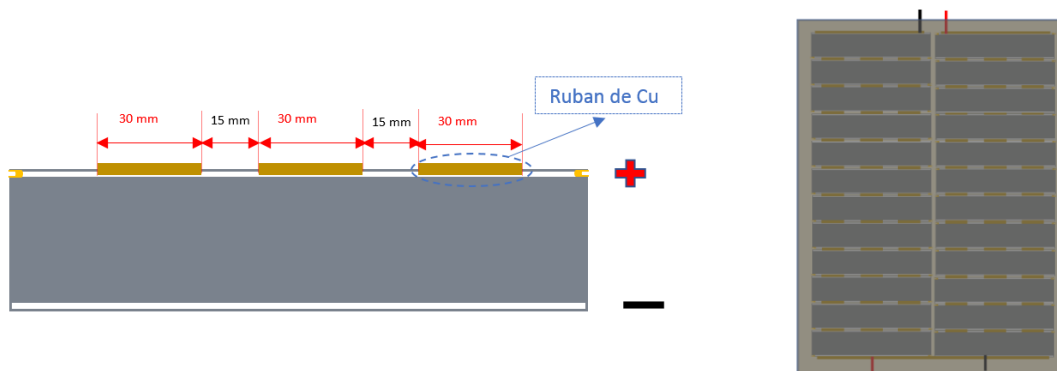


Figure V-16 : les cellules IBC sont assemblées par rubans le long des busbars de la face arrière (à gauche), pour former des modules composés de deux chapelets de 12 sous-cellules, toutes connectées en série (à droite).

V-3.1. Modules réalisés à partir de sous-cellules de 180 μm d'épaisseur avec soudure

Dans un premier temps les essais d'assemblage en modules ont été réalisés à partir de cellules de 180 μm .

V-3.1.1. Procédé

Comme dans le cadre des essais préliminaires, l'assemblage des sous-cellules entre elles a été réalisé au moyen de rubans de cuivre de 4 mm de largeur soudés parallèlement aux busbars. Deux rubans de 70 mm de long et de 0,08 mm d'épaisseur ont été utilisés pour chaque busbar. Les deux chapelets ont été interconnectés en série au moyen de ces mêmes rubans de 4 mm de large et de 0,08 mm d'épaisseur. Les modules ont été encapsulés entre une plaque de verre trempé de 3,2 mm d'épaisseur de 520 x 350 mm², et une feuille de backsheet noir au moyen d'une feuille d'EVA de 400 μm d'épaisseur. L'ensemble a été laminé à 148 °C pendant 15 min sous une pression de 930 mbar. Les modules obtenus ont été caractérisés électriquement au simulateur solaire, puis grâce à l'électroluminescence.

V-3.1.2. Résultats

Deux modules de 520 x 350 mm² ont été réalisés à partir de sous-cellules connectées en série, à raison de deux chapelets de 12 quarts de cellules connectés eux-mêmes en série, soit l'équivalent de modules de six cellules standard. Les sous-cellules ont été obtenues par découpe après avoir été réalisées sur des plaquettes Pillar. Les modules sont donc constitués en définitive de 24 sous-cellules de 180 μm d'épaisseur connectées en série, par deux rubans de cuivre de 70 mm de long soudés de manière longitudinale sur chaque busbar. Les caractéristiques électriques mesurées pour ces deux modules sont données dans le Tableau V-6.

Tableau V-6 : caractéristiques électriques mesurées pour les modules obtenus à partir de 24 sous-cellules de 180 μm d'épaisseur.

module	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	P_m (W)	η (%)	FF (%)	R_{sh} (Ω)	R_s (Ω)
A	2,48	15,8	26,5	17,5	67,8	45,7	0,57
B	2,49	15,7	26,4	17,4	67,4	67,1	0,99

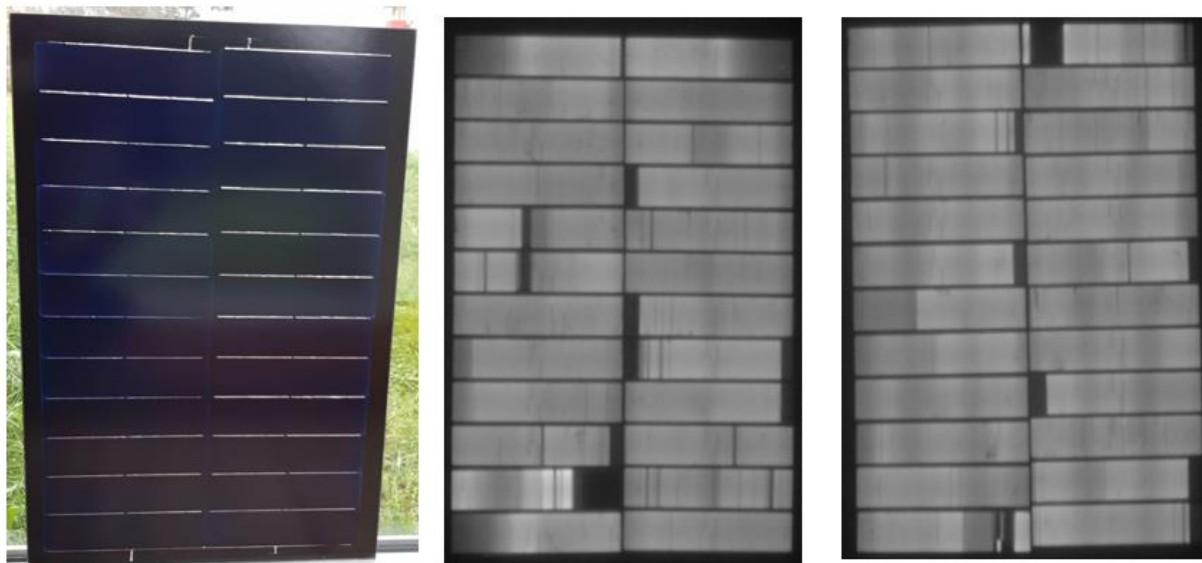


Figure V-17 : photographie d'un des modules réalisés (gauche), et images d'électroluminescence obtenus pour les modules A (au centre) et B (à droite).

Les puissances mesurées sont inférieures aux puissances théoriques attendues en prenant en compte la moyenne des caractéristiques électriques mesurées pour les sous-cellules utilisées pour l'assemblage, à savoir 29,3 W pour chaque module (voir Tableau V-7). Cette différence s'explique d'une part par la légère disparité de courant entre la meilleure et la moins bonne cellule dans un module. Malgré un tri selon les valeurs de courant, cette différence existe, et la cellule avec le courant généré le plus faible impose cette valeur dans l'assemblage en série. D'autre part, les images d'électroluminescence permettent de constater des zones réparties aléatoirement sur les modules, pour lesquelles le courant n'est pas collecté. Ces zones correspondent à des arrachements locaux des busbars d'argent sous l'effet des contraintes induites par le procédé de soudure des rubans. Elles contribuent aux fortes valeurs de résistance série mesurées et à la puissance moins élevée qu'attendue. Disposer d'un grand nombre d'échantillons de sous-cellules pour réaliser un tri en courant plus resserré et disposer également d'une meilleure méthode d'assemblage permettraient en théorie d'augmenter la puissance de sortie des modules.

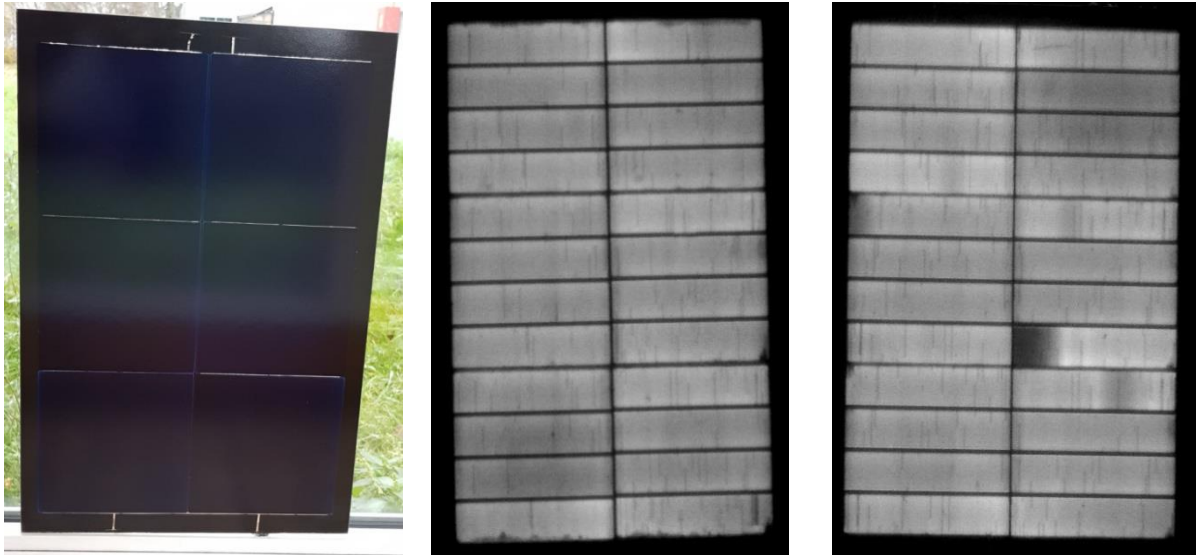
Tableau V-7 : moyenne des caractéristiques électriques des quarts de cellule utilisés pour la réalisation des modules A et B.

cellules	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	P_m (W)	η (%)	FF (%)	R_{sh} (Ω)	R_s (Ω)
Lot A	2,41	0,65	1,22	20,07	77,5	195,2	0,23
Lot B	2,42	0,65	1,22	20,11	77,3	197,3	0,22

Deux autres modules, C et D, ont été réalisés à partir de plaquettes Pillar de 160 μm d'épaisseur issues du même lot que précédemment, uniquement amorcées pour séparer les sous-cellules électriquement, mais pas physiquement. Les modules sont donc composés de six i-Cell connectées en série, elles-mêmes composées chacune de quatre sous-cellules connectées en série. Les caractéristiques mesurées pour ces deux modules sont données dans le tableau suivant.

Tableau V-8 : caractéristiques électriques mesurées pour les modules obtenus à partir de 6 i-Cells non découpées de 180 μm d'épaisseur.

module	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	P_m (W)	η (%)	FF (%)	R_{sh} (Ω)	R_s (Ω)
C	2,15	15,1	21,8	14,9	67,6	36,5	0,78
D	2,12	15,2	21,4	14,7	66,2	31,6	0,83

**Figure V-18** : photographie d'un des modules réalisés (gauche), et images d'électroluminescence obtenus pour les modules A (au centre) et B (à droite).

Des puissances respectives de 21,8 et de 21,4 W ont été obtenues pour les modules C et D. Ces valeurs sont plus faibles que les puissances théoriquement escomptées (W compte-tenu des cellules qui ont été utilisées, voir Tableau V-9) et que celles obtenues pour les modules de 24 sous-cellules. Ceci peut s'expliquer d'une part par les R_s élevées des modules, liées à la qualité de la métallisation de tout le lot, et d'autre part par les courants de fuite dont l'existence était déjà soupçonnée en partie V-2.3.2. L'amorce laser sans séparation mécanique ne permet en effet pas l'isolation électrique totale entre les sous-cellules. Celles-ci sont communicantes par l'absorbeur et le FSF. L'effet combiné de la R_s élevée et du courant de fuite dégrade fortement le FF et par conséquent la puissance du module.

De plus, le fait de ne pas séparer physiquement les sous-cellules empêche toute forme précise de tri sur les éléments de base. Ici, seules les i-Cell non découpées ont pu être triées, alors que l'élément de base constituant le module reste la sous-cellule. Or, il a été montré qu'au sein d'une même i-Cell, de grandes disparités peuvent exister dans les performances des sous-cellules, en raison de la qualité et de l'homogénéité de la métallisation, et des propriétés intrinsèques des plaquettes de silicium. Dans un assemblage en série, une mauvaise sous-cellule non détectée limite alors le courant de manière importante, comme on peut l'observer pour les modules C et D qui présentent des valeurs de courant de court-circuit inférieures de 14 % à celles des modules A

et B en moyenne. Le fait de ne pas découper les plaquettes, mais de les amorcer seulement permet d'économiser l'étape de clivage et diminue les contraintes lors des soudures, mais rend les performances des modules hasardeuses car la probabilité de présence d'une mauvaise sous-cellule non détectée est forte si l'on ne caractérise que les i-Cell.

Pour finir, le seul moyen de caractériser les i-Cell entières est de caractériser les quatre sous-cellules dont elles sont constituées simultanément et en parallèle. Cette méthode de caractérisation ne tient pas compte de l'utilisation réelle des sous-cellules, qui sont connectées en série dans les modules, et n'est donc pas fiable. C'est principalement pourquoi la méthode d'assemblage des i-Cell non découpées, malgré ses avantages, n'a pas été retenue pour les essais suivants.

Tableau V-9 : moyenne des caractéristiques électriques des i-Cells utilisées pour la réalisation du module normalisées par sous-cellule (1/4).

i-Cells	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	P_m (W)	η (%)	FF (%)	R_{sh} (Ω)	R_s (Ω)
	2,4	0,65	1,21	18,76	76,23	8,61	2,4

V-3.2. Modules réalisés à partir de sous-cellules de 120 μm d'épaisseur avec soudure

Dans la même approche que pour les sous-cellules IBC de 180 μm , des essais d'assemblage en modules ont été réalisés avec des quarts de cellules d'épaisseur 120 μm .

V-3.2.1. Procédé

Les cellules ont été assemblées selon la même méthode que dans la partie précédente, malgré la différence d'épaisseur. L'assemblage des chapelets entre eux a également été réalisé à l'identique, et les conditions d'encapsulation et de laminage sont les mêmes. Deux modules ont été réalisés selon cette méthode, puis caractérisés électriquement au simulateur solaire et à l'électroluminescence.

V-3.2.2. Résultats

Deux modules E et F, constitués de 24 sous-cellules ont ainsi été réalisés. Les caractéristiques électriques des modules obtenus sont données dans le Tableau V-10.

Tableau V-10 : caractéristiques électriques mesurées pour les modules obtenus à partir de 6 i-Cells de 120 μm d'épaisseur.

module	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	P_m (W)	η (%)	FF (%)	R_{sh} (Ω)	R_s (Ω)
E	2,56	15,75	29,04	19,68	74,3	46,2	0,31
F	2,54	15,74	28,74	19,48	74,7	71,7	0,54

Les puissances mesurées respectivement pour les modules E et F sont de 29 et 28,7 W. En tenant compte des performances des sous-cellules utilisées, dont la moyenne est donnée dans le Tableau V-11, ceci représente des gains CTM respectifs de 3,5 % et 2,5 %, c'est-à-dire que la puissance mesurée pour le module est supérieure à la somme des puissances des sous-cellules utilisées, prises individuellement. Ce résultat, physiquement impossible, peut être expliqué par la différence entre le simulateur utilisé pour les mesures sur les quarts de cellules d'une part et le simulateur utilisé pour les mesures sur les modules d'autre part. De plus, il souligne la difficulté de mesurer les modules spécifiques de cette étude qui génèrent de hautes tensions et de bas courants. Il est en effet difficile de calibrer les appareils de mesure de modules pour de tels modules, ce qui explique que les résultats présentés ici doivent être pris avec recul. Même si le fait d'encapsuler des cellules permet un gain optique (voir chapitre II), il semble difficile que les autres facteurs générant des pertes aient été amenés à un niveau si bas que le gain global CTM soit positif.

Tableau V-11 : moyenne des caractéristiques électriques des i-Cells utilisées pour la réalisation des modules E et F normalisées par sous-cellule (1/4).

cellules	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	P_m (W)	η (%)	FF (%)	R_{sh} (Ω)	R_s (Ω)
Lot E	2,42	0,65	1,17	19,64	74,3	46,2	0,31
Lot F	2,40	0,65	1,17	19,41	74,6	57,9	0,27

Toutefois, les valeurs de FF et de R_s , bien meilleures que pour les modules réalisées à partir de sous-cellules de 180 μm d'épaisseur, montrent que la qualité de l'assemblage est supérieure, et que le niveau de perte CTM réel est probablement très bas. Les images d'électroluminescence des deux modules sont montrées sur la Figure V-19. Aucun défaut de soudure n'a été observé, contrairement aux modules IBC de 180 μm . Cette différence peut s'expliquer par la souplesse des cellules de 120 μm , qui fait qu'elles subissent moins de dommages lorsqu'elles sont contraintes par les rubans lors de l'étape de soudure. On constate néanmoins des gradients de courant collectés (dégradés de gris sur les images d'EL) qui montrent qu'une partie du courant semble perdue au niveau des zones situées entre les rubans.

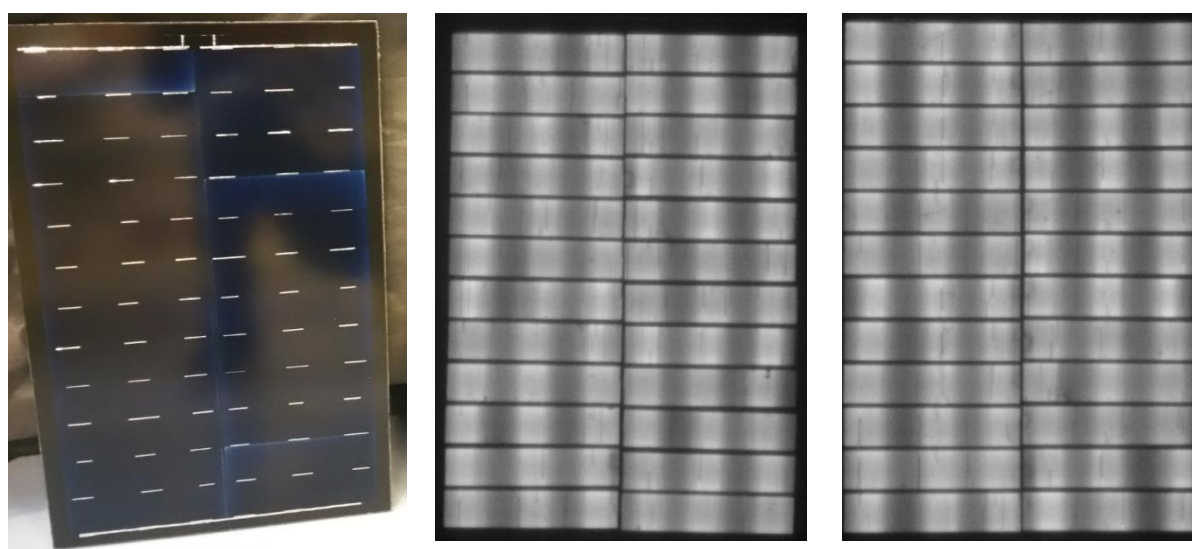


Figure V-19 : photographie du module E (gauche), et images d'électroluminescence obtenues pour le même module (centre) et pour le module F (droite).

Cette technique permet néanmoins l'obtention de modules équivalent 6 cellules avec des rendements supérieurs à 19 % pour des puissances générées de 28,9 W en moyenne, avec uniquement des moyens industriels ou industrialisables. Les pertes CTM semblent faibles, et le procédé pourrait être encore amélioré en limitant les pertes en courant par l'utilisation de rubans d'interconnexion plus longs.

V-3.3. Modules réalisés à partir de sous-cellules de 180 μm d'épaisseur sans soudure

V-3.3.1. Procédé

Deux modules ont été réalisés sans soudure, à l'aide de ruban adhésif de cuivre, pour constater les conséquences de la diminution des contraintes mécaniques de l'assemblage sur les caractéristiques électriques. L'assemblage des sous-cellules a été réalisé à l'aide d'un plateau aspirant qui permet de maintenir les sous-cellules et de garantir leur bon alignement. L'adhésif conducteur a été directement appliqué à la main le long des busbars, suite à quoi les chapelets obtenus ont été connectés à l'aide de rubans de cuivre directement soudés sur l'adhésif, puis caractérisés en électroluminescence. Les deux modules ont alors été encapsulés puis laminé dans les mêmes conditions que dans la partie V-3.1. Ils ont été mesuré électriquement grâce au simulateur solaire et à l'électroluminescence.

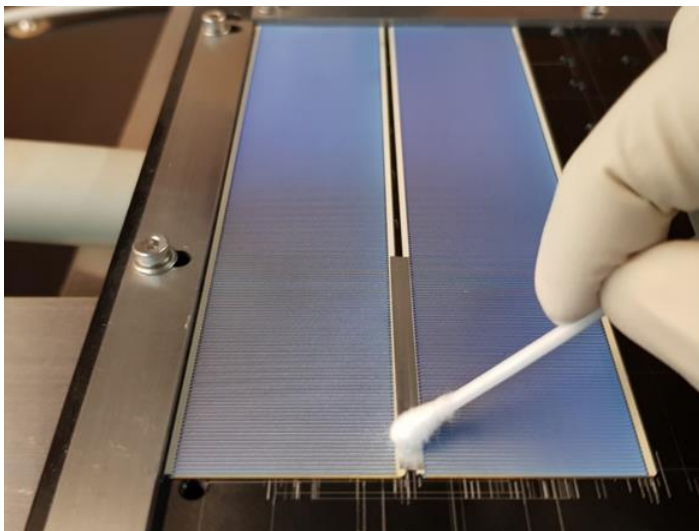


Figure V-20 : l'utilisation d'un plateau aspirant permet de limiter les contraintes et les déplacements lors de l'assemblage.

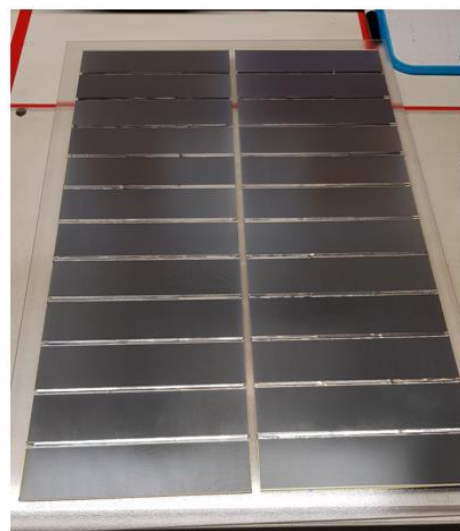


Figure V-21 : l'adhésif conducteur permet l'assemblage des chapelets sans soudure.

V-3.3.2. Résultats

Deux modules, G et H, ont été réalisés sans soudures, grâce à un assemblage des sous-cellules au moyen d'adhésif conducteur, décrit dans la partie V-2.5.2. Les paramètres électriques de ces modules sont donnés dans le Tableau V-12. Des puissances respectives de 30,5 W et de 30,97 W

ont ainsi été mesurées pour les modules G et H. Compte-tenu des puissances théoriques respectives 29,05 W et 29,10 W, calculées d'après les paramètres électriques moyens mesurés pour les sous-cellules utilisées, et données dans le Tableau V-13, ces puissances équivalent à des gains CTM supérieurs à 5 %, ce qui constituerait un excellent résultat, même dans un contexte où de tels gains ont déjà été constatés pour des petits modules IBC [135]. Comme dans la partie précédente, les valeurs absolues de gain ne sont pas fiables à cause des méthodes de mesure différentes utilisées pour les cellules d'une part et les modules d'autre part. Des mesures en conditions réelles effectuées au laboratoire PVTL de l'université de Chypre ont permis d'obtenir des valeurs de puissance 29,0 et 29,03 W, et donc les pertes CTM à 1,03 % environ, ce qui est un excellent résultat dans l'absolu. Mais même avec ces méthodes, des incertitudes liées à la calibration des moyens de mesures demeurent, en raison des caractéristiques courant-tension très spécifiques produites par les modules étudiés.

Quoi qu'il en soit, la comparaison des CTM des modules G et H à celles des modules A et B mesurées dans les mêmes conditions, permettent de supposer que l'assemblage par rubans adhésif engendre moins de pertes CTM que lorsqu'un procédé de soudure est mis en œuvre. L'autre part de l'augmentation de la puissance par rapport aux modules A et B provient de deux facteurs : i) l'utilisation d'un backsheet blanc à la place du noir qui permet une meilleure réflexion de la lumière en face arrière du module, et ii) l'utilisation de cellules aux caractéristiques légèrement meilleures (20,15 % de moyenne pour les modules G et H, contre 20,08 % pour les modules A et B). Les caractérisations des modules montrent un rendement supérieur à 20 % si l'on ne prend en compte que la surface active, pour des puissances supérieures à 30 W, ce qui constitue un record pour cette étude.

Tableau V-12 : caractéristiques électriques mesurées pour les modules G et H

module	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	P_m (W)	η (%)	FF (%)	R_{sh} (Ω)	R_s (Ω)
G	2,45	15,58	30,52	20,4	80,0	93,9	0,08
H	2,49	15,64	30,97	20,6	79,4	102,1	0,03

Tableau V-13 : caractéristiques électriques moyennes mesurées pour les sous-cellules utilisées pour la fabrication des modules G et H

cellules	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	P_m (W)	η (%)	FF (%)	R_{sh} (Ω)	R_s (Ω)
Lot G	2,41	0,65	1,23	20,1	77,1	122,3	0,01
Lot H	2,42	0,65	1,24	20,2	77,0	116,7	0,01

Comme dans le cadre de l'étude d'assemblage préliminaire, une collection suboptimale du courant est constatée pour les modules avant encapsulation et laminage de l'EVA. Cet effet est visible sur les clichés d'électroluminescence de la Figure V-22. Après encapsulation, le module apparaît néanmoins totalement clair, ce qui permet d'avancer que la circulation du courant est homogène. Les rubans de cuivre adhésifs sont en effet sensibles à la pression. Par ailleurs comme il n'est plus sensible aux déformations liées à la soudure, il est possible de couvrir tout le busbar par du ruban, ce qui permet de collecter la quasi-totalité des électrons photogénérés.

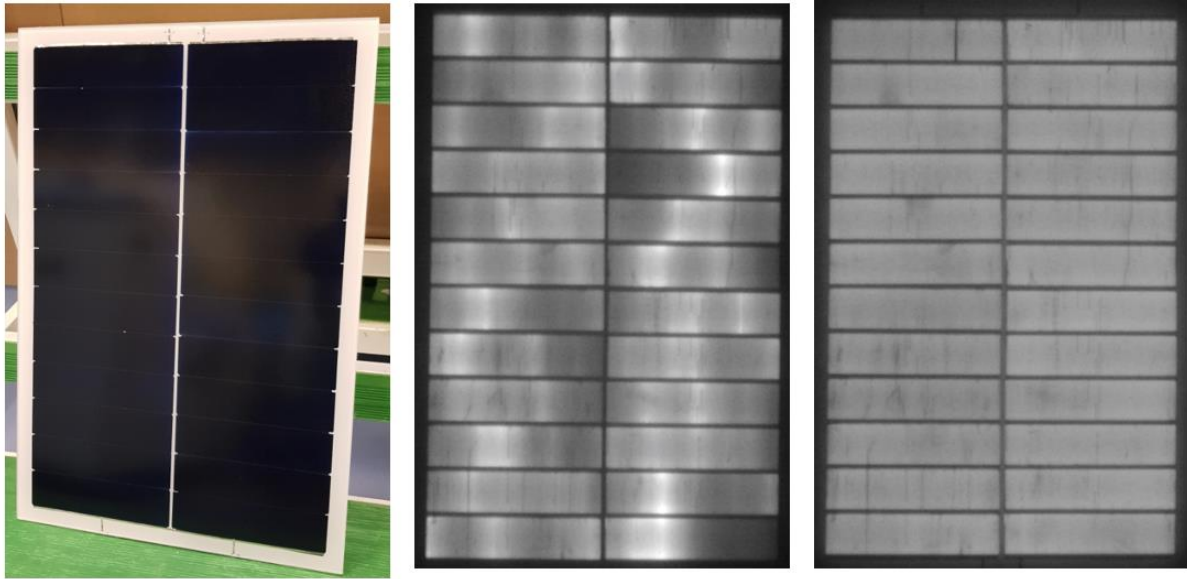


Figure V-22 : photographie du module G (gauche), et images d'électroluminescence obtenues pour les mêmes modules, avant encapsulation (centre) et après (droite).

V-3.4. Modules bifaciaux réalisés à partir de sous-cellules de 180 μm d'épaisseur sans soudure

Finalement, un modules bifacial a été réalisé et caractérisé selon les mêmes méthodes que précédemment.

V-3.4.1. Procédé

Les sous-cellules ont été assemblées à l'aide d'adhésif de cuivre conducteur et les chapelets à l'aide de ruban de cuivre. Le module obtenu a été encapsulé par une feuille d'EVA de 400 μm d'épaisseur entre une plaque de verre trempé et texturé de 3,2 mm d'épaisseur également en face avant et une feuille de backsheet transparent en face arrière. Les conditions de lamination utilisées incluent une température de 148 $^{\circ}\text{C}$, sous une pression de 930 mbar pendant 15 min. Ces conditions sont très proches des conditions de réalisation de module standard.

Aucun module bi-verre, technique très répandue pour les modules BIPV, n'a encore été réalisé car le procédé était en cours d'optimisation lors de la réalisation des essais. Le module obtenu a été caractérisé électriquement au simulateur solaire en face avant, puis en face arrière. Il a également été observé en électroluminescence, comme les autres modules fabriqués pour l'étude. Les résultats de mesure sont montrés et discutés en partie.

V-3.4.2. Résultats

Pour franchir une étape supplémentaire dans la réalisation de modules à haute puissance, un prototype bifacial baptisé I a été fabriqué. La séquence de production est la même que pour les modules G et H, à l'exception de la feuille de backsheet blanc remplacée ici par une feuille de backsheet transparent pour permettre à la lumière d'entrer par les deux faces du module. Les caractéristiques électriques mesurées pour ce module sont données dans le Tableau V-14. La génération de courant par la face avant permet l'obtention d'une puissance de 29,45 W alors qu'aucun backsheet blanc n'est présent. La face arrière quant à elle permet de générer 26,67 W. En comparant la puissance mesurée pour la face avant à la puissance moyenne mesurée pour les cellules utilisées dans le module, un gain CTM identique à ceux des modules G et H est calculé.

Tableau V-14 : caractéristiques électriques mesurées pour les faces avant et arrière du module I

module	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	P_m (W)	η (%)	FF (%)	R_{sh} (Ω)	R_s (Ω)
I avant	2,46	15,58	29,45	20,17	76,82	101,7	0,29
I arrière	2,21	15,51	26,67	17,99	77,63	93,25	0,27

Tableau V-15 : caractéristiques électriques moyennes mesurées pour les sous-cellules composant le module I

cellules	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	P_m (W)	η (%)	FF (%)	R_{sh} (Ω)	R_s (Ω)
Lot I	2,43	0,65	1,23	20,15	77,22	172,1	0,01

Cet essai montre qu'il est possible d'obtenir des modules IBC bifaciaux et avec de faibles pertes CTM à partir de cellules Zebra, sans ajouter aucune étape spécifique de fabrication. Les encapsulations bi-verre ou avec backsheet transparent peuvent être indifféremment utilisées, d'après d'autres essais réalisés à S'Tile. Les quarts de cellules Zebra permettent la fabrication d'un module avec un facteur de bifacialité φ d'une valeur très élevée (0,89), tout en maintenant la puissance générée par la face avant à un haut niveau.



Figure V-23 : images d'électroluminescence obtenues pour les mêmes modules, pour la face avant (gauche) et arrière (droite).

V-4. ETUDES DES PERTES LORS DE LA FABRICATION DE MODULES

La troisième partie de l'étude a pour objectif d'étudier les pertes dit "*Cell-To-Module*" ou "CTM" inhérentes à la réalisation de modules IBC. Les pertes CTM sont les pertes liées à la mise en module des cellules, et qui sont relativement élevées dans le cas des cellules à hauts rendements, car les pertes résistives augmentent fortement quand le courant généré augmente, comme vu précédemment [136]. Les technologies d'assemblage les plus répandues industriellement pour les cellules IBC consistent : i) soit à poser ces cellules sur une feuille de polymère sur laquelle des pistes conductrices ont été imprimées (*conductive foil*) pour que la connexion soit totale, ii) soit à connecter les cellules à l'aide de rubans, comme dans le cas de cellules Al-BSF conventionnelles. La première méthode permet de maintenir les pertes CTM à un niveau relativement faible (voire de générer du gain dans le cadre de petits modules [135]) mais présente deux principaux inconvénients : un coût en matière première important, et une occultation de la face arrière des cellules qui ne permet pas d'exploiter la bifacialité. La seconde méthode permet d'exploiter la bifacialité des cellules IBC dans des modules, mais induit des niveaux plus élevés de pertes CTM liés aux forts courants générés par les cellules à contact arrière [137].

L'objectif de cette étude est de comparer les CTM pour les modules i-Cell IBC avec les CTM de modules IBC réalisés à partir de cellules entières. Comme vu précédemment, l'utilisation de sous-cellules permet de diminuer le courant délivré par le module et donc théoriquement de diminuer fortement les pertes résistives. Il s'agit de confirmer par la pratique que le concept i-Cell fonctionne aussi pour les cellules IBC.

Les différences de rendement observées entre des cellules et ces mêmes cellules mises en module sont dues à plusieurs facteurs. Premièrement, les surfaces inactives du module induisent des pertes de rendement (espacement entre cellules, espacement entre les cellules et le bord du module principalement) car le rendement du module est calculé sur la surface totale du verre. Ensuite, l'encapsulation induit des pertes et gains optiques dus aux absorptions et réflexions des différents matériaux (pertes) et à la texturation du verre et aux réflexions sur le backsheet qui permettent une absorption de lumière plus importante (gains). Enfin, la mise en série des cellules, le contact avec les connexions, la résistance des rubans induisent des pertes résistives qui diminuent le courant et la tension et donc le rendement du module.

V-4.1. Détermination des pertes dues aux surfaces inactives

Les modules réalisés sont dimensionnés comme montré sur la Figure V-24. Les surfaces inactives sont principalement situées sur les bords. L'assemblage en sous-cellules permet en effet de déjà limiter les pertes entre les sous-cellules par un assemblage dense.

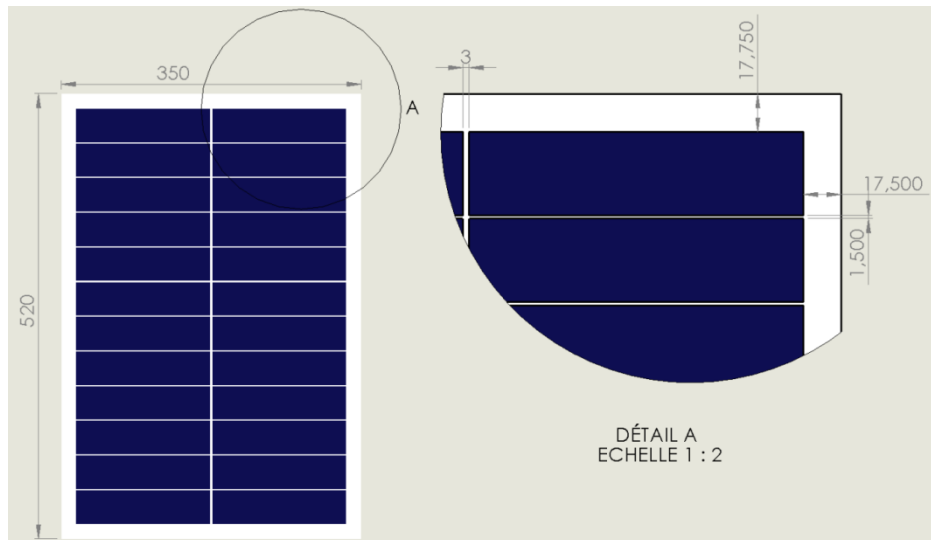


Figure V-24 : disposition et dimensions d'un des modules IBC réalisés pour l'étude. Le module est composé de 2 séries de 12 sous-cellules assemblées en série. Les zones inactives sont représentées en blanc.

L'ensemble des pertes de rendement dues aux surfaces inactives est donné par :

$$\Delta P_{SI} = 1 - \frac{A_{cellules}}{A_{module}} \quad (V.1)$$

Où $A_{cellules}$ correspond au produit de la surface d'une cellule par le nombre de cellules dans le module, et A_{module} à la surface du module et donc de la plaque de verre en face avant. Dans le cas des modules i-Cell IBC de l'étude, les pertes liées aux surfaces inactives peuvent être évaluées à 18,9 % relatifs de rendement. Si on prend des cellules avec un rendement moyen de 20 %, ceci équivaut à une perte absolue de 3,8 % lors de la mise en module. Cette perte peut être grandement diminuée si l'on adapte le verre aux chapelets de cellules. En effet, la distance d'isolement minimale entre le bord du verre et le bord du conducteur (cellule ou ruban) est de 2mm pour un module délivrant jusqu'à 50V. En réduisant la taille du verre aux dimensions minimales assurant le respect des normes, les pertes dues aux surfaces inactives diminuent à 5,8% relatifs. Il y a donc une importante marge de progression pour l'optimisation du rendement pur du module.

Cependant, les pertes CTM sont souvent exprimées en termes de puissance et non de rendement, afin d'évaluer les pertes réelles entre la puissance délivrée par le module et la puissance des cellules qui le composent.

V-4.2. Détermination des pertes optiques

Les pertes optiques sont provoquées par le procédé d'encapsulation inhérent à la mise en module, et par l'introduction d'éléments extérieurs, comme les rubans, qui perturbent la propagation de la lumière dans les cellules.

V-4.2.1. Modèle théorique

Les différentes pertes et gains optiques pour un module IBC sont résumés dans la Figure V-25.

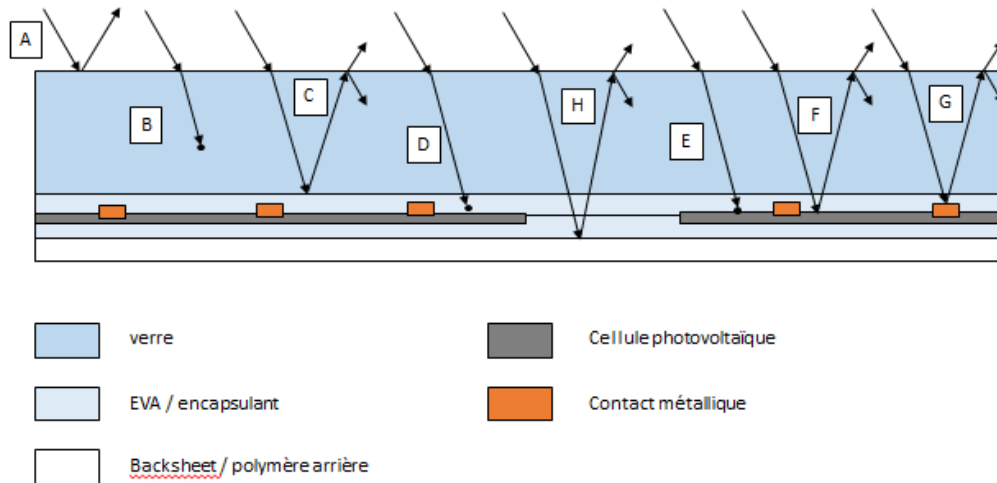


Figure V-25 : détail des pertes optiques provoquées par l'encapsulation en module : la lumière peut être perdue par réflexion ou absorption dans le verre (A, B), réflexion à l'interface verre-EVA ou absorption dans l'EVA (C, D), réflexion ou absorption sur les éléments de la cellule (F, G). E représente le gain optique apporté par le couplage entre l'anti-reflet de la cellule et l'encapsulant, qui permet de ré-absorber des rayons initialement réfléchis par la cellule, ou sur les doigts. H représente le gain dû aux réflexions sur le backsheet.

Il est à noter que dans le cas de modules IBC, et donc sans métallisation en face avant, il n'y a pas de pertes optiques liées à la métallisation ou aux rubans en face avant, comme dans le cas des modules standard. D'après la bibliographie, ceci permet une réduction des pertes comparativement à des cellules métallisées en face avant. En revanche, si on compare les modules i-Cell IBC composés de sous-cellules à des modules IBC standard composés de cellules entières, il ne devrait pas y avoir théoriquement de différence flagrante au niveau des pertes optiques dans le module. Il est toutefois nécessaire de mesurer ces pertes sur les modules de l'étude afin d'évaluer les pertes optiques absolues engendrées par ce mode d'assemblage.

V-4.2.2. Mesure des pertes optiques

Le principe utilisé est le suivant : des cellules IBC ont été caractérisées grâce au simulateur solaire avant et après l'encapsulation entre une plaque de verre et une feuille de backsheet blanc par EVA laminé dans les mêmes conditions pour toutes les cellules. La différence mesurée avant et après encapsulation représente donc le gain ou la perte optique totale inhérente à cette étape. Le simulateur solaire modifié pour la mesure de cellules IBC n'étant pas disponible, les mesures ont été réalisées sur un simulateur solaire standard, en contactant les cellules par le moyen de rubans, eux-mêmes soudés sur les busbars.

Deux expériences différentes ont été réalisées afin de déterminer les pertes et gain optiques : i) une mesure avant et après encapsulation d'une partie centrale de la cellule uniquement afin de

quantifier la somme des pertes A, B, C, D et du gain E détaillées dans la partie précédente (cf. Figure V-26, et ii) une mesure avant et après encapsulation de la cellule entière encapsulée sur son fond blanc afin de quantifier le gain apporté par les réflexions sur le backsheet blanc dans le module, comme l'illustre la Figure V-27. Il est à noter que dans le cas d'un module bifacial, ce gain ne s'applique pas puisque la face arrière est transparente. Néanmoins, les mesures réalisées séparément permettent d'évaluer les pertes CTM dans le cas d'un module bifacial ou non. Les deux mesures ont été réalisées à l'aide de différents masques ne laissant apparente qu'une surface contrôlée de la cellule lors de la mesure. Ces masques sont noirs et non réfléchissants afin de ne pas créer d'apport de lumière supplémentaire indésirable.



Figure V-26 : dispositif expérimental de la mesure i).

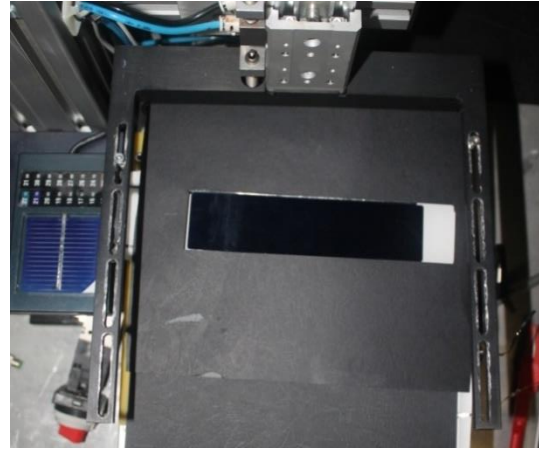


Figure V-27 : dispositif expérimental de la mesure ii) qui intègre le rôle du backsheet blanc.

V-4.2.3. Résultats

Les mesures au simulateur solaire avant et après encapsulation décrites dans la partie V-4.2.2 ont été réalisées sur des cellules 2 x 2 cm² de mêmes propriétés que celles utilisées pour la réalisation des modules décrits précédemment. Les conditions d'encapsulation (matériaux utilisés, temps, température, pression et durée) sont également identiques. La moyenne des pertes relatives entre les mesures précédant et suivant l'encapsulation pour les paramètres électriques des cellules est présentée dans le Tableau V-16.

Tableau V-16 : pertes relatives mesurées avant et après encapsulation sur les paramètres électriques des cellules Zebra, selon les méthodes i) et ii) décrites dans la partie V-4.2.2.

méthode	Pm (W)	Isc (A)	Voc (V)	FF (%)	η (%)
i.	-5,10 %	-4,42 %	-0,51 %	-0,31 %	-5,16 %
ii.	-3,12 %	-2,92 %	-0,57 %	0,34 %	-3,10 %

En soustrayant les pertes mesurées par la méthode i) à celles mesurées par la méthode ii), il est possible d'obtenir le gain apporté par la réflexion sur le backsheet. Ce gain vaut donc 1,98 %. Cette valeur est proche de celle estimée pour des modules standards, et vaut environ 1,64% selon l'étude qui sert ici de référence [138]. Connaissant cette valeur, les pertes optiques mesurées

pour les modules composés de quarts de cellules Zebra ont été comparées en termes de puissance à celles d'un module IBC standard et sont données dans le Tableau V-17.

Tableau V-17 : la valeur des différents types de pertes (voir) calculées pour un module IBC standard [1], comparées aux mêmes valeurs mesurées pour les modules de l'étude, assemblés à partir de sous-cellules.

Pertes	Module IBC standard	Module sous-cellules IBC
A	- 3,97 %	
B	- 1,2 %	
C	- 0,03 %	
D	- 1,28 %	- 5,10 %
E	0	
F	+ 1,29 %	
G	0	
H	+ 1,64 %	+ 1,98 %
Total	- 3,55 %	- 3,12 %

Ces mesures montrent que les pertes optiques des modules de l'étude sont légèrement inférieures à celles d'un module IBC standard. La différence est expliquée par le plus grand nombre d'espaces entre sous-cellules dans les modules i-Cell IBC, qui permettent plus de réflexion grâce au backsheet. Ce résultat est cohérent puisque théoriquement n'existent que très peu de différences entre une i-Cell Zebra et une cellule Zebra classique quant aux propriétés optiques. Les seuls facteurs spécifiques sont induits par les propriétés du backsheet utilisé pour l'étude, et ont été évaluées.

V-4.3. Détermination des pertes résistives

V-4.3.1. Modèle théorique

Grâce à l'interconnexion en série de sous-cellules, le courant circulant dans le module est théoriquement divisé par quatre. Or, il a été vu dans l'équation (1.5) du chapitre I que les pertes résistives dans un module sont proportionnelles au carré du courant généré I_L , et à la résistance de l'ensemble busbar + ruban R_{bb+r} :

$$\Delta P_R = \sum_{k=1}^{n_R} \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{I_L}{n_R}\right)^2 \cdot R_{bb+r} \quad (I.5)$$

Si l'on considère que la résistivité des busbars d'argent est très faible devant celle des rubans de cuivre, on peut approximer que les pertes résistives dans le module dépendent du carré du courant généré et de la valeur de la résistance des rubans. Cette valeur de résistance est donnée par la formule suivante :

$$R_r = \rho \cdot \frac{L_r}{l_r \cdot e_r} \quad (V.2)$$

Avec ρ la résistivité du ruban en $\Omega.m$, et L_r , l_r et e_r respectivement la longueur, la largeur et l'épaisseur du ruban, en m. En considérant les deux types de rubans présents dans les modules i-Cell IBC (pour l'interconnexion des cellules et la connexion des chapelets, comme montré sur la Figure V-28, il est possible d'estimer par le calcul les pertes résistives inhérentes à la mise en module de sous-cellules. Ces valeurs ont été comparées aux valeurs calculées par ISC pour des modules Zebra standard [137].



Figure V-28 : les rubans verticaux sur la photographie (en haut) servent à la circulation du courant total généré par chaque chapelet. Les rubans horizontaux (disposés entre chaque sous-cellule) servent à la connexion des sous-cellules entre elles.

V-4.3.2. Résultats

Les modules i-Cell IBC G et H ont servi à l'étude détaillée des pertes CTM, en comparant la puissance théorique (somme des puissances des cellules) et la puissance mesurée pour le module. L'ensemble des cellules a été caractérisé au préalable grâce au simulateur solaire, puis trié selon le courant au point de puissance maximale. De cette manière, les disparités entre cellules connectées en série sont limitées. La puissance théorique calculée à partir des cellules ne tient pas compte du fait que le courant du module est limité par le courant le plus faible de toutes les cellules constituant ce module. Les résultats pour les modules G et H sont donnés dans le Tableau V-18 et le Tableau V-19 respectivement.

Tableau V-18 : caractéristiques électriques théoriques et mesurées pour le module G

	Pm (W)	Isc (A)	Voc (V)	Rs (m Ω)	FF (%)	η (%)
Théorique	29,051	2,401	15,604	198,7	77,18	19,90
Mesuré	30,525	2,451	15,558	75,3	80,04	20,91
Différence	+5,07%	+ 2,10%	- 0,29%	- 62,08%	+ 3,70%	-

Tableau V-19 : caractéristiques électriques théoriques et mesurées pour le module H

	Pm (W)	Isc (A)	Voc (V)	Rs (m Ω)	FF (%)	η (%)
Théorique	29,103	2,416	15,608	214,0	77,01	19,93
Mesuré	30,976	2,494	15,642	33,9	79,40	21,1
Différence	+ 6,43%	+ 3,22%	+ 0,22%	-84,17%	+ 3,11%	-

Comme vu précédemment, le mode d'assemblage des sous-cellules a une grande incidence sur les pertes CTM. Les gains de puissances des modules G et H sont plus élevés que ceux des modules réalisés avec des soudures (A, B, C, D, E et F). Les rubans adhésifs conducteurs permettent en effet une plus grande surface de contact sur les busbars tout en engendrant moins de contraintes mécaniques. Le test d'électroluminescence (EL) permet de vérifier l'homogénéité du passage du courant à travers du module. La Figure V-29 montre une plus grande homogénéité dans la collecte du courant pour les modules réalisés sans soudure, qui permet de réduire les pertes CTM.

Tableau V-20 : caractéristiques électriques théoriques et mesurées pour le module F (120 μm épaisseur)

	P_m (W)	Isc (A)	Voc (V)	Rs (m Ω)	FF (%)	η (%)
Théorique	28,036	2,407	15,588	276,5	74,694	19,20
Mesuré	28,736	2,536	15,741	648,8	71,984	18,80
Différence	+ 2,49%	+ 5,34%	+ 0,98%	+ 135%	- 3,63%	-

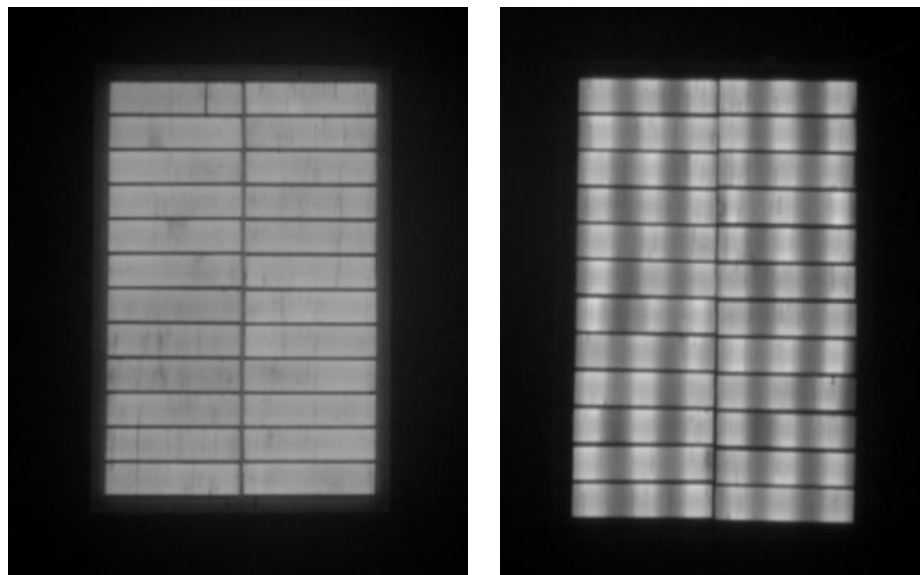


Figure V-29 : la circulation du courant est plus homogène dans les modules réalisés sans soudure (à gauche), que dans les modules où les sous-cellules sont soudées (droite), en raison de la plus grande surface couverte par l'interconnexion.

Les modules G et H ont été comparés avec ceux réalisés par ISC Konstanz à l'aide de cellules IBC Zebra standard de 20,79 % de rendement en moyenne. Les trois modules ont été mesurés électriquement après encapsulation, et les cellules qui les composent ont également été caractérisées électriquement à l'aide du même appareil. La perte relative de puissance est de 4,33 % pour le module composé de Zebra standard, alors qu'on constate un gain CTM pour les modules composés de sous-cellules. Comme vu précédemment, cette différence est probablement accentuée par la difficulté qui existe pour l'instant de caractériser les sous-cellules, et les modules fabriqués à partir d'elles de manière fiable. Les hautes tensions et faibles courants générés posent des problèmes pour calibrer les instruments de mesure de manière précise. Le simulateur solaire utilisé pour la mesure des modules n'a ainsi pas été calibré de la même manière pour les modules composés de sous-cellules que pour le module composé de Zebra standard.

Cependant, il est possible d'avancer qu'une partie du gain CTM provient de la réduction des pertes résistives : le courant des cellules standard est 4 fois plus important que celui des cellules utilisées par S'Tile. En utilisant des sous-cellules moins performantes seules que les cellules Zebra, il est théoriquement possible de fabriquer des modules plus puissants car les pertes CTM sont réduites. Il faudra confirmer ce résultat et trouver un moyen de calibrer le simulateur solaire de manière fiable.

Tableau V-21 : caractéristiques électriques théoriques et mesurées pour un module composé de cellules Zebra standard

	Pm (W)	Isc (A)	Voc (V)	FF (%)	η (%)
Théorique	29,806	9,330	3,938	80,64	20,79
Mesuré	28,516	9,132	3,937	79,31	19,94
Différence	- 4,33 %	- 2,13 %	- 0,01 %	- 1,64 %	-

V-5. CONCLUSION

Une étude des procédés d'interconnexion et d'assemblage en module des sous-cellules IBC obtenues a été présentée. Elle a permis de déterminer des conditions d'assemblages pour lesquelles les pertes résistives sont quasiment éliminées, avec des moyens déjà disponibles dans l'industrie. L'utilisation d'adhésif conducteur limite les contraintes mécaniques habituellement liées à la soudure de rubans et diminue drastiquement le taux de casse. L'assemblage sur substrat de silicium fritté à bas coût a également été étudié. Cette solution présente le double avantage de réaliser les connexions électriques sans contraintes entre sous-cellules, et également de faire office de support mécanique, qui pourrait s'avérer utile si des cellules très minces venaient à être utilisées. L'assemblage sur substrat nécessite cependant une grande précision dans le positionnement des sous-cellules pour éviter des diminutions de performances liées à des courts-circuits locaux.

Des mini-modules d'un équivalent de six cellules ont été réalisés en utilisant les différentes techniques d'assemblage étudiées. Des rendements supérieurs à 20 % ont ainsi pu être obtenus pour les modules réalisés à partir de sous-cellules de 160 μm d'épaisseur. Ces performances ont de plus été obtenues avec des techniques à bas coût, contrairement aux feuilles conductrices utilisées dans certains modules IBC. Des pertes CTM très faibles ont été observées, grâce principalement à la réduction des pertes résistives. Un mini-module bifacial a été réalisé à partir de sous-cellules de 160 μm , avec un rendement mesuré de 20,15 % pour la face avant, et de 18 % pour la face arrière. Des mesures des modules en conditions réelles sont en cours, notamment pour évaluer la tenue dans le temps et en température.

REFERENCES DU CHAPITRE V

135 Guillevin N. et al., « Cell to module gains for high efficiency back contact cells », *Proceedings of the 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2017, pp. 1654-1656.

136 Haschke J. et al., « The impact of silicon solar cell architecture and cell interconnection on energy yield in hot & sunny climates », *Energy & Environmental Science*, vol. 10, n° 5, 2017, pp.1196-1206.

137 Halm A. et al., « Evaluation of cell to module losses for n-type IBC solar cells assembled with state of the art consumables and production equipment », *Proceedings of the 39th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2013, pp. 2368-2372.

138 Haedrich I. et al., « Unified methodology for determining CTM ratios: Systematic prediction of module power », *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 131, 2014, pp. 14-23.

Conclusion et perspectives

Ce travail de thèse a pour ambition la réalisation de modules photovoltaïques à bas coût tout en augmentant la puissance produite. Plusieurs approches ont été sélectionnées, avec, premièrement, la réduction de la quantité de silicium utilisé pour la fabrication des cellules. Ensuite, la simplification du procédé de fabrication des cellules en simplifiant certaines étapes, comme le dépôt de la couche antireflet des cellules. Il a en effet été constaté que l'encapsulation dans un module diminue fortement l'écart de performance entre une couche anti-reflet de bonne qualité et une autre de qualité médiocre. Dans le même but, la réalisation de l'émetteur par implantation ionique permet de réduire le nombre d'étapes de fabrication et d'améliorer les propriétés de la face avant. L'ouverture du dépôt de métallisation en face arrière a également été retenue pour réduire la quantité de matériau métallique utilisé, et permettre la bifacialité des cellules.

A l'échelle des modules, deux approches ont été retenues pour améliorer les performances sans rupture technologique ni augmentation massive du coût de production ou de la complexité du procédé : premièrement utiliser un matériau transparent pour la face arrière des modules afin d'exploiter les propriétés de bifacialité des cellules pour augmenter la puissance générée à moindre frais. La seconde approche repose sur le concept de l'i-Cell développé par la société S'Tile. Il s'agit d'une cellule solaire intégrée, constituée de plusieurs sous-cellules plus petites connectées en série sur un substrat à bas coût. Cette idée a été adaptée en réalisant des modules photovoltaïques à partir de quarts de cellules connectés en série. Une telle structure génère un courant quatre fois plus faible qu'un module photovoltaïque standard, ce qui permet de très fortement diminuer les pertes résistives constatées lors de la production de modules.

Des mini-modules équivalents à six cellules ont été réalisés à partir des sous-cellules développés pour l'étude, et dans des conditions industrielles. Les procédés de fabrication standard, et la comparaison avec des modules de même taille réalisés à partir de cellules entières a permis de mettre en évidence un gain de puissance de 12 % pour les modules composés de sous-cellules. Ce gain doit être relativisé en raison des conditions de mesure et de réalisation des modules standards, légèrement différentes, mais est déjà prometteur pour la suite du développement.

La réalisation de modules IBC à hauts rendements et bas coût a été étudiée selon la même approche. L'étude par simulation de l'adaptation de la technologie Zebra développée par ISC à des sous-cellules a été présentée. Il a été démontré que plus les sous-cellules sont étroites, et plus la diminution de la résistance série dans les doigts entraîne une augmentation des performances, jusqu'à un minimum de 19,5 mm de largeur pour une sous-cellule. Dans ces conditions, découper les cellules en six ou 8 semble une solution optimale, qui n'a pas été testée pour des raisons pratiques. Il a été démontré que la diminution de l'épaisseur entraîne théoriquement une augmentation de la performance pour les sous-cellules IBC, et un nombre minimal de points d'interconnexion fixé à 10 a été déterminé pour minimiser les pertes en lignes lors de la mise en module.

Des sous-cellules IBC de 160, 120 et 60 μm d'épaisseur ont été réalisées à partir de différentes plaquettes de silicium monocristallin de type n. Les cellules de 60 μm sont trop fragiles pour être produites de manière industrielle avec les équipements actuels. Les sous-cellules de 160 et 120 μm d'épaisseur présentent des rendements inférieurs à ceux des cellules entières de même épaisseur produites dans les mêmes conditions. Cette différence est expliquée par les limites intrinsèques des quarts de cellules en termes de résistance série, et par un procédé de sérigraphie pas encore optimisé pour les sous-cellules. Des rendements maximum de 20,4 % pour des sous-cellules de 160 μm et de 20,2 % pour des sous-cellules de 120 μm ont été obtenus.

Une étude des procédés d'interconnexion et d'assemblage en module des sous-cellules IBC obtenues a été présentée. Elle a permis de déterminer des conditions d'assemblages pour lesquelles les pertes résistives sont quasiment éliminées, avec des moyens déjà disponibles dans l'industrie. L'utilisation d'adhésif conducteur limite les contraintes mécaniques habituellement liées à la soudure de rubans et diminue drastiquement le taux de casse.

Des mini-modules d'un équivalent de six cellules ont été réalisés. Des rendements supérieurs à 20 % ont ainsi pu être obtenus pour les modules réalisés à partir de sous-cellules de 160 μm d'épaisseur. Ces hauts rendements n'ont pas pu être reproduits avec des modules réalisés à partir de cellules de 120 μm d'épaisseur, en raison des défauts de sérigraphie présents sur celles-ci. Toutefois, des pertes CTM très faibles ont été observées dans les deux cas, grâce principalement à la réduction des pertes résistives. Un mini-module bifacial a été réalisé à partir de sous-cellules de 160 μm , avec un rendement mesuré de 20,15 % pour la face avant, et de 18 % pour la face arrière.

Après les résultats encourageant obtenus lors de cette étude, de nombreux axes de poursuite sont envisageables.

Concernant les cellules PERC, la piste principale pour l'amélioration des rendements concerne l'étude de la passivation de la face arrière. La couche de nitrure déposée par PECVD crée en effet une zone d'inversion qui limite le rendement. Il serait intéressant d'étudier les effets de la suppression de cette couche de nitrure qui apportent théoriquement plusieurs avantages : premièrement, ceci permettrait de supprimer le shunt parasite lié à la zone d'inversion et d'éventuellement augmenter les performances électriques. Ensuite, la suppression de cette couche permettrait de doubler simplifier le procédé de fabrication : en sérigraphiant les contacts d'aluminium directement sur l'oxyde, il serait possible de supprimer les étapes de dépôt de nitrure et d'ouverture laser de la face arrière. Le recuit de métallisation permettrait alors à l'aluminium de passer localement à travers l'oxyde thermique faisant office de passivation arrière afin de réaliser les contacts.

L'optimisation du recuit des contacts pour les cellules PERC sans anti-reflet en face avant doit également être continuée afin de connaître le potentiel de telles cellules. De même que les motifs de sérigraphie de la face avant qui peuvent encore être améliorés. Une étude de simulation pour déterminer la largeur optimale d'une sous-cellule pourrait également être intéressante, à l'instar de ce qui a été réalisé pour les cellules IBC.

Une autre voie d'amélioration concerne la découpe en sous-cellules, qu'elles soient PERC ou IBC. Des conditions de découpe favorables ont été identifiées et ont permis de limiter la perte de

rendement à 0,2 %. Il semble difficile de descendre en dessous de cette limite avec des moyens conventionnels, mais de nouvelles méthodes prometteuses sont en phase d'émergence, avec des pertes de rendements quasi nulles annoncées [139]. En utilisant ces techniques, il est possible d'augmenter le rendement des sous-cellules de manière à rendre la technologie i-Cell encore plus compétitive face à des modules standard. Des essais en ce sens ont débuté sur les cellules i-Zebra, en partenariat avec ISC.

Enfin, la réalisation de modules de taille plus importante pourrait permettre de caractériser si les points forts de la technologie i-Cell sont aussi présents dans le cas où un plus grand nombre de sous-cellules sont interconnectées. Il semble également important de mieux comprendre la calibration des simulateurs solaires pour modules afin d'obtenir des résultats de mesures avec moins d'incertitude pour les modules i-Cell à haute tension.

REFERENCES

139 S. Eiternick *et al.*, « High Quality Half-cell Processing Using Thermal Laser Separation », *Energy Procedia*, vol. 77, p. 340-345, août 2015.

Annexe A : Histoire des cellules photovoltaïques

VI-1. PREMIERES AVANCEES & CONCEPT THEORIQUE

L'effet photovoltaïque constitue la principale manière de convertir le rayonnement solaire en électricité. Le terme est composé du grec « photos » - la lumière, la clarté – et du nom de famille du physicien italien Alessandro Volta, connu pour ses travaux sur l'électricité et l'invention de la pile électrique.

Cet effet a été observé pour la première fois en 1839 par Antoine César et Alexandre Edmond Becquerel, respectivement grand-père et père d'Antoine Henri Becquerel, prix Nobel de physique de 1903 pour ses travaux sur la radioactivité. En éclairant des électrodes de platine et d'argent avec différentes lumières, dont la lumière du jour, Alexandre Becquerel se rendit compte que celles-ci produisaient de petites quantités d'électricité [140,141]. Il trouva une application à cet effet en fabriquant un actinomètre, appareil capable de mesurer une intensité lumineuse.

En 1877, une avancée significative dans le développement photovoltaïque émergea de l'étude des phénomènes photoconducteurs dans le sélénium (Se). En étudiant cet effet, William Adams et Richard Day découvrirent que l'exposition de ce matériau à la lumière génère une tension électrique interne dans l'échantillon [142]. C'est la première démonstration de l'effet photovoltaïque dans un dispositif entièrement à l'état solide.

La première cellule fonctionnelle et fabriquée intentionnellement l'a été en 1883 par Charles Fritts [143], en fondant un film mince de sélénium sur un substrat métallique et en déposant par-dessus une feuille d'or qui servait de contact électrique. Ne produisant pas assez de courant, la découverte passe relativement inaperçue. Cependant, Fritts note à l'époque que « le courant, s'il n'est pas utilisé immédiatement, peut soit être stocké à l'endroit où il est produit, au moyen de batteries, ou transmis à distance et utilisé ». Plus de cent ans à l'avance, la technologie photovoltaïque et ses applications actuelles ont été imaginées.

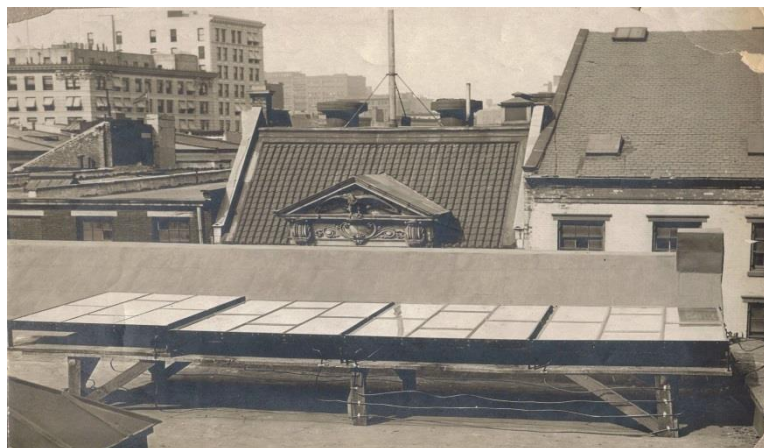


Figure VI-1 : la première installation photovoltaïque mise en place sur les toits de New York par Charles Fritts en 1884. Source : *Let it Shine : The 6000-year story of solar energy*, John Perlin

En 1905, Albert Einstein propose une théorie qui explique comment de la lumière peut produire de l'électricité en frappant un métal. Il développe une idée de Max Planck remontant à 1900 [144], selon laquelle la lumière est constituée de paquets d'énergie qui vibrent comme des ondes pendant leur mouvement. Ces particules d'énergie sont appelées des photons. Einstein avançait que les photons sont beaucoup plus puissants dans le domaine de la lumière invisible (à partir de l'ultraviolet) qu'ils ne le sont dans le domaine de la lumière visible. Dans cette théorie, il démontra que l'énergie d'un photon suffisamment puissant est entièrement transférée à un électron du matériau illuminé, et que le courant photoélectrique est proportionnel au nombre de photons absorbés, donc au flux lumineux [145], ce qui lui vaudra le prix Nobel de physique en 1922.

Les activités de recherche sur l'effet photovoltaïque sont cependant fortement ralenties pendant plusieurs décennies, notamment à cause des faibles courants générés par les cellules en sélénium, qui ne permettent pas d'applications immédiates, à l'époque où sont développées les premières centrales électriques au charbon notamment [146].

VI-2. GUERRE FROIDE ET CONQUETE SPATIALE

C'est en 1954 que le sujet suscita un nouvel intérêt, quand des chercheurs des laboratoires Bell aux Etats-Unis découvrirent accidentellement que des diodes de silicium à jonction *pn* généraient une tension quand les lumières de la pièce étaient allumées. Dans l'année qui suivit, ils produisirent une cellule photovoltaïque en silicium avec un rendement de l'ordre de 6 % [147].

La même année, un groupe de recherche de la base aérienne Wright-Patterson également aux Etats-Unis démontra un rendement identique avec une cellule mince à hétérojonction fabriquée en sulfure de cuivre (Cu_2S) et sulfure de cadmium (CdS) [148]. Deux ans après, c'est une cellule composée d'une jonction *pn* en arséniure de gallium (GaAs) avec un rendement de 6 % qui fit l'objet d'une publication [149].



Figure VI-2 : Calvin Fuller des laboratoires Bell diffuse du bore dans du silicium pour créer la première cellule solaire. Source : *American Physical Society*



Figure VI-3 : les premières cellules soviétiques à avoir volé dans l'espace ont servi à alimenter les instruments scientifiques de Spoutnik et le système de radio. Source : www.yuri-gagarin.com

Jusqu'aux années 60, plusieurs publications d'importance par Morton Prince [150], Joseph Loferski [151], Paul Rappaport et Joseph Wysocki [152], William Shockley (prix Nobel de physique 1956) et Hans-Joachim Queisser [153] décrivent et expliquent le fonctionnement des cellules solaires à jonction pn , notamment la relation entre le gap du matériau, le type de lumière incidente, la température, la thermodynamique et le rendement (voir partie correspondante).

Le développement de la technologie à cette époque était liée au fait que le programme spatial américain utilisait des cellules photovoltaïques pour alimenter ses satellites en énergie. En URSS, des recherches similaires avaient lieu, et permirent de faire de Spoutnik II le premier satellite équipé de panneaux solaires en 1957. En 1970, Jaurès Alferov (prix Nobel de physique en 2000) et son équipe de l'institut physico-technique Ioffe mirent au point une cellule à hétéroface en arséniure de gallium-aluminium (GaAlAs) et arséniure de gallium (GaAs). Ce matériau présentait l'avantage de hauts rendements [154], combinés à une résistance aux radiations spatiales.

Les performances des cellules s'améliorèrent encore avec l'introduction de la « cellule violette » [155] qui présentait une réponse améliorée dans le domaine des courtes longueurs d'onde impliquant un gain relatif de 30 % de rendement comparativement aux technologies contemporaines. IBM aux Etats-Unis développa également des cellules à hétérostructure en GaAs atteignant des rendements de 13 % [156].

VI-3. CRISE ENERGETIQUE

En octobre 1973 eut lieu le premier choc pétrolier provoqué par les pays de l'OPEP. A la suite de cet évènement, plusieurs gouvernements mirent en place des programmes encourageant l'énergie solaire, programmes qui eurent pour conséquence de transférer les applications de l'espace à la terre.

A partir des années 1980, l'industrie s'est développée alors que les progrès technologiques permettaient une augmentation de la capacité de production et une baisse des prix. Des usines de fabrication de production de cellules photovoltaïques à partir de wafers de silicium à jonction pn furent installées aux Etats-Unis, au Japon et en Europe. De nouvelles technologies issues de laboratoires publics ou industriels et d'universités sont transférées en phase de pré-commercialisation, ou production pilote. Certaines compagnies essaient de développer la production de cellules basées sur des films minces, comme le silicium amorphe (a-Si) ou l'alliage cuivre indium sélénium (CuInSe₂) qui atteignent plus de 10 % de rendement en laboratoire. Cependant, il s'avère qu'il est plus simple et moins coûteux de développer la taille de la filière silicium.

REFERENCES

140 Becquerel A. E., « Recherches sur les effets de la radiation chimique de la lumière solaire au moyen des courants électriques », *Comptes Rendus de L'Academie des Sciences*, vol. 9, 1839, pp. 145-149.

- 141 Becquerel A. E., « Mémoire sur les effets d'électriques produits sous l'influence des rayons solaires », *Annalen der Physik und Chemie*, vol. 54, 1841, pp. 35-42.
- 142 Adams W. G. et Day, R. E., « The Action of Light on Selenium », *Proceedings of the Royal Society*, London, vol. A25, 1877, p. 113.
- 143 Fritts C., « New Form of Selenium Cell, with some Remarkable Electrical Discoveries Made by its Use », *Proceedings of the American Association for the Advancement of Science*, vol. 33, 1883, p. 97.
- 144 Planck M., « Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum », *Annalen der Physik*, vol. 4, 1901, p. 553.
- 145 Einstein A., « Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt », *Annalen der Physik*, vol. 17, n° 6, 1905, pp. 132–148.
- 146 The Electricity Council, *Electricity supply in the United Kingdom*, éditeur : Electricity Council, 1987.
- 147 Chapin A., Fuller C. et Pearson G., « A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power », *Journal of Applied Physics*, vol. 25, 1954, pp. 676-677.
- 148 Reynolds D. et al., « Photovoltaic Effect in Cadmium Sulfide », *Physical Review*, vol. 96, 1954, pp. 533-534.
- 149 Jenny D., Loferski R., Rappaport P., « Photovoltaic Effect in GaAs p-n Junctions and Solar Energy Conversion », *Physical Review*, vol. 101, 1956, pp. 1208-1209.
- 150 Prince M., « Silicon Solar Energy Converters », *Journal of Applied Physics*, vol. 26, 1955, pp. 534-540.
- 151 Loferski J., « Theoretical Considerations Governing the Choice of the Optimum Semiconductor for Photovoltaic Solar Energy Conversion », *Journal of Applied Physics*, vol. 27, 1956, pp. 777-784.
- 152 Wysocki J. et Rappaport P., « Effect of Temperature on Photovoltaic Solar Energy Conversion », *Journal of Applied Physics*, vol. 31, 1960, pp. 571-578.
- 153 Shockley W. et Queisser H., « Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells », *Journal of Applied Physics*, vol. 32, 1961, pp. 510-519.
- 154 Alferov J., « Solar-energy converters based on p-n $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As-GaAs}$ heterojunctions », *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov*, vol. 4, 1970, p. 2378.
- 155 Lindmayer J. et Allsion J., « The Violet Cell: an Improved Silicon Solar Cell », *COMSAT Technical Review*, vol. 3, 1973, pp. 1-22.
- 156 Hovel H. et Woodall J., « », *Proceedings of the 10th IEEE Photovoltaic Specialist Conference*, 1973, pp. 25-30.

Annexe B : Physique des cellules solaires

INTRODUCTION

L'effet photovoltaïque consiste en la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique. De manière brève, le phénomène peut être décrit comme suit : la lumière entre dans une cellule photovoltaïque et apporte suffisamment d'énergie à certains électrons pour les libérer du matériau. Une barrière de potentiel interne à la cellule agit sur ces électrons pour produire une tension électrique qui peut être utilisée pour mettre en mouvement le courant dans un circuit. Par la suite, seul le fonctionnement des cellules photovoltaïques faites de silicium cristallin sera développé. Il s'agit en effet de la technologie la plus répandue, et également celle qui sera étudiée dans ces travaux.

VII-1. DESCRIPTION ATOMIQUE DU SILICIUM

La matière est constituée d'atomes, eux-mêmes constitués de trois types de particules, les protons, les neutrons et les électrons. Les protons (chargés positivement) et les électrons (chargés négativement) s'attirent mutuellement. Les neutrons ne sont attirés ni par les protons ni par les électrons et sont dits neutres. Les protons et les neutrons forment le noyau des atomes. Les électrons, qui sont beaucoup plus légers, orbitent autour du noyau. Les atomes ont le même nombre de protons et d'électrons, ce qui fait que leur charge électrique globale est neutre.

La location orbitale des électrons et le mouvement des électrons au sein de leur orbitale sont déterminés par l'énergie des électrons. Les électrons les plus éloignés des noyaux interagissent avec les électrons d'autres atomes et permettent l'assemblage de structures plus vastes, comme des solides. Les atomes de silicium possèdent quatorze électrons, dont les quatre les plus à l'extérieur peuvent être donnés, acceptés ou échangés avec d'autres atomes. On les nomme les électrons de valence. Un atome de silicium possède donc quatre électrons de valence. Il partage cette propriété avec les éléments regroupés dans la quatrième colonne du tableau de classification périodique de Mendeleïev.

Tableau VII-1 : classification périodique de Mendeleïev simplifiée

Colonne III	Colonne IV	Colonne V
B	C	N
Al	Si	P
Ga	Ge	As
In	Sn	Sb

A l'état solide, les atomes de silicium sont liés les uns aux autres pour former un ensemble. Dans cette configuration, chaque atome partage chacun de ses quatre électrons de valence avec un autre atome. L'unité de base de cet ensemble est constituée de cinq atomes de silicium formant un tétraèdre : un atome est disposé au centre et ceux avec lesquels il partage des électrons forment les quatre sommets. La répétition spatiale de ce motif de base (ou maille cristalline) dans toutes les directions de l'espace forme un cristal de silicium.

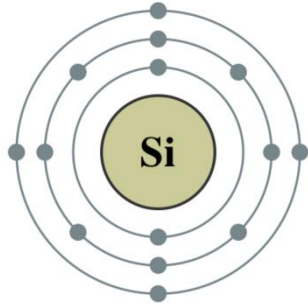


Figure VII-1 : représentation schématique d'un atome de silicium. Le noyau central est entouré des quatorze électrons. Les quatre électrons externes sont dits de valence. Source : www.electronicandyou.com

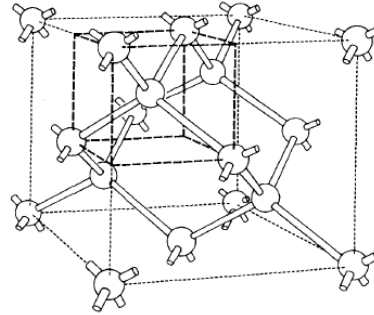


Figure VII-2 : la maille cristalline du silicium est le volume contenu dans le grand cube pointillé. Le motif élémentaire, composé de cinq atomes est lui contenu dans le petit cube pointillé. Source : Basic Photovoltaics principles and Methods

VII-2. STRUCTURE DE BANDES

Les électrons d'un atome isolé prennent des niveaux discrets d'énergie qui sont constitués de sous-niveaux. Lorsque l'on rapproche deux atomes, les sous-niveaux se dédoublent. En étendant ce phénomène à un grand nombre d'atomes, cette « dégénérescence » fait apparaître des bandes d'énergie permises pour les électrons ainsi que des bandes interdites (ou gap) [157]. Dans le cas d'un cristal de silicium comportant N atomes, deux bandes d'énergie apparaissent. La bande de plus forte énergie est appelée bande de conduction par opposition à la bande de valence qui est de moindre énergie.

Entre ces deux bandes se trouve une zone interdite ou gap, de largeur E_G (en joules J ou électronvolts eV). A la température du 0 absolu (0 K) la bande de conduction (BC) est totalement vide d'électrons tandis que la bande de valence (BV) en contient $4N$. Le fait que ces deux bandes soient totalement pleines ou vides implique que la conduction électrique ne peut avoir lieu.

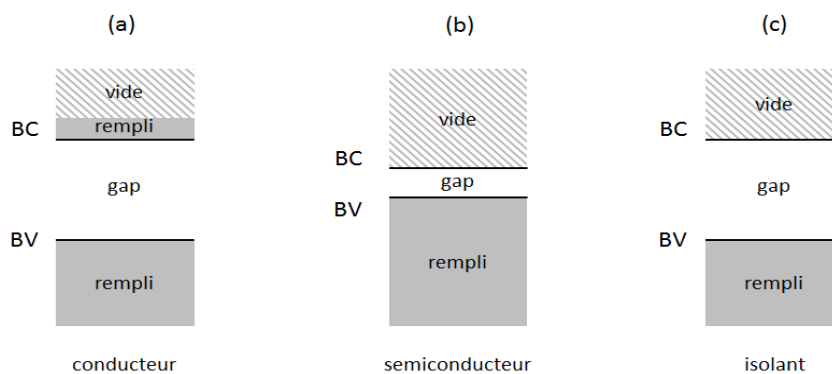


Figure VII-3 : diagrammes de bandes de différents matériaux : a) pour les conducteurs, le plus haut niveau d'énergie se trouve dans la bande de conduction b) pour les semiconducteurs, la bande de valence est totalement pleine et la bande de conduction totalement vide mais le gap entre les deux est faible c) si le gap est grand, le solide est un isolant

VII-3. L'INTERACTION AVEC LA LUMIERE

Lorsque de la lumière frappe du silicium cristallin, elle peut être réfléchi, absorbée ou passer à travers. La lumière absorbée peut produire deux effets différents suivant son énergie. La lumière de basse énergie (énergie inférieure à E_G) absorbée par le matériau fait vibrer les atomes de silicium qui ont tendance à osciller autour de leur position d'équilibre dans le réseau cristallin. De la même manière, les électrons des liaisons chimiques entre atomes emmagasinent de l'énergie pour atteindre des états de plus haute énergie. Comme ces états ne sont pas stables, les électrons retournent rapidement à leur état original en dissipant l'énergie excédentaire reçue sous forme de chaleur.

La lumière de plus forte énergie (supérieure à E_G) peut en revanche altérer les propriétés électriques d'un cristal de silicium. Si un électron de valence est frappé par un photon d'énergie suffisante, alors il est arraché de sa place dans le cristal et il ne contribue plus à la liaison chimique des atomes. Si on se place du point de vue de la structure de bande, ceci revient à dire que l'électron passe de la bande de valence (état de basse énergie) à la bande de conduction (haute énergie). L'électron laisse derrière lui une liaison à laquelle il manque un électron. Cette liaison incomplète est communément appelée un trou. L'électron situé dans la bande de conduction est dit libre et peut se déplacer sans limites dans le cristal et contribue à la conduction électrique. Les électrons et les trous libérés de leur position dans le cristal contribuent au fonctionnement des cellules photovoltaïques. Les porteurs de charges électriques créés ainsi par la lumière sont appelés paires électron-trou photogénérées.

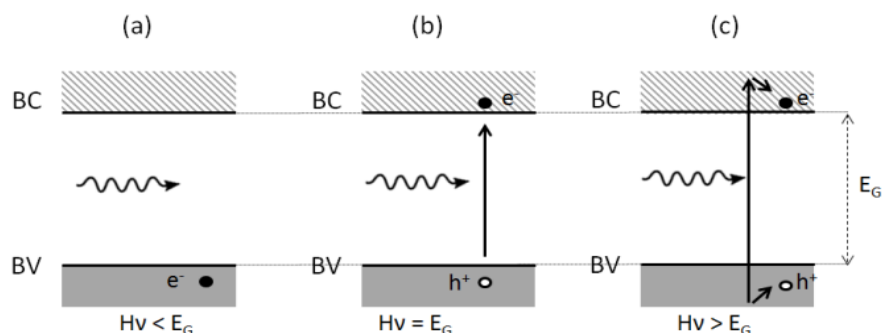


Figure VII-4 : absorption de la lumière par le silicium : a) si l'énergie du photon est inférieure à l'énergie du gap, le photon passe dans le matériau comme si celui-ci était transparent b) si l'énergie du photon est égale à la valeur du gap, le photon est absorbé et une paire électron-trou est créée c) les photons dont l'énergie est supérieure au gap du matériau sont très rapidement absorbés mais l'énergie supplémentaire est perdue par thermalisation quand l'électron et le trou la dissipent en retournant à la frontière de la BC et de la BV

Les trous, de la même manière que les électrons libres, peuvent se déplacer au sein du cristal. Le mouvement a lieu comme suit : un électron localisé dans une liaison chimique située près d'un trou peut facilement « tomber » dedans, laissant derrière lui un nouveau trou, et ainsi de suite. Les trous se déplacent de manière aléatoire et erratique dans le matériau. Du point de vue de la structure de bande, ils sont assimilés à des particules se déplaçant dans la bande de valence. Ce phénomène est rapide et survient fréquemment. Plus la température du solide est grande, et plus les électrons libres et les trous sont agités et se déplacent.

La génération d'électrons et de trous par la lumière est une partie importante de l'effet photovoltaïque, mais ne permet pas seule la production d'un courant électrique. Sans la présence d'un autre phénomène, les porteurs électriques produits se déplaceraient aléatoirement dans le matériau pendant un certain temps, puis perdraient progressivement leur énergie par thermalisation et retourneraient en position de valence. La présence d'une barrière de potentiel interne permet de générer une force qui canalise les porteurs en un courant électrique.

VII-4. BARRIÈRE DE POTENTIEL INTERNE

Une cellule solaire contient une barrière interne, formée par des charges électriques opposées fixées de part et d'autre d'une ligne de démarcation. Ce potentiel sépare de manière sélective les électrons et les trous (à cause de la différence de polarité de ces derniers), et envoie une majorité d'électrons d'un côté de la cellule et une majorité des trous de l'autre côté. Cette séparation des charges induit une différence de potentiel entre les deux extrémités de la cellule qui peut servir à la circulation d'un courant électrique. Il existe plusieurs manières de former une telle barrière de potentiel. La principale solution retenue dans l'industrie photovoltaïque consiste à modifier la nature du cristal de telle sorte que ses propriétés soient différentes de part et d'autre de la ligne de séparation.

VII-4.1. Les dopants négatifs (donneurs de charge)

Un atome de silicium possède quatre électrons de valence, tous impliqués dans les liaisons chimiques avec les quatre atomes de silicium voisins. Il est possible d'introduire dans un cristal de silicium (autrement pur) des impuretés qui se substituent atome pour atome au silicium. Certains éléments, comme par exemple le phosphore, et plus généralement les éléments situés dans la cinquième colonne du tableau périodique, possèdent cinq électrons de valence. Un atome de phosphore occupe la même place dans le cristal qu'un atome de silicium, fournissant quatre électrons de valence servant à la liaison avec les quatre atomes de silicium voisins. Cependant, le cinquième électron de valence du phosphore ne contribue à aucune liaison. A température ambiante, cet électron est libre et laisse derrière lui un atome d'impureté chargé positivement (un ion). Il ne laisse pas de trou avec lequel il pourrait se recombinaison ; il se comporte donc comme s'il se situait de manière permanente dans la bande de conduction.

Si un grand nombre d'impuretés est introduit dans un cristal de silicium, un nombre équivalent d'électrons libres est introduit dans le matériau. Globalement, le cristal reste neutre électriquement car il y a le même nombre d'électrons libres (chargés négativement) que d'ions positifs. Cependant, ses propriétés sont altérées. Les impuretés introduites de cette manière sont appelées dopants du silicium. Les dopants qui ont un électron de valence excédentaire (comme le phosphore dans un cristal de silicium) sont appelés donneurs car ils donnent un électron libre au cristal. Un cristal dopé par un donneur est appelé cristal de type n car il possède des charges libres négatives. Le nombre d'électrons libres contenus dans du silicium de type n est noté n_n et est environ égal au nombre d'atomes donneurs N_D .

$$n_n = N_D \quad (\text{VII.1})$$

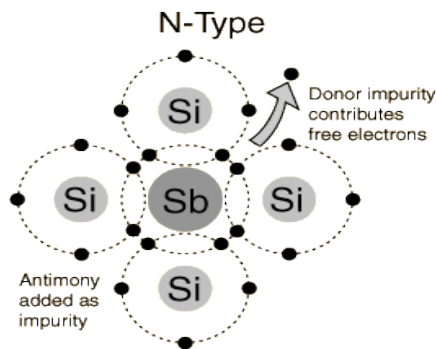


Figure VII-5 : les atomes de dopants négatifs (ici un atome d'antimoine) introduits dans le réseau cristallin du silicium permettent chacun l'introduction d'un électron libre, qui représente une charge négative mobile.

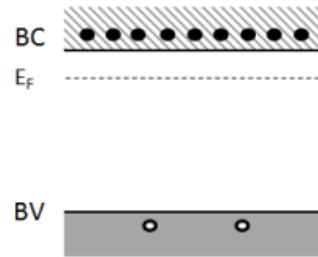


Figure VII-6 : du point de vue des bandes d'énergie, l'introduction d'atomes de dopants n correspond à l'introduction de niveaux d'énergie intermédiaires dans le gap près de la bande de conduction, qui tendent à faire déplacer le niveau de Fermi vers cette bande.

VII-4.2. Les dopants positifs (accepteurs de charge)

Suivant le même principe que pour les donneurs, on peut changer les propriétés d'un cristal de silicium en introduisant des atomes d'impureté possédant moins d'atomes de valence que ce dernier. Un atome d'impureté avec trois électrons de valence, appartenant à la troisième colonne du tableau périodique comme le bore, peut prendre la position d'un atome de silicium dans le cristal. Dans ce cas, une des liaisons avec les atomes voisins sera privée d'un électron, formant un trou. Comme vu précédemment, le trou peut se déplacer de manière libre dans la bande de valence, laissant derrière lui un atome de bore chargé négativement.

Les atomes à trois électrons de valence sont les dopants accepteurs du silicium car les trous qu'ils introduisent dans le cristal acceptent des électrons (électrons de la bande de valence mis en jeu dans les liaisons ou électrons libres de la bande de conduction). Un matériau dopé par des accepteurs est de type p car des charges libres positives y sont introduites. Le nombre de trous dans du silicium de type p, n_p , est environ égal au nombre d'atomes dopants accepteurs N_A .

$$n_p = N_A \quad (\text{VII.2})$$

Dans un matériau de type p, les charges libres positives (trous) sont dites majoritaires car elles sont beaucoup plus nombreuses que les électrons libres qui sont les porteurs minoritaires. Inversement, dans un cristal de type n, les électrons sont les porteurs majoritaires et les trous minoritaires puisque le dopage est inversé.

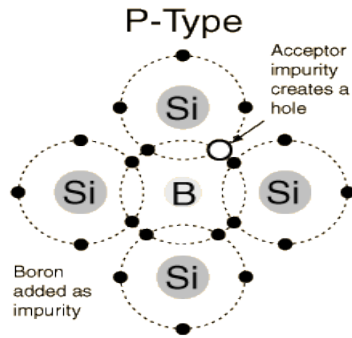


Figure VII-7 : les atomes de dopants positifs (ici un atome de bore) introduits dans le réseau cristallin du silicium permettent chacun l'introduction d'une lacune électronique ou trou, qui représente une charge positive mobile.

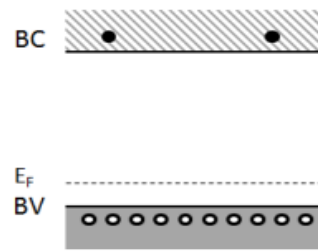


Figure VII-8 : du point de vue des bandes d'énergie, l'introduction d'atomes de dopants p correspond à l'introduction de niveaux d'énergie intermédiaires dans le gap près de la bande de valence, qui tendent à faire déplacer le niveau de Fermi vers cette bande.

VII-5. LA JONCTION

Quand du silicium de type n est mis en contact avec du silicium de type p, des échanges de porteurs ont lieu quasiment instantanément. Les électrons libres et majoritaires du silicium de type n diffusent dans le matériau de type p qui est très pauvre en électrons libres. De la même manière, les trous libres du silicium de type p diffusent dans le matériau de type n.

Les électrons libres qui se retrouvent du côté p se recombinent rapidement avec des trous qui y sont majoritaires. Ils laissent en revanche derrière eux des ions phosphore chargés positivement (P^+) fixés dans la matrice cristalline, et dont la charge n'est plus compensée. De manière analogue, les trous recombinent avec des électrons libres du côté n et laissent derrière eux des ions bore chargés négativement (B) dont la charge électrique n'est plus compensée. Le potentiel électrique induit par cette répartition de charges fixes est noté V_0 et s'exprime de la manière suivante :

$$V_0 = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_D \cdot N_A}{n_i^2} \right) \quad (\text{VII.3})$$

Cette différence de potentiel un champ électrique E à la jonction pn. Ce champ est dirigé dans le sens des charges fixes positives de la zone n vers les charges fixes négatives de la zone p et a deux différentes expressions selon qu'il est situé dans la zone p ou n :

$$E = \frac{-qN_A}{\varepsilon} x - \frac{qN_A}{\varepsilon} x_p \quad (\text{pour } 0 \leq x < x_p) \quad (\text{VII.4})$$

$$E = \frac{-qN_D}{\varepsilon} x - \frac{qN_D}{\varepsilon} x_n \quad (\text{pour } -x_n \leq x < 0) \quad (\text{VII.5})$$

Ce champ électrique pousse certains des électrons et des trous à un mouvement qui a lieu dans le sens opposé à celui du courant provoqué par la diffusion décrite précédemment. Ces deux courants de directions opposées atteignent un équilibre quand le nombre d'électrons mis en

mouvement par le mécanisme de diffusion est compensé par le nombre d'électrons déplaçant dans la direction opposée sous l'effet du champ électrique. Le courant global d'électrons et de trous à travers la jonction est nul. La contribution de ces deux phénomènes crée une zone qui est désertée par les charges libres et appelée zone de charge d'espace (ZCE). La largeur W de la ZCE est donnée par la relation suivante :

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{e} V_0 \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)} \quad (\text{VII.6})$$

Le potentiel électrique généré dans la ZCE permet de séparer les charges durant la génération de paires électron-trou sous illumination, étape importante de la génération du courant. Du point de vue de la structure de bandes, la diffusion des porteurs libres et la mise en place d'une différence de potentiel à l'interface contribue à la courbure des bandes d'énergie à la jonction.

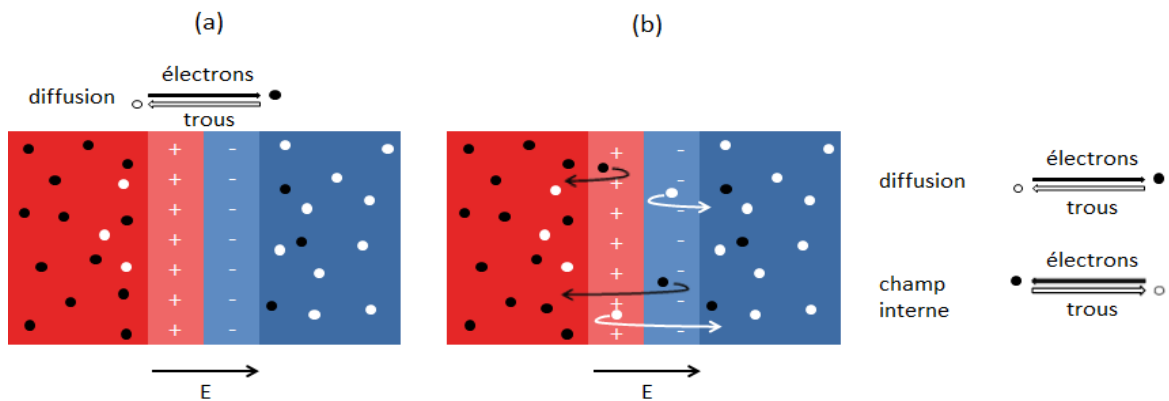


Figure VII-9 : description de la jonction pn : a) le procédé de diffusion est la résultante de mouvements aléatoires des électrons et des trous mobiles et tend à les distribuer de manière égale sur tout le volume du matériau. Ils traversent la jonction en créant des charges fixes derrière eux b) un électron ou trou libre qui passe près du champ électrique interne est « attiré » et renvoyé dans sa région d'origine. C'est la barrière de potentiel : les trous sont envoyés vers la zone p (bleue) et les électrons vers la zone n (rouge).

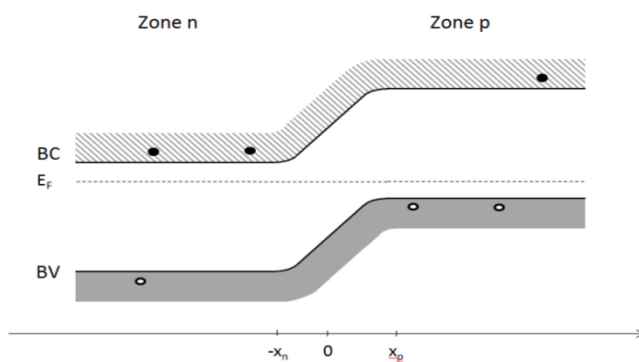


Figure VII-10 : la mise en contact des zones p et n induit une torsion des bandes d'énergie au niveau de la ZCE. Le niveau de Fermi reste constant dans tout le matériau (on parle de semi-conducteur non-dégénéré). La différence entre le minimum de la BC du côté p et le minimum de la BC du côté n correspond à la variation de l'énergie

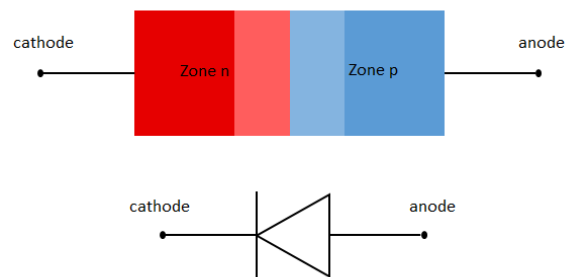


Figure VII-11 : du point de vue électrique, la jonction pn peut être modélisée par une diode, dont la cathode est constituée par la zone n et l'anode par la zone p.

potentielle d'un électron de conduction.

VII-6. GENERATION DE COURANT ELECTRIQUE

Pour établir les équations décrivant le courant généré dans une cellule photovoltaïque, il faut étudier le courant généré par une jonction pn (ou diode). En l'absence de tension externe appliquée sur la jonction, aucun courant ne circule, car les courants de diffusion et de conduction s'annulent l'un l'autre pour les électrons et les trous. En appliquant une tension sur la jonction, cet équilibre est rompu et un courant est généré, comme le montre la figure.

L'expression du courant généré par cette diode pn dépend de la tension appliquée et s'écrit comme suit :

$$I = I_0 (e^{qV/kT} - 1) \quad (\text{VII.7})$$

Quand une forte polarisation inverse est appliquée sur la jonction, le terme exponentiel de l'équation peut être négligé. Dans ce cas, $I = -I_0$. La constante I_0 est ainsi appelée la densité de courant de saturation inverse de la diode. Sa valeur dépend fortement de la durée de vie des porteurs minoritaires dans les zones n et p, τ_n et τ_p . Plus ces durées de vie sont longues et plus le courant de saturation inverse est faible, ce qui a une grande importance pour les cellules solaires comme il le sera montré par la suite.

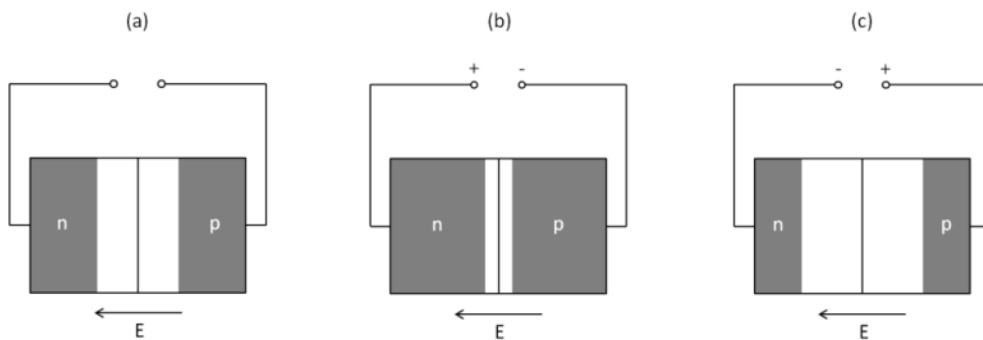


Figure VII-11 : si aucune tension extérieure n'est appliquée à la jonction (a), celle-ci n'est pas polarisée. La différence de potentiel induit la formation d'une ZCE et aucun courant ne circule. Si la borne positive d'une source est connectée à la zone n, et la borne négative à la zone p, la jonction est alors polarisée en inverse (b). La ZCE devient plus large et la barrière de potentiel augmente. La circulation du courant est fortement diminuée et on ne peut plus avoir qu'un courant lié aux porteurs minoritaires. Si une tension extérieure opposée est appliquée, la jonction est polarisée en direct (c). La ZCE devient étroite et la barrière de potentiel diminue. Une circulation des charges majoritaires peut avoir lieu si la polarisation est suffisante.

Sous illumination, les photons génèrent des paires électron-trou, principalement dans la région p. A cause du champ électrique interne de la jonction, qui pointe vers la région p, les électrons sont entraînés vers la zone n tandis que les trous restent dans la zone p. En connectant les deux terminaux ensemble, la quasi-totalité des électrons peuvent migrer dans la région n et compléter le circuit. Le courant de court-circuit (I_{sc}) est le courant d'électrons générés par la lumière.

Si les deux régions ne sont pas connectées par un circuit, les charges accumulées dans les deux régions génèrent un potentiel à travers la jonction. Le potentiel devient une polarisation directe pour la diode, et la largeur de la ZCE est réduite. Quand le courant de polarisation directe ainsi créé compense le courant de diffusion, un équilibre est établi. La tension de la diode lors de cet équilibre est appelée tension de circuit ouvert (V_{oc}).

VII-7. EQUATIONS DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

De manière générale, une cellule solaire peut être représentée par une source de courant, représentant le courant photogénéré, connectée en parallèle avec deux diodes pn. L'équation de la cellule devient donc :

$$I = I_L - I_{01} (e^{qV/kT} - 1) - I_{02} (e^{qV/2kT} - 1) \quad (\text{VII.8})$$

Le courant photogénéré I_L tend à polariser les deux diodes de manière directe. Celles-ci émettent chacune en retour un courant de diffusion. La diode 1 représente ainsi le courant de diffusion dans les régions neutres de la jonction, tandis que la diode 2 représente le courant de diffusion dans la ZCE. Ces courants sont appelés courants d'obscurité et s'opposent au courant photogénéré et envoient les porteurs dans des régions où ils sont minoritaires et se recombinent rapidement. Ils sont assimilés à des pertes (courants de recombinaison). Le courant d'obscurité de la diode 2 est généralement négligé si on considère une cellule solaire de bonne qualité, particulièrement si on applique une forte polarisation directe.

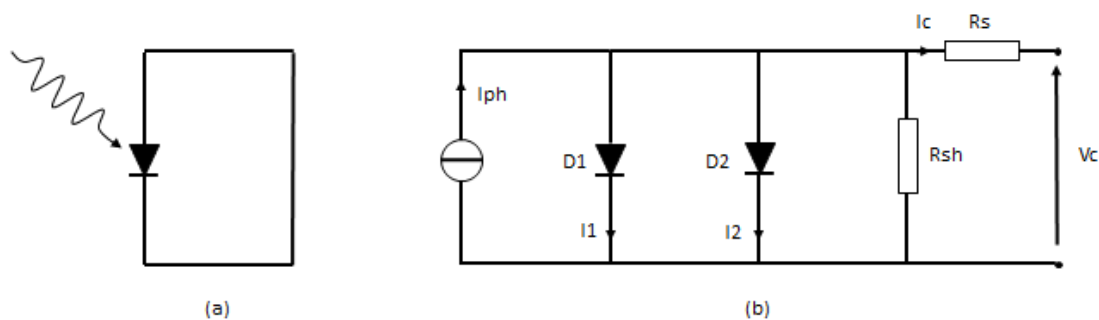


Figure VII-12 : les propriétés d'une jonction pn sous illumination (a) peuvent être approximées par un modèle électrique à deux diodes (b). Les diodes 1 et 2 modélisent les courants de diffusion parasites générés par les régions neutres et la ZCE de la cellule. La résistance série R_s représente les pertes résistives dans la cellule, et la résistance de shunt R_{sh} modélise les courants de fuite et les court-circuits qui peuvent exister.

La caractéristique courant-tension (I-V) caractéristique d'une cellule solaire est représentée sur la figure. Elle permet d'illustrer plusieurs valeurs importantes pour l'analyse de la structure des cellules, le courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert, et le facteur de forme. Quand la tension appliquée sur la cellule est faible, les courants de recombinaison sont négligeables et le

Le courant total produit est uniquement le courant de court-circuit. Quand la tension appliquée sur la cellule augmente, les courants de recombinaison augmentent de manière significative et le courant produit par la cellule diminue rapidement.

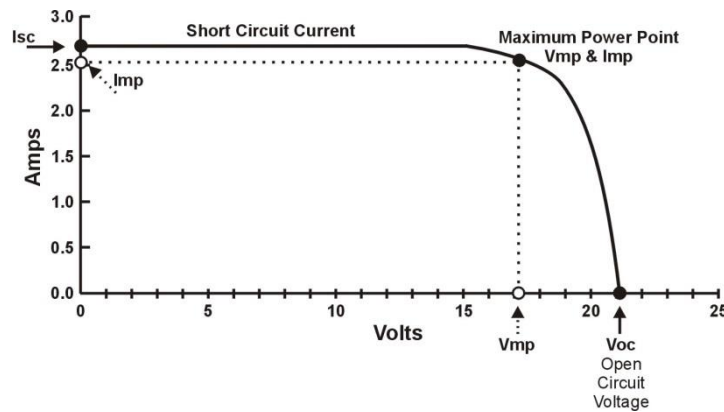


Figure VII-13 : caractéristiques $I(V)$ typique d'une cellule solaire photovoltaïque. Elle permet d'évaluer les valeurs de tension de circuit ouvert V_{oc} , de courant de court-circuit I_{sc} , ainsi que les valeurs de courant et de tension au point de puissance maximale.

La tension de circuit ouvert est la tension appliquée quand le courant est nul, elle peut donc être écrite :

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0}\right) \quad (\text{VII.9})$$

La puissance électrique générée par la cellule est le produit de la tension et du courant $P = IV$. Parce que cette puissance est utilisée pour alimenter une charge R , la valeur de la tension est inférieure à V_{oc} et la valeur du courant est inférieure à I_{sc} . On peut calculer les V_{mp} et I_{mp} , les valeurs de tension et de courant au point de puissance maximale de la cellule.

$$V_{mp} = V_{oc} \left(\frac{\ln \ln(I_0 / I_{sc})}{\ln(I_0 / I_{sc})} \right) \quad (\text{VII.10})$$

$$I_{mp} = I_{sc} \left(1 - \frac{1}{\ln(I_0 / I_{sc})} \right) \quad (\text{VII.11})$$

La puissance maximale produite par la cellule est ainsi définie par :

$$P_{mp} = V_{mp} \cdot I_{mp} \quad (\text{VII.12})$$

Le facteur de forme de la cellule (FF) est exprimé par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{mpp}}{V_{oc} I_{sc}} = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (\text{VII.13})$$

Le rendement η d'une cellule solaire est le rapport entre la puissance électrique produite au point de puissance maximale et la puissance lumineuse reçue par la cellule (P_{in}). Il reflète la performance de la cellule, mais dépend aussi du spectre et de l'intensité de la lumière incidente, ainsi que de la température de la cellule. Les cellules solaires conventionnelles sont mesurées sous un spectre AM1.5 à une température d'environ 25 °C.

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{P_{in}} \quad (\text{VII.14})$$

VII-8. LIMITES AU RENDEMENT DES CELLULES

Toute la puissance lumineuse reçue par la surface d'une cellule photovoltaïque n'est pas convertie en puissance électrique. Le rendement maximal théorique pour une cellule utilisant une seule jonction p-n a été calculée par William Shockley et Hans-Joachim Queisser en 1961. Cette limite place le rendement théorique maximum d'une cellule de silicium cristallin à environ 32 % [153]. Elle prend en compte certaines des limites fondamentales, ou intrinsèques, liées à la nature du matériau et à la taille du gap. En réalité, d'autres limites intrinsèques s'additionnent si des phénomènes physiques plus complexes sont considérés, ainsi que des limites extrinsèques liées aux techniques de fabrication. Tous ces facteurs expliquent le fait que le record de 2017 pour une cellule photovoltaïque de silicium monocristallin est « seulement » de 25,7 % [158] ; ils sont détaillés ci-après. Un des enjeux majeurs de l'augmentation de la performance des cellules actuellement produites consiste en la réduction de ces limites, thème qui sera abordé plus en détail dans les chapitres II et III de cette étude.

VII-8.1. Limites intrinsèques

VII-8.1.1. Radiation du corps noir

Tout matériau qui n'est pas à la température du zéro absolu (0 K) émet une radiation par l'intermédiaire de l'effet de radiation du corps noir. Une cellule à température ambiante émet environ 7 % de l'énergie qu'elle reçoit par ailleurs de cette manière. L'énergie perdue dans la cellule est dissipée sous forme de chaleur, si bien que la température augmente lorsque la cellule est exposée à de la lumière, puisque certains photons ne sont pas convertis en paires électron-trou. L'augmentation de température de la cellule entraîne à son tour une augmentation de la radiation et de la chaleur émises, jusqu'à ce qu'un équilibre soit atteint, communément aux alentours de 87 °C. Cette énergie est perdue pour la conversion électrique et les cellules opèrent à un rendement plus bas que lorsqu'elles sont mesurées à température ambiante.

VII-8.1.2. Pertes de spectre

La largeur de la bande interdite est le paramètre le plus important en ce qui concerne le rendement. Seuls les photons dont l'énergie est supérieure ou égale à la valeur du gap du matériau

sont absorbés. Pour le silicium, dont le gap vaut 1,12 eV, cela signifie que les radiations dont la longueur d'onde est supérieure à 1100 nm (domaine infrarouge) passent à travers la cellule sans être absorbées.

Cependant, si l'énergie d'un photon est largement supérieure à la valeur du gap, alors l'énergie en excès est dissipée sous forme de chaleur et non convertie électriquement. Chaque photon absorbé génère une charge électrique soumise à une tension égale à la valeur du gap du matériau, indépendamment de son énergie initiale. Le courant de court-circuit dépend du courant de photons absorbés et donc du gap du matériau. Il est donc maximal pour un semi-conducteur de gap 0 eV et diminue quand l'énergie du gap augmente. En revanche, la tension de circuit ouvert est nulle quand le gap vaut 0 eV, et augmente en même temps que celui-ci. L'optimum de rendement se situe autour d'une énergie de gap de 1,1 eV, dont est très proche le silicium.

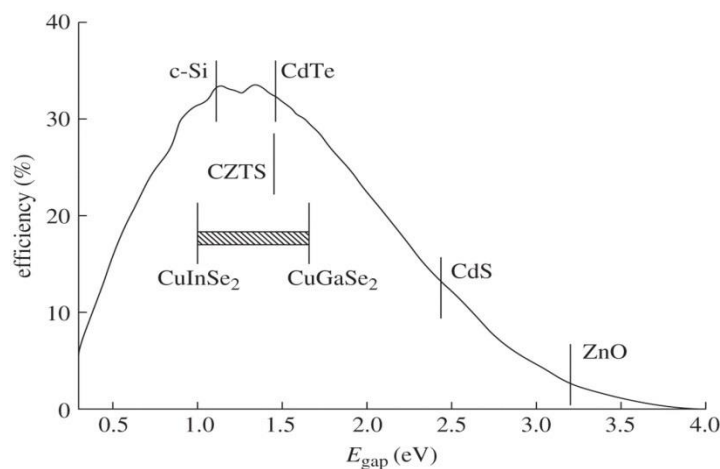


Figure VII-14 : rendement en fonction de l'énergie du gap pour des matériaux illuminés par un spectre AM 1.5
Source : Physics of solar cells : from principles to new concepts.

VII-8.1.3. Recombinaisons

Dans un semiconducteur, la transition d'un électron depuis la bande de conduction vers la bande de valence est appelée recombinaison. Le mécanisme de recombinaison est un phénomène physique qui permet un retour à l'équilibre thermique après que des porteurs excédentaires ont été introduits dans le matériau. Durant ce procédé, une paire électron-trou recombine et disparaît. L'énergie en excès de l'électron est dissipée par l'émission de photons, de phonons ou d'autres électrons.

Le taux de recombinaison des paires électron-trou est un des facteurs déterminants dans la limite du rendement des cellules solaires, et les meilleures cellules fabriquées sont celles qui limitent le plus ces recombinaisons, comme les cellules PERC et IBC (voir partie I-5).

VII-8.1.3-a Recombinaison de volume

La recombinaison dans le volume d'un semiconducteur est composée de deux procédés intrinsèques et d'un procédé extrinsèque. Un procédé de recombinaison intrinsèque a lieu y compris dans un cristal idéal de matériau semiconducteur, alors qu'un procédé extrinsèque est

directement lié aux impuretés comprises dans le matériau ou aux défauts cristallographiques. Le premier procédé intrinsèque est lié au phénomène de recombinaison radiative. On lui assigne la durée de vie de recombinaison τ_{rad} . Le second procédé de recombinaison intrinsèque est la recombinaison Auger. On lui assigne la durée de vie notée τ_A . La recombinaison via les défauts est un procédé extrinsèque, auquel on associe la durée de vie τ_{SRH} . La durée de vie totale des porteurs dans le volume est notée τ_b et est donnée par la somme des inverses des durées de vie associées aux trois contributions individuelles.

$$\frac{1}{\tau_b} = \frac{1}{\tau_{\text{rad}}} + \frac{1}{\tau_A} + \frac{1}{\tau_{\text{SRH}}} \quad (\text{VII.15})$$

Les trois procédés sont décrits après.

VII-8.1.3-b Recombinaisons radiatives ou bande à bande

Le phénomène de recombinaison radiative bande à bande a lieu quand un électron libre de la bande de conduction redescend directement dans la bande de valence en dissipant l'énergie excédentaire sous forme d'un photon. C'est le phénomène inverse de l'absorption optique. Il annihile donc un électron de bande de conduction ainsi qu'un trou de la bande de valence.

Ce phénomène est courant dans les semiconducteurs à gap direct (comme le GaAs par exemple). Dans le cas d'un semiconducteur indirect comme le silicium, ce type de recombinaison est d'importance moindre car il nécessite la participation additionnelle d'un phonon, qui dissipe l'énergie sous forme thermique par échauffement du réseau cristallin. C'est pourquoi on considère que dans le silicium, les recombinaisons radiatives sont un phénomène minoritaire et très souvent négligé.

Le taux de recombinaison est proportionnel au produit des concentrations en électrons et en trous dans le matériau, puisque un électron ainsi qu'un trou doivent être impliqués dans une recombinaison de ce type. Le taux net de recombinaison est donné par la relation :

$$U_{\text{rad}} = B(np - n_i^2) \quad (\text{VII.16})$$

La durée de vie radiative correspondante est la suivante :

$$\tau_{\text{rad}} = \frac{1}{N(n_0 + p_0) + B\Delta n} \quad (\text{VII.17})$$

Le coefficient B est dépendant de la température. Pour le silicium, il a été déterminé par Schlangenotto *et al.* [159]. Pour $T = 300$ K, $B = 0.95 \cdot 10^{-14} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

VII-8.1.3-c Recombinaisons Auger

La recombinaison Auger est également un procédé de recombinaison bande à bande ⁽¹⁶⁶⁾. Un électron de la bande de conduction redescend directement dans la bande de valence. La majeure différence avec une recombinaison radiative est que l'énergie dissipée par l'annihilation d'une paire électron-trou est transférée à un électron de la bande de conduction qui monte d'un niveau d'énergie ou à un trou de la bande de valence, qui descend d'un niveau d'énergie. On parle alors de procédé *eeh* (pour *electron electron hole* – électron électron trou) ou *ehh* respectivement. Le taux net de recombinaison Auger est également proportionnel aux concentrations de porteurs impliqués :

$$U_A = C_n(n^2p - n_i^2n_0) + C_p(np^2 - n_i^2p_0) \quad (\text{VII.18})$$

C_n et C_p sont les coefficients d'Auger. La durée de vie Auger peut être déduite de l'équation précédente et de la quatrième. En régime de faible injection, on trouve :

$$\tau_A = \frac{1}{C_n n_0^2} \text{ pour des semiconducteurs de type n} \quad (\text{VII.19})$$

$$\tau_A = \frac{1}{C_p p_0^2} \text{ pour des semiconducteurs de type p} \quad (\text{VII.20})$$

Les coefficients C_n et C_p ont été déterminés par Dzierwior et Schmid en régime de faible injection et pour $N_{dop} > 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ [161]. $C_n = 2,8 \cdot 10^{-31} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$ et $C_p = 9,9 \cdot 10^{-32} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$ à 300K.

La recombinaison Auger est importante dans le cas de fortes concentrations de porteurs provoquées par un dopage élevé ou par un haut niveau d'injection (rayonnement lumineux concentré). Dans le cas des cellules solaires en silicium cristallin, la recombinaison Auger limite la durée de vie et donc le rendement. Plus le matériau sera fortement dopé, et plus faible sera la durée de vie liée à la recombinaison Auger. Ce type de recombinaison concerne particulièrement les émetteurs de cellules photovoltaïques qui constituent les zones les plus fortement dopées.

VII-8.1.3-d Recombinaison assistée par pièges ou Shockley-Read-Hall

Le silicium cristallin utilisé dans la fabrication de cellules photovoltaïques n'est jamais parfait, et des défauts apparaissent systématiquement dans son réseau cristallographique. Ces imperfections peuvent être des dislocations, aussi bien que des atomes d'impuretés ou des complexes, et peuvent provoquer l'apparition de niveaux d'énergie dans la bande interdite du semiconducteur. Si c'est le cas, les défauts deviennent des centres de recombinaison efficaces pour les porteurs en excès. Le procédé de recombinaison assisté par ces défauts s'effectue en deux temps. Premièrement, un électron ou un trou est capturé par un niveau d'énergie introduit par un centre de recombinaison et situé dans la bande interdite. Dans un second temps, si un trou ou un électron se déplace vers le même niveau d'énergie avant que le premier porteur ne soit thermiquement réémis vers sa bande d'énergie d'origine, les deux porteurs recombinent.

Le taux de recombinaison a été calculé par Shockley et Read ⁽²⁾ ainsi que par Hall ⁽³⁾, et ce procédé est donc souvent appelé recombinaisons Shockley Read Hall (SRH). Le taux de recombinaison net a été calculé en utilisant un modèle statistique qui prend en compte la densité

de centres de recombinaison N_t , des sections de capture des électrons σ_n et des trous σ_p , ainsi que des niveaux d'énergie E_t des centres de recombinaison :

$$U_{SRH} = \frac{(np - n_i^2)}{\tau_{p0}(n + n_1) + \tau_{n0}(p + p_1)} \quad (\text{VII.21})$$

τ_{n0} est la constante de temps de capture pour les électrons et τ_{p0} la constante de temps de capture pour les trous. On a $\tau_{n0} = (\sigma_n v_{th} N_t)^{-1}$ et $\tau_{p0} = (\sigma_p v_{th} N_t)^{-1}$. Comme pour la recombinaison radiative, le taux de recombinaison est proportionnel à $(np - n_i^2)$ car chacun de ces phénomènes met en jeu un électron et un trou à chaque fois. v_{th} est la vitesse thermique moyenne des porteurs, telle que $v_{th} = \sqrt{8kT/\pi m_{th}^*}$, ou m_{th}^* est masse effective de vitesse thermique. A $T = 300K$, $m_{th}^* = 0,28m_0$ pour la bande de conduction et $0,41m_0$ pour la bande de valence, avec la masse d'un électron au repos $m_0 = 0.91095.10^{-30}$. De ce fait, on a $v_{th} = 2,0.10^7$ cm.s⁻¹ pour les électrons et $v_{th} = 1,7.10^7$ cm.s⁻¹. Les facteurs statistiques n_1 et p_1 sont fonctions du niveau d'énergie des centres de recombinaison :

$$n_1 = n_i \exp\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right), \quad p_1 = n_i \exp\left(\frac{-(E_t - E_i)}{kT}\right) \quad (\text{VII.22})$$

En utilisant l'équation liant U et τ , ainsi que l'équation de la neutralité électrique, la durée de vie SRH peut s'écrire :

$$\tau_{SRH} = \frac{\tau_{p0}(n_0 + n_1 + \Delta n) + \tau_{n0}(p_0 + p_1 + \Delta n)}{p_0 + n_0 + \Delta n} \quad (\text{VII.23})$$

Dans des conditions de faible injection, τ_{SRH} devient indépendante du niveau d'injection :

$$\tau_{SRH} = \tau_{n0} \left(\frac{p_1}{n_0}\right) + \tau_{p0} \left(\frac{n_1}{n_0}\right) \text{ pour les semiconducteurs de type } n \quad (\text{VII.24})$$

$$\tau_{SRH} = \tau_{p0} \left(\frac{n_1}{p_0}\right) + \tau_{n0} \left(\frac{p_1}{p_0}\right) \text{ pour les semiconducteurs de type } p \quad (\text{VII.25})$$

Les expressions peuvent être encore simplifiées si l'on ne prend en compte que les centres de recombinaison profonds, c'est-à-dire ceux qui possèdent des niveaux d'énergie proches du milieu du *gap* du matériau semiconducteur. Dans ce cas de figure la valeur d' E_t est très proche de celle d' E_i . Par conséquent, n_1 et p_1 sont très petits devant la concentration de dopants. On peut en déduire que $\tau_{SRH} = \tau_{n0}$ pour les semiconducteurs de type p et $\tau_{SRH} = \tau_{p0}$ pour les semiconducteurs de type n .

En régime de faible injection, et pour des niveaux de recombinaison peu profonds, la constante de temps capture des porteurs minoritaires constitue la limite basse de la durée de vie SRH,

d'après l'équation. Les porteurs ont donc une plus forte durée de vie dans les niveaux peu profonds, ce qui explique qu'ils sont de moins bons centres de recombinaison.

Dans des conditions de forte injection, l'équation devient :

$$\tau_{\text{SRH}} = \tau_{n0} + \tau_{p0} \quad (\text{VII.26})$$

En régime de forte injection, la durée de vie SRH est donc indépendante des niveaux d'énergie des centres de recombinaison, de la concentration de dopants ou encore du niveau d'injection. Les centres de recombinaison profonds offrent une meilleure durée de vie aux porteurs, et sont donc moins nuisibles. Cependant, les niveaux peu profonds deviennent des centres de recombinaison efficaces dans ces conditions, alors qu'ils ne le sont pas en faible injection. Les recombinaisons SRH jouent un rôle important dans la détermination des performances d'une cellule solaire qui serait limitée par des défauts cristallins. Les régions critiques affectées par ce genre de défauts peuvent être la zone de charge d'espace à la jonction pn, la région quasi-neutre (base), l'interface base-émetteur, et les surfaces qui présentent un cas particulier.

VII-8.1.3-e Recombinaisons à la surface

Les défauts de surface mettent fin à la continuité du réseau cristallin, qui est à l'origine des bandes de conduction et de valence. Ils induisent des états d'énergie localisés dans la bande autrement interdite. Ces états de surface sont globalement similaires aux états d'énergie qui entrent en jeu dans le cas de la recombinaison SRH. La principale différence est que les états de surface sont répartis de manière continue sur les valeurs d'énergie de la bande interdite. Le calcul du taux de recombinaison net s'effectue donc de la même manière que pour la recombinaison SRH, mais en intégrant l'équation sur le gap d'énergie. On néglige les transitions d'un état de surface vers un autre, on considère donc que les défauts n'interagissent qu'avec les bandes de conduction et de valence mais pas entre eux. De cette manière, on obtient le taux de recombinaison net U_s , tel que :

$$U_s = (n_s p_s - n_i^2) \int_{E_V}^{E_C} \frac{v_{th} D_{it}(E) dE}{\sigma_p^{-1}(E)(n_s + n_1(E)) + \sigma_n^{-1}(E)(p_s + p_1(E))} \quad (\text{VII.27})$$

n_s et p_s sont les concentrations d'électrons et de trous à la surface. On appelle D_{it} la densité d'états d'interface à la surface par intervalle d'énergie (en $\text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$). σ_p et σ_n sont les sections de capture de trous et des électrons respectivement, et n_1 et p_1 sont des facteurs statistiques. Ces quatre derniers paramètres sont dépendants de l'énergie.

U_s est un taux de recombinaison par unité de surface (et non pas de volume comme précédemment). On ne peut donc pas définir la durée de vie associée. On introduit à la place S , la vitesse de recombinaison de surface (ou SRV pour *surface recombination velocity*).

$$S(\Delta_{ns}, n_0, p_0) = \frac{U_s(\Delta_{ns}, n_0, p_0)}{\Delta_{ns}} \quad (\text{VII.28})$$

$\Delta_{ns} = n_s - n_{s0} = p_s - p_{s0}$ est la densité de porteurs en excès à la surface.

La relation qui lie la performance globale de la cellule aux recombinaisons de volume et de surface est décrite par la durée de vie effective τ_{eff} , définie par :

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_b} + \frac{2S}{d} \quad (\text{VII.29})$$

Avec d l'épaisseur de la cellule. D'après cette équation, on déduit que si l'épaisseur de la cellule diminue, les recombinaisons de surface tendent à prendre le pas sur les recombinaisons de volume dans la détermination de la durée de vie effective τ_{eff} .

VII-8.1.3-f Courbure des bandes en surface

Comme vu précédemment, et mis à part les cas idéaux, une courbure des bandes d'énergie existe à mesure que l'on s'approche de la surface. Cela est dû à un potentiel extérieur au semiconducteur qui est provoqué par différents facteurs. Ce peut être une différence entre les travaux des sortie du semiconducteur et de la couche de métal qui l'entoure, ou bien des états chargés (charges électriques fixes) à la surface ou à l'intérieur d'un film isolant déposé sur la surface, ou enfin d'états de surface interagissant avec le semiconducteur. Dans les semiconducteurs, la courbure des bandes aux alentours de la surface s'étend généralement de plusieurs centaines de nanomètres dans le volume. Elle est caractérisée par la longueur de Debye.

La zone de charge d'espace ainsi formée est également le siège de recombinaisons.

VII-8.1.4. Adaptation d'impédance

Les cellules solaires sont utilisées pour alimenter des systèmes électriques, le plus souvent des batteries, qui sont assimilées à des charges. Si la résistance de la charge est trop importante, le courant délivré par la cellule sera très bas alors que si la résistance est trop basse, c'est la chute de tension à travers la charge qui sera trop basse. Il existe donc une charge optimale qui permet d'extraire un maximum de puissance électrique de la cellule sous une illumination donnée. Le ratio entre l'énergie extraite et l'énergie lumineuse incidente est le FF défini précédemment. Pour des illuminations faibles, la valeur de FF est d'environ 25 % et augmente avec l'illumination. Il est cependant difficile de dépasser les 85 % pour des cellules de silicium cristallin [162] et le surplus est perdu.

VII-8.2. Limites extrinsèques

VII-8.2.1. Pertes optiques

VII-8.2.1-a Réflexion

Tous les semiconducteurs ont des indices optiques n élevés. C'est le cas du silicium qui a un indice de réfraction réel de 3,939 pour des longueurs d'onde de 600 nm. La réflexion à la surface

du silicium est supérieure à 30 % à cause de cela. La réflectivité R à l'interface entre deux matériaux d'indices de réfraction différents est donnée par :

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (\text{VII.30})$$

Dans le cas d'une cellule photovoltaïque, n_1 est l'indice de réfraction du milieu environnant ($n_1 = 1$ si le milieu est l'air et $n_1 = 1,5$ si la cellule est encapsulée) et n_2 est l'indice du silicium. Toute la lumière réfléchiée en face avant de la cellule n'est pas utilisée pour la génération du courant électrique.

VII-8.2.1-b Défaut d'absorption

Les photons d'énergie supérieure à l'énergie du gap sont absorbés par le silicium. Cependant, en fonction de leur énergie, ils sont absorbés avec plus ou moins de facilité. La probabilité d'absorber un photon dépend de l'interaction du photon avec un électron. Si l'énergie du photon est de l'ordre de celle du gap du silicium, seuls les atomes à la limite de la bande de valence pourront interagir avec lui. En revanche, si l'énergie du photon est plus élevée, il pourra aussi interagir avec des électrons dont l'énergie est plus basse, et le nombre de possibilités est plus grand. Pour décrire ce phénomène, on introduit le coefficient d'absorption α et la profondeur d'absorption L_α du silicium.

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \text{ et } L_\alpha = \frac{1}{\alpha} \quad (\text{VII.31})$$

L'absorption et la profondeur d'absorption sont dépendantes de l'énergie de la lumière et donc de sa longueur d'onde. Pour les grandes longueurs d'ondes, la profondeur d'absorption est supérieure à l'épaisseur de la cellule (environ 200 μm pour une cellule standard). Le silicium est donc partiellement transparent pour ces photons de basses énergies (infrarouges) qui sont perdus pour la conversion photovoltaïque.

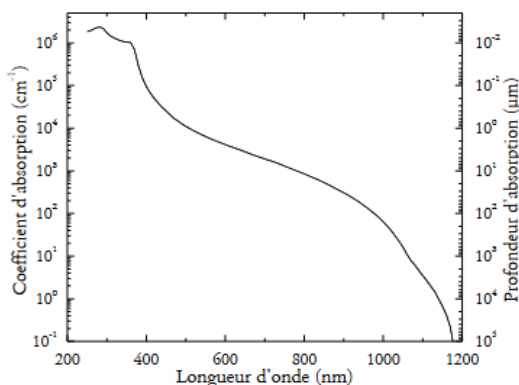


Figure VII-15 : coefficient et profondeur d'absorption dans le silicium en fonction de la longueur d'onde de la lumière reçue.

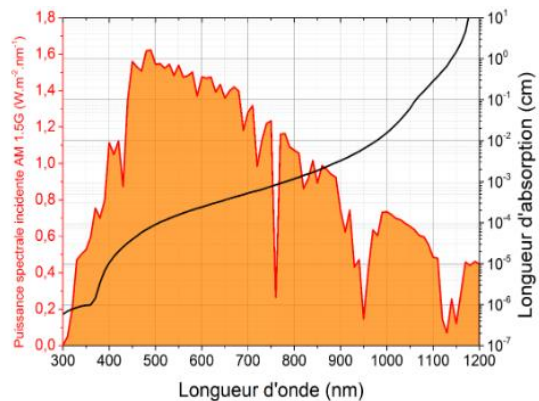


Figure VII-16 : en rouge, la puissance spectrale du rayonnement solaire selon la norme AM 1.5G. En noir, la profondeur d'absorption du silicium cristallin en fonction de la longueur d'onde.

VII-8.2.2. Ombrage

La collecte des porteurs en face avant de la cellule nécessite la présence de contacts électriques. Cette grille, le plus souvent constituée de métal, n'est pas transparente et porte une ombre sur la cellule. Or chaque zone non atteinte par des photons ne permet pas de générer du courant et limite le rendement.

VII-8.3. Pertes résistives

Pour qu'une cellule photovoltaïque soit pleinement utile, il est nécessaire de collecter le courant qu'elle génère pour l'injecter dans un système électrique. Les électrodes métalliques de la cellule sont prévues à cet effet. Cependant, le courant ne circule pas de manière idéale dans la cellule jusqu'aux métallisations, et subit différents facteurs de résistance électrique dans la cellule. Entrent en jeu la résistance verticale du volume du silicium, la résistance latérale de l'émetteur, ainsi que les résistances longitudinales des fingers et des busbars. Ces trois derniers facteurs sont les plus critiques et sont également ceux qui le plus optimisés. Une forte résistance série diminue la valeur de FF de la cellule et influe négativement sur le rendement.

REFERENCES

157 Kittel C., *Introduction to Solid-State Physics, Eighth Edition*, éditeur : John Wiley & Sons, 2004, 704 p.

158 Fraunhofer ISE, « New World Record Efficiency of 25.7% for Both Sides-Contacted Monocrystalline Silicon Solar Cell - Fraunhofer ISE », *Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE*, <http://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/news/2017/new-world-record-efficiency-of-25-point-7-percent-for-both-sides-contacted-monocrystalline-silicon-solar-cell.html>, consulté le 28 septembre 2017.

159 Schlangenotto H., Mäder H. et Gerlach W., « Temperature dependence of the radiative recombination coefficient in silicon », *Physica Status Solidi*, vol. 21, n° 1, 1974, pp. 357-367

160 Auger P., « Sur les rayons β secondaires produits dans un gaz par des rayons X », *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, vol. 177, 1923, pp. 169-171.

161 Dziewior J. et Schmid W., « Auger coefficients for highly doped and highly excited silicon », *Applied Physics Letters*, vol. 31, n° 5, 1977, p. 346.

162 Green, Martin A., « Solar cell fill factors: General graph and empirical expressions », *Solid-State Electronics*, vol. 24, n° 8, 1981, pp. 788–789.

Annexe C : La société S'Tile

VIII-1. LA SOCIETE S'TILE

S'Tile est une entreprise issue du CNRS et de l'Université de Poitiers et fondée en 2007. Créée autour des procédés de broyage et de frittage de silicium, elle est pionnière dans l'utilisation du silicium fritté pour des applications photovoltaïques et possède plusieurs brevets portant sur ce domaine. Les travaux développés par la société ont permis d'établir une relation semi-empirique liant la porosité du matériau fritté à la température, la pression et la durée du frittage sous pression [163]. Ces travaux ont été confirmés et ont abouti à la réalisation de cellules photovoltaïques par recristallisation du substrat de silicium fritté [164]. Par la suite, un procédé de purification a été mis au point pour les poudres de silicium de qualité métallurgique [165], et des développements ont conduit à produire des cellules à partir de couches minces de silicium cristallin déposés par épitaxie sur des substrats de silicium fritté recristallisé [166]. Finalement, la cellule intégrée ou i-Cell a été mise au point sur substrat fritté [167]. Aujourd'hui, la société produit des modules photovoltaïques dont la technologie s'appuie sur la cellule intégrée. Les développements de cette technologie ont été présentés dans ce travail de thèse.

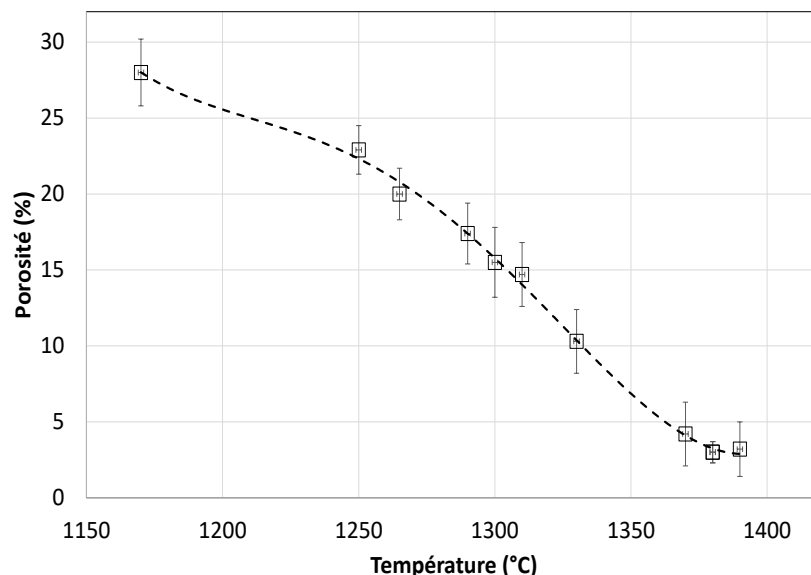


Figure VII-1 : Evolution de la porosité des plaquettes frittées de silicium fritté en fonction de la température de frittage sous 21 MPa pendant 15 minutes.

VIII-2. OBJECTIFS DE L'ENTREPRISE

Le marché principal visé par la société est celui des systèmes photovoltaïques intégrés aux bâtiments ou BIPV (voir partie I-2.3). Elle propose en effet des modules sur mesure à forte valeur ajoutée à des clients dont les besoins spécifiques ne peuvent être actuellement remplis par des modules standard. C'est le cas des systèmes BIPV, qui nécessitent des dimensions et des puissances électriques particulières, et qui répondent à des normes adaptées. Cependant, cette technologie s'appuie sur les différentes étapes de développement issues de l'histoire de la société, à commencer par le frittage.

VIII-3. LE FRITTAGE DE POUDRE DE SILICIUM

Le principal bénéfice de l'utilisation du frittage de poudre de silicium pour des applications photovoltaïques est d'éviter l'étape de sciage des plaquettes, qui génère, comme vu précédemment, environ 50 % de pertes sur la masse de silicium de départ. Les plaquettes sont en effet fabriquées individuellement dans le cadre du silicium fritté. Cette technique permet donc de réduire les coûts de production des modules, en économisant la quantité de matériau utilisé.

Le frittage est le passage de l'état d'une poudre compacte à celui d'un solide cohérent par l'action de la chaleur. Pour ce faire, il est nécessaire de créer des liaisons rigides entre les particules de poudre. Il est réalisé à une température inférieure à celle de fusion du matériau. Le frittage est difficile dans les cas des matériaux covalents, comme le silicium, en raison des liaisons covalentes non plastiques. L'énergie nécessaire pour la densification est plus élevée, et une énergie supplémentaire doit être apportée afin de diminuer la porosité. Dans le cas du processus développé à S'Tile, la poudre de silicium est pressée à haute température. Il en résulte soit un grossissement des grains, soit une soudure des grains, avec ou sans densification. Le frittage présente l'avantage de pouvoir choisir la forme de l'objet produit (forme du moule), et la densité du matériau fritté.

Le principe théorique du frittage repose sur plusieurs étapes. Tout d'abord, les poudres sont mises en forme et comprimées. Lors de cette phase, une réorganisation des poudres a lieu par glissement et réarrangement. La montée en température vient ensuite consolider le comprimé de poudre et augmenter sa densité, par deux mécanismes. Dans un premier temps, se forment des ponts de soudure, ou cous, entre les grains de poudre. Ces mécanismes ont lieu uniquement en surface des grains, et la taille des pores du matériau ne varie pas. Ce dernier est malgré tout déjà compact, et présente une bonne tenue mécanique. La densité est à ce moment d'environ 60 %. Dans une seconde étape, a lieu un mécanisme de volume : les grains pénètrent les uns dans les autres, et les pores se referment, provoquant une augmentation de la densité du matériau, qui peut atteindre des valeurs d'environ 90 %.

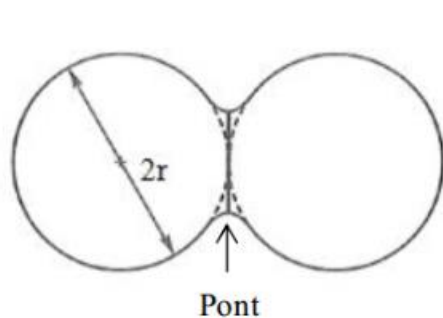


Figure VII-2 : Représentation schématique de deux grains voisins au début du frittage. Source [168]

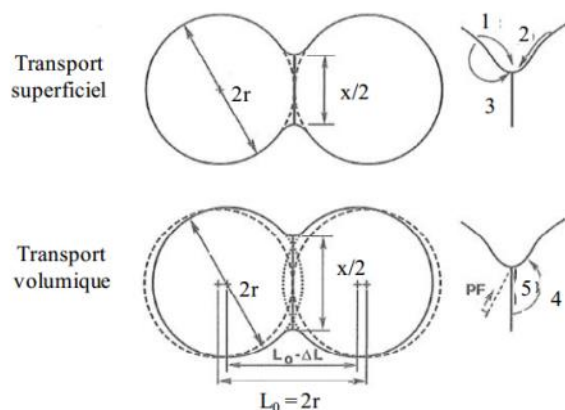


Figure VIII-3 : Mécanismes de transport de matière : (1) évaporation-condensation, (2) diffusion de surface, (3) diffusion en volume, (4) consolidation à travers le volume des grains, (5) transport par les joints de grains.

Les mécanismes de surface qui entraînent la création de ponts entre les grains sont au nombre de deux : le mécanisme d'évaporation-condensation qui consiste en un transfert d'atomes par voie gazeuse entre la surface des grains et le pont de matière [169], et le mécanisme de diffusion en surface. Les atomes se déplacent en surface des grains vers les ponts inter-granulaires. Ce mouvement est limité à une couche superficielle d'une épaisseur de l'ordre de la maille cristalline [170].

Quatre mécanismes de volume permettent quant à eux la densification de l'échantillon. La diffusion en volume s'exerce au sein de la maille cristalline du matériau fritté, depuis les joints de grain en pression vers les joints de grain en tension. De la diffusion a également lieu dans les joints de grain eux-mêmes. Sous l'effet de la montée en pression et de la température, apparaissent également des déformations plastiques à l'intérieur des grains, qui provoquent l'apparition et le déplacement de dislocations. Enfin, un mécanisme de glissement des grains les uns par rapport aux autres apparaît pour relâcher les contraintes [171].

VIII-4. UTILISATION DU FRITTAGE

La société S'Tile a utilisé deux technologies pour réaliser des plaquettes de silicium fritté. La première d'entre elles utilise un mode de chauffage des poudres de silicium par rayonnement émis par un résistor en graphite. Elle permet d'obtenir des plaquettes d'un diamètre de 90 mm, et a servi principalement pendant les phases de développement de la technologie de frittage. La seconde méthode permet de chauffer la poudre de silicium par induction électromagnétique et a été développée par l'entreprise pour produire des plaquettes allant jusqu'à 200 mm de diamètre. En se basant sur cette technique, un four industriel d'une capacité de production de 15 MW a été fabriqué en partenariat avec le groupe ECM et installé en 2017. Ce four a pour but de produire des plaquettes de 156 x 156 mm² qui serviront de bases à la fabrication de cellules solaires à coût modéré. Pour ce faire, plusieurs voies ont été étudiées par l'entreprise.



Figure VIII-4 : four de frittage sous pression par chauffage inductif développé par S'Tile (*Inductive Heating Hot Press* ou IH2P).

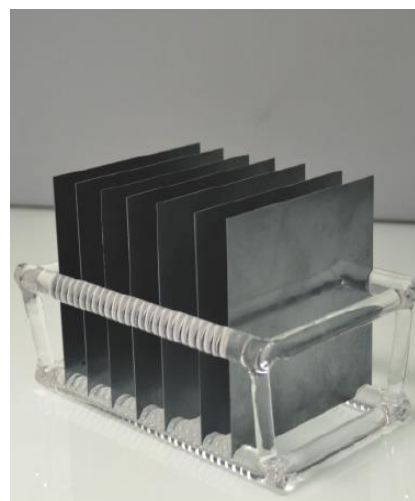


Figure VIII-5 : des plaquettes de silicium fritté 156 x 156 mm².

VIII-5. LE PROCEDE DE RECRISTALLISATION

Les plaquettes frittées denses présentent des structures cristallines accompagnées d'un nombre important de défauts. Elles ne peuvent donc pas être directement utilisées comme substrat actif d'une cellule photovoltaïque, ou du moins pas avec des performances élevées. Un procédé a été développé de manière à faire fondre une couche superficielle de silicium. En solidifiant, la taille des grains de silicium augmente considérablement et permet d'obtenir une meilleure durée de vie des porteurs de charge qui entraîne des rendements plus élevés. Le procédé ZMR développé par le Fraunhofer ISE Freiburg permet de recristalliser des plaquettes sur une épaisseur d'environ 100 μm par concentration de rayonnement infrarouge. La largeur des cristaux obtenus est de l'ordre d'un cm, et de plusieurs cm pour la longueur.

Des cellules photovoltaïques ont été développées à partir de ces substrats recristallisés, avec un rendement maximal de 8,9 % obtenu sur un fritté recristallisé ZMR de 156 x 156 mm^2 [163].

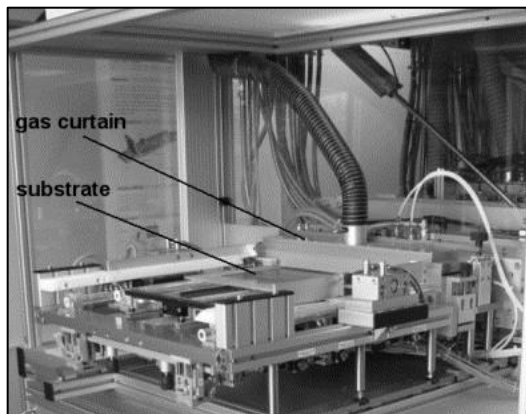


Figure VIII-6 : photographie de la machine ZMR.

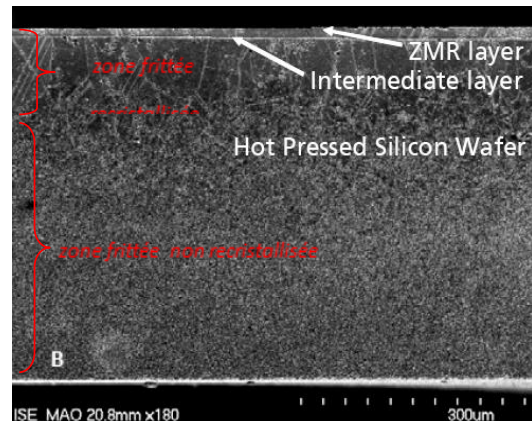


Figure VIII-7 : coupe MEB d'une plaquette recristallisée en surface.

VIII-6. CELLULE SOLAIRE MINCE SUR SUBSTRAT FRITTE

Dans le but d'augmenter les rendements, le procédé EpiWE (ou *Epitaxial Wafer Equivalent*) a été développé. Il consiste à déposer une couche mince de silicium monocristallin sur un substrat par épitaxie CVD. Il a été adapté pour la réalisation de cellules sur substrats de poudre de silicium frittée puis recristallisé par Maïlys Grau [165]. Cette technologie se base sur la couche de silicium recristallisée qui permet la germination de silicium monocristallin de bonne qualité, avec un potentiel de rendement supérieur à 10,5 %. Cependant, la meilleure cellule obtenue en pratique par cette méthode n'a pas dépassé les 6,7 % pour une surface de 2 x 2 mm^2 .

Par la suite, et pour améliorer les performances des couches minces déposées sur substrat, le concept ReWE (ou *Recrystallised Wafer Equivalent*) a été étudié [172]. Contrairement à ses prédécesseurs, le substrat fritté n'est pas recristallisé directement. Il sert de base au dépôt d'une couche mince isolante d'oxyde (SiO_2), sur laquelle est déposée par CVD une couche de silicium

amorphe dopé p+. Cette couche de silicium amorphe est recristallisée par ZMR et sert alors de couche de germination pour le dépôt épitaxial du reste de la cellule (environ 15 μm d'épaisseur) par CVD également. Des cellules de 2 x 2 mm² avec un rendement de 9,2 % ont été réalisées en 2009 par S'Tile avec le procédé ReWE, qui a par ailleurs démontré un potentiel de 13,5 %. Cette différence dans les performances a été expliquée par la qualité non optimale du film épitaxié et par le confinement optique imparfait.

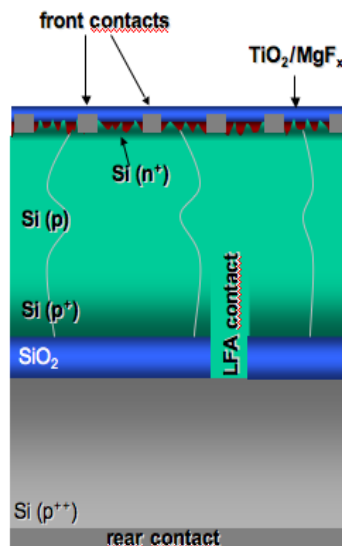


Figure VIII-8 : Schéma du principe de la cellule RexWE obtenue avec couche de Si déposée par épitaxie.

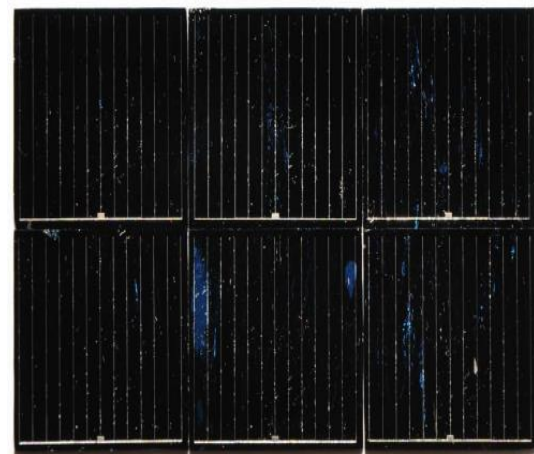


Figure VIII-9 : photographie des cellules 2 x 2 mm² réalisées.

Les travaux de l'entreprise ont donc évolué vers le report de couches minces sur substrats de silicium fritté. Avec cette technique, la couche mince croît par épitaxie sur la couche « sacrificielle » obtenue par porosification locale d'un substrat de silicium monocristallin, ce qui permet d'augmenter la qualité du matériau. Des couches intermédiaires de confinement optique et faisant office de barrière de diffusion sont réalisées sur le film mince, qui est ensuite collé sur le substrat fritté, après quoi la couche sacrificielle est retirée. Cette technique de report de couches, courante en microélectronique, a permis l'obtention de cellules minces de bonne qualité, avec des rendements de 15,3 %.

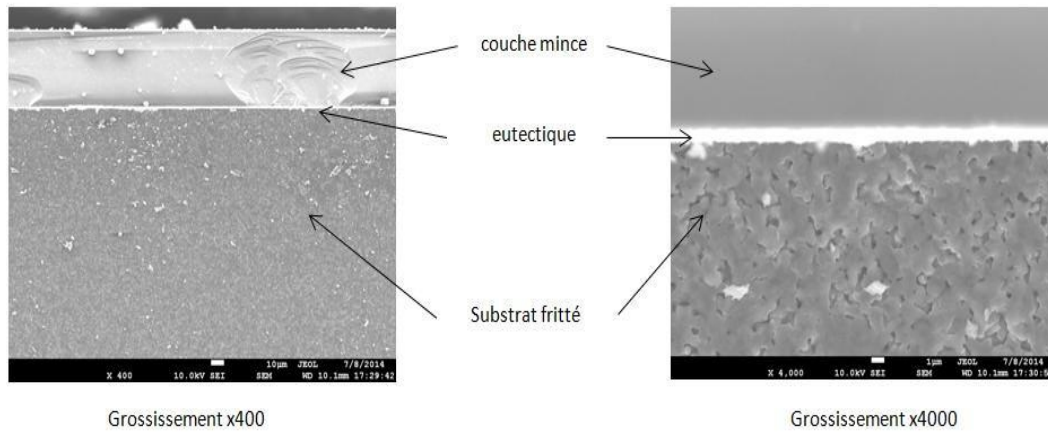
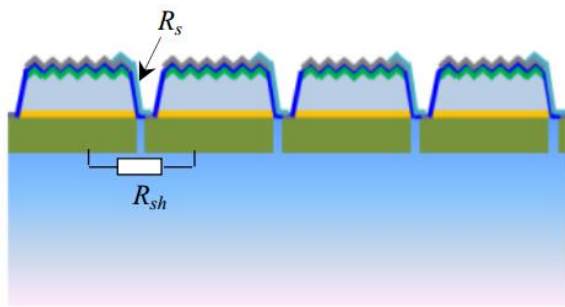


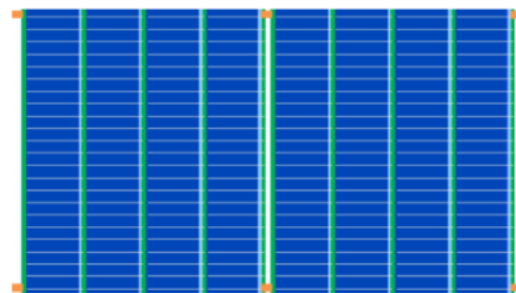
Figure VIII-10 : cliché MEB en coupe d'une cellule obtenue par report de couche mince sur substrat de silicium fritté.

A partir de cette technique a émergé le concept de l'i-Cell (*integrated cell*) ou cellule intégrée. Inspirée des circuits intégrés de la microélectronique, elle consiste en plusieurs sous-cellules issues d'un même film de silicium monocristallin, séparées physiquement puis connectées en série par le biais du substrat fritté sur lequel elles sont assemblées. Le concept a été développé et a fait l'objet de plusieurs brevets. La version la plus courante de l'i-Cell comporte quatre sous-cellules. Cette structure permet l'obtention de tensions quatre fois plus hautes et de courants quatre fois plus bas qui réduisent les pertes résistives lors de la mise en module [173,174]. Combinée à la réduction des coûts offerte par l'utilisation d'un substrat fritté, cette technologie permet théoriquement l'obtention de modules économiques à haute puissance. En effet, le substrat permet théoriquement de diminuer la quantité de silicium de bonne qualité, et de supprimer les busbars et donc la quantité d'argent utilisée. L'i-Cell permet également d'améliorer la compacité des modules et améliore leur aspect esthétique.



- Sintered Si substrate (300 µm)
- Conductive zone (30 µm)
- Intermediate layer
- Absorber (25 µm)
- Emitter

Figure VIII-11 : structure d'une i-Cell.



- ARC ($\text{SiN}_x\text{:H}$)
- Ag paste 1
- Ag paste 2
- Cu ribbon

Figure VIII-12 : représentation schématique de l'interconnexion de deux i-Cell dans un module.

Pour des raisons de faisabilité industrielle à court terme, les premiers prototypes d'i-Cell à destination commerciale ont été réalisés à partir de cellules Al-BSF d'épaisseur standard (environ 180 μm) assemblées sur substrat fritté. Un premier mini-module a été produit en 2015, avec un rendement de 18 % [175]. Suivant la même logique, les premiers modules entrés en production sont basés sur le concept de sous-cellules développées avec l'i-Cell, mais ces sous-cellules sont d'épaisseur standard et assemblées directement entre elles sans l'aide d'un quelconque substrat.

VIII-7. LES MODULES SUR-MESURE DE S'TILE

Aujourd'hui, la société S'Tile produit des modules photovoltaïques à hauts rendements et à l'esthétique améliorée basés sur la technologie de l'i-Cell. Des cellules de petites dimensions (le plus souvent des quarts de cellule standard) sont découpées au laser et assemblées à l'aide d'une technique brevetée nécessitant un motif de métallisation spécifique. Hormis cette différenciation, les étapes de fabrication sont identiques au standard, tant pour les cellules que pour les modules, et sont donc compatibles avec des équipements de production déjà existants. Cette technologie permet une meilleure flexibilité lors de la fabrication des modules car les tailles de cellules plus petites offrent de très bonnes valeurs de FF ainsi qu'une bonne densité de puissance.

REFERENCES

- 163 Derbouz-Droua A., *Etude du frittage du silicium pour application aux cellules solaires photovoltaïques*, thèse de doctorat, Université de Poitiers, 2006.
- 164 Bellanger P., *Etude d'un procédé de recristallisation de plaquettes de silicium fritté pour la réalisation de cellules solaires photovoltaïques*, thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2010.
- 165 Sow A., *Étude de la purification des poudres de silicium destinées à la fabrication de substrats frittés pour des applications photovoltaïques*, thèse de doctorat, Université de Poitiers, 2011.
- 166 Grau M., *Réalisation de nouvelles structures de cellules solaires photovoltaïques à partir de couches minces de silicium cristallin sur substrat de silicium préparé par frittage de poudres*, thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2012.
- 167 Boye Y., *Réalisation de cellules solaires intégrées par oxydation localisée d'un substrat de silicium fritté poreux*, thèse de doctorat, Université d'Orléans, 2016.
- 168 Malinge A., *Étude du frittage de poudres de carbure de silicium de taille nanométrique : application à l'élaboration de fibres*, thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1.
- 169 Bernache-Assollant D. et Bonnet J. P., *Frittage: aspects physico-chimiques*, éditeur : Techniques de l'Ingénieur, 2005.
- 170 German R.M., *Sintering Theory and Practice*, éditeur : John Wiley & Sons, 1996.
- 171 Inomata Y. « Free Energy Theory of the Initial Sintering of Solids », *Journal of the Ceramic Association*, vol. 90, n° 1045, 1982, pp 527-531.

172 Grau M. et al., « High Voc Crystalline Silicon Thin Film Solar Cells through Recrystallised Wafer Equivalent Applied to Sintered Silicon », *Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2009, pp. 2615-2618.

173 Straboni, A., Malinge, A., Sionneau, B., Brette, J.-B., Sow, A., Sun, G., Boye, Y., Chancerel, F., 2014. Integrated Solar Cell Based on Monocrystalline Si Thin Film Transferred to Low Cost Sintered Si Wafers. 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 1937–1940.

174 Summhammer, Johann, et Harald Rothen. « Rectangular Silicon Solar Cells with More Power and Higher Voltage Modules », *Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2009, pp. 2221-2224.

175 Sun G. et al., « A low current high efficiency solar cell composed of a 80 μm -thin monocrystalline silicon foil transferred on a low cost substrate », *Proceedings of the 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2016, poster.

Développement de modules photovoltaïques bifaciaux à haut rendement utilisant le concept i-Cell

Résumé

Les travaux présentés dans cette thèse consistent à concevoir des modules à haut rendement et à bas coûts. Des modules intégrés réalisés à partir de sous-cellules découpées ont été réalisés. Ces sous-cellules sont inspirées de la technologie PERC. La réduction du coût de production en simplifiant le procédé de fabrication et en diminuant la quantité de matériaux utilisés a été étudiée. L'augmentation des rendements a été observée en ouvrant la face arrière des cellules, ce qui leur confère la bifacialité, et en utilisant des moyens performants pour la réalisation des émetteurs. Dans un second temps, l'augmentation de la puissance des modules a été étudiée en s'inspirant de l'i-Cell développée par la société S'Tile pour réduire fortement les pertes résistives traditionnellement observées dans les modules classiques. La même étude a été réalisée à partir de cellules IBC spécialement conçues pour être découpées en sous-cellules et ainsi assemblées en modules. Ces cellules ont été développées pour être compatibles avec des procédés industriels de production de masse, permettant de réduire le coût de production par rapport à des cellules IBC conventionnelles. Les sous-cellules obtenues après découpe ont été connectées pour obtenir des modules photovoltaïques bifaciaux permettant l'obtention de hauts rendements. De cette manière, deux voies possibles sont explorées pour l'amélioration des rendements et la diminution des coûts des modules photovoltaïques.

Mots clés : PERC, IBC, Cellules bifaciales, Haut rendement, cellules coupées.

Résumé en anglais

The work presented here is aimed to produce high-efficiency, low-cost photovoltaic silicon solar modules. Integrated modules have been carried out from laser-cut sub-cells. These cells have been produced using the PERC cell technology. The reduction of production costs have been studied by simplifying the manufacturing processes and by decreasing the quantity of materials used. An increase in efficiency has been observed by opening the rear side of the cells, making them bifacial, and by using advanced means in order to realize the cell emitters. The increase of produced power has been studied by using sub-cells in order to reduce the resistive losses measured in standard modules. The same study has been carried out with IBC solar cells. These cells have been designed to be separated in sub-cells by laser scribing, and to be produced with means compatible with mass production only, thus decreasing the cost. The sub-cells obtained after laser scribing have been connected in order to obtain bifacial photovoltaic modules producing high electrical power. In this way, two possible paths towards high efficiency and low cost modules have been studied.

Key words : PERC, IBC, bifacial cells, high efficiency, sub-cells.