



HAL
open science

Développement, fabrication et caractérisation de modules photovoltaïques à concentration à ultra haut rendement à base de micro-concentrateurs

Arnaud Ritou

► **To cite this version:**

Arnaud Ritou. Développement, fabrication et caractérisation de modules photovoltaïques à concentration à ultra haut rendement à base de micro-concentrateurs. Optique [physics.optics]. Université Grenoble Alpes, 2018. Français. NNT : 2018GREAY059 . tel-02053358

HAL Id: tel-02053358

<https://theses.hal.science/tel-02053358>

Submitted on 1 Mar 2019

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

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

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE LA COMMUNAUTE UNIVERSITE GRENOBLE ALPES

Spécialité : **Physique appliquée**

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

Arnaud RITOU

Thèse dirigée par

Olivier RACCURT, Docteur (HDR), Expert Sénior, CEA-LITEN,

et encadrée par

Philippe VOARINO, Docteur, CEA-LITEN

préparée au sein du **Laboratoire de Photovoltaïque à
Concentration, CEA-LITEN**
dans l'**École Doctorale de physique de Grenoble**

Développement, fabrication et caractérisation de modules photovoltaïques à concentration à ultra haut rendement à base de micro- concentrateurs

Thèse soutenue publiquement le **22 novembre 2018**,
devant le jury composé de :

Madame Carole DEUMIE

Directrice de la formation, École Centrale Marseille, Institut Fresnel,
Univ. Aix-Marseille, **Présidente du jury**

Monsieur Stéphane COLLIN

Chargé de recherche, C2N, CNRS, Univ. Paris-sud/Paris-Saclay,
Rapporteur

Monsieur Alain DOLLET

Directeur de recherche, PROMES, CNRS, Univ. Perpignan,
Rapporteur

Monsieur César DOMINGUEZ-DOMINGUEZ

Professeur, IES, Univ. Politecnica de Madrid, Examineur

Monsieur François HENAULT

Ingénieur de recherche, IPAG, CNRS, Univ. Grenoble Alpes,
Examineur



à mon père

Remerciements

Le travail de thèse présenté ici a été réalisé au Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA) au sein du Laboratoire pour le Photovoltaïque à Concentration (LCPV) sur le site de l'Institut National de l'Énergie Solaire (INES).

Je tiens à remercier Philippe pour son encadrement constant pendant ces trois années de thèse et les 6 mois de stage qui ont précédé. C'est avant tout grâce à lui que j'ai pu intégrer le LCPV et découvrir le métier d'ingénieur de recherche. Je remercie également mon directeur de thèse, Olivier, pour son suivi très régulier et ses conseils qui m'ont beaucoup appris. Leur investissement à tous les deux a été remarquable pendant la rédaction de cette thèse.

Je remercie également Mathieu, le chef du laboratoire pendant mes deux premières années pour sa confiance et son soutien. Avec Philippe et lui, le reste de la « dream team » du LCPV mérite également un grand merci. L'ambiance amicale et passionnée qui règne dans cette petite équipe est très fertile aux réflexions scientifiques, savamment accompagnées d'un zeste d'humour. Merci à Yannick, Pablo, Xtophe, Caroline, Sarah, Marlène, Anthony, Romain et Romain.

Les micro-concentrateurs fabriqués pendant ma thèse ont été réalisés en collaboration avec le LP3D du CEA-LETI. Je tiens à remercier Thierry, Nacer, Baptiste, Nadine, Alain et plus particulièrement Arnaud pour son implication.

Je remercie également les collègues du LMPV pour tous les petits coups de main et les conseils précieux dans l'atelier. J'ai eu beaucoup de plaisir à côtoyer Lionel, Paul, Eric, Hervé, Julien, Manu, Benjamin, Amandine, Marion, l'autre Paul, François, Bertrand, Jean-François et Guillaume.

Pour les fois où il manquait un outil dans l'atelier du LMPV, j'ai également pu compter sur les collègues du solaire thermique ou des systèmes PV. Merci à Coralie, Romain, Bertrand, Raph, Fred et Mark pour leur aide en optique ou en électronique.

Dans le bâtiment du Lynx4, un lien très fort soude les thésards de toutes les générations entre eux. Pour le partage, dans les meilleurs moments comme dans les pires, je ne remercierai jamais assez Pierre, Clément, Stéphane, Nouha (mention spéciale pour ma co-bureau), Mousaab, Julien et Karim.

Parmi tous les stagiaires avec qui il a été agréable de travailler, je remercie plus particulièrement Antoine et David dont les travaux figurent dans cette thèse.

En dehors du cadre professionnel, beaucoup de monde a également contribué directement ou indirectement à l'aboutissement de mon travail de thèse. D'abord, il y a Chamoux, mon lieu de villégiature principal, plus qu'une coloc, c'est un collectif, une famille. Ensuite il y a la Mort Subite, brass band de Grenoble avec qui on peut aussi bien parler de science que d'accordage, bien que ce soit trop souvent après les concerts ! Je remercie aussi tous les copains de Grenoble, de Marseille ou du Jura, à qui j'adresse un « Kikou ! » bien solennel. Plus près de l'INES, la salle Grangeret est un endroit parfait pour la pause musicale de midi. Merci aux Koaffertz' ainsi qu'au groupe de Jazz de l'ACS pour toutes ces bonnes sessions. Enfin, merci à Maud, pour tout ce qu'elle est et pour son soutien très précieux.

Aussi bêtement que cela puisse paraître, je remercie également ma Maman ! Avec elle ma sœur Maëlle, mon frère Maxime et les pièces rapportées Christian et Will (qui comptent autant que les autres), seront pour toujours la famille « tupeuxpastest' ».

Table des matières

Remerciements	iii
Table des matières	vi
Résumé	ix
Abstract	xi
Nomenclature	xii
Liste des abréviations	xii
Liste des symboles et constantes.....	xiii
1. Introduction	2
1.1 Le solaire photovoltaïque.....	3
1.2 Le photovoltaïque à concentration.....	6
1.3 La micro-concentration Photovoltaïque	9
2. Etat de l'art	11
2.1 La micro-concentration.....	11
2.1.1 Composition d'un micro-concentrateur.....	11
2.1.2 Particularité des micro-concentrateurs	11
2.1.3 Le rapport Cell-to-Module.....	15
2.2 L'optique de concentration	17
2.2.1 Etat de l'art des optiques de concentration.....	17
2.2.2 Perte optiques dans un micro-concentrateur	18
2.2.2.1 Pertes par réflexion et absorption.....	19
2.2.2.2 Pertes diverses et qualité de fabrication	19
2.3 L'assemblage des modules micro-concentrateurs.....	23
2.4 Partie électrique des modules : les cellules multi-jonctions	24
2.4.1 Les cellules multi-jonctions	24
2.4.2 Pertes par non-uniformités	27
2.4.3 Interconnexion des cellules PV dans un module	29
2.5 Bilan des pertes dans un micro-concentrateur	30
3. Conception optique des micro-concentrateurs	33
3.1 Optique non-imageante : bases théoriques.....	33
3.1.1 De l'électromagnétisme à l'optique géométrique	33
3.1.2 Conservation de l'étendue.....	34
3.1.3 Principe de Fermat.....	35
3.1.4 Le principe des rayons de bord	36
3.1.5 Réflexion et réfraction.....	37

3.2	Conception de micro-concentrateurs à double étage de lentilles	38
3.2.1	Conception de l'optique primaire.....	38
3.2.2	Conception de l'optique secondaire.....	41
3.3	Optimisation pour le spectre solaire	44
3.3.1	Simulations par tracé de rayon.....	45
3.3.2	Comparaison des performances de chaque SOE conçue	46
3.3.3	Optimisation des optiques	48
3.4	Concentrateurs réalisés.....	48
4.	Fabrication des modules μ-CPV	51
4.1	Matériaux et procédés pour les optiques de concentration.....	52
4.2	Procédé de fabrication des modules proposé : trois étapes	55
4.2.1	Interconnexion et positionnement des cellules	56
4.2.2	Moulage et auto-alignement des lentilles	56
4.2.3	Assemblage du module μ -CPV final.....	57
4.3	Estimation des tolérances mécaniques	58
4.3.1	Angle d'acceptance.....	59
4.3.2	Désalignements des éléments du concentrateur	59
4.3.2.1	Rotations autour de l'axe z	61
4.3.2.2	Décalage latéral des éléments (axe x).....	62
4.3.2.3	Décalage vertical des éléments (axe z)	63
4.3.2.4	Bilan de l'analyse préliminaire des 9 mobilités.....	65
4.3.2.5	Analyse multicritères	65
4.3.3	Déformation de la POE.....	68
4.4	Tolérances mécaniques des pièces réelles	69
4.4.1	Mobilités de la cellule	70
4.4.2	Mobilités de la SOE.....	70
4.4.3	Mobilités de la POE	71
4.4.4	Erreur de forme de la lentille	71
4.5	Réalisation de prototypes étapes par étape	72
4.5.1	Choix des cellules et assemblage de la face arrière.....	72
4.5.2	Fabrication du moule et injection	73
4.6	Conclusion.....	75
5.	Caractérisation des performances du micro-concentrateur 1000X.....	77
5.1	Mesure des courbes IV	78
5.1.1	Les simulateurs solaires.....	79
5.1.1.1	Contrôle des variations spectrales	80
5.1.1.2	Contrôle de l'intensité de la lumière	84
5.1.2	Performances des cellules nues	87
5.1.3	Performance des modules.....	88
5.1.3.1	Performances électriques	88
5.1.3.2	Angle d'acceptance	89
5.1.4	CTM du micro-concentrateur 1000X.....	90
5.2	Mesure de l'efficacité optique	91
5.2.1	Pertes directes : Réflexion et Absorption.....	91
5.2.2	Critères de caractérisation de la tache focale	92
5.2.3	Banc d'imagerie de la tache focale	93
5.2.4	Tache focale de la POE du micro-concentrateur 1000X.....	95
5.3	Alignement des optiques dans le module réel.....	97
5.3.1	Désalignement Cellule-SOE	97
5.3.2	Désalignement POE-récepteur.....	98

5.4 Déséquilibre de courant dans le module	101
5.5 Synthèse et conclusion	102
6. Conclusion	104
Références	109
Contributions scientifiques	117
Conférences internationales	117
Journal avec comité de lecture.....	117
Brevet.....	117

Résumé

Les modules photovoltaïques à concentration (CPV) ont tendance à se miniaturiser. D'une part, la distance focale plus courte des optiques de concentration permet de réduire le besoin en matériaux pour l'assemblage du module ; et d'autre part, le rendement des modules est sensiblement meilleur que celui des modules CPV de taille normale. L'étude de chaque élément de la chaîne de pertes dans la littérature des micro-concentrateurs a permis de confirmer cette tendance. Cette thèse aborde les problématiques de coût et de rendement à travers la conception optique d'un concentrateur à deux étages de lentilles, sa fabrication puis une étude approfondie de ses performances.

La méthode de conception, développée à partir de lois d'optique géométrique et non-imageante, définit le profil des lentilles à $\lambda=589\text{nm}$ en premiers lieux. Ensuite, une simulation par tracé de rayons permet d'optimiser ces lentilles pour l'ensemble du spectre solaire puis d'étudier l'impact de leur désalignement lors de la mise en module. Les limites des déplacements des éléments du module ainsi déterminées conditionnent la précision de sa fabrication. Dans notre cas, l'alignement est réalisé automatiquement par un jeu de repères mécaniques lors du moulage simultané des optiques primaires (POE) et des optiques secondaires (SOE). Contrairement aux procédés habituels, ce procédé de moulage innovant permet d'assembler un module en seulement trois étapes au lieu de cinq.

Pour caractériser les micro-concentrateurs réalisés, une méthode de mesure du rapport module à cellule (CTM) est développée. Pour cela, le rendement des cellules est mesuré en simulateur solaire avant et après leur mise en module. Les cellules multi-jonctions mises en œuvre étant sensibles aux variations spectrales et spatiales de l'éclairement, la validation préalable de ces mesures est primordiale. En complément du CTM qui quantifie la somme des pertes introduites lors de la mise en module, d'autres mesures sont développées pour comprendre la chaîne de pertes plus en détails.

Le dispositif étudié au cours de cette thèse utilise des cellules triple-jonction de $0,6 \times 0,6\text{mm}^2$ avec une concentration de 1000X et atteint un rendement de 29%. Le CTM est de 70% et l'analyse de la chaîne de pertes montre que le procédé inventé n'impacte pas ou peu les performances du module. De plus, la détermination de la chaîne de pertes montre que les pertes par réflexion et par absorption sont prédominantes, au même titre que les pertes dues à la diffusion des lentilles ainsi que les pertes dues aux non-uniformités d'éclairement sur la cellule.

Abstract

The actual trend of CPV is the micro-scaling of modules. A bibliographic study shows that shorter focal length of optics implies less material consumption in manufacturing and an enhanced efficiency of the modules. In this thesis, a double stage refractive micro-concentrator is designed, manufactured and characterized. First, the optical design of the concentrator is based on non-imaging technics. Thus, the profile of the lenses is generated for a single wavelength. Then, a ray tracing simulator is used to optimize the lens profile for the overall solar spectrum and study the concentrator element misalignment effect on the performances.

Secondly, a three steps self-assembly process is developed instead of the usual five steps one. Both POE and SOE lenses of our device are molded simultaneously and a mechanical guidance system in the mold ensures the alignment of the micro-concentrator elements (POE, SOE and Cell).

Finally, the performances measurements of the manufactured modules are managed in solar simulators in which the lightening condition are previously studied and validated. Comparing the bare cells efficiency with the module efficiency, the cell-to-module ratio (CTM) represents the overall losses in the module. Further experiments are managed to quantify each loss of the module. The manufactured and characterized micro-concentrator is a 1000X concentrating ratio with $0.6 \times 0.6\text{mm}^2$ triple junction cells. Its efficiency is 29% with a 70% CTM. Finally, the loss chain study reveals that the three steps self-assembly process is reliable.

Nomenclature

Liste des abréviations

μ -CPV	Micro-Concentrateur PhotoVoltaïque
AA	Angle d'Acceptance
AM1.5D	Spectre solaire direct dans les conditions atmosphériques (Air Mass) 1.5
ARC	Couche AntiReflet
BIPV	Building Integrated PV
BRDF	Bidirectional Reflected Distribution Function
BTDF	Bidirectional Transmitted Distribution Function
CIPV	Car Integrated PV
CPC	Compound Parabolic Concentrator
CPV	Concentration PhotoVoltaïque
c-Si	Silicium monocristallin
CSOC	Concentrated Standard Operating Conditions
CSTC	Concentrated Standard Test Condition
CTM	Rapport Cell-to-Module
DNI	Direct Normal Irradiance
DUT	Device Under Test
EQE	Efficacité Quantique Externe (External Quantum Efficiency)
FF	Facteur de Forme
III-V	Matériaux des colonnes III et V de la table de Mendeleïev
IV	Courbe Courant-tension
LCOE	Levelized Cost Of Energy
LED	Light Emitting Diode
MJSC	Cellules Solaires Multi-Jonctions
MPP	Point de Maximum de Puissance
PAR	Rapport Crête-moyenne (Peak to Average Ratio)
PC	PolyCarbonate
PCB	Circuit Imprimé (Printed Circuit Board)
PERC	Passivated Emitter and Rear Cell
PMMA	Polyméthacrylate de méthyle
POE	Element Optique Primaire (d'un concentrateur)
PV	PhotoVoltaïque
RMS	Moyenne quadratique (Root Mean Square)
RX	Concentrateur Réfractif puis Réflectif

RXI	Concentrateur Réfractif, Réflectif puis Réfractif
SIL0	SInGLE Optical surface design
SMR	Spectrale Matching Ratio
SOE	Elément Optique Secondaire (d'un concentrateur)
TIR	Réflexion Totale Interne
UV	Ultra-Violet
Xe	Xénon
XR	Concentrateur Réflectif et Réfractif

Liste des symboles et constantes

C_g	Facteur de concentration (en Suns ou X)
P_{in}	Puissance lumineuse incidente (en W)
P_{out}	Puissance lumineuse sortante (en W)
R_f	Réflexion de Fresnel (en %)
n_i	Indice de réfraction du demi-espace incident (<i>u.a.</i>)
n_t	Indice de réfraction du demi-espace en transmission (<i>u.a.</i>)
α	Coefficient d'absorption (en mm^{-1})
L	Longueur (en mm)
σ_s	Moyenne quadratique de la taille des rugosités d'une surface (en nm)
θ_i	Angle du rayon incident (en °)
θ_t	Angle du rayon transmis (en °)
θ_r	Angle du rayon réfléchis (en °)
E_i	Eclairement incident (en W/m^2)
σ_{pente}	Moyenne quadratique de l'erreur angulaire de forme d'une surface (en mrad)
η	Rendement (en %)
FF	Facteur de forme (en %)
T	Température (en °C)
V_{oc}	Tension de circuit ouvert (en V)
k	Constante de Boltzmann ($=1,3806488 JK^{-1}$)
q	Charge élémentaire d'un électron ($=1,60217733 \cdot 10^{-19} C$)
R_s	Résistance série (en Ω)
I_{sc}	Courant de court-circuit (en mA)
P/A Ratio	Rapport Périmètre sur Aire (en cm^{-1})
I	Courant (en mA)
V	Tension (en V)
λ	Longueur d'onde de la lumière (en nm)
c_0	Célérité dans le vide ($=2,99792458 \cdot 10^8 ms^{-1}$)
NO	Nombre d'ouverture (<i>u.a.</i>)
ε	Amplitude des déplacements d'un élément optique (en μm)

Introduction

D'une certaine manière, la dernière révolution énergétique que l'homme ait connue date d'il y a 500 000 ans, lorsque l'Homme a découvert le feu [1]. Aujourd'hui encore, 80% de l'énergie primaire que l'Homme consomme vient de la combustion du pétrole, du gaz ou du charbon [2]. En comparaison, la terre reçoit près de 10 000 fois cette quantité d'énergie en énergie solaire chaque année. Certes, la répartition de cette énergie n'est pas uniforme sur la surface du globe, comme le montre la Figure 1.1 [3], mais même dans les zones à ensoleillement moyen, l'énergie solaire est suffisamment abondante. Par exemple, un chambérien reçoit environ 1210kWh/m^2 et par an.

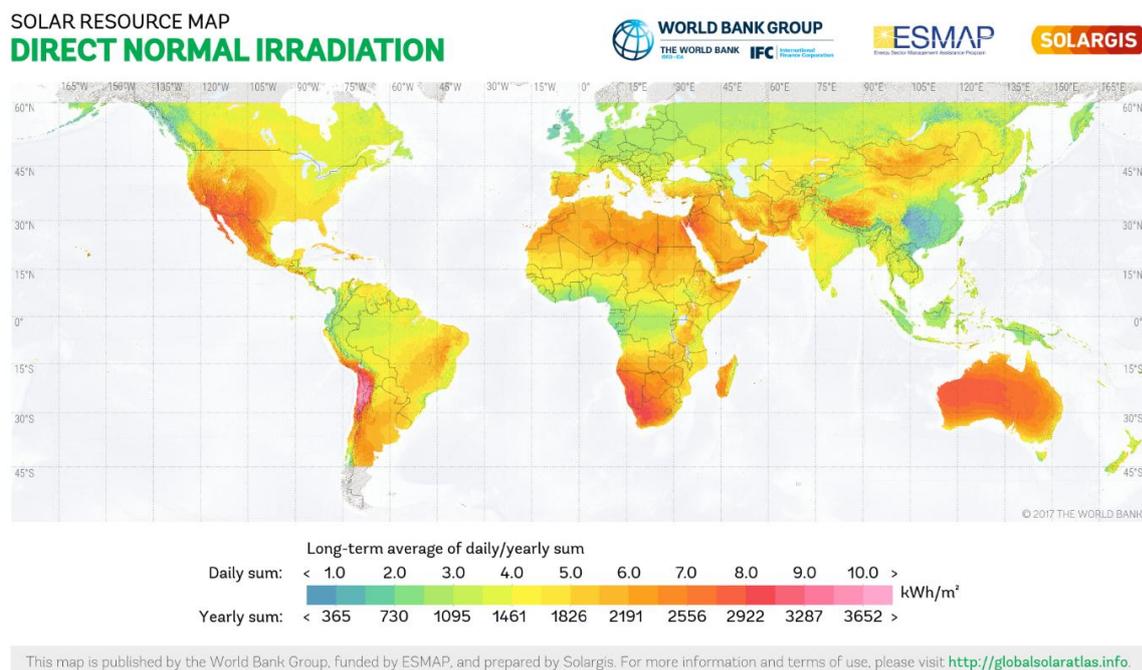


Figure 1.1 : Carte d'irradiance solaire directe mondiale : représentation de la répartition de l'énergie solaire incidente sur terre [3].

En imaginant un système qui transforme l'énergie solaire avec un rendement de 100%, il peut subvenir à ses besoins énergétiques ($43,1\text{MWh}$ par an en moyenne) avec seulement $36,5\text{m}^2$ de surface au sol. En réalité, la surface nécessaire est bien plus grande à cause du rendement faible des modules PV et si le coût de son installation n'est pas assez intéressant, il préférera sans doute se tourner vers

d'autres énergies. Dans cette thèse, nous nous intéressons à ces deux aspects de la production d'électricité photovoltaïque : le rendement et le coût. Plus particulièrement, notre étude porte sur les micro-concentrateurs photovoltaïques. Ce chapitre introduit les particularités techniques et économiques de ce type de panneaux solaires.

1.1 Le solaire photovoltaïque

Edmond Becquerel a découvert l'effet photovoltaïque en 1839 [4]. Plus de 100 ans après, la première cellule PV capable de produire une puissance significative est fabriquée en laboratoire avec un rendement de 6% en 1954 [5]. Ce tout premier record marque le début d'une progression très rapide, fortement influencée par la bataille technologique entre les Etats-Unis et l'URSS sur fond de conquête spatiale. En pleine guerre froide, la mise en orbite du premier satellite par les Russes a bouleversé la recherche scientifique américaine. Neuf mois après le lancement, la NASA était créée et le PV fut la solution énergétique choisie pour le développement des satellites autonomes [6]. Aujourd'hui, le photovoltaïque n'est pas seulement réservé aux activités spatiales mais prend une place de plus en plus importante dans le mix énergétique mondial.

Bien que le PV représente seulement 1% du marché de l'énergie, sa capacité de production d'énergie, donnée en GW crête sur la Figure 1.2, est en croissance exponentielle [7].

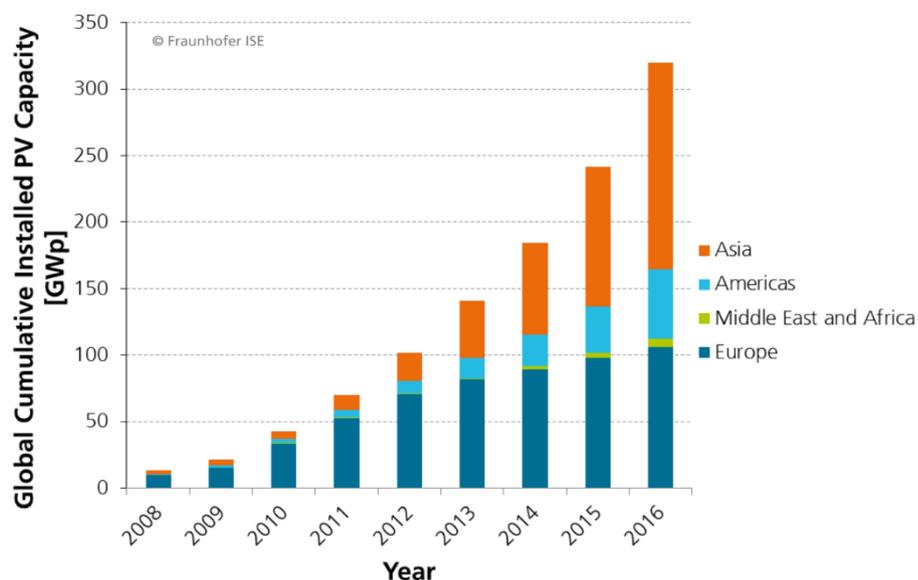


Figure 1.2 : Capacité de production d'énergie solaire PV cumulée en GW crête [7]

La maturation du marché dont le déploiement à grande échelle permet une optimisation des technologies et une rationalisation des coûts de fabrication permet une chute du prix des modules. Aujourd'hui, la technologie la plus répandue, *i.e.* les modules en Silicium monocristallins (c-Si), possède une durée de vie de 30 ans environ [8] avec un rendement de 17,2%. La Figure 1.3 représente le prix de ces modules (en dollar par W) sur laquelle on constate une chute des prix en fonction des capacités de production [9].

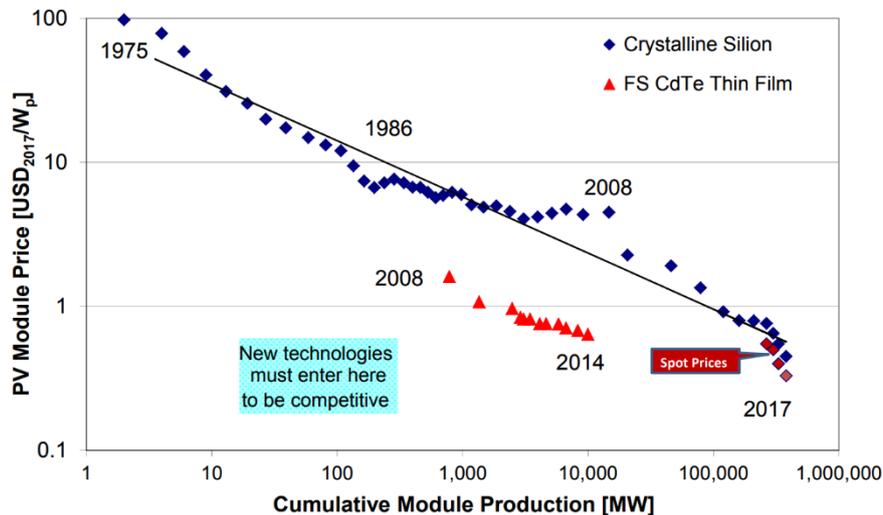


Figure 1.3 : Courbe de réduction du coût des modules c-Si : Prix des modules en \$/W en fonction de la puissance cumulée installée en MW [9].

Les modules PV c-Si représentent 93% des installations en termes de puissance installée et regroupe plusieurs technologies avec des performances différentes. Les cellules les plus commercialisées aujourd'hui existent en laboratoire depuis des dizaines d'années déjà. Par exemple, la technologie PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) qui équipe des modules commerciaux produits en masse depuis 2015, a été mise au point en 1989 avec 22,4% de rendement [10]. Il a donc fallu presque 30 ans pour que cette « nouvelle » technologie fasse son apparition sur le marché.

Aujourd'hui les technologies de cellules PV sont très variées et le Silicium n'est pas le seul semi-conducteur capable de produire l'effet photovoltaïque. Que ce soit pour des applications terrestres ou spatiales, la recherche sur les cellules PV distingue cinq grandes familles technologiques. La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** montre l'évolution des rendements record obtenus en laboratoire des cellules, pour toutes ces technologies [11]. Sur ce graphique, les cellules les plus efficaces sont les cellules multi-jonctions (MJSC) à base de matériaux III-V. Ces cellules, à l'origine destinées aux panneaux solaires des satellites, sont développées pour obtenir le rapport puissance/poids le plus élevé possible sans contraintes sur leur coût. Leur rendement est deux fois plus élevé qu'une cellule en silicium mais elles coûtent 200 à 300 fois plus chères. Pour les applications terrestres, ce coût est un frein pour leur déploiement. En effet sur le marché de l'énergie, un des indicateurs majeurs qui intéresse les investisseurs est le coût de production de l'énergie (*levelized cost of energy*, LCOE) exprimé en \$/kWh. Une énergie avec un LCOE très bas permet un retour sur investissement rapide. Les coûts de fabrication doivent être faibles et l'efficacité de l'installation élevée. En ce sens, la concentration solaire est une solution pertinente pour l'intégration des MJSC.

Best Research-Cell Efficiencies

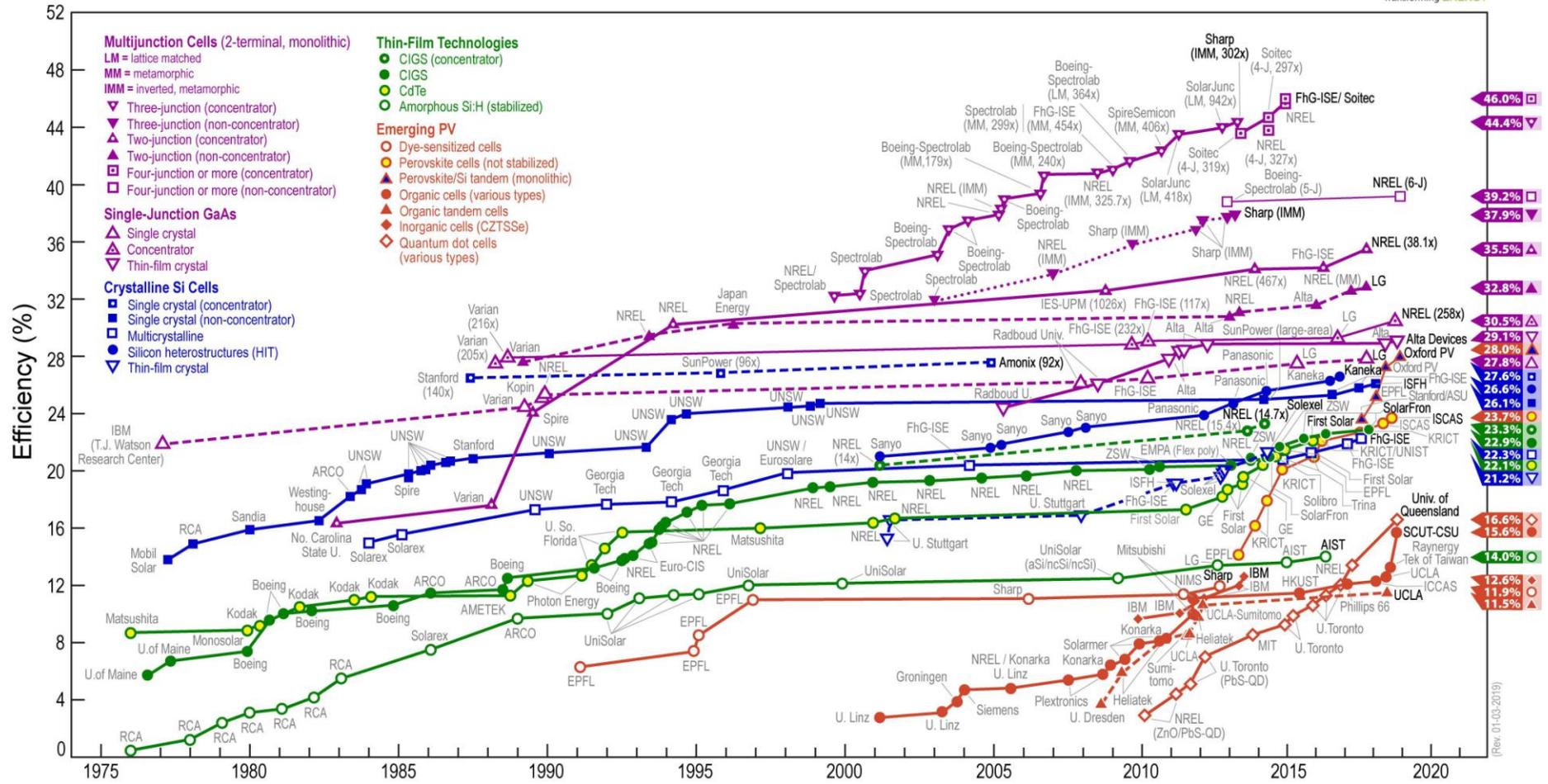


Figure 1.4 : Evolution des rendements record des cellules PV en laboratoire [11].

Dans un premier temps, les optiques de concentration permettent de réduire la quantité de cellules utilisées par module grâce au rapport de surface égale à la concentration du module. Dans un second, l'effet de la concentration lumineuse sur les cellules solaires est très bénéfique pour leur rendement [12]. Le défi principal de la concentration photovoltaïque (CPV) est donc de fabriquer des optiques de concentration à moindre coût et de les intégrer à des cellules MJSC. L'objectif est de proposer des modules photovoltaïques plus efficaces et compétitifs avec les modules PV en Silicium.

1.2 Le photovoltaïque à concentration

Un module photovoltaïque à concentration (CPV), tel que représenté sur la Figure 1.5, est, d'après la norme IEC 62108 [13], composé d'une optique primaire (POE), d'une éventuelle optique secondaire (SOE) et d'une cellule photovoltaïque à haut rendement. L'ensemble SOE, cellule et circuit de connexion forme le récepteur d'un mono-module. Ensuite, les mono-modules sont assemblés pour constituer le module. L'ensemble des lentilles primaires forme le parquet de lentilles et les récepteurs sont interconnectés en série-parallèle en fonction du besoin en courant et tension. Afin de focaliser le rayonnement solaire sur le récepteur, les modules sont équipés de suiveurs solaires, communément appelés *trackers*.

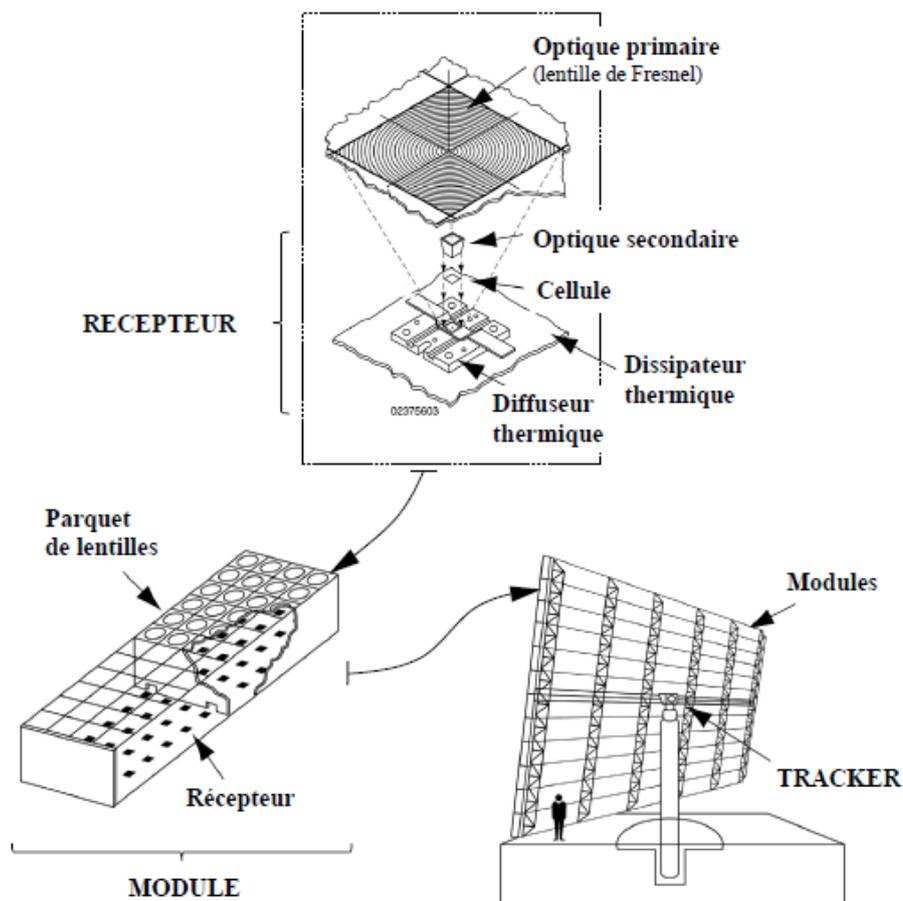


Figure 1.5 : Schémas de principe d'un module CPV avec la dénomination de chaque composant [13].

Avec l'objectif d'augmenter le rendement des centrales solaires PV, le Photovoltaïque à Concentration (CPV) met en œuvre des cellules à haut rendement en les intégrant à des optiques de concentration pour composer un module. La concentration de la lumière a pour effet d'augmenter le rendement des cellules tout en diminuant leur quantité nécessaire [12]. Ce rapport de surfaces entre l'optique de concentration primaire et la surface des cellules définit le facteur de concentration géométrique d'un module CPV :

$$C_g = \frac{\text{Surface Optique}}{\text{Surface Cellule}} \quad \text{Eq. 0.1}$$

Les cellules à haut rendement mises en œuvre dans le CPV sont généralement des cellules solaires multi-jonctions (MJSC), composées de sous-cellules connectées en série absorbant chacune une partie différente du spectre solaire. La Figure 1.6 compare leur réponse spectrale à celle d'une cellule simple jonction en Silicium [14].

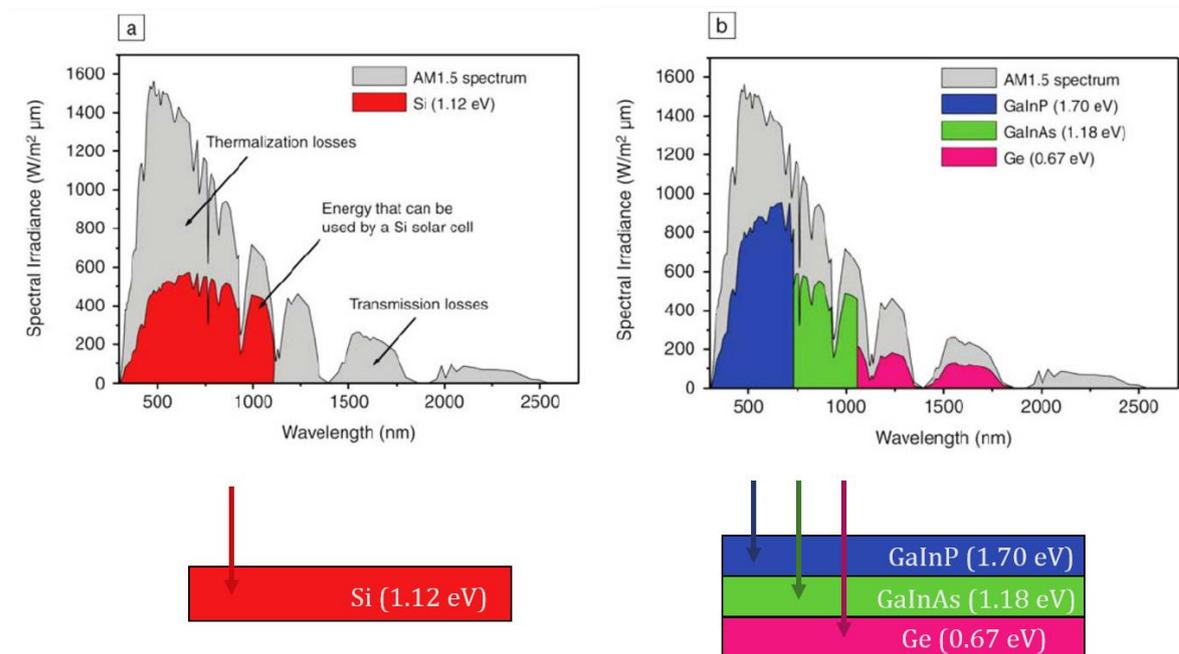


Figure 1.6 : Absorption du spectre solaire pour une cellule PV simple jonction en Silicium à gauche et une cellule multi-jonction avec des matériaux III-V à droite [14].

Pour concentrer la lumière sur ces cellules MJSC, les optiques de concentration peuvent être réfractives (lentilles de Fresnel), ou réfléchives (miroirs). Dans les deux cas, le but de ces optiques est de concentrer le flux lumineux du soleil sur la cellule avec le minimum de pertes et en conservant le spectre solaire de la Figure 1.6. L'optique focalise la lumière directe du soleil sur la cellule, le rayonnement diffus de l'atmosphère n'est pas collecté. Dans la norme photovoltaïque IEC-60904, ce rayonnement direct (DNI, Direct Normal Irradiance) est formé par le disque solaire décrit par la Figure 1.7. Le cône formé par les rayons incidents forme un angle de $\pm 0,27^\circ$ et correspond à 90% de la puissance solaire reçu sur terre dans les conditions atmosphériques de la norme CSOC (Concentrated Standard Operating Conditions). En effet, dans ces conditions le rayonnement DNI apporte 900W/m^2 avec le spectre AM1.5.

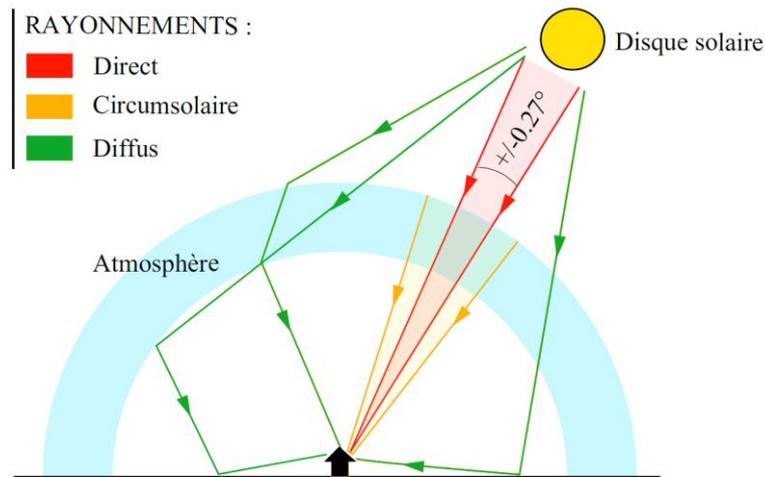


Figure 1.7 : Représentation schématique du rayonnement solaire direct, circumsolaire et diffus incident sur terre

Afin de récolter le rayonnement direct du soleil, les modules CPV doivent être installés sur un système qui suit la course du soleil. Les *trackers* peuvent être mobiles selon un ou deux axes et sont soit intégrés au module, soit indépendants. La précision de ces systèmes de suivi est de l'ordre de $\pm 0,1^\circ$ dans l'état de l'art. Cette valeur est un paramètre important dans la conception des optiques de concentration car les optiques doivent tolérer ces erreurs de tracking. Cette tolérance est quantifiée par l'angle d'acceptance, c'est-à-dire l'angle minimum que le module doit avoir par rapport à la direction du soleil pour fournir 90% de sa puissance nominale.

Les performances des modules CPV sont mesurées avec leur rendement, c'est-à-dire le rapport de la puissance électrique délivrée en sortie sur la puissance lumineuse reçue par module. Les rendements sont mesurés dans des conditions d'environnement et d'éclairement normées comme le CSOC pour les mesures extérieures.

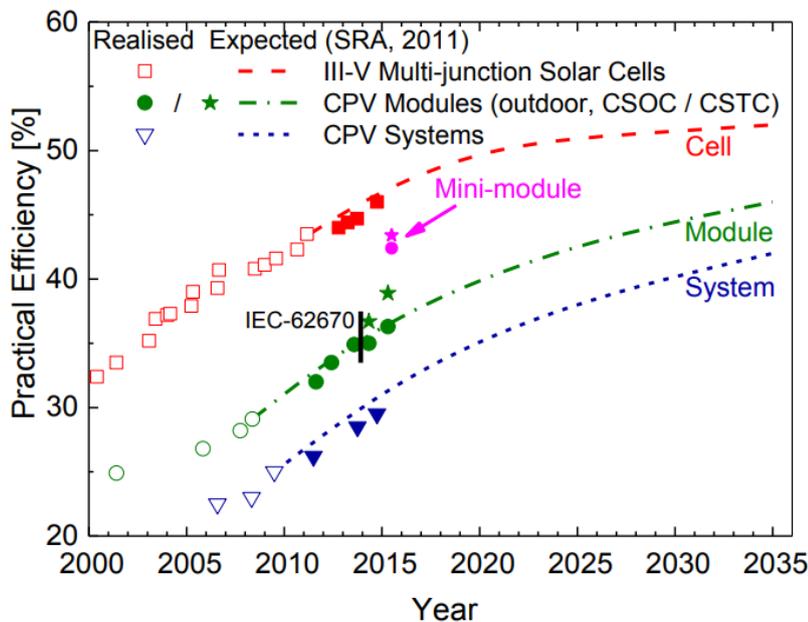


Figure 1.8 : Evolution des rendements cellules, module et systèmes CPV mesurés et prévus en fonction du temps [15].

La Figure 1.8 montre l'évolution des rendements des cellules nues, des modules et des systèmes complets avec tracker et onduleur intégrés [15]. Le décalage important entre les cellules et les modules correspond aux pertes générées lors de l'intégration des optiques et de la fabrication des modules. Cet écart, quantifié par le Cell-To-Module ratio (CTM) est de l'ordre de 65% à 80% dans l'état de l'art CPV. C'est-à-dire que la mise en module entraîne 20% à 35% de pertes en efficacité par rapport au fonctionnement de la cellule nue.

1.3 La micro-concentration Photovoltaïque

Le marché actuel de la Concentration PhotoVoltaïque (CPV) tend à réduire la taille des modules. De nombreux projets de recherche voient le jour avec comme objectif, le développement de modules mettant en œuvre des cellules inférieures à un millimètre de côté. En 2015 aux Etats-Unis par exemple, l'agence de financement ARPA-E a créé le programme MOSAIC (Micro-scale Optimized Solar-cell Arrays with Integrated Concentration)[16]. Les instituts bénéficiant de ce financement ont pour objectif de développer des modules μ -CPV avec un rendement supérieur à 30%, une épaisseur inférieure à 2,5cm et un coût de fabrication inférieur à 150\$/m². Certes, le prix de fabrication des modules en silicium monocristallins (c-Si) est actuellement de 45\$/m² mais leur rendement n'est que de 17,5% en moyenne [17]. En réduisant le coût de fabrication des modules à haute efficacité comme les modules CPV, l'objectif est de faire diminuer le LCOE afin de le rendre compétitif avec celui du PV monocristallin, leader sur le marché. Le LCOE, qui est le coût actualisé de l'énergie en \$/kWh, est calculé en fonction du coût de l'installation, des frais annuels de fonctionnement et d'entretien, du taux d'intérêt réel des investissements et aussi de la quantité d'énergie produite par année. Par exemple, pour des centrales CPV à grande échelle (10MW) et dans une zone fortement irradiée (2000kWh/m² par an), le LCOE valait entre 0,10€/kWh et 0,15€/kWh. En comparaison, pour une centrale PV c-Si à grande échelle également dans une zone fortement ensoleillée (2000kWh/m² par an), il était compris entre 0,06€/kWh et 0,10€/kWh [18]. La stratégie de miniaturisation vise une rupture technologique dans la fabrication des modules CPV en intégrant des procédés de fabrications issus des micro-technologies. Ces procédés sont largement éprouvés pour de la production de masse ce qui permettra de réduire de façon significative et rapidement les coups de fabrication des modules μ -CPV [19]. Un autre marché potentiel pour le μ -CPV concerne les cas où la surface disponible pour les installations solaires est réduite, par exemple en toiture (BIPV) ou en toiture de voiture (CIPV), le rendement est un critère de choix pour les modules. Par ailleurs la miniaturisation permet également de s'affranchir de certaines contraintes telles que la gestion thermique ou la réduction du poids [20]. En outre, la miniaturisation des modules CPV introduit également de nouvelles contraintes sur le rendement, un autre paramètre important du LCOE, que nous détaillerons dans le prochain chapitre. Plus précisément, nous allons nous intéresser plus particulièrement au rendement des modules μ -CPV et à la compréhension des pertes qui le limite. Cette analyse permettra d'identifier les sources de pertes dans la mise en œuvre d'un μ -CPV qui devront donc faire l'objet d'une attention particulière. Cette identification est la première étape qui a permis de conduire ces travaux de thèse dont l'objectif est la compréhension et la maîtrise des phénomènes optiques permettant de définir le meilleur compromis entre coût de fabrication peu élevés et efficacité maximale.

Dans un premier temps, un état de l'art de la micro-concentration PV est réalisé et identifie les pertes introduites lors de la mise en module. Ensuite, un procédé innovant de fabrication des modules est proposé. Basé sur le moulage auto-alignant de deux étages de lentilles, ce procédé permet de fabriquer un micro-concentrateur en trois étapes au lieu de cinq. La description du principe est détaillée et une étude théorique de ses performances en fonction de l'alignement des éléments du concentrateur est effectuée (Cellule, POE et SOE). Ensuite, un module μ -CPV avec une concentration de 1000X et des cellules de $0,6 \times 0,6 \text{ mm}^2$ est réalisé puis caractérisé. La qualité du procédé de fabrication est jugée en fonction de son rendement et de son angle d'acceptance. D'autres expériences sont également effectuées pour comprendre la chaîne de pertes du module plus en profondeur.

Etat de l'art

2.1 La micro-concentration

2.1.1 Composition d'un micro-concentrateur

De la même manière qu'un concentrateur de taille habituelle, un micro-concentrateur est composé d'une optique primaire (POE), d'une éventuelle optique secondaire (SOE) et d'une cellule photovoltaïque. L'ensemble SOE + cellule + circuit de connexion forme le récepteur du concentrateur. Chaque concentrateur est assemblé en module. L'ensemble des lentilles primaires forme le parquet de lentilles et les récepteurs sont connectés en série-parallèle, en fonction du besoin en courant et tension. Les modules sont ensuite installés sur des suiveurs solaires ou trackers en anglais. Tout ceci est illustré dans la Figure 1.5 du chapitre d'introduction, issue de la norme IEC 62108 [13].

La taille des modules μ -CPV est bien inférieure à celle de modules CPV mais les composants décrits ici ont la même fonction. Dans ce chapitre, le fonctionnement de chaque élément est décrit en détail afin de comprendre les phénomènes qui génèrent des pertes du CTM.

2.1.2 Particularité des micro-concentrateurs

Basés sur le même principe que les modules CPV, les modules μ -CPV ont simplement des dimensions plus petites. Typiquement, la largeur d'une MJSC ne dépasse pas un millimètre, l'optique primaire est de quelques centimètres de côté, du même ordre de grandeur que l'épaisseur du module. La Figure 2.1 ci-dessous représente les principales différences entre un module CPV et μ -CPV. En plus des dimensions qui varient, la face arrière des micro-concentrateurs n'est pas équipée d'un dissipateur thermique. La petite surface de collection des lentilles réduit la quantité de chaleur à évacuer [21]. Les pistes métalliques qui connectent les cellules en série suffisent à dissiper la chaleur des pertes de conversion de la cellule.

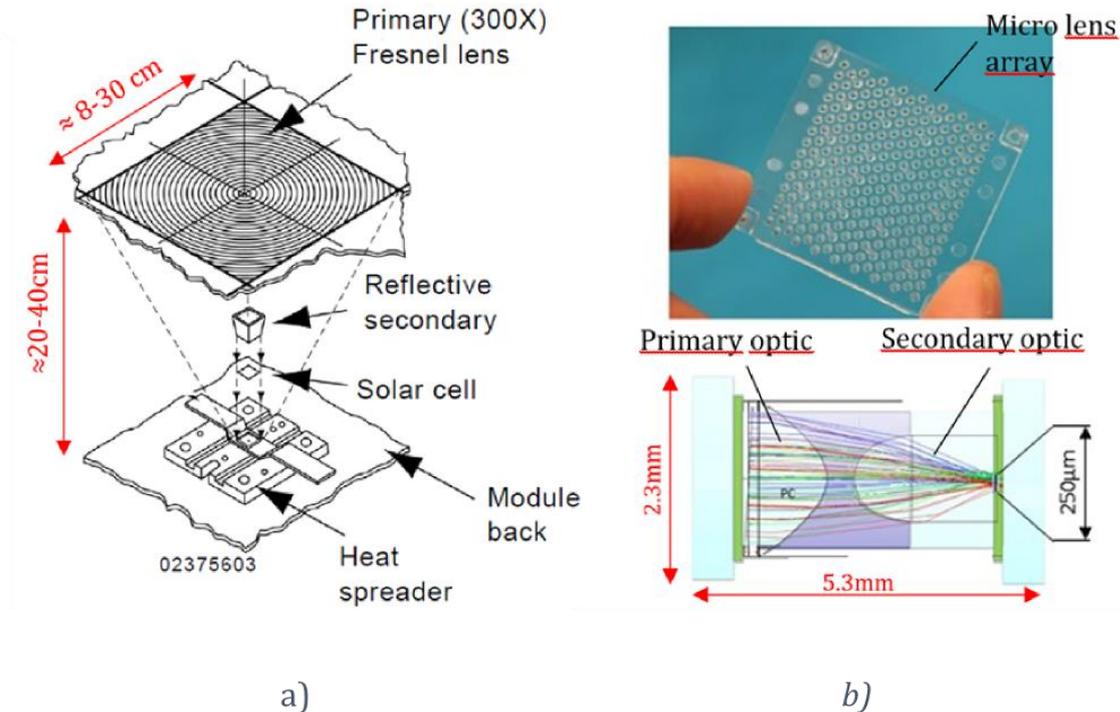


Figure 2.1 a) Schéma d'un concentrateur PV de quelques dizaines de centimètre d'épaisseur [13]; b) Photographie et schéma d'un micro-concentrateur de quelques mm d'épaisseur [22]

Dans une démarche de réduction des coûts, les dimensions plus petites diminuent la quantité de matériaux nécessaires pour la fabrication des modules μ -CPV. D'autre part, les procédés utilisés se rapprochent de ceux de la micro-électronique, peu coûteux et très précis [23].

La plupart des modules μ -CPV ne sont pas encore commercialisés et leur constitution n'est pas standard. Tout comme la forme de l'optique de concentration, les structures mécaniques sont très variables. De la Figure 2.2 à la Figure 2.6, trois types de modules μ -CPV pour lesquels le maintien de la distance focale et de l'alignement des composants présentent des contraintes différentes sont illustrés. Le module de Panasonic (cf Figure 2.2) est un bloc de 19mm de hauteur et de 50mm \times 50mm au total. La concentration du module est de 277X avec des cellules de 600 μ m \times 600 μ m. Le parquet de lentille est directement collé sur le circuit imprimé qui connecte les cellules. L'épaisseur des différents composants optiques assure le maintien de la focale et l'alignement des composants est géré lors du collage [24].

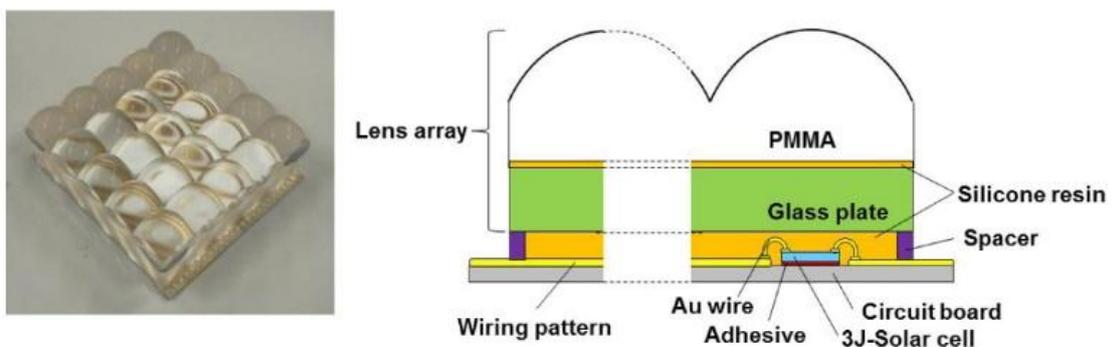


Figure 2.2 : Module micro-concentrateur de Panasonic. Lentille convergente de 277X directement attachée aux cellules de 600 μ m de côté [24].

A la différence de celui de Panasonic, le micro-module de Sandia National Laboratory représenté sur la Figure 2.3 possède un système à deux optiques avec des dimensions plus petites [22]. En effet, ce module est également compact avec un empilement de matériaux directement collés sur le circuit imprimé et des cellules de $250\mu\text{m}$ de diamètre seulement. Pour un facteur de concentration de 100X, les lentilles de 2,5mm de diamètre sont alignées lors du collage également.

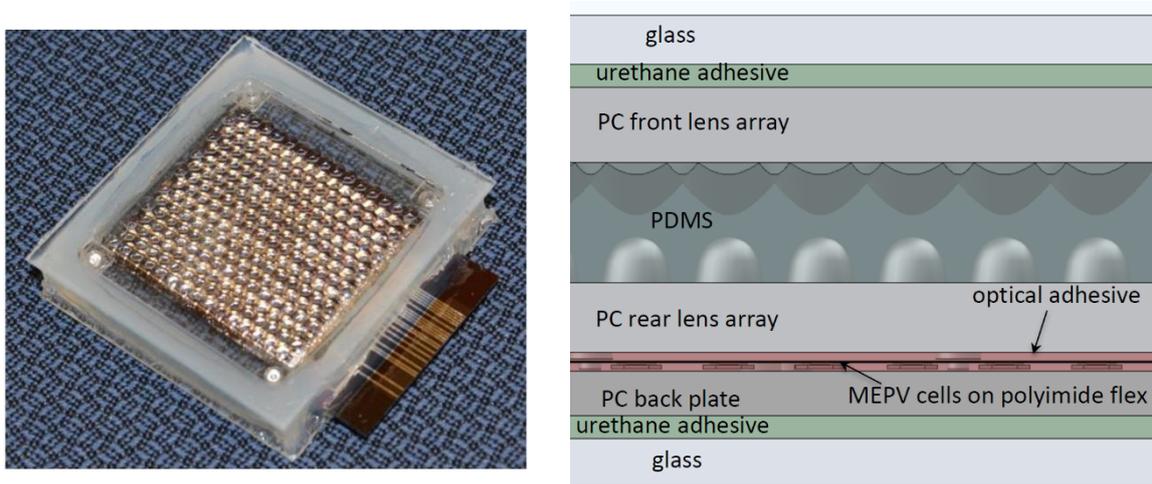


Figure 2.3 : Microsystem Enabled Photovoltaics (MEPV), le micro-module de Sandia National Laboratory avec double étage de lentilles sans vide, d'une concentration de 100X avec des cellules de $250\mu\text{m}$ de diamètre [22].

En 2016, une startup de l'EPFL Insolight, présente un module équipé d'un micro-tracking séparant l'étage de lentilles primaire du récepteur (Figure 2.4). Un système de déplacement de l'étage des lentilles primaires permet d'assurer le suivi du soleil au long de la journée. Ce module n'ayant pas besoin de tracker, il est très intéressant pour des applications de solaire en toiture puisque la puissance surfacique développée est élevée et le système compact. Le facteur de concentration est de 190X avec des cellules de $600\mu\text{m} \times 600\mu\text{m}$ [25].

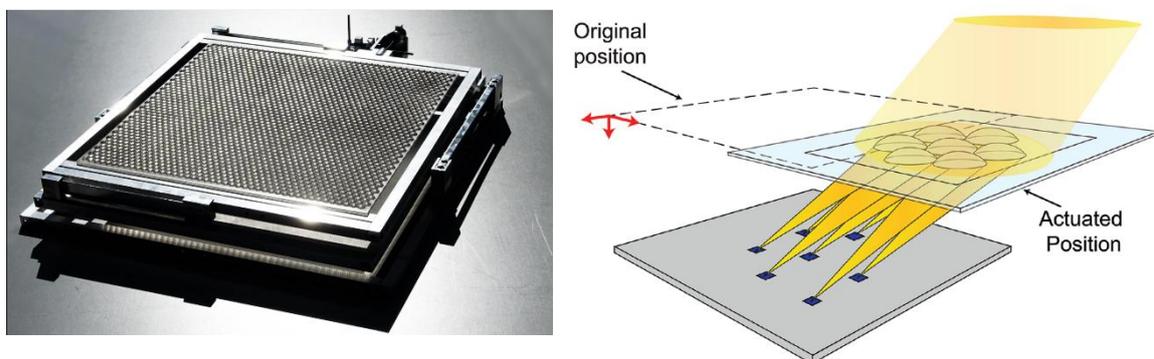


Figure 2.4 : Module micro-tracking d'Insolight avec une seule optique convergente mouvante pour suivi du soleil de 190X avec des cellules de $600\mu\text{m}$ [26].

A la différence des modules μ -CPV précédents, ceux de Semprius ont un facteur de concentration beaucoup plus élevé : 1111X (cf Figure 2.5). Les cellules sont encore de $600\mu\text{m}\times 600\mu\text{m}$ avec une bille en verre de quelques millimètres de diamètre en optique secondaire. Avec un facteur de concentration beaucoup plus élevé, les dimensions et la distance focale des lentilles primaires sont aussi beaucoup plus grandes que pour les systèmes précédemment décrits. Dans ces modules commerciaux, une lentille primaire fait 20mm de côté et une distance focale de 60mm [27].

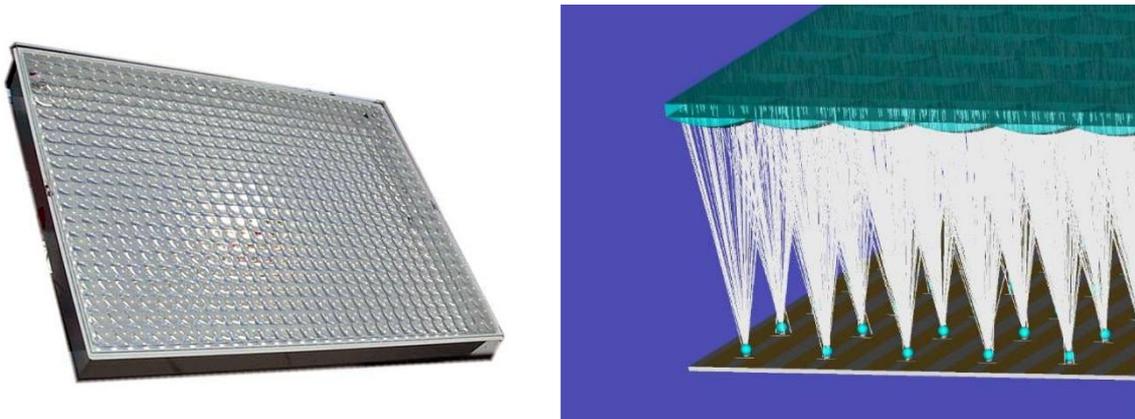


Figure 2.5 : Module micro-concentrateur de Semprius. Les cellules font $600\mu\text{m}\times 600\mu\text{m}$ et le facteur de concentration est de 1111X avec deux étages de lentilles [28].

Pennsylvania State University développe un module compact avec tracking intégré représenté sur la Figure 2.6. Le concentrateur est composé de micro-lentilles avec réfraction primaire et réflexion secondaire d'une concentration allant de 255X à 743X en fonction des modules. Les cellules sont de $700\mu\text{m}\times 700\mu\text{m}$. Ce type de module, les modules « RX », ont la particularité de devoir placer leur cellule au centre de l'optique. Le « R » en première position indique que la surface d'entrée du dispositif est réfractive ; le « X » en seconde position indique que la surface secondaire est réfléchive. Le tracking est effectué en faisant glisser la cellule sur un verre à l'intérieur de l'empilement de polymères optiques [29].

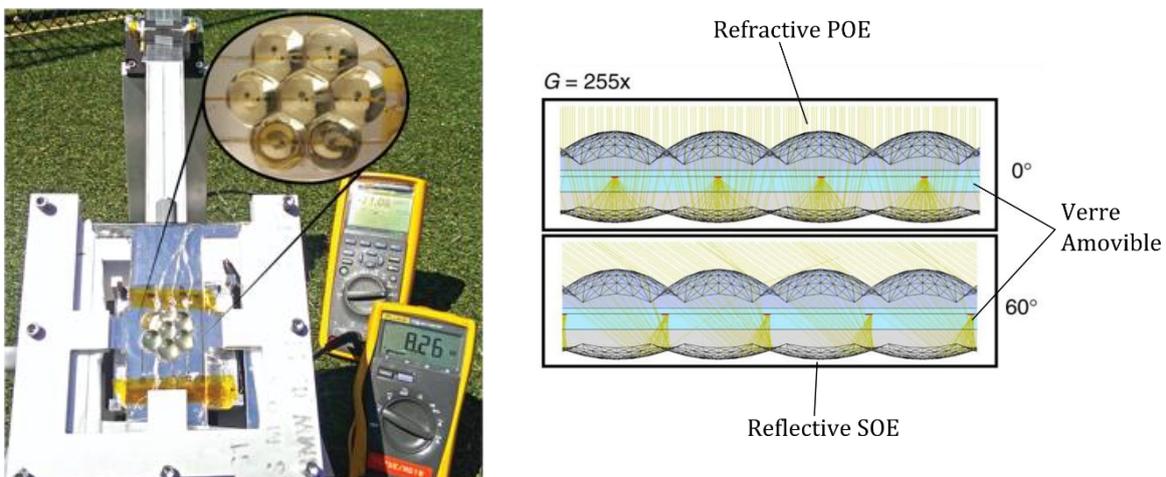


Figure 2.6 : Le planar micro-tracking de Penn State University. La concentration est de 255X et les cellules de $700\mu\text{m}\times 700\mu\text{m}$ [29].

Pour conclure, les designs optiques et mécaniques des μ -CPV de l'état de l'art sont très différents. Leur facteur de concentration, le nombre d'éléments ainsi que la technologie optique jouent un rôle important dans le dimensionnement des structures des modules. Les modules μ -CPV ont des épaisseurs comprises entre quelques millimètres et 6 ou 7 cm. Leur compacité permet à la fois d'implémenter des systèmes de tracking intégrés mais aussi d'éviter l'utilisation de lentilles de Fresnel, moins efficaces que des lentilles classiques [30]. Un autre avantage de la micro-concentration serait de pouvoir utiliser des procédés à grande échelles issus de la micro-électronique pour la fabrication des récepteurs. Ces procédés, déjà bien développés, peuvent introduire les micro-concentrateurs directement dans un marché de masse.

2.1.3 Le rapport Cell-to-Module

Dans cette section, les différentes technologies de micro-concentrateurs PV sont comparées par rapport à leurs performances électriques. Le paramètre de comparaison le plus pertinent pour juger de la qualité des modules est le Cell-To-Module ratio (CTM), c'est-à-dire le rapport de l'efficacité du module sur celui de la cellule comme défini dans l'Eq. 0.1 ci-dessous :

$$CTM = \frac{\text{Efficacité Module (\%)}}{\text{Efficacité Cellule (\%)}} \quad \text{Eq. 0.1}$$

Dans le CTM, il est important de préciser les conditions de mesures d'efficacité. Les conditions retenues pour la comparaison des μ -CPV du Tableau 1 sont celles spécifiées par la norme IEC 62670-3. Cette norme définit les « Concentrated Standard Test Conditions » (CSTC) qui spécifient d'avoir un éclairement de $1000\text{W}/\text{m}^2$, le spectre solaire AM1.5D et une température de 25°C . Les conditions d'intensité et de spectre seront décrites plus précisément un peu plus tard. Comme les cellules et les modules sont mesurés à 25°C , les pertes décrites dans ce chapitre sont également valables à cette température seulement. L'effet de la température est très variable selon chaque perte décrite dans ce chapitre. Par ailleurs, comme l'efficacité d'une cellule est dépendante de l'éclairement incident, les cellules sont mesurées avec la même concentration que celle du module soit ici $C_g \times 1000\text{W}/\text{m}^2$. C_g étant le facteur de concentration du module défini dans l'Eq. 1.1 du chapitre d'introduction. Le Tableau 1 ci-dessous compare huit micro-modules CPV selon leurs principales caractéristiques (facteur de concentration, taille et nombre de cellules) ainsi que leurs performances électriques.

La Figure 2.7 ci-dessous représente l'efficacité de chaque module μ -CPV du Tableau 1 en fonction de son CTM ainsi que le facteur de concentration. Cette représentation montre que les modules les plus efficaces sont ceux qui ont le CTM le plus élevé donc ceux qui ont le moins de pertes. Il est à noter que le facteur de concentration n'a pas d'impact sur l'efficacité du module en regard du CTM.

Tableau 1 : Les modules μ -CPV de l'état de l'art et leur principales caractéristiques.

Ref	Nom du module	Concentration (Suns)	Cell-to-module Ratio (%)	Efficacité Module (%)	Surface de la Cellule (mm ²)	Nombre de cellules	Date
[31]	Panasonic 2015	150	83,7	35,5	0,672	5×5	2015
[26]	Micro-tracking Insolight	190	86,7	36,4	0,6×0,6	7	2016
[32]	μ -X 275X CEA-INES	275	79,8	29,7	0,9×0,9	4×4	2016
[24]	Panasonic 2014	277	81,8	34,7	0,6×0,6	5×5	2014
[33]	Micro-tracking Penn State	743	71,4	30	0,65×0,65	1	2017
[34]	μ -X 1000X CEA-INES	1000	78,8	33,4	0,6×0,6	1	2017
[27]	Semprius 3J	1111	85,1	34,9	0,6×0,6	22×30	2016
[35]	Semprius Illinois 4J	1111	83,1	36,5	0,6×0,6	1	2014

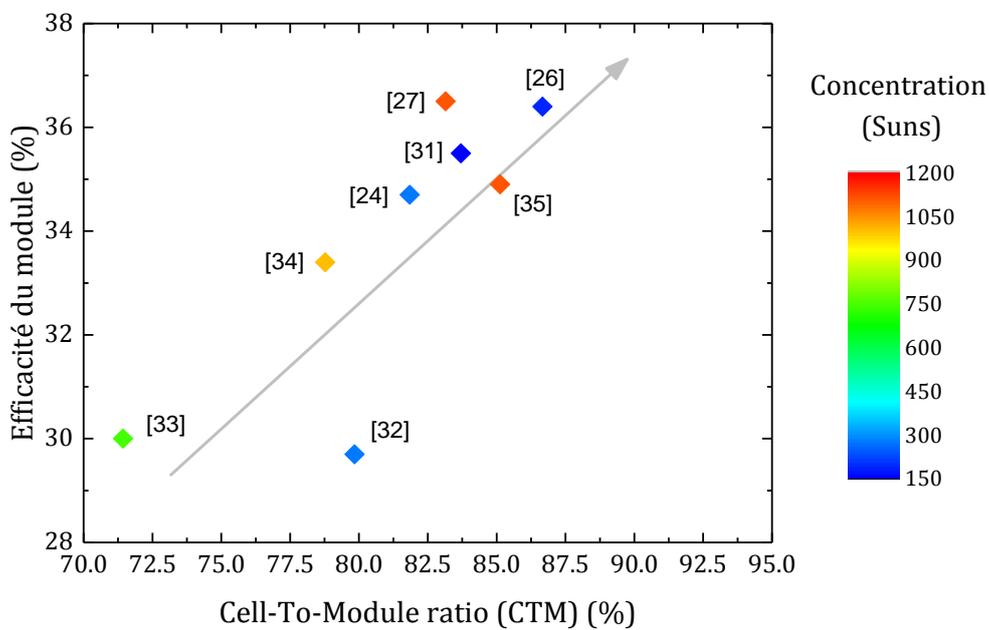


Figure 2.7 : Efficacité des modules de l'état de l'art en fonction de leur CTM.

2.2 L'optique de concentration

Un concentrateur solaire focalise la lumière sur une surface absorbante. Que ce soit pour produire de la chaleur ou de l'électricité, l'objectif est de maximiser la puissance lumineuse reçue par l'absorbeur. Pour maximiser cette densité de puissance, il faut concentrer le rayonnement solaire tout en limitant les pertes. De plus, du fait de l'imperfection des trackers, l'optique de concentration doit tolérer un dépointage d'au moins $\pm 0,1^\circ$ par rapport à la direction du soleil. Comme 98% de la lumière du soleil est comprise dans un cône de $\pm 0,27^\circ$, l'angle d'acceptance minimum que doit admettre un module est d'environ $\pm 0,4^\circ$. La norme IEC 62670 définit cet angle comme étant l'angle maximum d'inclinaison par rapport à la direction du soleil pour lequel le module fournit 90% de sa puissance maximale [36]. De plus, comme les cellules MJSC absorbent différentes parties du spectre solaire, la balance spectrale doit être conservée. En somme, le système optique d'un concentrateur doit concentrer la lumière du soleil sans pertes de puissance ni déformation du spectre et doit avoir un angle d'acceptance de $\pm 0,4^\circ$ minimum.

2.2.1 Etat de l'art des optiques de concentration

Sans rentrer dans le détail de leur conception optique, une sélection des principaux designs de micro-concentrateurs est présentée ici. La Figure 2.8 montre les vues en coupe des micro-concentrateurs de Panasonic [31], de Semprius [27] et Pennsylvania State University [33] référencés dans le Tableau 1. Le micro-concentrateur de la Figure 2.8.a) est une simple optique réfractive directement collée à la cellule. Ce type d'optique est utilisé pour les concentrations inférieures à 300X. La Figure 2.8.b) illustre la configuration la plus classique en CPV. Ce concentrateur à deux étages comporte une lentille convergente en optique primaire (POE) et une optique secondaire (SOE). La POE joue le rôle de concentrateur alors que la SOE augmente l'angle d'acceptance et permet d'homogénéiser le flux sur la cellule [37]. Dans la micro-concentration, la faible épaisseur des lentilles traditionnelles évite l'utilisation de lentilles de Fresnel. Ces lentilles sont classiques en CPV mais génèrent des pertes optiques à cause de l'imprécision de fabrication des dents [30,38]. Enfin, la Figure 2.8 c) représente la famille de concentrateurs avec cellule intégrée dans l'optique de type « RX ».

Les trois types de concentrateurs représentés sur la Figure 2.8 ci-dessus sont représentatifs de l'ensemble des micro-concentrateurs du Tableau 1. Cette sélection de design optique donne un aperçu complet des possibilités et permet d'illustrer la compréhension des pertes dans les micro-concentrateurs.

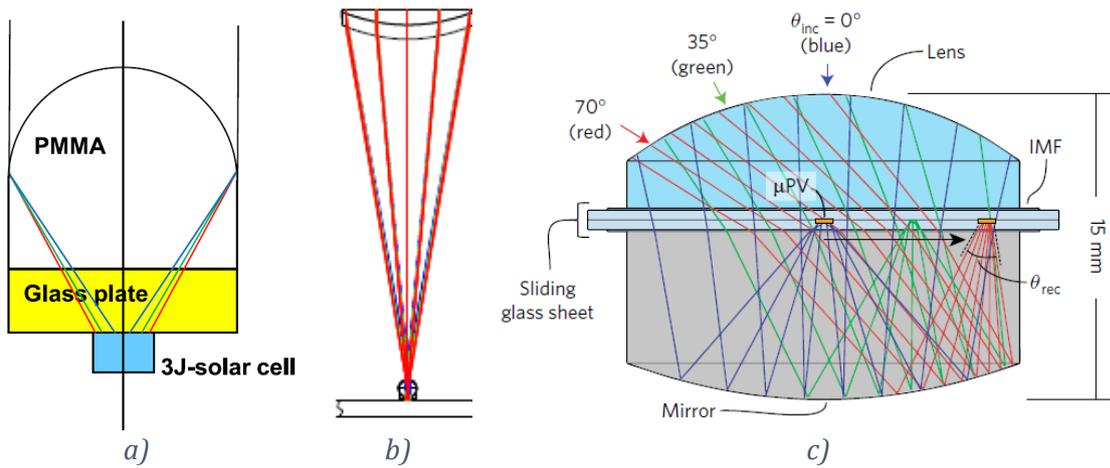


Figure 2.8 : Exemples de micro-concentrateurs à lentilles réfractives : a) un seul étage de lentilles 277X directement attachés aux cellules [31] ; b) double étage de lentilles 1111X [27] ; c) concentrateur RX (réfractif puis réflectif) 743X avec tracking intégré [33].

2.2.2 Perte optiques dans un micro-concentrateur

La concentration de la lumière sur des cellules MJSC grâce à des optiques à bas coût permet d'augmenter le rendement des cellules et d'économiser en surface de cellules par module. En revanche ces optiques introduisent des pertes de puissance non-négligeables. Dans cette section on fait l'inventaire des pertes de puissance lumineuses, lorsque le flux n'atteint pas la cellule. La Figure 2.9 ci-dessus représente l'ensemble des pertes considérées dans ce chapitre avec la définition de l'efficacité optique notée η_{optique} . Dans cette section sur les pertes optiques dans les modules μ -CPV, les pertes par réflexion et par absorption seront brièvement explicitées, puis le détail des « pertes diverses » dépendantes de la qualité des optiques seront explicitées plus en détail.

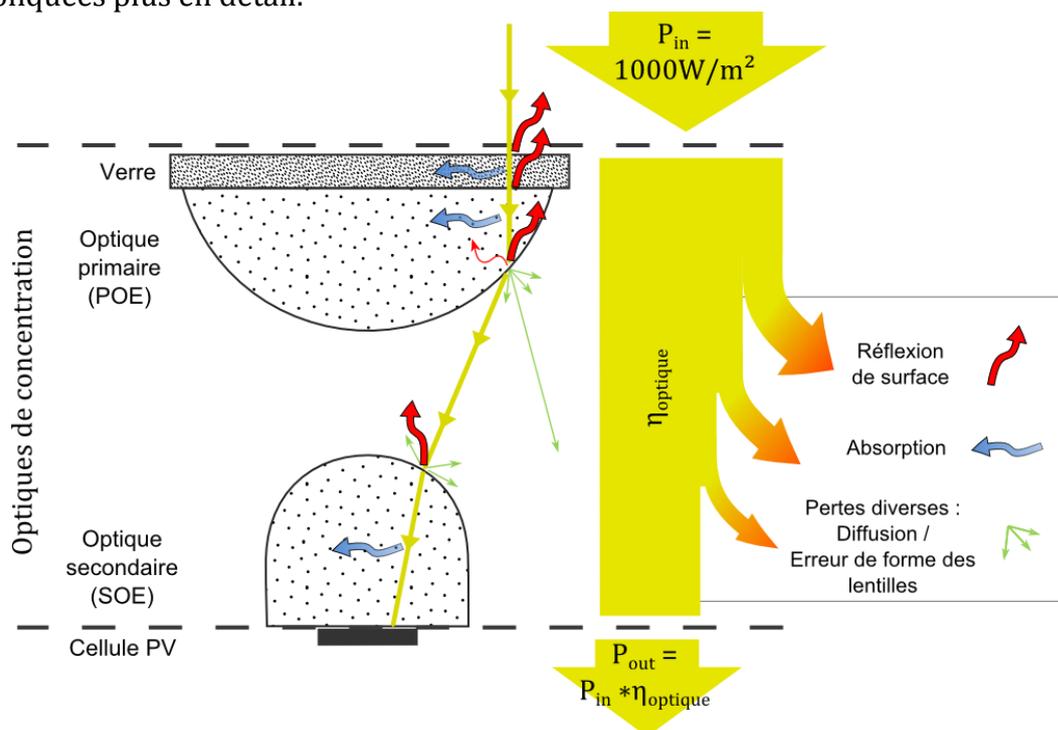


Figure 2.9 : Schéma des pertes optiques dans un micro-concentrateur.

2.2.2.1 Pertes par réflexion et absorption

Les pertes de puissance lumineuse par réflexion et absorption interviennent seulement dans les optiques réfractives. Les pertes par réflexion interviennent à chaque surface marquant un saut d'indice de réfraction. A incidence normale, la fraction de la puissance réfléchie se calcule en fonction des indices de réfraction des milieux incident (n_i) et transmis (n_t) d'après l'Eq. 0.2 [39]:

$$R_f = \left| \frac{n_i - n_t}{n_i + n_t} \right|^2 \quad \text{Eq. 0.2}$$

Les indices de réfraction n_i et n_t dépendent de la longueur d'onde considérée. Typiquement, à l'interface air-verre et pour une incidence normale des rayons, ces pertes sont de l'ordre de 4%. Elles peuvent être réduites par l'ajout d'une couche antireflet (ARC pour Anti-Reflective Coating) sur l'optique primaire. C'est par exemple ce qu'a montré Panasonic en limitant les pertes de ce type à 2,2% sur l'unique interface air-PMMA du module μ -CPV de Panasonic [31]. A l'inverse, les modules à double étage de lentille perdent près de 10% du flux sans ARC.

L'absorption est une perte de puissance dans un milieu homogène et se calcule grâce à la loi de Beer-Lambert ci-dessous:

$$P_{out} = P_{in} e^{-\alpha L} \quad \text{Eq. 0.3}$$

La puissance P_{out} à la surface de sortie d'un milieu se calcule en fonction de la puissance à la surface d'entrée P_{in} , du coefficient d'absorption α ainsi que de la distance parcourue par la lumière entre les deux surfaces frontière du milieu. Le coefficient d'absorption qui dépend de la longueur d'onde est généralement donné pour un matériau par le fabricant ou dans la littérature. Par exemple, le coefficient d'absorption est $\alpha=0,0074\text{mm}^{-1}$ pour un verre à faible teneur en Fe [40], $\alpha=0,0097\text{mm}^{-1}$ pour du PMMA [41] et $\alpha=0,0021\text{mm}^{-1}$ pour du silicone transparent [42]. Dans un échantillon de 5mm d'épaisseur, ces pertes représentent respectivement 3,6%, 4,7% et 10%. Les pertes minimales et maximales de l'état de l'art en absorption sont respectivement de 0,87% et 7,6%.

2.2.2.2 Pertes diverses et qualité de fabrication

A l'inverse des pertes par réflexion et absorption qui dépendent des choix de matériaux et de conception, cette section décrit les pertes qui dépendent de la qualité de fabrication des lentilles. Ces pertes, n'ont pas le même impact sur l'efficacité optique selon le type de concentrateur étudié et l'amplitude de ses défauts. Dans cette section, le phénomène de diffusion lié aux rugosités de surface ainsi que la perte d'angle d'acceptance à cause des erreurs de pente sont expliqués.

2.2.2.2.1 Diffusion de surface

Les optiques moulées, usinées ou polies ne sont pas parfaitement lisses. Les rugosités de surfaces sont naturellement créées par les procédés de fabrication et génèrent de la diffusion. L'état de surface des optiques peut être qualifié par des techniques avec ou sans contact mécanique. A partir des mesures de profil de surface comme celui de la Figure 0.10, la distribution de hauteur des rugosités est estimée [43]. Généralement, les surfaces rugueuses sont caractérisées par la moyenne quadratique (RMS) σ_s de cette distribution. Par exemple, les miroirs ou les moules formés par usinage diamant peuvent avoir une erreur σ_s allant de quelques

centaines de micromètres, pour les surfaces brutes d'usinage, à quelques nanomètres pour les surfaces polies [44].

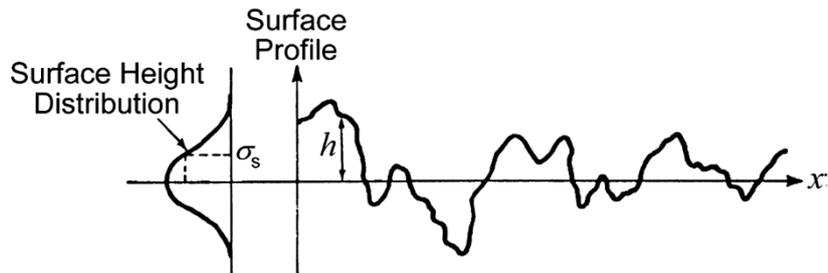


Figure 0.10 : Profile d'une surface rugueuse et distribution statistique de la hauteur des rugosités [43].

L'état de surface des lentilles est très variable selon la technique d'usinage et la technique de mesure employée. Devant la forte disparité des tailles moyenne de rugosité σ_s , de nombreux modèles avec des domaines de validités différents permettent de calculer la diffusion de la lumière par une surface rugueuse [45–47]. Néanmoins, ils permettent de qualifier la distribution angulaire du flux diffusé par une surface. La Figure 2.11 représente la diffusion dans le demi espace en réflexion, notée BRDF (Bidirectional Reflected Distribution Function), ainsi que la diffusion dans le demi espace en transmission, notée BTDF (Bidirectional Transmitted Distribution Function). A la différence du comportement balistique des rayons que l'on a vu dans la section 2.2.1, le flux est distribué angulairement à chaque passage par une surface rugueuse. Pour les optiques de concentration, l'angle pris par les rayons diffusés génère un étalement de la tache focale, allant jusqu'à la faire déborder de la surface de la cellule. La direction prédominante parmi les rayons diffusés est appelé *réflexion* ou *transmission spéculaire* et constitue une fraction de la puissance totale incidente. On note θ_i l'angle d'incidence de l'éclairement entrant, θ_r l'angle de la direction de la réflexion spéculaire et θ_t l'angle de la direction de la transmission spéculaire. Les fonctions BRDF et BTDF sont toutes deux données en sr^{-1} et représente la fraction de la radiance réfléchié ou transmise $L_{\text{réfléchié/transmise}}$ en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ par rapport à l'éclairement incident E_i exprimé en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$. La Figure 2.11 montre qu'une fraction de la lumière transmise ou réfléchié est diffusée dans toutes les directions alors que les composantes spéculaires suivent les lois de réflexion et transmission de l'optique géométrique.

$$L_{\text{Réfléchié}}(\theta_r; \lambda; E_i) = \text{BRDF}(\theta_i; \theta_r; \lambda) E_i(\theta_i; \lambda) \quad \text{Eq. 0.4}$$

$$L_{\text{Transmise}}(\theta_t; \lambda; E_i) = \text{BTDF}(\theta_i; \theta_t; \lambda) E_i(\theta_i; \lambda) \quad \text{Eq. 0.5}$$

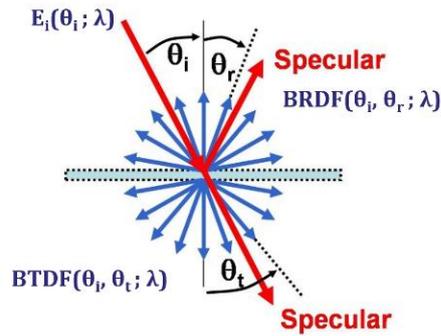


Figure 2.11 : Diffusion de surface en réflexion et en transmission respectivement définies par les fonctions BRDF et BTDF [45].

Pour connaître l'impact de la diffusion sur le rendement optique des concentrateurs, il faut intégrer les distributions angulaires des rayons diffusés dans les simulations par tracé de rayon. En effet, les pertes de flux lumineux à cause de la diffusion ont lieu seulement lorsque les rayons diffusés n'atteignent pas le récepteur. Actuellement, aucune publication de la littérature ne quantifie ces pertes en % du flux mais elles sont prises en compte dans les mesures de rendement optique [48]. Pour la compréhension du CTM, retenons simplement que l'effet de la diffusion dépend de l'état de surface des optiques, de l'angle d'incidence d'un rayon sur cette surface, de la longueur d'onde et des paramètres géométriques d'un concentrateur.

2.2.2.2.2 Pertes par erreur de forme des lentilles

La seconde perte dépendante de la qualité de fabrication est la perte due aux erreurs de forme des optiques. Contrairement à l'état de surface, les déformations du profil de la lentille sont très grandes par rapport à la longueur d'onde. Ces erreurs de géométrie dévient les rayons de leur trajectoire idéale. Lorsque l'amplitude des déformations est trop grande, les rayons sont déviés à côté de la cellule. L'amplitude des déformations peut être quantifiée grâce à des profilomètres optiques ou mécaniques, les premiers ayant l'avantage d'être non-destructifs [49]. A partir des mesures de profil des optiques et de la même manière que pour l'état de surface, l'erreur quadratique moyenne du profil est déterminée. Comme la direction des rayons réfractés ou réfléchis par une surface dépend des angles d'incidence par rapport à la normale à la surface, l'erreur quadratique σ_{pente} est calculée pour la distribution des erreurs angulaires du profil. Basés sur l'erreur angulaire statistique σ_{pente} et la conservation de l'étendue géométrique, un modèle stochastique permet de calculer la transmission angulaire des concentrateurs déformés [50]. Par exemple, la Figure 2.12 représente la transmission angulaire d'un concentrateur XR (miroir primaire et diélectrique secondaire) de 34X pour différentes valeurs de σ_{pente} données en mrad. Sur ces courbes, l'influence de l'erreur de pente sur l'angle d'acceptance d'un module est frappante. L'efficacité optique à incidence normale est affectée pour $\sigma_{\text{pente}} > 4 \text{ mrad}$.

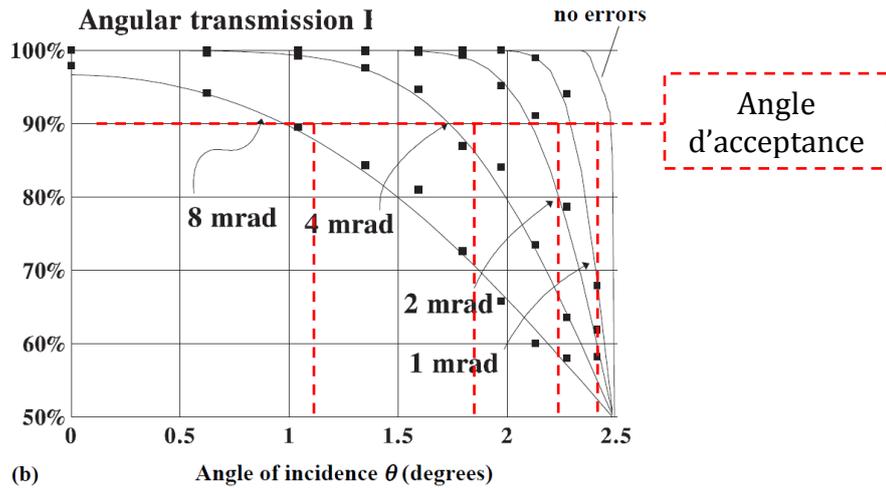


Figure 2.12 : Transmission d'un concentrateur de 34X pour différentes valeurs d'erreur de pente moyenne σ_{pente} tracées en fonction de l'angle d'incidence des rayons sur l'optique primaire [50].

Comme l'angle d'acceptance est un objectif de performance d'un module, ces modèles permettent également de déterminer l'erreur maximale tolérée pour garantir l'angle d'acceptance souhaité. La Figure 2.13 ci-dessous, compare les σ_{pente} maximum garantissant un angle d'acceptance de $\pm 0,75^\circ$ pour différents concentrateur et deux valeurs de concentration. Parmi les concentrateurs, la «Parabola» est un simple miroir parabolique, sans optique secondaire. Les concentrateurs CPC (voir la Figure 2.8) sont soit purement réflectifs pour « CPC », soit en réflexion totale-interne pour le « Solid CPC ». Les autres concentrateurs, « XR, RXI et RX » sont une combinaison d'optiques réfléchives et réfractives. Dans ces concentrateurs, la notation « X » en première position indique que l'optique primaire est un miroir. A l'inverse, un « R » en seconde position indique que l'optique secondaire est réfractive. Dans l'étude de ces différents concentrateurs, on fait l'hypothèse que l'erreur σ_{pente} est identique sur chaque surface du dispositif. Finalement, on remarque que les tolérances aux erreurs géométriques des concentrateurs chutent en fonction de la concentration, quelle que soit la géométrie de l'optique.

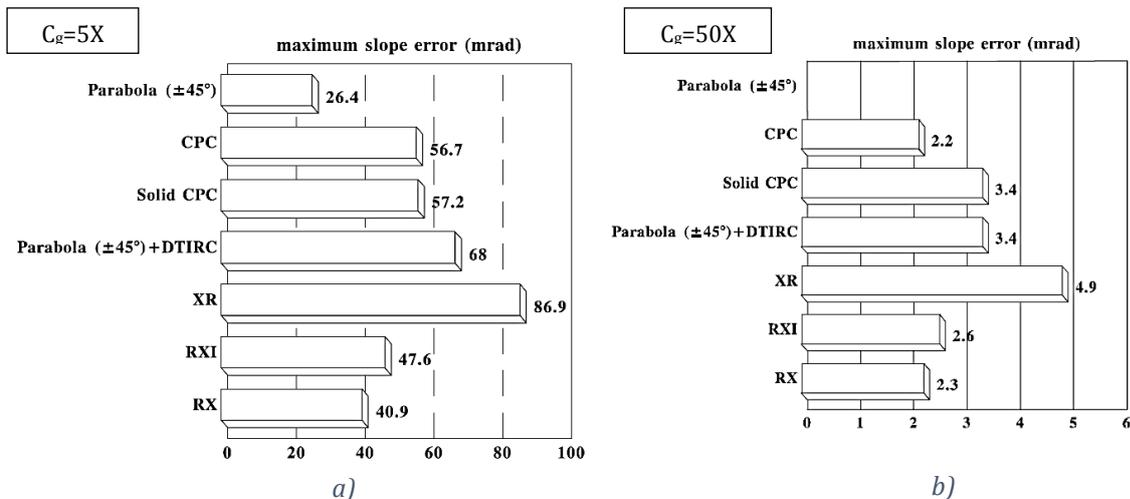


Figure 2.13 : Comparaison de l'erreur de pente maximum σ_{pente} tolérée pour obtenir un angle d'acceptance de $\pm 0,75^\circ$ sur plusieurs technologies de concentrateurs. a) Concentration de 5X b) Concentration de 50X [50].

Pour conclure sur les erreurs de géométrie des optiques, chaque technologie de concentrateur doit être étudiée séparément pour connaître la tolérances aux déformations de ses optiques. La forme des optiques, le facteur de concentration ainsi que la réfraction ou la réflexion ont une influence sur les tolérances aux erreurs de forme d'un concentrateur. Les études publiées sur cette erreur de forme montrent néanmoins que les tolérances aux déformations chutent avec le facteur de concentration [51]. Dans le meilleur des cas, une déformation de l'optique n'a aucune influence sur le CTM, seul l'angle d'acceptance est affecté. En revanche, pour une déformation trop importante, un pourcentage du flux peut être perdu à incidence normale. C'est le cas pour $\sigma_{\text{pente}} = 8$ mrad sur l'exemple de la Figure 2.12 ou 4% du flux est perdu à incidence normale.

2.3 L'assemblage des modules micro-concentrateurs

De la même manière que pour les déformations du profil des optiques, les structures mécaniques peuvent être déformées. Les déformations de structure mécanique désalignent les éléments optiques et induisent des pertes en angle d'acceptance et *a fortiori*, des pertes de flux [52]. Les schémas de la Figure 2.14 ci-dessous illustrent les défauts d'alignement ou de maintien de la focale qui peuvent générer des pertes. Les cellules peuvent être décalées sur le côté dans le plan focal, elles peuvent également être inclinées, la distance lentille-cellule trop courte ou trop grande et les lentilles peuvent aussi être désaxées [53].

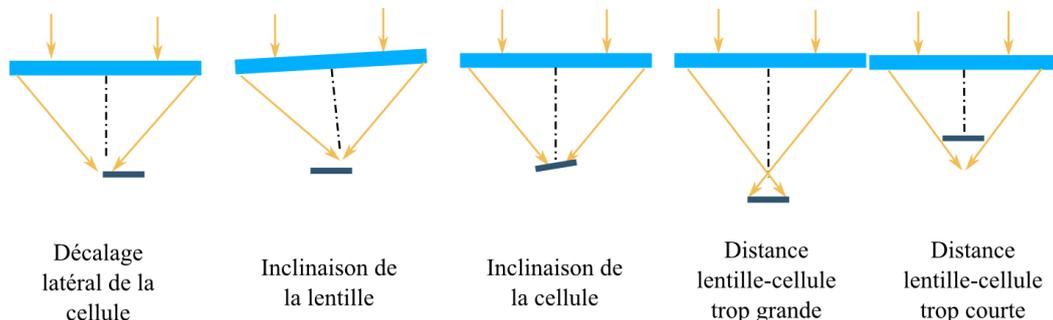


Figure 2.14 : Défauts d'alignement mécaniques possible dans un micro-concentrateur.

La structure mécanique d'un module μ -CPV doit limiter les déplacements possibles en fonction des tolérances au désalignement du dispositif optique. Comme les degrés de libertés d'un système à plusieurs optiques sont nombreux, le tolérancement mécanique doit être associé à une étude de sensibilité [54,55]. Ces études n'ont été menées que pour des concentrateurs de taille normale. Les angles étant conservés dans les micro-concentrateurs, les tolérances optiques sont proportionnellement plus petites. Par ailleurs, l'étude des tolérances mécaniques des micro-concentrateurs n'est pas effectuée ici pour ceux qui possèdent un système de tracking intégré.

Pour les micro-concentrateurs à structure fixe, la perte d'angle d'acceptance à cause d'un désalignement est plus importante pour les modules à haute concentration. Peu d'études des tolérances ont été menées sur les micro-concentrateurs en dehors de celle de Menard *et al.* sur les désalignements de leur

optique secondaire par rapport à la cellule [56]. Dans cette étude sur les module 1111X de Semprius avec une bille en optique secondaire, un décalage latéral de 50µm de l'optique secondaire par rapport à la cellule entraîne une perte de 1% sur l'efficacité. Si ce décalage est de 75µm, la perte est de 3%. La Figure 2.15 illustre les pertes liées à ce décalage en fonction du décalage en unité arbitraire non précisée par l'auteur [56].

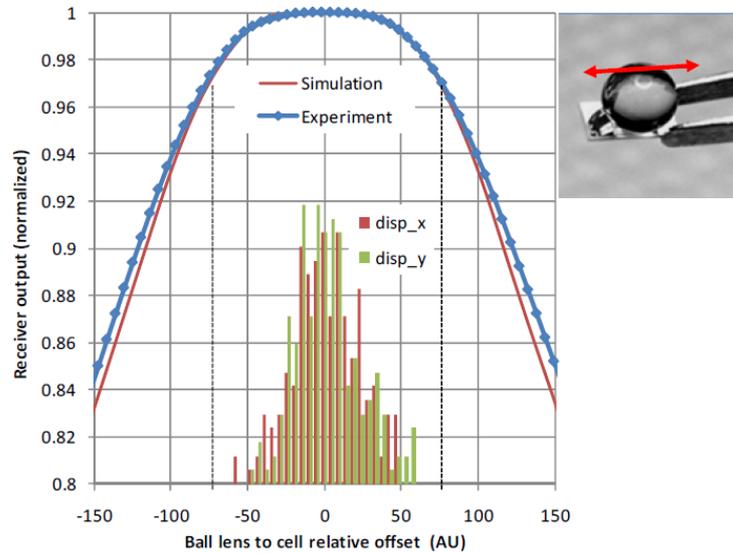


Figure 2.15 : Efficacité optique d'un concentrateur en fonction du décalage latéral de l'optique secondaire par rapport à la cellule. On représente également l'histogramme des décalages latéraux sur un échantillon de 200 récepteurs [56].

2.4 Partie électrique des modules : les cellules multi-jonctions

Un autre élément particulier d'un µ-CPV est la cellule. En général, les cellules mises en œuvre dans un module à concentration sont des cellules multi-jonction (MJSC). Cette section explique leur particularité et fait l'inventaire des pertes d'ordre électrique dans un module.

2.4.1 Les cellules multi-jonctions

La concentration solaire ainsi que l'empilement de jonctions PV boostent l'efficacité d'une cellule [57]. D'une part l'efficacité de la cellule dépend logarithmiquement en fonction de la concentration, comme le montre l'Eq. 0.6 ci-dessous. Dans la définition du rendement pour une concentration de Xsuns, trois termes positifs se multiplient. Le rendement sans concentration (à 1sun), le rapport des facteurs de forme (FF) ainsi qu'un troisième terme qui dépend de la concentration et de la tension en circuit ouvert de la cellule à 1sun. La pente de la courbe d'efficacité en fonction de la concentration dépend du FF, lui-même dépendant de la concentration.

$$\eta^{Xsuns} = \underbrace{\eta^{1sun} \left(\frac{FF^{Xsuns}}{FF^{1sun}} \right)}_{> \text{ ou } < 1} \underbrace{\left(1 + \frac{kT}{qV_{oc}^{1sun}} \ln X \right)}_{> 1} \quad \text{Eq. 0.6}$$

Lorsque la concentration augmente, le troisième terme de l'Eq. 0.6 augmente. Comme le rapport des facteurs de forme n'est pas toujours supérieur à un, la courbe de l'efficacité en fonction de la concentration possède un maximum. La Figure 2.16 illustre cette évolution avec un maximum à 600X pour la cellule mesurée ici.

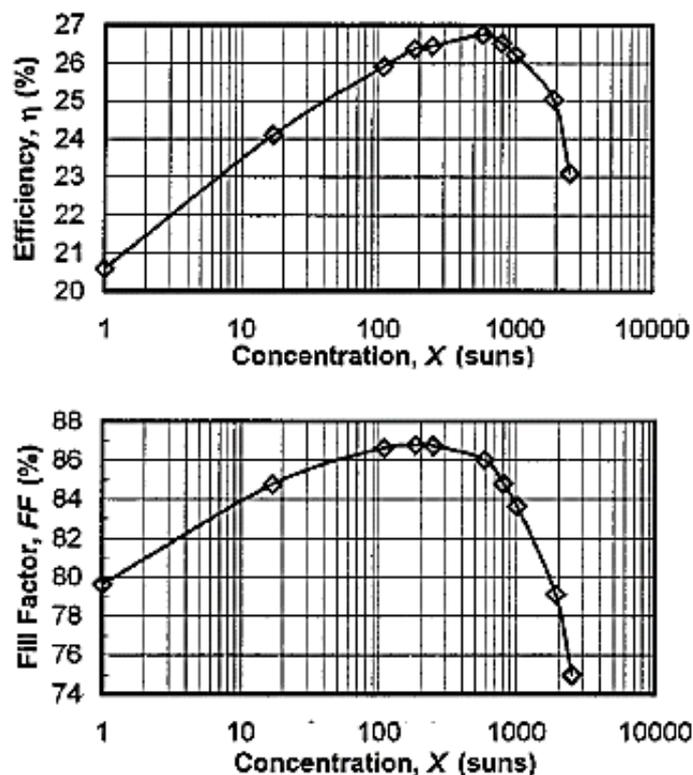


Figure 2.16 : Evolution de l'efficacité et du facteur de forme d'une cellule MJSC en fonction de la concentration.

Par ailleurs, comme chaque jonction absorbe une partie différente du spectre solaire, un empilement de plusieurs jonctions permet une meilleure absorption et augmente l'efficacité. La Figure 2.17 a) représente la part du spectre solaire absorbée par chaque jonction d'une cellule triple jonction. La jonction qui absorbe les longueurs d'onde de haute énergie est appelée jonction *Top*, celle qui absorbe les plus basses énergies *Bottom*. La jonction *Middle* absorbe la partie intermédiaire du spectre. Ces trois jonctions étant connectées en série dans la cellule de manière monolithique, comme sur la Figure 2.17 b), le plus faible courant produit par une des jonctions I_{px} limite le courant total de la cellule. Sur ce schéma, R_s représente la résistance série de la cellule et chaque jonction est représentée par un modèle électrique à une diode.

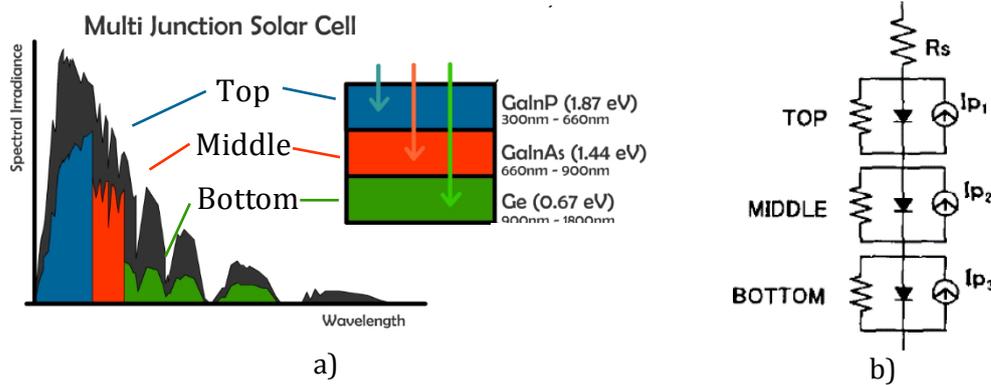


Figure 2.17 (a) Spectre solaire AM1.5D en fonction de la longueur d'onde, représenté avec l'efficacité de conversion spectrale de chaque sous-jonction d'une MJSC [14]. (b) Modèle électrique simplifié d'une cellule triple-jonction. [58]

Comme la distribution d'irradiance dans un concentrateur n'est pas uniforme, les modèles électriques de cellule MJSC discrétisent la cellule en mailles interconnectées par un réseau de résistances. Elles représentent les pertes ohmiques des courants latéraux, voir Figure 2.18. Chaque jonction d'une maille est un modèle à deux diodes, plus précis que le modèle à simple diode de la Figure 2.17 b). Une jonction tunnel est nécessaire entre chaque jonction pour le bon fonctionnement de la MJSC. A partir de ces modèles multi-éléments et en comparaison avec des résultats expérimentaux, de nombreuses études sur l'influence d'un éclairage non-uniforme sur la cellule font l'objet d'un article de *review* par Baig *et al.* dans [59].

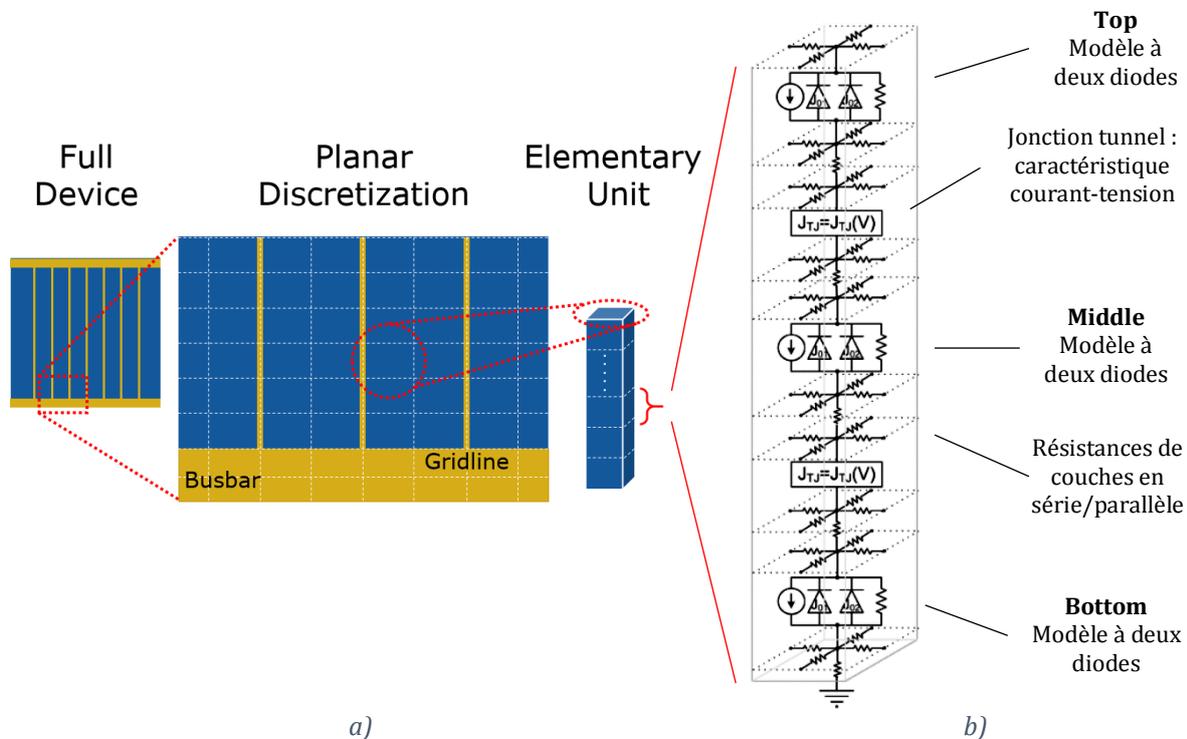


Figure 2.18 : a) Principe du modèle électrique 3D d'une MJSC [60]. b) Unité de maille du modèle 3D discrétisé [61].

Pour les micro-cellules l'effet des recombinaisons en périphérie des cellules est une source de perte à cause du rapport Périmètre/Surface plus important [62]. La Figure 2.19 montre l'évolution de la V_{oc} en fonction de ce rapport et pour différentes concentrations. La chute de V_{oc} est plus importante pour les faibles concentrations mais elle est toujours visible. Cependant, cet effet important pour les modules μ -CPV n'intervient pas dans la compréhension du CTM.

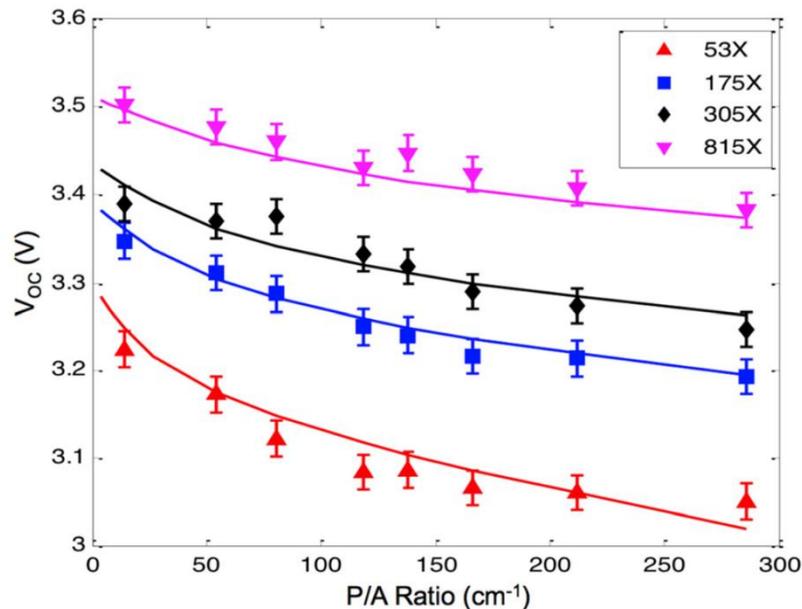


Figure 2.19 : Pertes de V_{oc} en fonction du rapport Périmètre/Surface de microcellules triple jonction à différentes concentration.

2.4.2 Pertes par non-uniformités

Comme l'éclairage d'un micro-concentrateur n'est pas uniforme, la densité de courant photo-généré ne l'est pas non plus. Les non-uniformités de l'éclairage peuvent être spectrales ou spatiales. Dans le premier cas, la non-conservation de la balance spectrale entraîne le déséquilibre entre les courants photo-générés par les différentes jonctions. Comme ces jonctions sont connectées en série, la jonction qui produit le courant le plus faible limite le courant produit par les autres. Dans la littérature, on parle de pertes dues aux non-uniformités spatiales ou aberrations chromatiques [63]. Dans le cas des non-uniformités spatiales, l'intensité de l'éclairage variable sur la surface de la cellule entraîne une densité de courant variable également. Des courants latéraux apparaissent entre les zones de fort éclairage et les zones moins éclairées. Ces courants génèrent des pertes ohmiques dans les résistances de couche des cellules. Pour mieux représenter ces pertes de non-uniformité spatiales, la Figure 2.20 représente les lignes de courants qui parcourent une cellule éclairée seulement sur sa partie centrale. Ces pertes ohmiques à cause des non-uniformités sont bien connues de la littérature du CPV mais restent encore peu étudiées pour des petites cellules. Comme la distance parcourue par ces courants latéraux est plus courte dans les micro-cellules, on peut supposer qu'ils ont un impact plus faible sur les performances de ce type de cellules que pour les cellules de taille centimétrique.

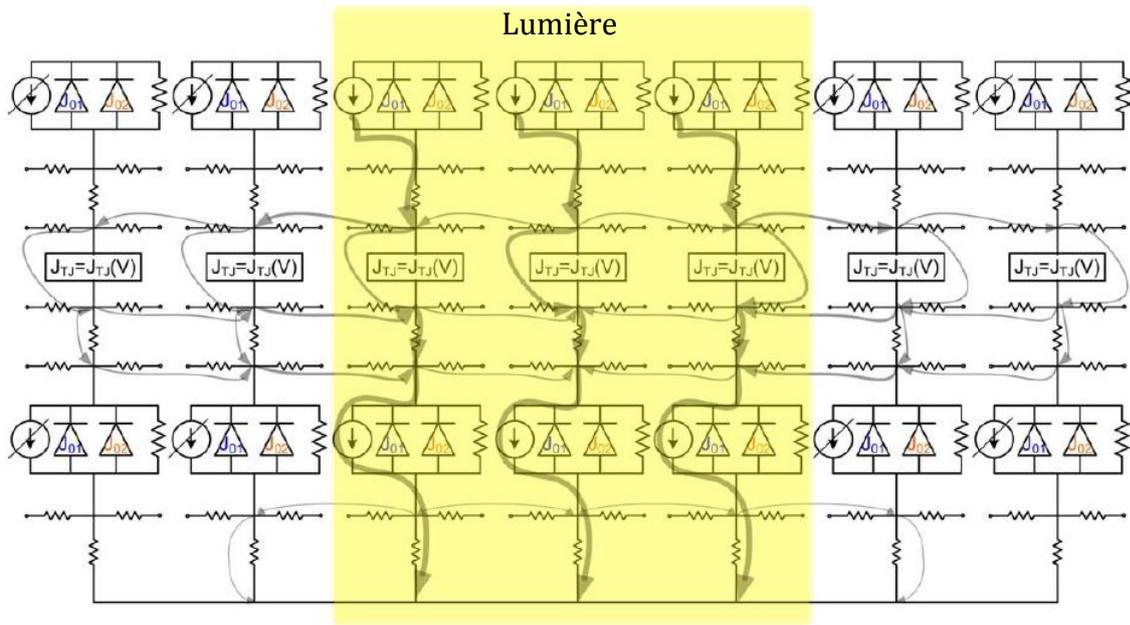


Figure 2.20 : Chemins des courants transversaux dus à un éclairage non-uniforme [61]

Pour quantifier l'amplitude des non-uniformités de flux reçu par la cellule, le Peak to Average Ratio (PAR) est le rapport de l'éclairage max sur l'éclairage moyen [64]. La plupart des études des pertes électriques dues aux non-uniformités de flux utilisent ce rapport comme paramètre d'entrée. Par exemple, la Figure 2.21 montre l'effet du PAR sur la courbe $I(V)$ d'une cellule double jonction de 1cm^2 en surface active [65]. Le PAR a un effet sur le FF de la cellule. Grossièrement, lorsque les courants transversaux passent par les résistances de couches série-parallèles, il génère une chute de tension. Plus le courant est élevé, plus la chute de tension est importante. La tension de maximum de puissance (V_{mp}) est très impactée, le FF et le rendement également.

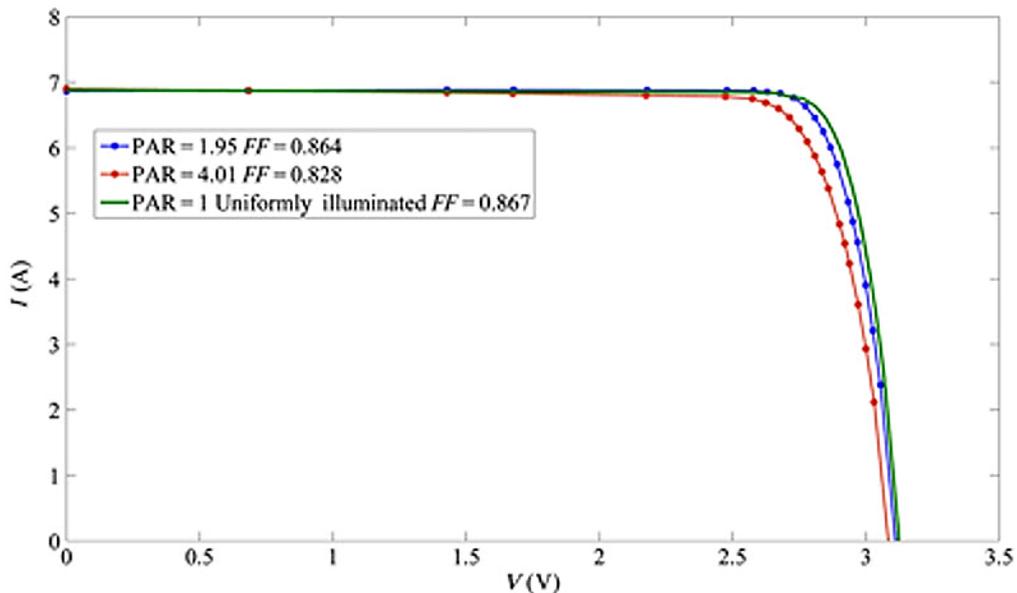


Figure 2.21 : Effet des non-uniformité de flux sur la courbe courant-tension d'une cellules MJSC [65].

Dans la littérature du CPV, ce type de pertes est de l'ordre de quelques pourcents et varie en fonction de la concentration du module ainsi que du PAR [59]. Comme le courant des sous-jonctions est plus faible des cellules à triple jonctions (3J) que pour les doubles jonctions (2J), l'impact des non-uniformités est également plus faible. En revanche, il existe une seule étude sur les non-uniformités pour les microcellules. Comme la distance que parcourent les courants latéraux est plus faible, il est probable qu'avec une même valeur de résistance de couches série-parallèle, les pertes par non-uniformité soit plus faibles. Hayashi *et al.* ont réalisé cette étude pour leur cellules 3J de 550 μm de côté avec une résistance de couche élevée dans la jonction Top [66]. Même si cette étude ne concerne que les non-uniformités spectrales, leur conclusion confirme notre hypothèse. Néanmoins d'autres études sur les non-uniformités spatiales sont nécessaires pour valider cette tendance.

2.4.3 Interconnexion des cellules PV dans un module

Pour former un module complet, les micro-cellules sont connectées en série-parallèle. Entre chaque MJSC, les pistes de cuivre ajoutent de la résistance série à celle de la cellule elle-même. Lorsqu'elles sont connectées en série, les cellules forment ce qu'on appelle un string. Dans un string, le courant est constant sur toute la chaîne et les tensions de chaque cellule s'additionnent. Comme le courant dans un circuit en série est constant, c'est le générateur qui fournit le moins de courant qui limite le courant total du string. Les autres générateurs doivent dissiper le surplus de courant généré sous forme de chaleur pour s'accorder aux autres. Ces pertes de déséquilibre de courant, ou *current mismatch* en anglais, sont favorisées lorsque le nombre de cellules en série est élevé. Elles dépendent à la fois de la variation des performances de chaque cellule et des variations de performances optiques. Dans la littérature, on constate des pertes allant de 1% à 5% en valeur absolue [67].

A l'inverse, lorsque les strings sont connectés en parallèle, les courants s'additionnent et la tension est constante. Pour que chaque string ne dissipe pas sa puissance dans le string voisin, il faut que leurs tensions soient égales. En cas de déséquilibre de tension, une diode de dérivation, généralement appelée *diode de bypass*, en parallèle de chaque string permet de dissiper la surtension et éviter le claquage éventuel des cellules.

Bien connu de la littérature, les risques électriques que présente l'interconnexion des cellules dans un module CPV sont aujourd'hui maîtrisés [68]. Par ailleurs, le nombre de générateurs en série et parallèle sont optimisés pour réduire les pertes ohmiques et dues aux différents déséquilibres en courant ou tension. L'optimum du nombre de connexions séries-parallèles dépend du nombre de cellules mais aussi de la résistance des interconnexions [69].

Dans un module CPV à base de micro-concentrateur, le nombre d'éléments pour la même surface de module est plus élevé. Le nombre de résistances séries ajoutées est donc plus élevé également. Cependant, comme la surface de collection de chaque élément est plus petite, le courant photo-généré est plus faible également. Malgré la multiplicité des connexions inter-élément, cette diminution de courant par élément permet de réduire considérablement les pertes ohmiques dans les connexions du module [21]. En effet, comme les pertes sont dépendantes au carré du courant I traversant une résistance R d'après la loi d'ohm en Eq. 0.7, la diminution de courant est prépondérante devant l'augmentation de la résistance.

$$P_{\text{pertes ohmiques}} = RI^2$$

Eq. 0.7

Pour conclure, les pertes électriques dans un micro-concentrateur sont identiques à celle dans un module CPV, sauf pour les pertes résistives qui sont minimisées. Pour notre étude, nous les considérerons comme négligeables comparées aux pertes dues au déséquilibre de courant qui sont comprises entre 1 et 5%.

2.5 Bilan des pertes dans un micro-concentrateur

L'état de l'art de la micro-concentration montre beaucoup de diversité dans les technologies. Plusieurs familles de concentrateurs sont identifiées et le facteur de concentration varie de quelques dizaines de suns à plus de mille dans une même famille de modules μ -CPV. Parmi ce panel de solutions optiques, les pertes liées à l'optique, à l'assemblage mécanique, aux connections électriques des cellules ainsi qu'aux non-uniformités sont étudiées au cas par cas dans la littérature du CPV et du μ -CPV. La micro-concentration présente un avantage sur certains points et possède les mêmes ordres de grandeurs sur d'autres.

Dans ce chapitre, toutes les pertes qui apparaissent lors de la mise en module des microcellules sont recensées. Dans la mesure du possible, le chiffrage minimum et maximum de chaque perte est donné à partir des études publiées. Les pertes par réflexion de Fresnel sont prédominantes dans la liste. Elles peuvent être limitées par l'utilisation d'antireflets (ARC) ou en dessinant des concentrateurs avec moins d'interfaces à haut saut d'indice. Typiquement, un concentrateur avec une seule interface air-diélectrique sur laquelle il y a un ARC perd seulement 2,2% du flux. A l'inverse, un concentrateur avec trois interfaces sans ARC atteint 10%. L'absorption est la deuxième perte prédominante. Comprise entre 0,9% et 7,6%, cette perte dépend surtout de l'épaisseur des optiques ainsi que de leur absorptivité. En générale, un nombre d'interfaces élevé permet de diminuer l'épaisseur des optiques et inversement. A la différence des réflexions et absorptions qui sont des pertes dépendantes du design de l'optique, les pertes dépendantes de la qualité de fabrication sont plus difficiles à quantifier. Les pertes dues à la diffusion des surfaces rugueuses ainsi que les pertes de flux causées par la déformation des lentilles doivent être étudiées spécifiquement pour chaque micro-concentrateur. En dépit du manque d'études sur la plupart des micro-concentrateurs, on donne un ordre de grandeur des pertes à cause des déformations du profil des lentilles sur des modules à faibles concentration. Les pertes simulées pour sept concentrateurs différents vont de 0% à 4% en fonction de l'amplitude des défauts. Comme l'étude spécifique de chaque perte optique n'est pas triviale, il existe un protocole standard pour mesurer l'efficacité optique d'un concentrateur et obtenir l'effet cumulé de chaque perte directement. D'autre part, les défauts d'alignement mécaniques entre les éléments d'un module sont responsables de pertes sur l'angle d'acceptance. L'effet sur le CTM n'est perceptible que pour des désalignements importants. Cela-dit, on observe des pertes de puissance de 0.7% à 3% pour des micromodules très concentrés. Ensuite, les pertes électriques dans la mise en module sont associées aux variations d'alignement et participent au déséquilibre de courant des cellules en séries.

Dans ce cas, la littérature donne des pertes entre 1% et 5% selon la stratégie de câblage des récepteurs en série-parallèle. Finalement les pertes dues aux non-uniformités de flux sur les cellules, qui sont des pertes spécifiques au CPV, ne sont pas encore bien connus pour la micro-concentration.

Toutes ces valeurs qui bornent les capacités de l'état de l'art sont récapitulées dans le Tableau 2 et représentées sous forme graphique dans la Figure 2.22. L'ensemble de cette étude sur la chaîne de pertes a fait l'objet de l'article de la référence [70].

Tableau 2 : Minimum et maximum de chaque perte du CTM ratio dans l'état de l'art.

Nom de la perte	Minimum de l'état de l'art (%)	Maximum de l'état de l'art (%)
<i>Réflexion de Fresnel</i>	2,2	10
<i>Absorption</i>	0,9	7,6
<i>Dispersion</i>	Négligeable	Négligeable
<i>Diffusion de surface</i>	$f(\theta_i, \sigma_s, \lambda)$	$f(\theta_i, \sigma_s, \lambda)$
<i>Erreur de pente</i>	0	4
<i>Désalignement mécanique</i>	0,7	3
<i>Pertes d'interconnexion électriques</i>	Négligeable	Négligeable
<i>Déséquilibre de courant</i>	1	5
<i>Non-uniformités</i>	$f(C_g, \lambda, PAR)$	$f(C_g, \lambda, PAR)$

Le CTM des modules CPV est compris entre 65% et 80% pour des modules commerciaux [7] alors que celui des modules μ -CPV est compris entre 71,4% et 86,7%. Cette différence de CTM motive le développement de la micro-concentration afin de diminuer son LCOE. C'est pourquoi cette thèse s'intéresse à la micro-concentration en développant, en fabricant et en caractérisant des modules à haute concentration. En plus du développement d'un procédé de fabrication innovant, l'analyse de la chaîne pertes dans le module est décrite en détail.

De l'efficacité
de la cellule...

...à l'efficacité
du module

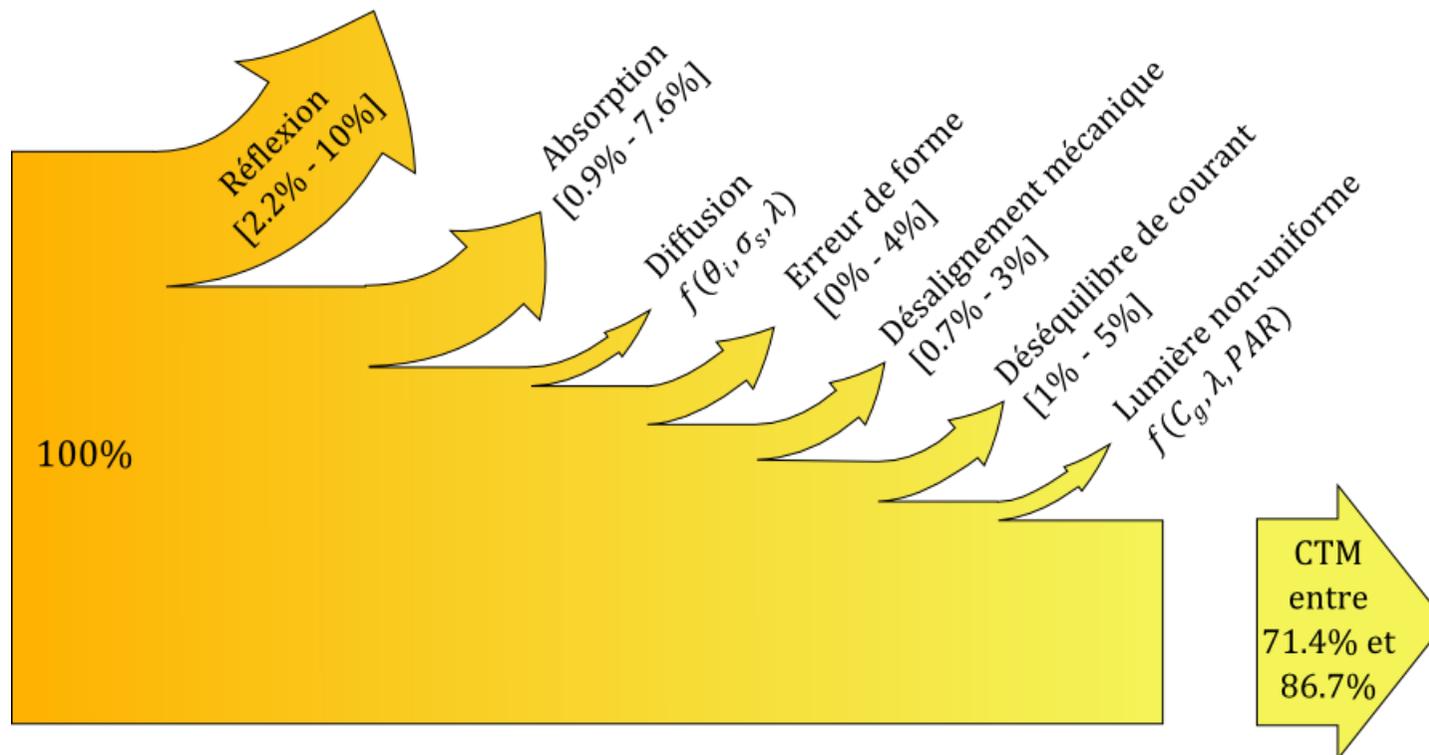


Figure 2.22 : Chaîne de pertes moyenne de l'état de l'art de la micro-concentration avec les Cell-to-Module minimum et maximum de la littérature.

Conception optique des micro-concentrateurs

3.1 Optique non-imageante : bases théoriques

Les méthodes de conception optique des micro-concentrateurs solaires se basent sur des principes d'optique géométrique. Le rayonnement solaire est alors considéré comme un faisceau de rayons qui représentent la trajectoire de la lumière. Dans cette section, les hypothèses de travail ainsi que les bases de l'optique non-imageante nécessaires à la compréhension des chapitres suivants sont définies. Cette section est donc la base théorique sur laquelle s'appuie la conception optique des micro-concentrateurs développés pendant ma thèse.

3.1.1 De l'électromagnétisme à l'optique géométrique

La lumière émise par le soleil est une onde électromagnétique qui se propage dans une certaine direction à la vitesse $c = \frac{c_0}{n}$ où c_0 est la vitesse de la lumière dans le vide. Le vecteur d'onde $U(\mathbf{r}, t)$ qui vérifie l'équation d'onde Eq. 0.1 décrit la propagation de l'onde en fonction de sa position $\mathbf{r}(x, y, z)$ et du temps t [71] :

$$\nabla^2 U - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = 0 \quad \text{Eq. 0.1}$$

Dans l'Eq. 0.1, la fonction d'onde $U(\mathbf{r}, t)$ peut-être décrite sous sa forme complexe. Si on considère une onde monochromatique de longueur d'onde λ_0 qui se propage dans un milieu homogène d'indice de réfraction $n(\mathbf{r})$ qui varie très peu dans le milieu considéré, l'équation d'onde s'exprime :

$$U(\mathbf{r}, t) = U(\mathbf{r}) \exp(j\omega t) \quad \text{Eq. 0.2}$$

avec $U(\mathbf{r})$, son amplitude complexe notée :

$$U(\mathbf{r}) = a(\mathbf{r}) \exp[-jk_0 \mathcal{S}(\mathbf{r})] \quad \text{avec } k_0 = 2\pi/\lambda_0 \quad \text{Eq. 0.3}$$

Dans l'Eq. 0.3, $a(\mathbf{r})$ est l'amplitude de l'onde et $k_0 \mathcal{S}(\mathbf{r})$, sa phase. Le front d'onde, représenté sur la Figure 3.1, est la surface sur laquelle $\mathcal{S}(\mathbf{r})$ constant. Le front d'onde est également appelée surface équiphasé. Comme l'onde se propage dans une

direction perpendiculaire au front d'onde, on peut représenter la trajectoire de la lumière par des lignes de champ comme celles représentées sur la Figure 3.1. Le vecteur \mathbf{p} , perpendiculaire au front d'onde, représente localement la direction de la ligne de champ. En optique non-imageante, les milieux dans lequel se propage la lumière sont considérés comme étant homogènes et leurs indices de réfraction sont constants. Dans ce cas, les fronts d'onde sont plans ou sphériques et les lignes de champ sont droites. On peut donc représenter la trajectoire de la lumière par des rayons dont la direction dépend des lois de passage entre deux milieux optiques différents. Les principes les plus importants en optique non-imageante sont la conservation de l'étendue, le principe de Fermat, le principe des rayons de bords ainsi que les lois de réfraction et de réflexion. Ils sont présentés dans les sous-sections suivantes.

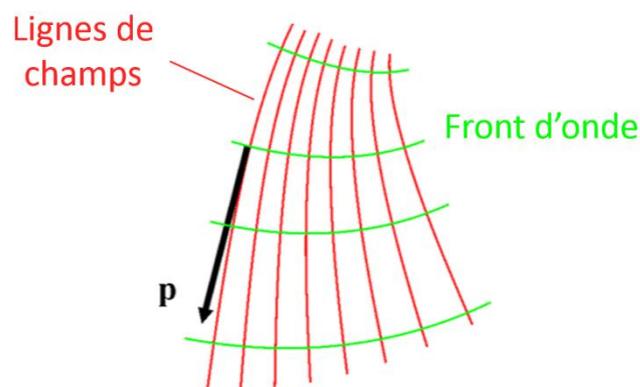


Figure 3.1 : Le front d'onde, ou surface équiphasse, est perpendiculaire à la direction \mathbf{p} des lignes de champs.

3.1.2 Conservation de l'étendue

L'étendue est une grandeur photométrique qui caractérise la propagation d'un faisceau lumineux par la surface qu'il éclaire et son angle d'ouverture. A partir des paramètres géométriques du faisceau $d\Omega_{\Sigma}$ de la Figure 3.2, l'étendue dG_{Σ} de la lumière dans un milieu d'indice n s'exprime :

$$dG_{\Sigma} = n^2 d\Sigma \cos\theta_{\Sigma} d\Omega_{\Sigma} \quad \text{Eq. 0.4}$$

Cette grandeur est en $\text{m}^2 \cdot \text{sr}$ et se calcule pour une surface donnée. La conservation de l'étendue énonce que la totalité du flux émis par une surface source doit être conservée tout au long de sa propagation, jusqu'à la surface réceptrice. Sur la Figure 3.2, l'étendue dG_{Σ} d'une source de surface $d\Sigma$ est égal à l'étendue dG_S de surface dS soit:

$$n^2 d\Sigma \cos\theta_{\Sigma} d\Omega_{\Sigma} = n^2 dS \cos\theta_S d\Omega_S \quad \text{Eq. 0.5}$$

soit

$$n^2 d\Sigma \cos\theta_{\Sigma} \frac{dS \cos\theta_S}{d^2} = n^2 dS \cos\theta_S \frac{d\Sigma \cos\theta_{\Sigma}}{d^2} \quad \text{Eq. 0.6}$$

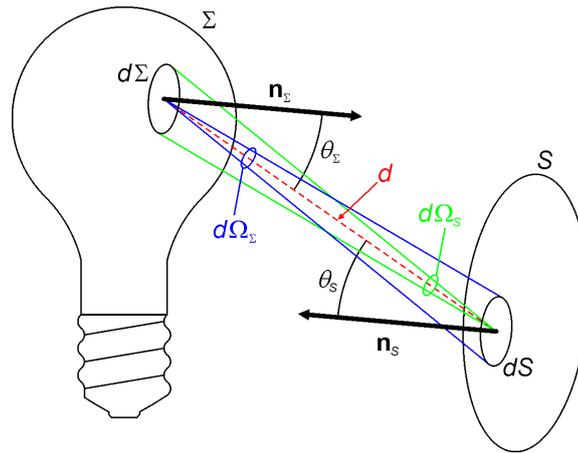


Figure 3.2 : Conservation de l'étendue entre un élément de surface source $d\Sigma$ et un élément de surface écran dS .

La conservation de l'étendue est un principe fondamental en optique non-imageante [72]. En effet, si les surfaces et positions de la source et du récepteur d'un concentrateur sont connus, la conservation de l'étendue géométrique permet de déterminer la forme des surfaces optiques qui concentrent la lumière sans perte. Pour calculer la forme de ces surfaces, plusieurs méthodes ont été développées sous forme d'algorithmes plus ou moins complexes mais ne font pas objet d'étude dans ce travail de thèse [73–77].

3.1.3 Principe de Fermat

Le principe de Fermat est une condition sur le chemin optique parcouru par la lumière entre deux points. Le chemin optique L_{opt} d'un rayon entre un point P et un point Q est la distance géométrique pondérée par l'indice de réfraction $n(\mathbf{r})$, comme défini par l'Eq. 0.7 :

$$L_{opt} = \int_P^Q n(\mathbf{r}) dl \quad \text{Eq. 0.7}$$

Le principe de Fermat veut que la trajectoire d'un rayon optique entre deux points P et Q soit minimale. Sur la partie gauche de la Figure 3.3, ce principe est illustré par le rayon j qui est le plus direct parmi tous les rayons de 0 à n . Sur la partie droite, les rayons partent d'un front d'onde et traversent deux surfaces optiques. Comme le front d'onde est plan, chaque rayon est parallèle et la distance parcourue entre plan P et le point Q est constante d'un point de vue optique. D'un point de vue mathématique, chaque rayon parcourt la même distance optique notée ζ sur la Figure 3.3 issue de la référence [78].

Dans un concentrateur solaire, les rayons issus du soleil sont quasiment parallèles, avec une divergence de $\pm 0,27^\circ$. Le principe de Fermat peut être inversé pour obtenir la forme des surfaces réfringentes qui permettrait de concentrer les rayons sur un point Q. Cette technique est à la base de toutes les méthodes de conception d'optique non-imageante existantes [73–77].

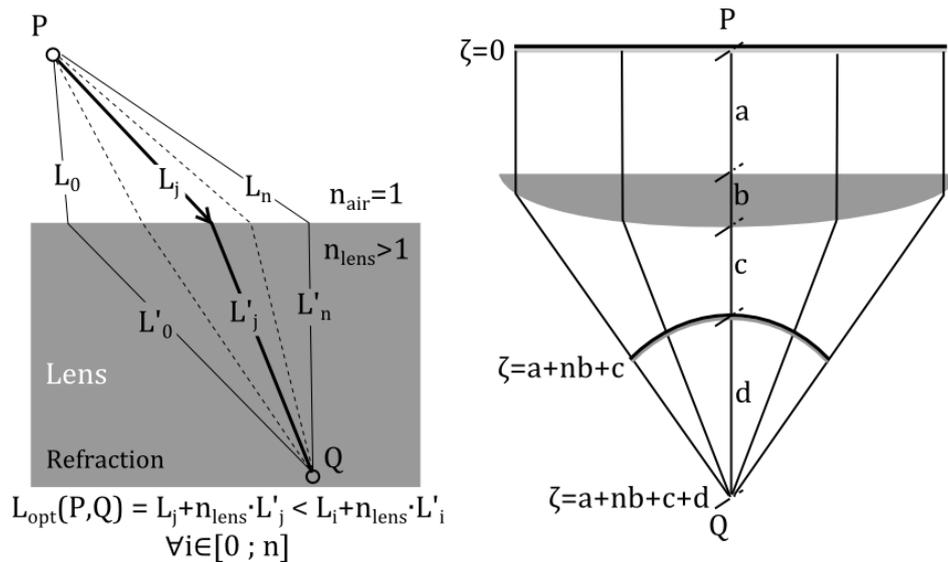


Figure 3.3 : Illustration du principe de Fermat. A gauche pour un rayon allant d'un point P à un point Q ; A droite, chaque rayon partant d'un front d'onde P arrive en un point Q en ayant parcouru la même distance optique [78].

3.1.4 Le principe des rayons de bord

Depuis la surface de la terre, la lumière directe issue du disque solaire forme un cône de $\pm 0,27^\circ$ (voir figure 1.6 du chapitre d'introduction). De plus, les concentrateurs solaires sont installés sur des trackers qui possèdent une erreur de $\pm 0,1^\circ$ typiquement. L'ouverture angulaire de la source ajoutée aux erreurs de dépointage des trackers fait que l'incidence des rayons du soleil sur l'optique sont contenus dans un cône de $\pm 0,4^\circ$ environ. Cette divergence angulaire des rayons incidents doit être prise en compte lors de la conception des optiques afin qu'elles aient un angle d'acceptance supérieure à $0,4^\circ$. En d'autres termes, quel que soit leur angle d'incidence entre $-\theta_i$ et $+\theta_i$ tous les rayons parallèles entre eux focalisent sur le récepteur. Pour simplifier les calculs, le principe des rayons de bord montre qu'il suffit de considérer les deux angles extrêmes $-\theta_i$ et $+\theta_i$ pour dessiner les surfaces optiques [79].

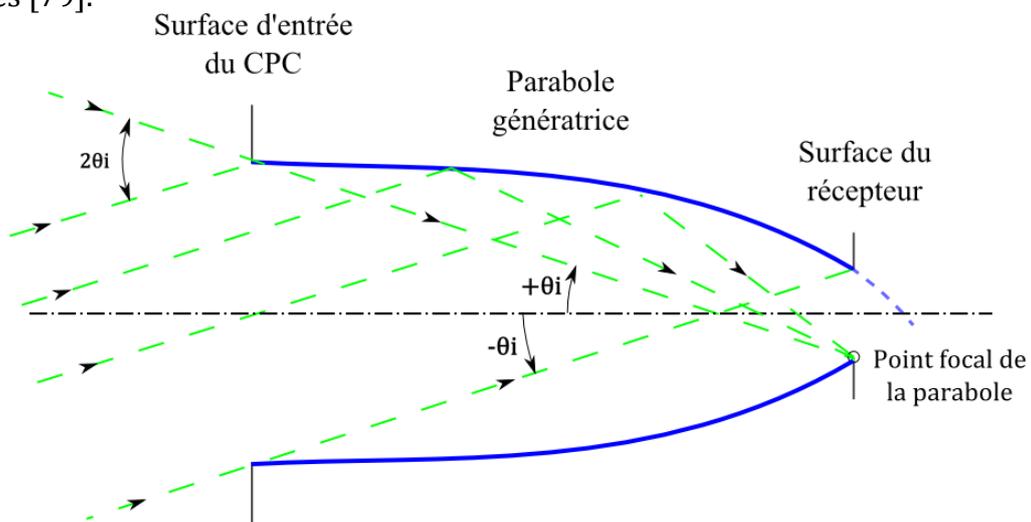


Figure 3.4 : Principe des rayons de bord appliqué au dessin du Compound Parabolic Concentrator (CPC)

La Figure 3.4 montre ce principe pour la conception d'un Compound Parabolic Concentrator (CPC), le premier concentrateur conçu à partir du principe des rayons de bord, en 1994 par Ries et Rabl. Sur ce schéma, un faisceau de rayons parallèles incidents avec un angle $-\theta_i$ focalisent au point focal de la parabole qui coïncident avec le bord du récepteur. Un faisceau de rayons avec une incidence opposée de $+\theta_i$ se focalise sur l'autre bord du récepteur. Sur le schéma, on distingue facilement que chaque faisceau avec un angle d'incidence intermédiaire atteint forcément le récepteur, même si les paraboles sont valables pour les deux angles $-\theta_i$ et $+\theta_i$.

Le principe des rayons de bord s'applique pour la conception de n'importe quel type de concentrateur.

3.1.5 Réflexion et réfraction

Pour diriger les rayons du soleil, les concentrateurs sont soit réfléchissants soit réfractifs soit une combinaison des deux. Comme la conception des concentrateurs est un problème purement géométrique, la différence entre réflexion et réfraction concerne essentiellement les lois angulaires de déviation des rayons. Sur la Figure 3.5, on représente chaque phénomène.

La réfraction est régie par la loi de Snell-Descartes :

$$n_i \sin\theta_i = n_t \sin\theta_t \quad \text{Eq. 0.8}$$

L'angle d'un rayon réfléchi est égal à l'angle du rayon incident par rapport à la normale à la surface. Le cas de la réflexion totale interne (TIR) varie de la réflexion sur une surface métallique par son angle limite. En effet, la TIR est possible seulement à l'intérieur d'un matériau diélectrique pour des angles supérieurs à θ_c représenté sur le schéma central de la Figure 3.5.

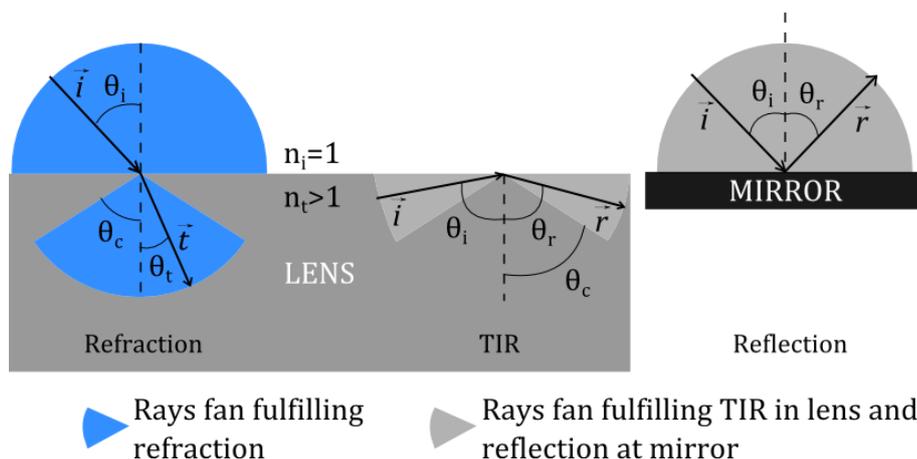


Figure 3.5 : De gauche à droite : réfraction des rayons et réflexion totale interne dans un diélectrique puis réflexion sur une surface métallique [80].

3.2 Conception de micro-concentrateurs à double étage de lentilles

Les modules μ -CPV à l'étude dans cette thèse sont composés de deux lentilles : une optique primaire (POE), qui joue le rôle de concentrateur, ainsi qu'une optique secondaire (SOE) [37]. La SOE, directement attachée à la cellule, sert d'homogénéisateur et permet d'augmenter l'angle d'acceptance. La Figure 3.6 représente la structure type de ces micro-concentrateurs. La POE et la SOE sont conçues lors de deux étapes distinctes. Ces étapes sont décrites dans les deux sections suivantes.

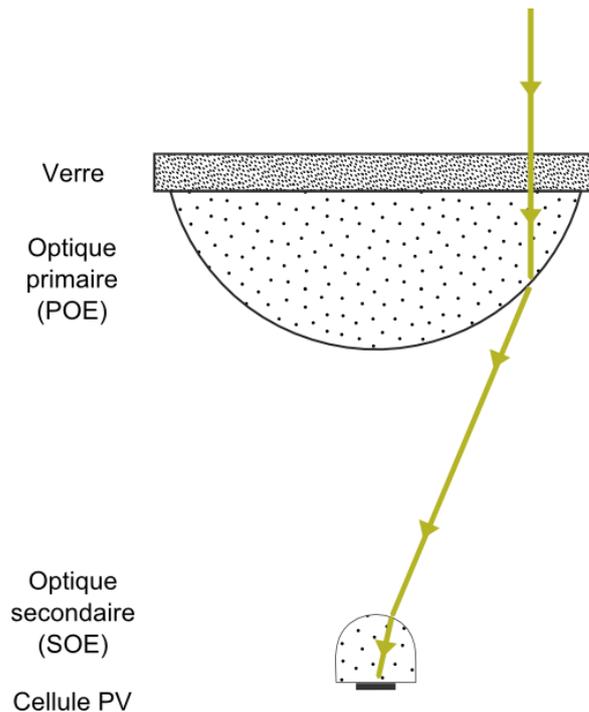


Figure 3.6 : Schéma de principe d'un micro-concentrateur à double étage de lentilles.

3.2.1 Conception de l'optique primaire

Le profil 2D de la POE est calculé en fonction du facteur de concentration géométrique et des paramètres liés aux matériaux. Dans un premier temps, le profil est calculé à partir du principe de Fermat pour une seule longueur d'onde prise à $\lambda = 589nm$. Les POE sont générées par révolution autour de l'axe optique à partir du profil 2D calculé. Ensuite, pour maximiser la surface occupée par les lentilles, celles-ci sont assemblées en damier. L'ouverture carrée des lentilles s'inscrit dans la lentille circulaire générée par révolution à partir du profil 2D, comme le montre la Figure 3.7. Les Eq. 0.9 et Eq. 0.10 expriment la valeur de x_{max} , rayon de la lentille circulaire, en fonction du facteur de concentration C_g et de la taille de la cellule. Ces dimensions, sont les paramètres d'entrée du calcul qui génère le profil 2D de la lentille.

$$x_{max} = \frac{c\sqrt{2}}{2} = \frac{\phi}{2} \quad \text{Eq. 0.9}$$

$$Surface_{lentille} = c^2 = C_g \cdot Surface_{cellule} \quad \text{Eq. 0.10}$$

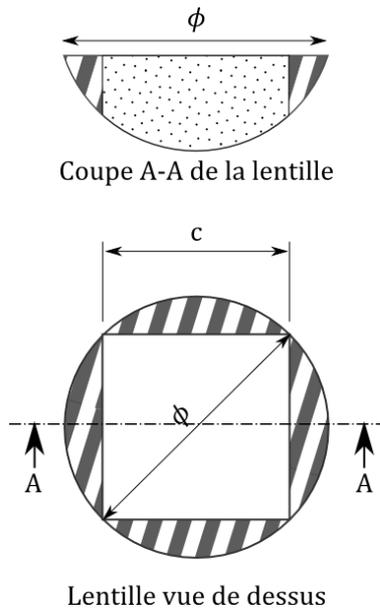


Figure 3.7 : Vue en coupe et vue de dessus d'une POE carrée de côté c inscrite dans une lentille circulaire de diamètre ϕ .

Le soleil étant à l'infini, tous les rayons qu'il émet sont considérés comme parallèles. D'autre part, l'indice de réfraction $n_{POE} = 1,41$ du silicone qui compose la lentille est donné par le fabricant pour $\lambda = 589nm$. L'indice de réfraction de l'air est $n_{air} = 1$. Sur la Figure 3.8, deux rayons parallèles convergents au point F sont représentés. Le *Rayon 1* arrive au centre de la lentille au point $A_1(x_{A1};z_{A1})$ et ressort au point $B_1(x_{B1};z_{B2})$. Il parcourt la distance e dans le verre, la distance l_{11} dans la lentille et l_{12} dans l'air entre la lentille et le point focal F. De la même manière, le *Rayon x* (quelconque) arrive au point $A_x(x; z_{Ax})$ sur la lentille et ressort au point $B_x(x; z_{Bx})$. Il parcourt la distance e dans le verre, la distance l_{x1} dans la lentille et l_{x2} dans l'air.

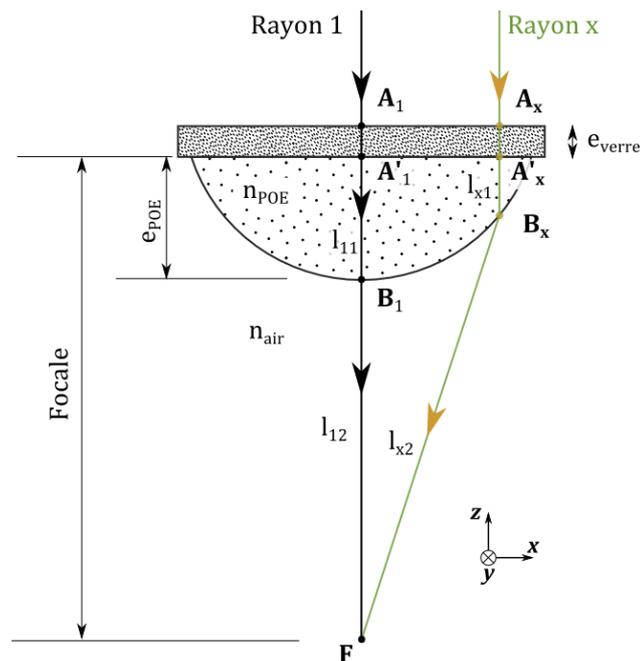


Figure 3.8 : Principe de Fermat appliqué à la conception de l'optique primaire (POE).

On applique le principe de Fermat au *Rayon 1* et au *Rayon x* de la Figure 3.8 ; le chemin optique que parcourt le *Rayon 1* est égal au chemin optique que parcourt le *Rayon x*, quelle que soit sa position. L'Eq. 0.11 exprime cette condition sur la trajectoire du *Rayon 1* et du *Rayon x* :

$$n_{verre}e_{verre} + n_{POE}l_{x1} + n_{air}l_{x2} = n_{verre}e_{verre} + n_{POE}l_{11} + n_{air}l_{12} \quad Eq. 0.11$$

Dans cette équation, les termes qui dépendent de l'épaisseur du verre se simplifient. De plus, les valeurs de l_{11} et l_{12} correspondent respectivement à l'épaisseur de la POE et à la distance entre le sommet de la POE et le point focal. Finalement, l'Eq. 0.11 se traduit :

$$n_{POE}l_{x1} + l_{x2} = n_{POE} \cdot e_{POE} + (focale - e_{POE}) \quad Eq. 0.12$$

Les distances l_{x1} et l_{x2} s'expriment :

$$l_{x1} = |A'_x B_x| = focale - z_{B_x} \quad Eq. 0.13$$

$$l_{x2} = |B_x F| = \sqrt{x_{B_x}^2 + z_{B_x}^2} \quad Eq. 0.14$$

Les Eq. 0.12, Eq. 0.13 et Eq. 0.14 forment un système de 3 équations à 5 inconnues : la focale, l'épaisseur de la lentille, x_{B_x} , z_{B_x} et $z_{A'_x}$. Pour résoudre ce système, les conditions aux limites fixent les deux degrés de liberté indéterminés. Connaissant la largeur de la lentille par son facteur de concentration, on applique le principe de Fermat au *rayon 1* et au *rayon x_{max}* qui passe par le bord de la lentille, en considérant que la distance l_{x1} est nulle à cet endroit. La trajectoire du *rayon x_{max}* au le bord de la lentille est représentée sur la Figure 3.9 :

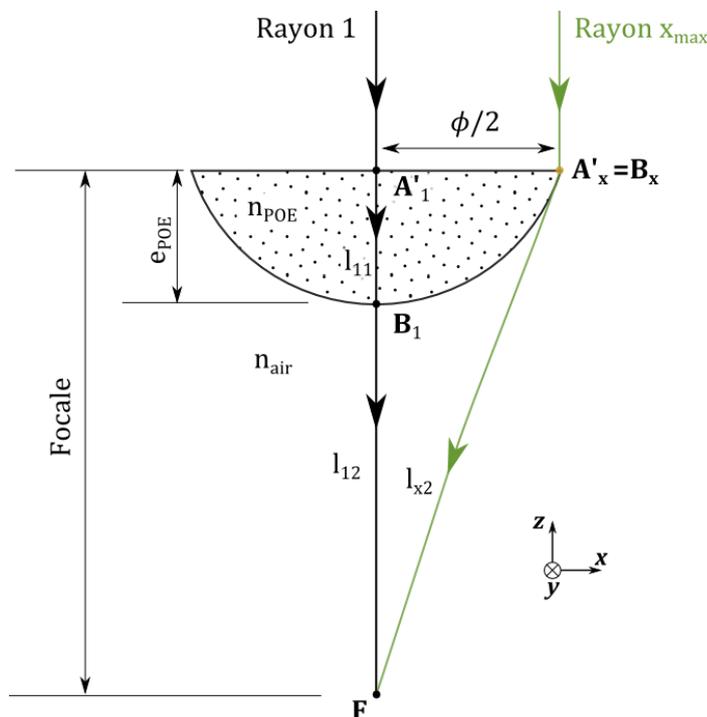


Figure 3.9 : Détermination de la focale et de l'épaisseur de la lentille en appliquant le principe de Fermat au bord de celle-ci.

Le principe de Fermat appliqué au *Rayon 1* et au *Rayon x_{max}* de la POE s'exprime comme ceci :

$$n_{POE} \cdot e_{POE} + (focale - e_{POE}) = l_{x2} \quad Eq. 0.15$$

avec

$$l_{x2} = \sqrt{\left(\left(\frac{\phi}{2}\right)^2 + focale^2\right)} \quad Eq. 0.16$$

Les Eq. 0.15 et Eq. 0.16 ajoutent une 4^{ème} équation au système précédent de trois équations pour cinq inconnues. Cette 4^{ème} équation est une relation entre la focale et l'épaisseur de la POE. Pour déterminer le dernier degré de liberté du système, l'épaisseur de la lentille est arbitrairement fixée afin de minimiser l'absorption dans la lentille. Les équations Eq. 0.12, Eq. 0.13 et Eq. 0.14, se simplifient et aboutissent à une relation de x_{Bx} en fonction de y_{Bx} :

$$x_{Bx} = \sqrt{az_{Bx}^2 + bz_{Bx}} \quad \text{avec} \quad a = n_{POE}^2 - 1 \quad Eq. 0.17$$

$$b = 2(focale - \text{épaisseur})(n_{poe} - 1) \quad Eq. 0.18$$

Le profil de la POE, régi par l'Eq. 0.17, dépend finalement de l'épaisseur choisie de la lentille, de l'indice de réfraction des matériaux ainsi que du facteur de concentration ou de la taille de la cellule.

3.2.2 Conception de l'optique secondaire

De la même manière que pour la conception de la POE, le profil de la SOE est calculé dans un plan 2D. Dans notre étude, le type de SOE choisie est le *SingLe Optical surface design* (SILO), décrit dans les références [37,81,82]. Le calcul du profil $f(x, z)$ de la SOE est basé sur le principe des rayons de bords. Il prend seulement en compte les rayons qui passent par l'extrémité $P_1(x_1, z_1)$ de la POE et qui rejoignent l'extrémité opposée $P_2(x_2, z_2)$ de la cellule (voir Figure 3.10). Ensuite, le principe de Fermat est appliqué à tous les rayons qui passent par le point P_1 et rejoignent le point P_2 , quel que soit leur angle d'incidence. Une grande amplitude en angle d'incidence de ces rayons traduit un angle d'acceptance élevé. Dans ces conditions, le principe de Fermat s'écrit :

$$l_1 + n_{SOE}l_2 = cste \quad Eq. 0.19$$

Dans le système de coordonnées du concentrateur, les longueurs l_1 et l_2 s'expriment :

$$l_1 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (z - z_1)^2} \quad Eq. 0.20$$

$$l_2 = \sqrt{(x - x_2)^2 + (z - z_2)^2} \quad Eq. 0.21$$

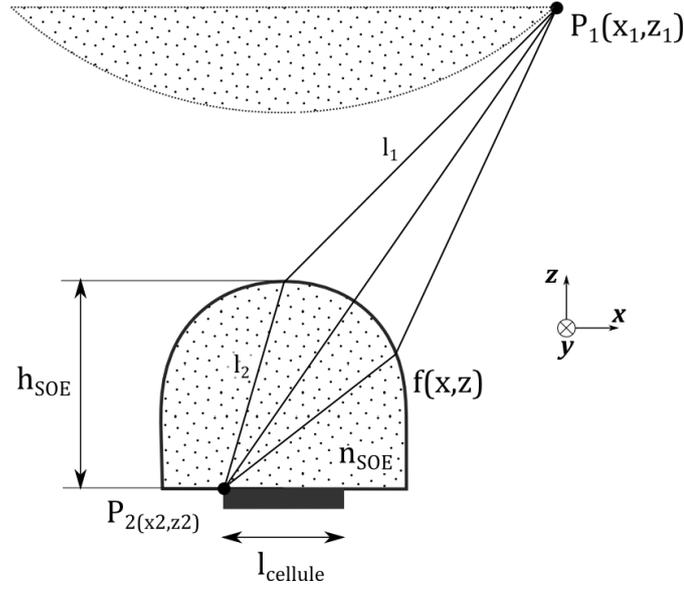


Figure 3.10 : Principe de Fermat et le principe des rayons de bord appliqué à la conception de l'optique secondaire (SOE).

Avec l'Eq. 0.19, les Eq. 0.20 et Eq. 0.21 forment un système de trois équations à quatre inconnues. Pour fixer le dernier degré de liberté, une condition supplémentaire est imposée sur la hauteur du dôme, notée h_{SOE} sur la Figure 3.10. Dans un premier temps, cette condition est imposée à la tangente au sommet du dôme. Pour le moment, la tangente doit être horizontale et la relation Eq. 0.22 exprime cette condition sur la hauteur h_{SOE} . La hauteur obtenue par cette condition initiale détermine la hauteur nominale du dôme. Elle dépend de l'indice de réfraction n_{SOE} , du côté c de la lentille et du nombre d'ouverture NO de la lentille.

$$h_{SOE} = \frac{x_2}{\tan[\sin^{-1} \frac{\sin[\tan^{-1} \frac{1}{2NO}]}{c}]} \quad \text{avec} \quad NO = \frac{\text{focale}}{\Phi_{\text{lentille}}} \quad \text{Eq. 0.22}$$

Le point $f(0, h_{SOE})$ défini ci-dessus constitue l'état initial du calcul itératif. Ensuite, la position de chaque point $(x_n; z_n)$ du profil $f(x, z)$ est déterminée par le processus itératif suivant avec un pas Δx :

$$x_{n+1} = x_n + \Delta x \quad z_{n+1} = z_n + \frac{\partial z}{\partial x} \Delta x \quad \text{Eq. 0.23}$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{(x - x_1)l_2 + n_{SOE}(x - x_2)l_1}{(z_1 - z)l_2 + n_{SOE}(z_2 - z)l_1} \quad \text{Eq. 0.24}$$

Les équations ci-dessus sont celles d'un ovale cartésien, représenté en pointillés sur la Figure 3.11. Cette courbe asymétrique propose deux solutions de profils différents pour la SOE. La première solution, appelée Dôme A, est la courbe bleue dans le quadrant des x positifs. La seconde, appelée Dôme B, est la courbe rouge dans le quadrant des x négatifs. Dans les deux cas, des droites verticales prolongent l'ovale cartésien à l'endroit où la tangente à l'ovale cartésien est verticale. Une partie du profil théorique de l'ovale cartésien est prolongée par des droites verticales car cette

partie n'est pas atteignable depuis la source lumineuse. Les Dôme A et B possèdent donc des bords verticaux, ce qui constitue un avantage pour leur fabrication.

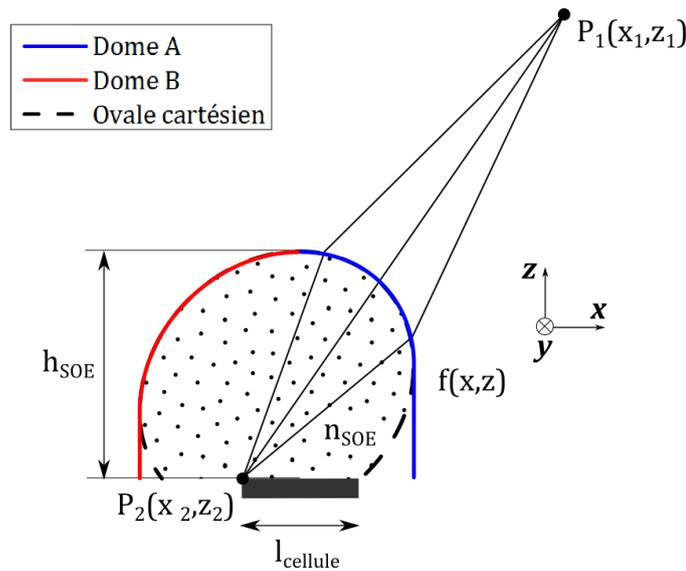


Figure 3.11 : Les dômes A et B sont respectivement générés par les parties positive et négative de l'ovale cartésien, solution de l'algorithme précédent.

Les dômes A et B permettent tous les deux d'homogénéiser le flux sur la cellule et d'augmenter l'angle d'acceptance. Cependant, leurs performances ne sont pas identiques. Le dôme A permet une meilleure homogénéité que le dôme B mais son angle d'acceptance est plus faible [37]. Dans le but de trouver le meilleur compromis entre l'angle d'acceptance et l'homogénéité, il est possible d'établir une combinaison des deux solutions que l'on appelle un « Dôme Hybride » [82].

En se référant à la conception du profil 2D du SILO, le paramètre définissant sa construction est la hauteur du dôme h_{SOE} . A l'origine, la tangente horizontale au sommet du dôme fixe sa hauteur nominale et impose le profil de l'ovale cartésien. En imposant une hauteur supérieure à cette hauteur nominale, la pente au sommet de la courbe varie et le diamètre du SILO augmente. En faisant varier cette hauteur, une infinité de dômes A et B sont possibles parmi lesquelles des combinaisons forment les dômes hybrides. Pour notre application, le nombre de dômes qui composent un dôme Hybrid est limité à deux. Un couple de dômes A et B de hauteurs différentes est constitué lorsqu'il y a tangence entre les deux profils à un point quelconque. Sur la Figure 3.12, trois dômes hybrides sont représentés avec les dômes A et B de hauteur variable qui les composent. Les courbes rouges représentent les dômes A ; les bleues représentent les dômes B ; les courbes noires en pointillés correspondent aux dômes hybrides. La notation $A_{h_A}-B_{h_B}$ qui désigne un dôme hybride précise la hauteur à l'origine de chacun des dômes qui le compose. Les dômes A et B de hauteur nominale avec leur tangente au sommet horizontale sont également représentés sur la Figure 3.12. Parmi ces cinq SOE possibles, celle qui a le meilleur angle d'acceptance et qui maximise la puissance lumineuse sur la cellule est sélectionnée. La section suivante décrit comment les performances optiques des SOE sont déterminées.

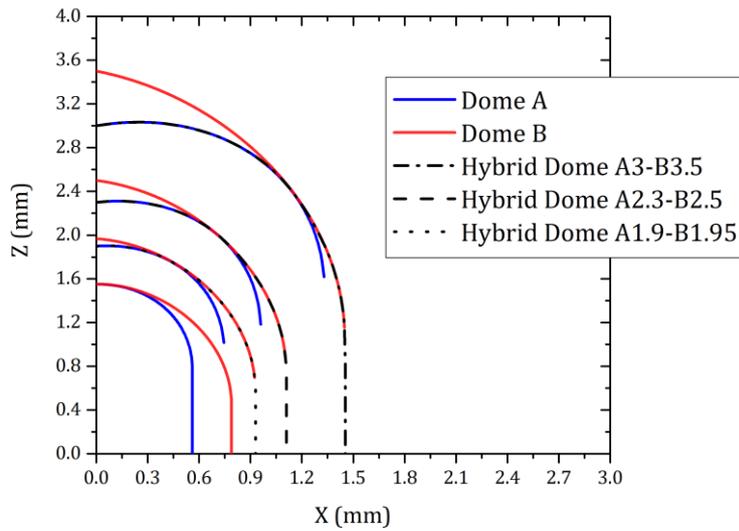


Figure 3.12 : Dômes A et B de hauteur nominale ainsi que 3 dômes hybrides représentés avec les dômes A et B de hauteur différente qui les composent.

3.3 Optimisation pour le spectre solaire

Les optiques primaires et secondaires dessinées avec les méthodes décrites dans la section précédente ne sont valables que pour un éclairage monochromatique pour $\lambda = 589\text{nm}$. En effet l'indice de réfraction du silicone qui compose les lentilles est donné par le fabricant, pour cette longueur d'onde. La Figure 3.13 compare le spectre AM1.5D [83] avec l'indice de réfraction du silicone [42] en fonction de la longueur d'onde. Bien que sa variation ne soit que de quelques centièmes dans la gamme de longueur d'onde du spectre solaire [250nm ; 2500nm], la variation d'indice est responsable des aberrations chromatiques. En effet, l'angle de déviation des rayons réfractés par une surface dépend de l'indice de réfraction. Les rayons prennent donc des trajectoires différentes selon leur longueur d'onde. Les aberrations chromatiques sont donc responsables d'un étalement de la tache focale.

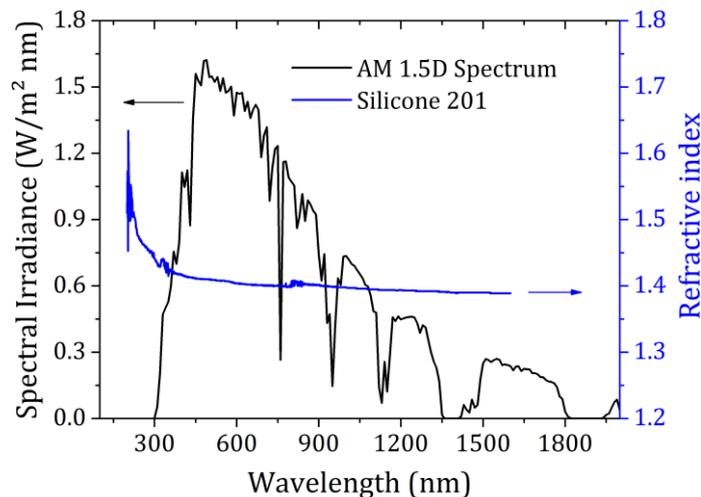


Figure 3.13 : Spectre solaire direct AM1.5D [83] et indice de réfraction du silicone 201 [42] en fonction de la longueur d'onde.

Afin de minimiser l'étalement de la tache focale sur la cellule, la conception des micro-concentrateurs comporte une étape d'optimisation. Cette optimisation, effectuée à l'aide du logiciel de tracé de rayons TracePro, est détaillée dans les sections suivantes.

3.3.1 Simulations par tracé de rayon

Les simulations par tracé de rayons permettent d'obtenir la carte d'irradiance à la surface de la cellule. La puissance lumineuse totale reçue par la cellule constitue un indicateur majeur de l'efficacité du concentrateur. La source lumineuse modélisée pour le tracé de rayon reproduit le spectre AM1.5D, représenté sur la Figure 3.13 en W/m^2 , ainsi que l'ouverture angulaire de $\pm 0,27^\circ$ du rayonnement solaire. Le spectre solaire est discrétisé sur une dizaine de longueur d'onde entre 300 et 1800nm. En revanche la distribution angulaire est continue avec un angle de coupure à $0,27^\circ$. Les cartes d'irradiance enregistrées à la surface de la cellule permettent d'avoir des informations sur la puissance reçue, l'homogénéité spatiale et l'homogénéité spectrale. La Figure 3.14 a) montre une simulation par tracé de rayons effectuée sur un concentrateur 1000X à double étage de lentille. La Figure 3.14 b) montre la carte d'irradiance enregistrée pour un éclairage avec le spectre AM1.5D. Cette carte d'irradiance représente le flux en W/m^2 enregistré par chaque pixel de la surface réceptrice discrétisée en 128×128 éléments. Pour reproduire la surface active des micro-cellules utilisées, la surface réceptrice est obturée par les deux principaux contacts métalliques de la cellule (les deux *Busbars*). Chaque simulation est effectuée avec un million de rayons. Ce nombre de rayons a été défini pour assurer la convergence du modèle de simulation tout en limitant le temps de calcul. Comme chaque pixel reçoit en moyenne 60 rayons, les valeurs de flux qu'ils enregistrent sont significatives et répétables et chaque tracé de rayons prend quelques secondes. La puissance lumineuse totale reçue par la cellule correspond à l'intégrale du flux sur la surface réceptrice ombrée par les deux *Busbars*. Par exemple, la carte d'irradiance de la Figure 3.14 b) est celle obtenue pour le couple POE-Dôme A1.9-B1.95, après optimisation. La transmittance des dispositifs optiques comparés est la fraction de la puissance lumineuse qui atteint la surface de la cellule par rapport à celle à l'entrée du concentrateur.

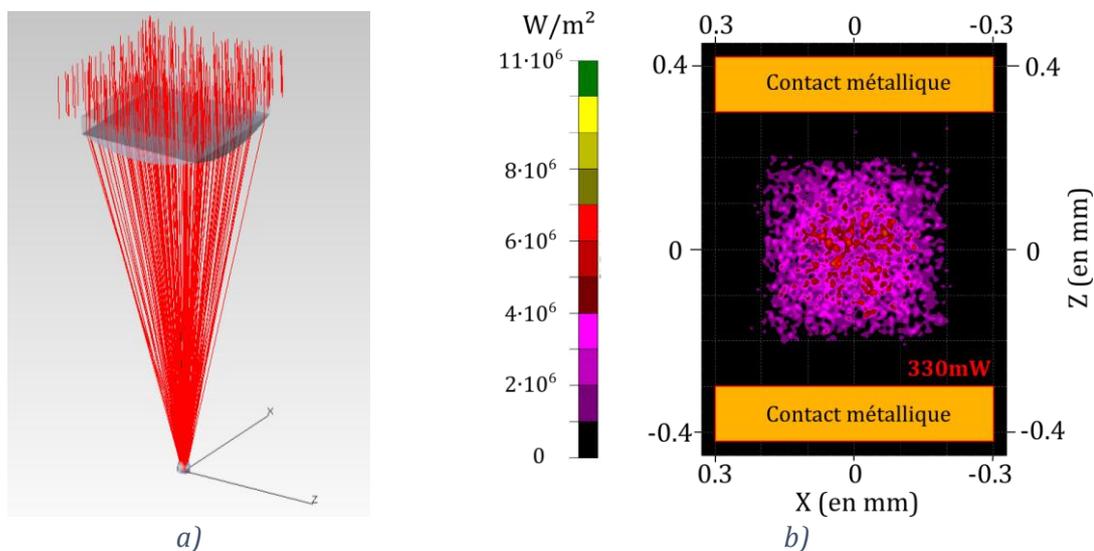


Figure 3.14 : a) Tracé de rayon sur un micro-concentrateur avec le logiciel TracePro. b) Carte d'irradiance à la surface de la cellule pour le spectre AM1.5D.

3.3.2 Comparaison des performances de chaque SOE conçue

Les cinq SOE de la Figure 3.12 sont analysées et comparées en fonction de leurs performances simulées par tracé de rayons. Avec la puissance lumineuse reçue par la cellule comme indicateur, plusieurs études sur leurs performances peuvent être réalisées. Pour chaque SOE, on peut déterminer leur transmittance, leur angle d'acceptance ainsi que leur tolérance à la défocalisation. Par exemple, la Figure 3.15 représente les performances du dôme hybride A1.9-B1.95. Sur cette figure, une surface 3D représente la transmittance (rapport de la puissance lumineuse entrante sur la puissance lumineuse sortante en échelle de couleur) en fonction de l'angle d'incidence des rayons (en abscisse) et de la défocalisation du récepteur (en ordonnée). L'angle d'acceptance du concentrateur est calculé au point focal, lorsque les pertes de puissances sont de 10%. La défocalisation du récepteur est mesurée en mm par rapport au point focal de la POE. Les Figure 3.16 a) à d) correspondent respectivement aux performances des Dôme A, Dôme B, Dôme hybride A2.3-B2.5 et A3.3-B3.5 conçus lors de l'étape précédente. Le Tableau 3 recense les transmittances et en angle d'acceptance de chaque SOE, issues des Figure 3.15 et Figure 3.16. Parmi les cinq SOE conçues, le dôme hybride A1.9-B1.95 est le plus efficace et celui qui a le plus grand angle d'acceptance ($\pm 0,6^\circ$). La défocalisation n'est pas critique sur ce système puisqu'elle est de plusieurs millimètres. Aucune influence sur la puissance n'est observée entre +2mm et -2mm par rapport au point focal.

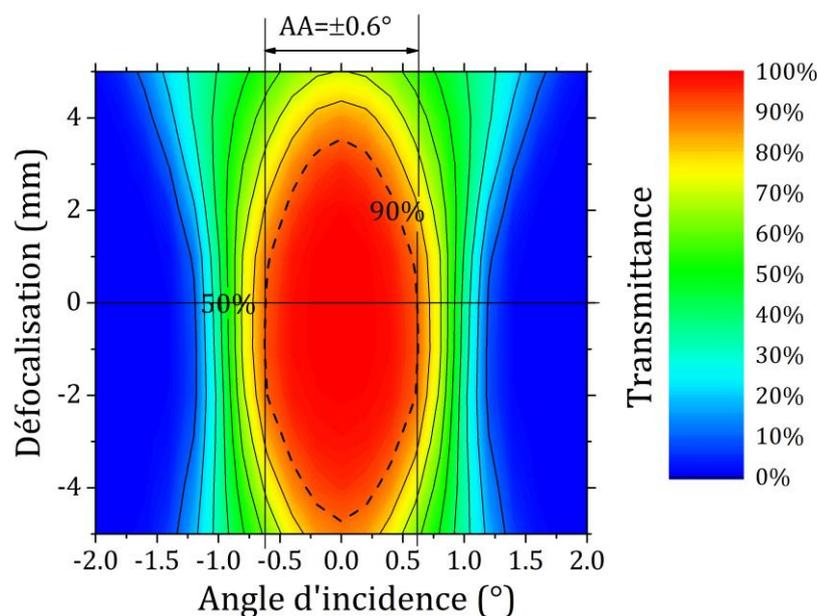


Figure 3.15 : Transmittance du concentrateur avec le dôme Hybride A1.9-B1.95 en fonction de l'inclinaison des rayons incidents et de la défocalisation.

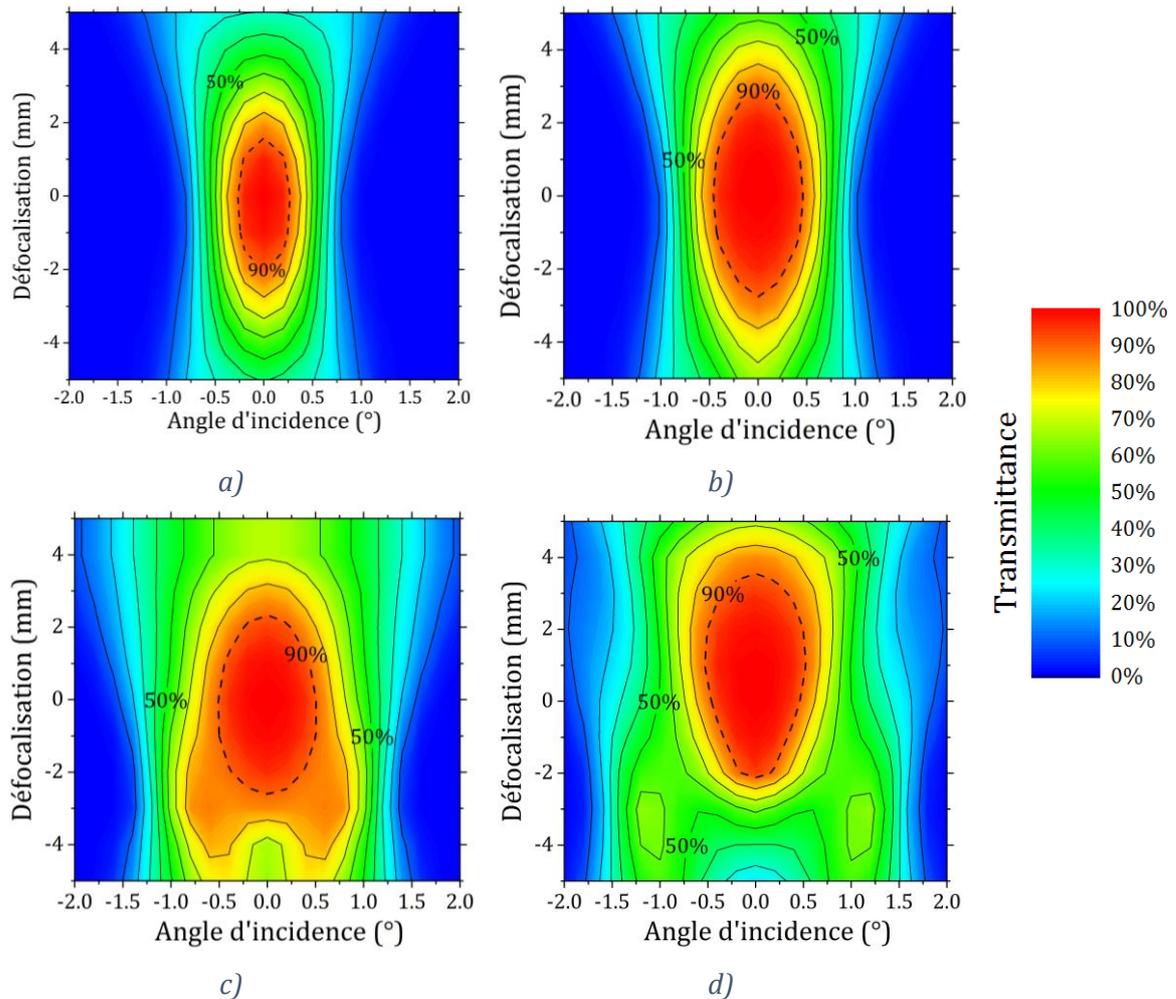


Figure 3.16 : Cartographie de la transmittance en fonction de la défocalisation et de l'angle d'incidence pour a) Dôme A, b) Dôme B, c) Dôme hybride A2.3-B2.5 et d) Dôme hybride A3.3-B3.5

Tableau 3 : Comparaison des différentes SOE en fonction de leur angle d'acceptance et de leur transmittance maximale.

Optique secondaire testée	Angle d'acceptance à 90%	Transmittance Maximale
Dôme A	$\pm 0,25^\circ$	83,3%
Dôme B	$\pm 0,45^\circ$	88,3%
Dôme A190-B195	$\pm 0,6^\circ$	88,5%
Dôme A230-B250	$\pm 0,55^\circ$	87,1%
Dôme A300-B350	$\pm 0,4^\circ$	87,7%

3.3.3 Optimisation des optiques

Après avoir choisi le dôme hybride avec le meilleur angle d'acceptance et la meilleure transmittance, la forme de la POE est optimisée pour maximiser la puissance reçue à la surface de la cellule. Au cours de cette étape, l'algorithme d'optimisation du logiciel utilisant la méthode de Nelder-Mead modifie la forme de l'optique primaire afin d'obtenir la puissance maximale à la surface de la cellule. Plusieurs points de contrôle du profil de la lentille, comme ceux représentés par des flèches sur la Figure 3.17, sont définis dans une certaine gamme de mobilité. En modifiant la position de ces points, l'algorithme cherche la forme de la lentille qui maximise la puissance à la surface de la cellule. La Figure 3.17 illustre le principe de cette étape d'optimisation.

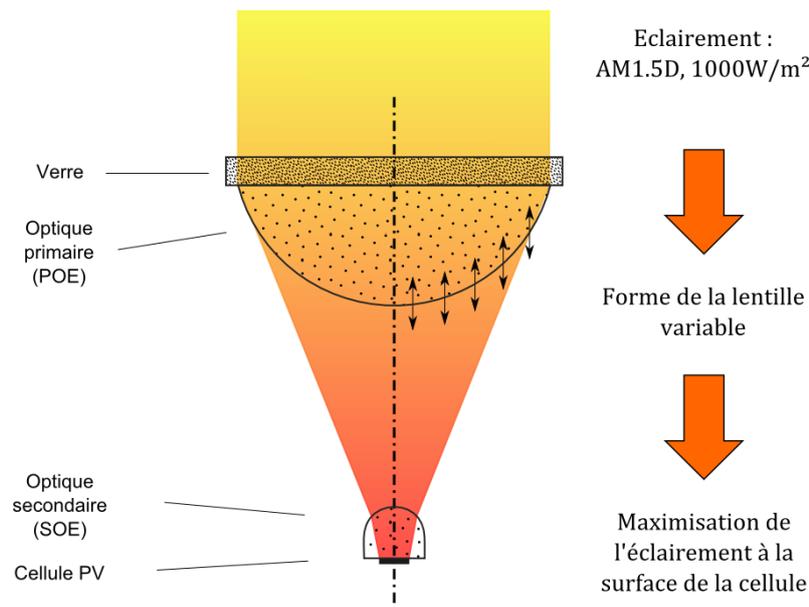


Figure 3.17 : Optimisation de la POE pour le spectre AM1.5D.

Après optimisation de la forme de la POE, les tolérances mécaniques du concentrateur sont également déterminées afin d'établir le cahier des charges pour la fabrication des pièces. Les détails de la fabrication des concentrateurs dessinés pour différentes concentrations et tailles de cellules sont donnés dans le chapitre suivant.

3.4 Concentrateurs réalisés

La méthode de conception des micro-concentrateurs étudiés dans ma thèse applique les étapes décrites dans ce chapitre, dans l'ordre où elles ont été énoncées. Dans un premier temps le profil de la POE est calculé en fonction du facteur de concentration et de la taille de la cellule à $\lambda = 589nm$. Ensuite, cinq profils de la SOE sont est calculés à partir de la méthode SILO à $\lambda = 589nm$ également. La SOE sélectionnée est celle qui a le plus grand angle d'acceptance et la meilleure transmittance. Enfin, la forme de la POE est optimisée pour tout le spectre solaire AM1.5D. La Figure 3.18 illustre cette méthode de conception optique par un organigramme.

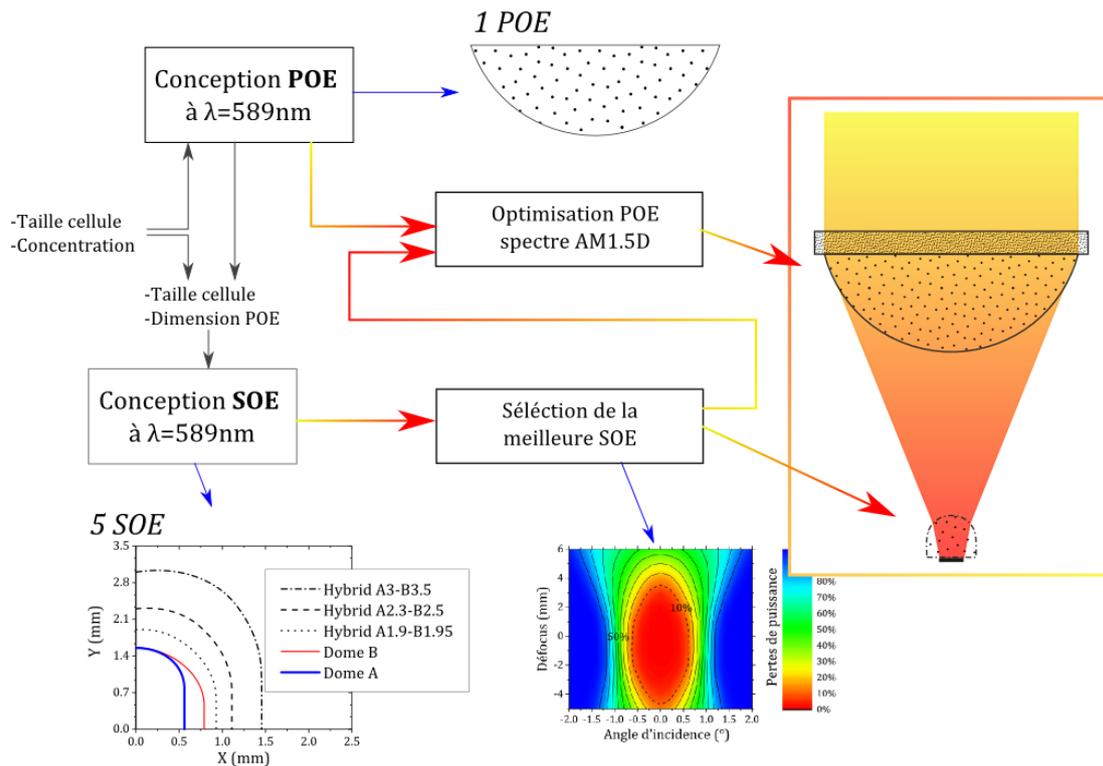


Figure 3.18 : Méthode de conception optique des micro-concentrateurs à double étage de lentille.

Deux micro-concentrateurs réalisés selon cette méthode sont représentés dans la Figure 3.19. Un micro-concentrateur de 275X avec des cellules de $0,9 \times 0,9 \text{ mm}^2$ est représenté sur la Figure 3.19 a), un autre de 1000X avec des cellules de $0,6 \times 0,6 \text{ mm}^2$ est sur la Figure 3.19 b). Le côté d'une POE du premier module est de 15mm, celle du second est de 19mm.

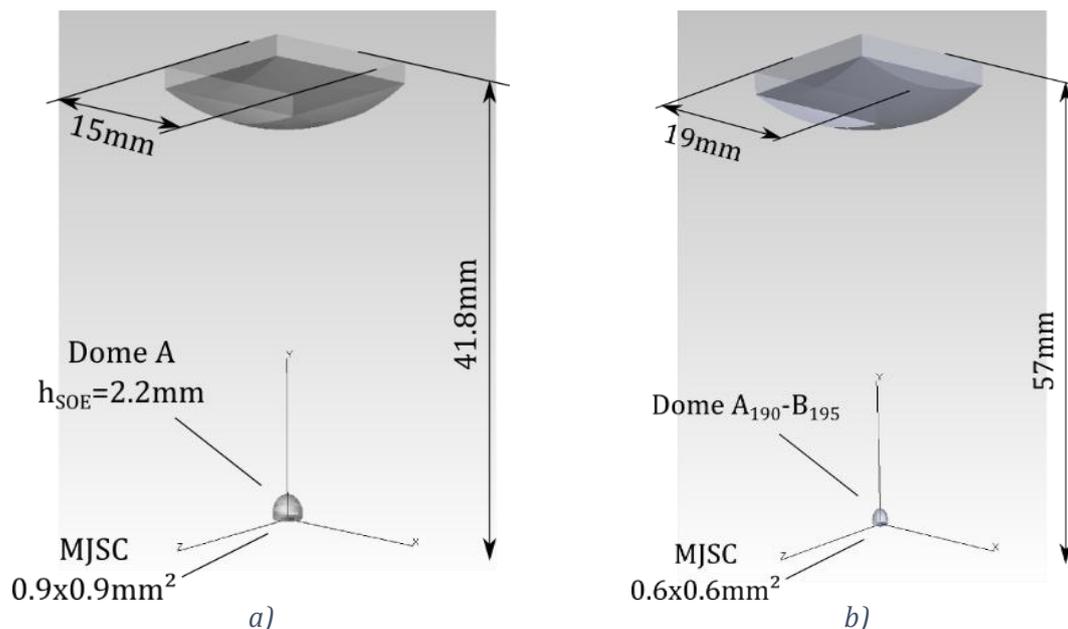


Figure 3.19 : Représentation de deux micro-concentrateurs a) 275X et b) 1000X conçus avec la méthode décrite dans ce chapitre.

Les deux micro-concentrateurs de la Figure 3.19 définissent les dimensions et la forme des optiques de deux prototypes réalisés pendant ma thèse. Les deux modules μ -CPV réalisés à partir de ces dessins sont des démonstrateurs de 4×4 éléments. Le chapitre suivant décrit le procédé de fabrication innovant qui a été développé pour la fabrication des optiques ainsi que leur assemblage.

Fabrication des modules μ -CPV

Le procédé de fabrication des modules CPV et μ -CPV est généralement réalisé en cinq étapes distinctes :

- Interconnexion et positionnement des cellules sur la face arrière du module,
- Fabrication du parquet de POE,
- Fabrication des SOE,
- Assemblage des SOE avec les cellules sur la face arrière,
- Assemblage de la face arrière et du parquet de POE.

Dans cette thèse, on développe un procédé de fabrication en trois étapes seulement. A la différence des procédés habituels, les POE et SOE sont fabriquées et auto-alignées en une seule étape. Ce chapitre décrit en détail ce principe d'auto-alignement.

Les techniques d'interconnexion des cellules sur la face arrière sont issues du domaine de l'électronique et de la micro-électronique. L'interconnexion doit assurer la bonne connexion électrique des cellules entre elles, garantir le bon positionnement des cellules et gérer l'accumulation de chaleur liée à la concentration. Ces trois problématiques, bien connues dans le domaine des LED (Light Emitting Diode), sont aujourd'hui matures et robustes. L'assemblage des cellules par des techniques de *Pick and Place* est très répandu dans l'industrie des modules CPV [78].

Pour la fabrication des SOE et POE ainsi que leur assemblage, il existe de nombreuses techniques qui varient beaucoup en fonction de la taille des lentilles. La section suivante identifie les principales techniques de fabrication dans des domaines connexes au CPV. A la suite de ce court état de l'art, ce chapitre décrit en détail un procédé innovant de fabrication des modules μ -CPV. Ce procédé, basé sur le moulage des lentilles, permet de fabriquer un module μ -CPV en trois étapes au lieu de cinq. S'en suivent une étude des tolérances mécaniques du système ainsi que les détails de la réalisation.

4.1 Matériaux et procédés pour les optiques de concentration

Pour fabriquer les optiques de concentration, plusieurs matériaux et procédés existent dans le domaine du CPV. La plupart de ces procédés sont très inspirés des techniques de fabrications d'optiques pour l'éclairage, pour les lentilles de contact, pour les objectifs de caméra ou pour des simples loupes. Le Tableau 0-1 résume les principaux matériaux mis en œuvre dans les optiques de concentration. Pour chaque matériau, l'usage et le procédé de fabrication est donné. Les verres flottés, largement répandus dans les panneaux PV plans, assurent la protection des cellules PV contre les agressions environnementales (UV, intempéries) et transmettent un maximum de lumière dans la zone d'absorption des cellules. Ces verres ont une excellente planéité mais sont coulés dans leur état de fusion (entre 1300°C et 1500°C) [84]. Dans les modules CPV, leur fonction est la même car le façonnage de lentilles en verre est trop onéreux. Les optiques de concentration sont généralement formées par des procédés à bas coût avec des matériaux sous forme liquide à des températures plus basses. Les matériaux réalisés par procédé Sol-Gel, issus d'une réaction chimique entre une solution acide et un composé organique, gélifient à des températures comprises entre 20°C et 150°C. Les Sol-Gel peuvent être formés par moulage par exemple. Ils sont utilisés à la fois dans les optiques primaires et secondaires [85]. Les silicones sont également des liquides plus ou moins visqueux qui solidifient par polymérisation à température ambiante.

Tableau 0-1 : Principaux matériaux et procédés associés pour la fabrication d'optiques de concentration.

Matériau	Fonction	Procédé(s)	Réf.
Verre	Verre de protection	Verre flotté (procédé « <i>float glass</i> »)	[84]
	SOE	Billes de verre : Polissage	
Sol-Gel	POE	Moulage / Frittage	[85,86]
	SOE	Moulage / Frittage	[85,86]
Silicones	POE (<i>Silicone-on-Glass</i>)	Moulage / Coulage	[86,87]
	SOE	Moulage	[86]
	Colle pour SOE	Coulage	[84]
PMMA (Polyméth acrylate de Méthyle ou Plexiglas)	POE	Moulage / Gaufrage à chaud (hot embossing)	[86,88,89]
	SOE	Moulage / Gaufrage à chaud (hot embossing)	[86,88,89]
Aluminium	Miroir	Polissage / Dépôts / Roulage / Emboutissage / Etc.	[90,91]

De la même manière que les Sol-Gels, les silicones peuvent former des POE et des SOE par moulage [87]. D'autres polymères, tels que le Polyméthacrylate de méthyle (PMMA ou *Plexiglas*®) et le Polycarbonate (PC), sont également utilisés dans les optiques de concentrations. Ces polymères, sont formés par moulage ou gaufrage à chaud (de 100°C à 150°C) [88,92]. Le procédé de gaufrage à chaud des polymères est plus répandue dans le CPV, notamment pour la fabrication de lentilles de Fresnel [80]. Par ailleurs, les modules CPV avec optiques réfléchives utilisent des miroirs en aluminium ou en argent qui peuvent être polis, emboutis, roulés extrudés, etc. [91]. Ces optiques réfléchives sont en dehors du domaine d'application de cette étude mais il est important de noter que certains modules CPV utilisent des optiques secondaires réfléchives avec des miroirs métalliques.

Dans le cas des modules CPV à deux étages de lentilles, Les POE et les SOE sont fabriquées séparément. Les POE sont fabriquées collectivement pour constituer un pavage de lentilles continu en face avant des modules. Les matériaux utilisés sont le plus souvent des polymères ou des silicones moulées sur une plaque de verre (Silicone-on-Glass). Les optiques primaires, qui jouent le rôle de concentrateur, sont des lentilles convergentes pleines ou des lentilles de Fresnel. Quoi qu'il en soit, les techniques de fabrications restent les mêmes : le moulage ou le gaufrage à chaud (hot embossing) [93]. Sur le deuxième étage du module, les SOE sont généralement fabriquées puis couplées avec chaque cellule en deux temps distincts. Très variées, les techniques de fabrication sont inspirées de différents domaines d'applications qui peuvent être classées par ordre de grandeur :

- *centimétrique* :

Objectifs de microscope, lentilles ophtalmiques, luminaires domestiques ou professionnels.

- *millimétrique* :

Objectifs de caméra de téléphone, éclairage LED, têtes de lecture de CD/DVD [88].

- *submillimétrique* :

Micro-réseaux de lentilles pour détecteurs CCD ou CMOS, matrices de diodes ou lasers pour la télécommunication [94].

Pour des lentilles de diamètre supérieur à 1mm, le procédé de fabrication le plus commun est le moulage, comme il est largement décrit dans le livre *Molded Optics : design and manufacture* [86]. Pour les lentilles de diamètre inférieur à 1mm, les microlentilles, les techniques de fabrication les plus répandues sont recensées dans le Tableau 0-2. Dans ce tableau, les différents procédés sont comparés en fonction de la taille des lentilles réalisées ainsi que l'état de surface obtenu. L'état de surface est quantifié par la taille moyenne des rugosités, noté *Roughness Average* (Ra) en anglais. La Figure 4.1, représente les dimensions des microlentilles données dans le Tableau 0-2. L'image de droite est une image de microscope électronique d'une micro lentille gaufrée à chaud [95].

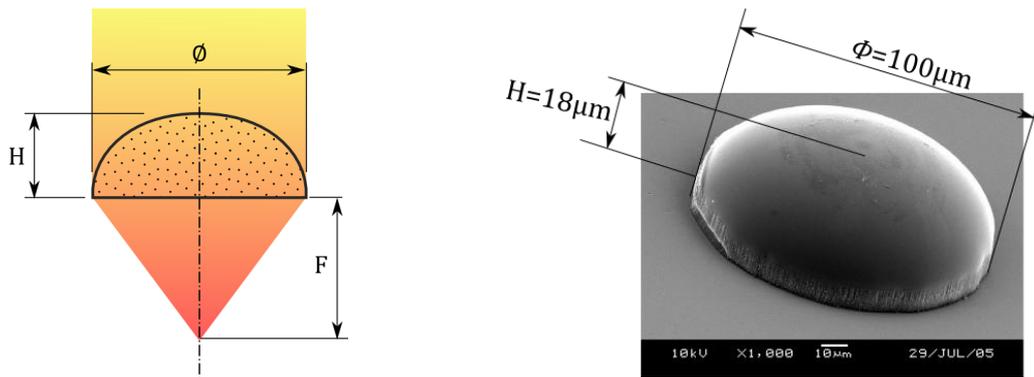


Figure 4.1 : Dimensions des microlentilles du tableau 4.2. Exemple d'une microlentille gaufrée à chaud en PC avec ses dimensions [95].

Tableau 0-2 : Principales techniques de fabrication de microlentilles.

Procédé	Matériaux	ϕ (μm)	H (μm)	F (μm)	Ra (nm)	Réf
Hot embossing	PMMA/PC	330-500	14-30	1000-2200	7	[96,97]
Microdroplet jetting	Polymères divers	20-140	5-45	25-175	0,5-2	[98–100]
Grayscale lithography	Sol-Gel	140	2.1	-	1	[101]
Thermal reflow	PMMA/PC	50-200	7-8	100-1600	5	[102]
Micro-moulage	PMMA/PC	100-1200	2-60	1-2600	1,6-10	[103–105]

Parmi les cinq procédés énumérés dans le Tableau 0-2, les quatre premiers sont issus d'applications micro-électroniques. Ils utilisent les propriétés hydrophobes des substrats ainsi que la tension de surface des matériaux sous forme liquide. Le principe physique qui crée la courbure des lentilles, avant leur solidification, est un équilibre entre les forces de pressions et les forces dues aux tensions de surfaces. Dans la pratique, le diamètre des microlentilles ne dépassent que rarement $500\mu\text{m}$, comme le montre le Tableau 0-2. A l'inverse, le 5^{ème} procédé est un procédé de moulage par injection. Ce procédé ne change pas de celui employé pour les lentilles de taille supérieures mais la fabrication du moule peut être très différente. Pour des lentilles de diamètre inférieur à 1mm , le moule peut aussi être fabriqué par gravure chimique ou d'autres procédés issus de la micro-électroniques [95,104,106]. Finalement, quelle que soit la taille des lentilles entre le μm et le cm , le moulage est un procédé de fabrication pertinent pour la réalisation des optiques. Le Tableau 0-3, montre les tolérances standards des optiques moulées résumées à partir des données d'une multitudes de fabricants [86]. Ce tableau donne un ordre de grandeur de la qualité atteignable par moulage. Dans certains cas, la qualité des optiques produites peut être supérieure. La taille des optiques (rayon de courbure, diamètre, épaisseur et décentrage) varie de quelques μm . Les erreurs de formes (forme de surface, irrégularités, rugosités, etc.) sont comparables à celles requises pour les optiques de précision en verre. A titre de comparaison, une lentille d'objectif

d'appareil photo présente des rugosités moyennes de taille inférieure à λ/n , avec n allant de 3 à 8 selon la qualité, ce qui représente des rugosités allant de 75nm à 150nm.

Tableau 0-3 : Tolérances de la norme pour les optiques moulée par injection [86].

Rayon de courbure (%)	±0,5
Focale (%)	±1,0
Diamètre (µm)	±20
Epaisseur (µm)	±20
Forme de surface (franges par cm)	1-4
Irrégularité de surface (franges par cm)	0,5-2
Rugosité de surface (RMS Å)	20-40
Décentrage radial de la surface (µm)	20
Qualité de surface (marque/creux)	40/20
Profondeur des microstructures sur la surface diffractive (µm)	±0,1

Note: Les franges sont à $\lambda=632,8$ nm.

Parmi les nombreuses solutions possibles pour la fabrication des optiques, le moulage par injection est le procédé le plus polyvalent et un des moins coûteux. Les optiques primaires et secondaires, bien que leur taille varie d'un ordre de grandeur, sont fabriquées par moulage. De plus, la qualité des optiques moulées est éprouvée pour de nombreuses applications connexes à la concentration solaire. C'est pourquoi le moulage est à la base du procédé de fabrication de modules μ -CPV détaillé ici.

4.2 Procédé de fabrication des modules proposé : trois étapes

Le moulage est adapté à la fabrication des POE comme des SOE. Le principe du procédé en trois étapes qui fait l'objet de cette thèse réside dans le moulage simultané des deux étages de lentilles avec un seul moule. Ce moule abrite les empreintes des deux types de lentille sur deux de ses faces pour permette la fabrication simultanée des optiques primaires et secondaire. De plus, en utilisant un moule à « double face », l'alignement de ces deux étages de lentilles intrinsèquement réalisé lors de cette étape. Habituellement, chaque étage de lentille est réalisé séparément et assemblé par la suite. Les trois étapes dont le détail fait l'objet de cette section, sont les suivantes :

- Interconnexion et positionnement des cellules,
- Moulage et auto-alignement des lentilles,
- Assemblage du module μ -CPV final.

Ce procédé en trois étapes au lieu de cinq a été breveté par le laboratoire [107].

Dans cette section le principe de chaque étape est expliqué avec une attention particulière sur le positionnement des éléments les uns par rapport aux autres.

4.2.1 Interconnexion et positionnement des cellules

Dans un premier temps, comme le montre la Figure 4.2, les cellules sont positionnées et interconnectées via un circuit imprimé (PCB pour Printed Circuit Board). Ce PCB est fixé sur la face arrière métallique du module qui comporte les inserts rectifiés A et B. Les inserts rectifiés B permettent de maintenir la position du PCB sur la face arrière du module ; les inserts A, la position des autres pièces assemblées avec la face arrière. Sur cet ensemble PCB-Face arrière, les cellules sont positionnées avec précision par rapport aux inserts rectifiés A, qui constituent le repère géométrique de l'ensemble.

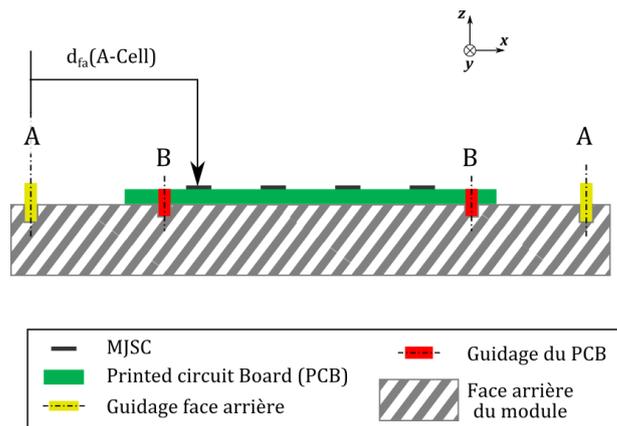


Figure 4.2 : Première étape du procédé : Interconnexion et positionnement des cellules sur le circuit imprimé.

Lors de cette première étape du procédé de fabrication des micromodules, le positionnement des cellules est très important. Chaque cellule est collée par rapport à un repère visuel, typiquement, l'insert A de la Figure 4.2 sur la face arrière du module. La machine de *pick-and-place* utilisée pour ce positionnement (Datacon 2200 apm+) place les cellules l'une après l'autre par rapport à ce repère en utilisant une fonction de reconnaissance de forme. Après le collage de chaque cellule, la précision du placement est contrôlée par plusieurs outils de mesure. L'angle des cellules et leur position par rapport aux inserts doit répondre aux tolérances mécaniques fixées lors de la conception. La distance $d_{fa}(A-Cell)$, est un élément important dans la chaîne de cotes qui définit l'incertitude globale de positionnement de la cellule dans le système optique.

4.2.2 Moulage et auto-alignement des lentilles

Dans un second temps, le moulage par injection des POE et des SOE est simultané. Deux faces du moule comportent des empreintes de lentilles. La Figure 4.3 représente l'injection du silicone liquide dans ces empreintes de POE d'un côté et de SOE de l'autre. Comme chaque cellule est placée dans un repère géométrique lié aux inserts A, l'alignement SOE-Cellule dépend des distance $d_{fa}(A-Cell)$ (Figure 4.2) et $d_m(A-SOE)$ (Figure 4.3). Comme les POE sont moulées au même moment, l'alignement SOE-POE est assuré par les distances $d_m(A-POE)$ et $d_m(A-SOE)$ (Figure 4.3). L'alignement POE-Cellule est assuré par les distances $d_{fa}(A-Cell)$ et $d_m(A-POE)$.

Sur la face avant du moule, les inserts C guident le verre par rapport au moule. En quelques sortes, ce guidage mémorise l'alignement des POE avec la face arrière du

module lors du moulage. La position des POE par rapport aux inserts C est une reproduction de la position des cavités de POE par rapport à cet insert dans le moule. On considère donc que la distance entre l'insert C et la POE est $d_m(C-POE)$, que ce soit pendant le moulage ou une fois que les POE sont moulées. En somme, la distance Cellule-POE résulte de la chaîne de cote suivante :

$$d_{moulage}(Cellule - POE) = d_{fa}(A - Cell) + d_m(A - C) + d_m(C - POE) \quad Eq. 0.1$$

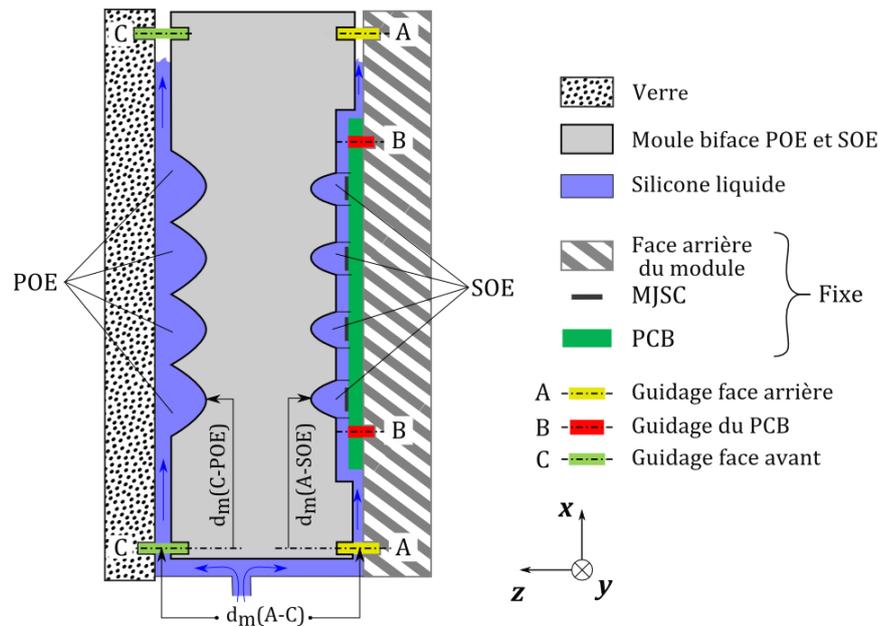


Figure 4.3 : Seconde étape du procédé : Injection simultanée du silicone dans les empreintes de POE et SOE. Auto-alignement des optiques grâce à la géométrie du moule.

En plus de garantir l'alignement des éléments du système optique, le moule, la face arrière du module, et les pièces annexes doivent assurer trois fonctions principales. Le montage du moule avec les autres éléments doit être étanche, démontable et remontable. L'étanchéité est gérée au moyen de joints toriques et grâce à la qualité des surfaces dans le plan de joint. L'alignement est assuré par les inserts A et C, qui jouent le rôle de guide pour le montage des pièces métalliques. Ces guides mécaniques sont montés glissants et sans jeu dans les pièces mécaniques pour remplir la double fonction d'alignement et de démontage du moule. Les distances $d_m(A-SOE)$ et $d_m(A-POE)$ représentés sur la Figure 4.3 constitue également des éléments importants de la chaîne de cotes qui définit l'incertitude globale du positionnement de la cellule dans le système optique.

4.2.3 Assemblage du module μ -CPV final

La troisième étape consiste simplement à remplacer le moule par une entretoise qui maintient les récepteurs à la distance focale et en vis-à-vis des POE. L'entretoise, est usinée avec les mêmes dimensions que le moule. Cela permet de réaligner les POE avec les récepteurs avec les mêmes références de positionnement que lors du moulage. La Figure 4.6 ci-dessous représente le module final assemblé avec l'alignement assuré par les inserts A, B et C. L'alignement Cellule-SOE est celui

appliqué lors du moulage ; l'alignement Cellule-POE est celui appliqué lors du moulage sauf que la distance A-C n'est pas maintenue par la même pièce (voir Eq. 0.1).

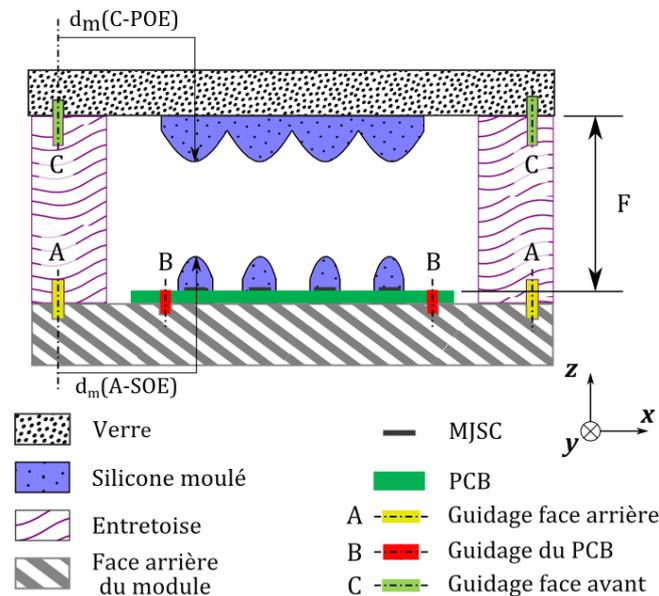


Figure 4.4 : Troisième étape du procédé : Assemblage des optiques primaires et secondaires via une entretoise avec la même géométrie que le moule. Auto-alignement respecté grâce aux guides mécaniques.

Lors du montage du module final. La face avant du module avec les POE s'emboîte dans les inserts C, montés serrés dans l'entretoise. De la même manière que lors du moulage, les faces avant et arrière sont ajustées glissantes, sans jeu avec les inserts. Les trois parties, la face avant, l'entretoise et la face arrière sont fixées par des vis M3. L'alignement final des POE avec les cellules et des SOE avec les cellules sont définis par les incertitudes sur les distances $d_m(C-POE)$ et $d_m(A-SOE)$.

4.3 Estimation des tolérances mécaniques

L'alignement des optiques doit être suffisamment précis pour limiter les pertes dans le module. Les dimensions du moule, la forme des empreintes et leur état de surface doivent répondre à une exigence minimale pour limiter les pertes optiques. Cette section explique comment sont quantifiées les tolérances que doivent respecter les pièces de l'assemblage.

L'impact des déformations et désalignements sur les performances est estimé par des simulations par tracé de rayons. Comme décrit dans le chapitre précédent, la source lumineuse reproduit l'ouverture angulaire et le spectre solaire. Les indices de réfraction du verre et du silicone sont pris dans les fiches techniques des matériaux. L'absorption du silicone et la diffusion due à l'état de surface, inconnues pour l'instant, ne sont pas prises en compte dans ces simulations. L'objectif de ces simulations est de quantifier les pertes de puissance à cause d'un mauvais alignement des optiques ou des erreurs de forme des lentilles. D'après l'état de l'art, les performances affectées sont la puissance lumineuse reçue par la cellule mais surtout l'angle d'acceptance du module. Dans cette section, on cherche donc à quantifier l'influence des mobilités de chaque élément sur l'angle d'acceptance du module.

4.3.1 Angle d'acceptance

Un module CPV collecte la lumière directe du soleil. Pour cela, il est généralement placé sur un système de pointage qui aligne son axe optique avec les rayons du soleil. Malheureusement, ces systèmes de pointage, couramment appelés *trackers*, ne sont pas parfaits. Pour compenser leur dépointage angulaire, le module doit donc tolérer un certain angle d'incidence des rayons du soleil sans limiter la puissance produite. Pour cela, on définit l'angle d'acceptance (AA) des modules comme étant « l'angle maximum d'incidence des rayons du soleil qui permet au module de produire au moins 90% de sa puissance nominale » [36]. La puissance électrique délivrée par le module est proportionnelle à la puissance lumineuse reçue par ses cellules. Pour simplifier la représentation de l'acceptance angulaire du module, on introduit la transmittance du concentrateur qui est le rapport de la puissance lumineuse reçue par la cellule sur la puissance lumineuse incidente. Exprimée en % sur la Figure 4.8 en fonction de l'angle d'incidence des rayons du soleil, la transmittance facilite la lecture de l'angle d'acceptance (AA). En effet, l'AA correspond au croisement entre la courbe d'acceptance angulaire et la ligne d'iso-valeurs à 90% de la transmittance. Par la suite, nous étudierons l'évolution de cette courbe d'acceptance angulaire en fonction de différents paramètres géométriques du micro-concentrateur. La transmittance sera donc représentée par une cartographie en fonction de l'angle d'incidence et d'un autre paramètre du concentrateur.

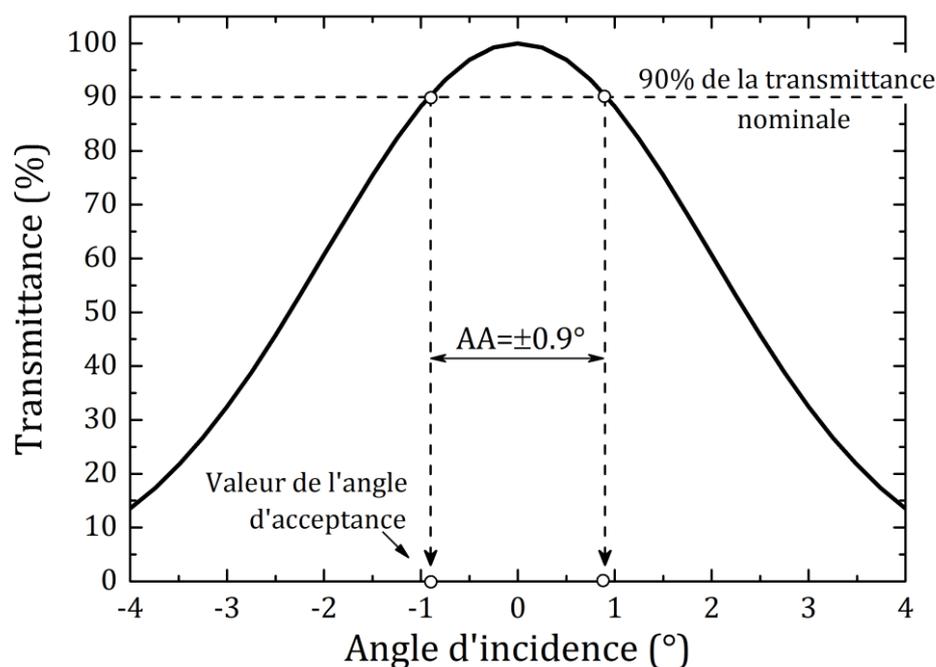


Figure 4.5 : Définition de l'angle d'acceptance (AA) sur la courbe de transmittance en fonction de l'angle d'incidence des rayons du soleil.

4.3.2 Désalignements des éléments du concentrateur

Dans le plan 2D, chaque élément du concentrateur (la POE, la SOE et la cellule) possède 2 degrés de liberté en translation et un degré de liberté en rotation. Avec l'angle d'incidence des rayons à faire varier pour obtenir l'angle d'acceptance (AA), dix paramètres influent sur la puissance reçue à la surface de la cellule au total. La Figure 4.6 représente ces dix paramètres :

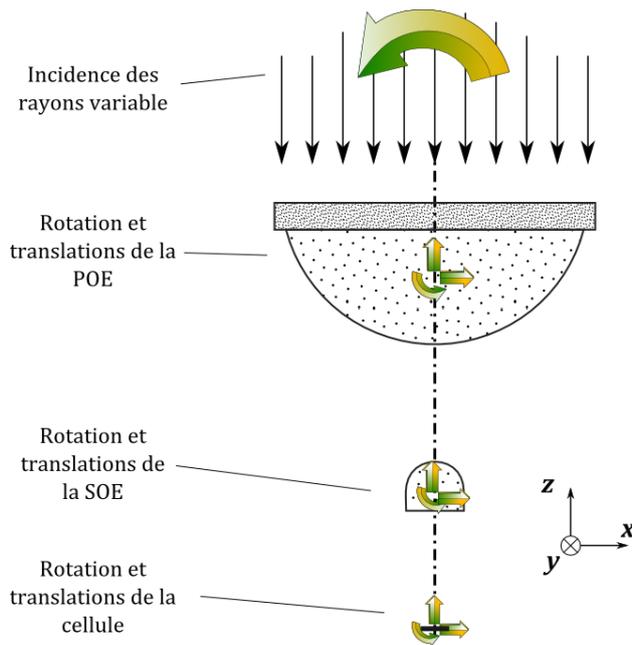


Tableau 0-4 : Bilan des degrés de libertés du système

Axe	Translation		Rot.
	x	z	y
POE	✓	✓	✓
SOE	✓	✓	✓
Cellule	✓	✓	✓

Figure 4.6 : Représentation des neuf degrés de liberté du concentrateur et de l'incidence variable des rayons du soleil.

L'analyse de sensibilité de ces dix paramètres est effectuée avec le logiciel de tracé de rayons. Seulement, chaque simulation prend environ dix secondes. En sondant chaque degré de liberté sur 11 points de mesure, l'analyse des tolérances mécaniques avec 10 degrés de liberté serait de plus de 8000 ans ! En réduisant le nombre de rayons tracés, au détriment de la fiabilité des résultats, ou en augmentant la puissance de calcul ou le temps de calcul serait réduit d'un facteur 100 au mieux. De plus, l'outil d'optimisation, précédemment utilisé lors de la conception des lentilles, n'est pas adapté pour analyser la mobilité des lentilles. En revanche, la suppression de n paramètres d'entrée réduit directement le temps de calcul d'un facteur n . Afin de réduire le temps de calcul sans altérer l'estimation des tolérances mécaniques, on procède d'abord à une analyse de sensibilité de ces paramètres indépendamment, l'un après l'autre. Cette analyse de sensibilité est effectuée en comparant l'influence de chaque paramètre sur l'AA. Un seul paramètre varie, tous les autres sont fixes. Dans un premiers temps, l'analyse de chaque paramètre isolé donne un ordre de grandeur des incertitudes mécaniques tolérées.

Pour chaque point de contrôle du paramètre sondé, l'angle d'incidence des rayons incidents varie de -1° à $+1^\circ$. De cette manière, la courbe d'acceptance angulaire est tracée pour chaque point de contrôle de chaque paramètre. La suite de cette section montre les résultats de chaque analyse pour le micro-concentrateur 1000X. Les cartographies représentent la transmittance en fonction du paramètre sondé (en ordonnées) et de l'angle d'incidence (en abscisse). Cette transmittance, exprimée en %, est normalisée par la transmittance nominale, c'est-à-dire lorsque tous les paramètres sont dans leur position nominale et que l'angle d'incidence des rayons est nul. De cette manière, les lignes d'iso-valeurs à 90% de la transmittance permettent de visualiser l'angle d'acceptance du concentrateur. Au total, les 9 degrés de liberté sont analysés séparément et classés par type de mobilité : rotation autour de y , translation selon x et translation selon z , l'axe optique. Enfin, un tableau récapitulatif permet d'identifier les paramètres les plus sensibles sur l'angle d'acceptance.

4.3.2.1 Rotations autour de l'axe z

Dans un premier temps, l'influence de la rotation de la POE autour de l'axe z est simulée. L'acceptance angulaire des modules est tracée pour chaque inclinaison de la POE. La Figure 4.7, une cartographie de la transmittance en fonction de l'angle de la POE et de l'angle d'incidence des rayons, représente l'évolution de cette acceptation angulaire en fonction de l'angle de la POE. Sur cette cartographie, on remarque que l'inclinaison de la POE génère un décalage de l'acceptance angulaire quasiment linéaire. Ce décalage, non négligeable, est d'environ $+0,15^\circ$ degré pour une rotation de la POE de $+1^\circ$. En revanche, pour les rotations inférieures à $\pm 0,3^\circ$ de la POE, le décalage de l'angle d'incidence est considéré comme négligeable. On prendra cette valeur de $\pm 0,3^\circ$ comme valeur maximale acceptable pour la rotation de la POE.

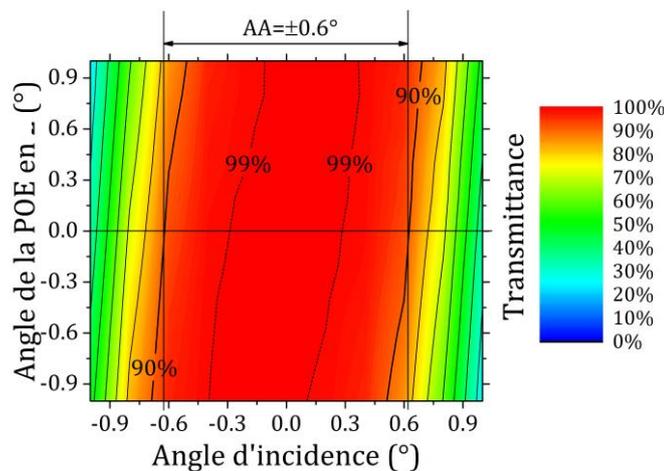


Figure 4.7 : Influence de l'inclinaison de la POE autour de z sur l'acceptance angulaire pour le micro-concentrateur 1000X.

Contrairement à la POE, l'inclinaison de la SOE est très peu influente sur l'angle d'acceptance du concentrateur. Pour une amplitude de $\pm 2^\circ$ en rotation autour de y , l'angle d'acceptance reste constant (voir Figure 4.8 a). En ce qui concerne l'inclinaison de la cellule, l'influence sur l'angle d'acceptance est encore moins perceptible. Une rotation de $\pm 3^\circ$ n'a aucune influence sur l'angle d'acceptance ou sur son décalage. On prendra cette valeur comme limite acceptable de rotation de la cellule ou de la SOE.

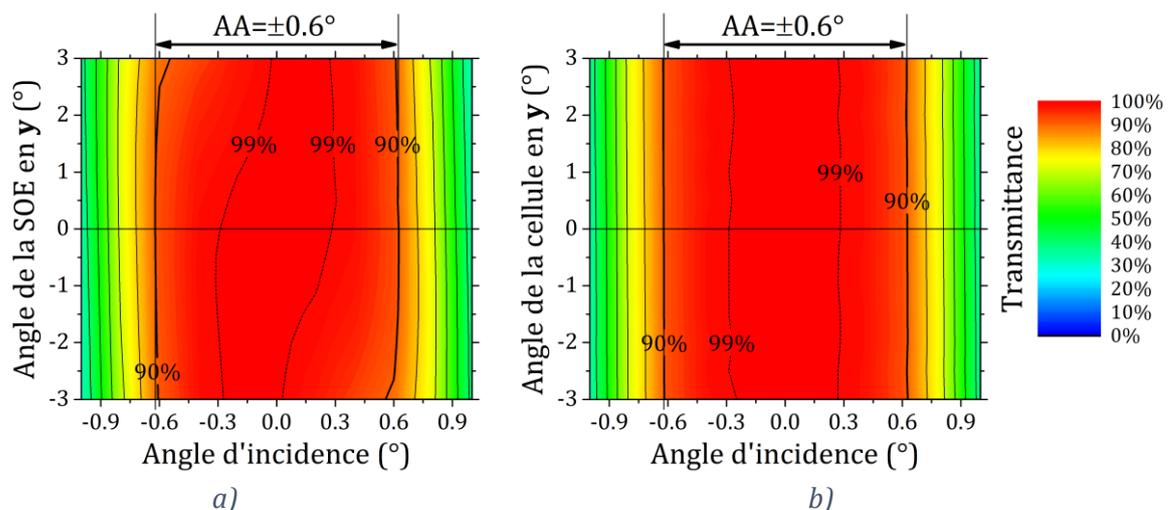


Figure 4.8 : Acceptance angulaire en fonction de l'inclinaison autour de z de la SOE en a) et de la cellule en b).

4.3.2.2 Décalage latéral des éléments (axe x)

Pour analyser l'influence du décalage latéral de la POE sur l'angle d'acceptance, l'ensemble *POE + Verre* un déplacement de -2mm à +2mm sur l'axe **x** par rapport à sa position nominale a été simulé. La Figure 4.9 ci-dessous représente l'acceptance angulaire du concentrateur en fonction du décalage de l'optique primaire. L'angle d'acceptance nominal de $\pm 0,6^\circ$ est globalement conservé quel que soit la position de la POE. En revanche, plus la POE est décalée, plus l'angle d'acceptance est décalé. Cette tendance est linéaire sur un intervalle d'au moins ± 2 mm. Dans le cas du module

μ -CPV @1000X, le décalage latéral de la POE $100\mu\text{m}$ déplace l'angle d'incidence de $0,2^\circ$. Comme les modules sont installés sur des trackers, ce décalage est compensé lors de l'installation. En effet, le montage consiste à aligner les modules par rapport au soleil afin d'obtenir le maximum de leur puissance, ensuite, le tracker maintient cet alignement. A l'inverse, les modules μ -CPV avec tracking intégré cités dans le chapitre d'état de l'art utilisent le décalage de la POE par rapport à la cellule pour tracker le soleil. Installés à plat, le mouvement dans le plan (**x,y**) de leur POE (ou de leur récepteurs) permet de compenser l'inclinaison des rayons du soleil. Pour la suite de l'étude, on prendra $\pm 100\mu\text{m}$ comme limite acceptable du décalage de la POE par rapport à l'axe optique.

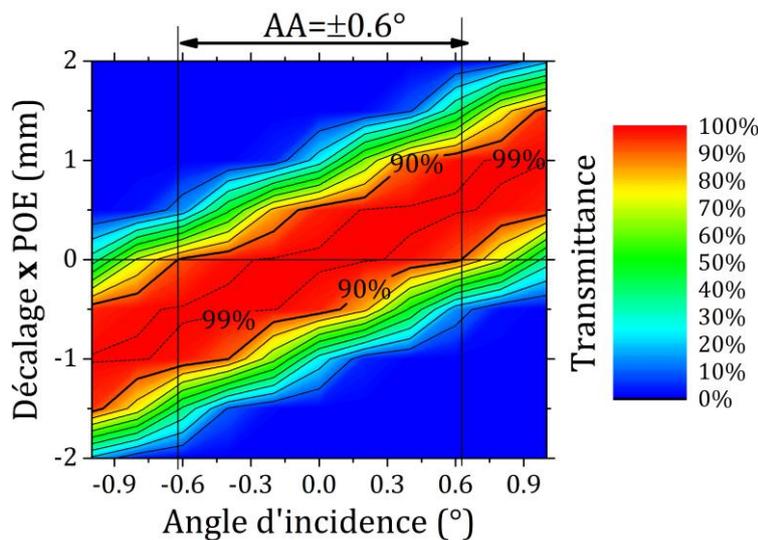


Figure 4.9 : Influence du décalage latérale selon **x** de la POE sur l'acceptance angulaire pour le concentrateur 1000X.

Les mobilités de la SOE et de la cellule ont une influence très similaire sur l'acceptance angulaire du module. Lorsque la SOE se décale de moins de $50\mu\text{m}$ sur l'axe **x**, l'angle d'acceptance diminue de moins de $0,1^\circ$. Au-delà de $\pm 50\mu\text{m}$, l'angle d'acceptance décroît plus vite et devient asymétrique (voir Figure 4.10 a). Sur l'acceptance angulaire de la cellule, l'angle d'acceptance également de $0,1^\circ$ pour un décalage inférieur à $50\mu\text{m}$ (voir Figure 4.10 b).

En revanche les deux cartographies de transmittance sont symétriques. Pour un décalage de la SOE dans le sens des x positifs (x^+), le maximum de la transmission se déplace dans le sens des z positifs (z^+) (voir Figure 4.10 a). Lorsque la SOE est fixe et la cellule est décalée dans le sens des x^+ , le maximum de la transmission se déplace dans le sens des z^- (voir Figure 4.10 b). Cette symétrie montre que l'acceptance angulaire est surtout affectée par le décalage entre les deux objets (SOE et cellule). Pour la suite du tolérancement mécanique, nous considérerons que la cellule est mobile et la SOE fixe et la limite acceptable du décalage Cellule-SOE est de $\pm 50\mu\text{m}$.

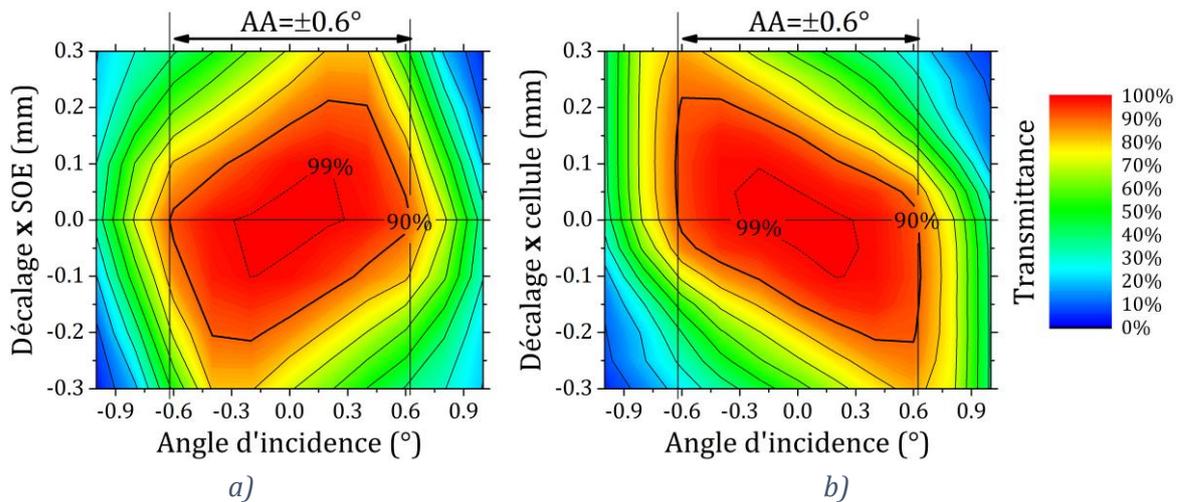


Figure 4.10 : Acceptance angulaire en fonction du décalage latéral (axe x) de la SOE en a) et de la cellule en b).

4.3.2.3 Décalage vertical des éléments (axe z)

La Figure 4.11 illustre l'acceptance angulaire du concentrateur en fonction du décalage vertical de l'ensemble POE + Verre. La position de cet ensemble varie de -3mm à $+3\text{mm}$ sur l'axe z avec un pas de $0,5\text{mm}$. Sur la cartographie de transmittance sur la Figure 4.11, l'angle d'acceptance commence à diminuer pour une défocalisation supérieure à $\pm 500\mu\text{m}$. Dans le sens des z^+ , la défocalisation est légèrement plus tolérante sur le maximum de puissance. A incidence normale, la courbe de niveau à 99% de transmission croise l'axe des y en $+1,5\text{mm}$ et $-1,9\text{mm}$. Malgré cette asymétrie, la position nominale de la POE sur l'axe z , c'est-à-dire $y=0$, correspond au maximum de puissance reçue par la cellule dans la gamme de longueur d'onde des deux jonctions limitantes de la cellule. Les aberrations chromatiques introduites par la POE sont à l'origine d'une variation de densité de puissance reçue par la cellule en fonction de la longueur d'onde. Avec d'autres facteurs, l'aberration chromatique participe à l'étalement du point focal du concentrateur. En terme de puissance lumineuse à $\lambda=[300\text{nm}; 900\text{nm}]$, les variations observées par simulation sont inférieure à 1% pour un décalage de la POE compris entre $+1,5\text{mm}$ et $-1,9\text{mm}$, à incidence nulle. On prendra donc ces valeurs comme limite acceptable du déplacement de la POE selon y .

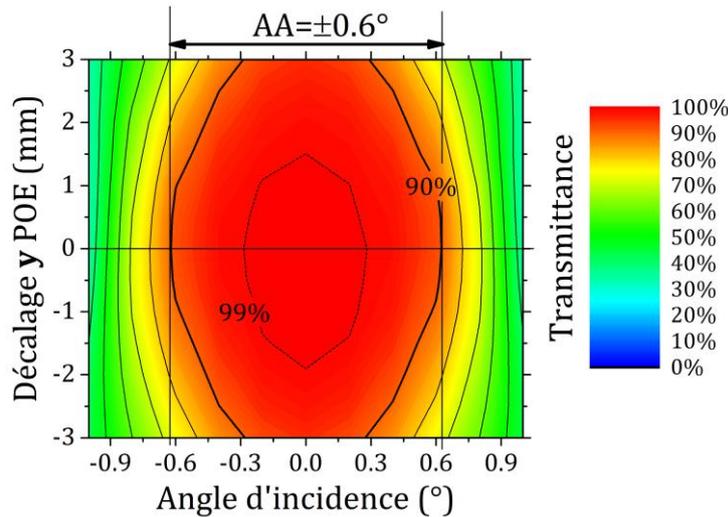


Figure 4.11 : Influence du décalage de la POE le long de l'axe focal z sur l'acceptance angulaire pour le concentrateur 1000X.

Lorsque la SOE ou la cellule sont décalées sur l'axe z autour de leur position nominale, on observe la même symétrie que pour le décalage latéral (Figure 4.10). L'acceptance angulaire de la SOE en fonction de son décalage vertical, Figure 4.12 a), est symétrique par rapport à celle de la cellule, Figure 4.12 b). De la même manière que pour les mouvements latéraux des composants du récepteur, la symétrie entre les deux surfaces colorées montre que c'est le décalage entre la cellule et la SOE qui influence sur l'acceptance angulaire. Si la cellule est déplacée de plus de $100\mu\text{m}$ par rapport à sa position nominale en z^+ , l'angle d'acceptance décroît très rapidement et le maximum de puissance est conservé à incidence normale. Dans le sens des z^- , le décalage toléré par l'angle d'acceptance est beaucoup plus important mais le maximum de puissance diminue très vite. Le décalage de $-300\mu\text{m}$ de la cellule génère une perte de 1% de la puissance lumineuse reçue; le décalage de $+100\mu\text{m}$ maximum conserve l'angle d'acceptance de $\pm 0,6^\circ$. On prendra donc $\pm 100\mu\text{m}$ comme limite acceptable du déplacement de la cellule par rapport à la SOE.

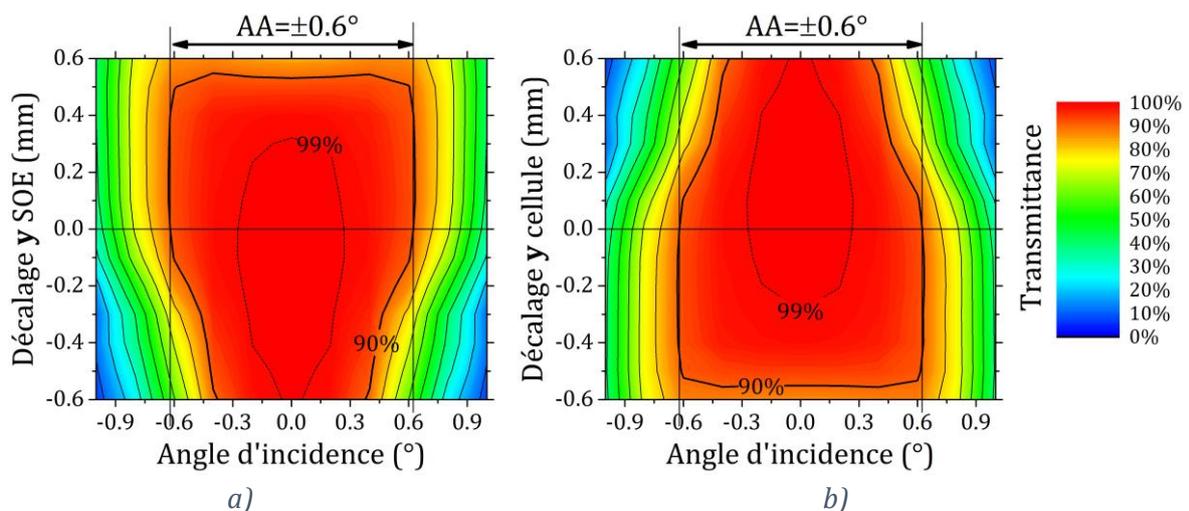


Figure 4.12 : Acceptance angulaire en fonction du décalage focal (axe z) de la SOE en a) et de la cellule en b).

4.3.2.4 Bilan de l'analyse préliminaire des 9 mobilités

Les 9 cartographies de transmittance ci-dessus représentent l'influence des 9 degrés de libertés sur l'acceptance angulaire du concentrateur 1000X. Cette analyse préliminaire de sensibilité permet d'identifier les degrés de mobilité les plus critiques pour l'angle d'acceptance. Lors de l'assemblage du module réel, ces mobilités doivent être limitées pour assurer le fonctionnement optimum du module. L'étude préliminaire donne une estimation haute des mouvements autorisés par le montage dans un premier temps, résumée dans le Tableau 0-5. Les valeurs indiquées représentent les amplitudes maximales de mobilité qui ont une influence négligeable sur l'angle d'acceptance. Comme chaque paramètre est analysé indépendamment des autres, les valeurs limites des mobilités du tableau ci-dessous ne constituent pas encore les tolérances mécaniques que doit respecter l'assemblage du module. Ces résultats permettent dans un premier temps d'identifier les paramètres les plus sensibles qui influent sur l'angle d'acceptance du module. Par exemple, la rotation de la SOE ou de la Cellule influencent dix fois moins l'angle d'acceptance que la rotation de la POE. On choisit donc de négliger ces deux degrés de libertés dans l'étude paramétrique des tolérances mécaniques du système. En ce qui concerne les translations latérales (sur l'axe **x**) et verticales (sur l'axe **z**), c'est le décalage entre la cellule et la SOE qui fait chuter l'angle d'acceptance. Pour l'étude des tolérances mécaniques, la cellule est mobile selon **x** et **z**, la SOE est fixe. Finalement, l'étude des tolérances mécaniques est effectuée sur cinq paramètres au lieu de neuf. Malgré tout, l'analyse de sensibilité complète sur ces cinq paramètres de mobilités prendrait plus de 6 mois.

Tableau 0-5 : Résultats de l'étude préliminaire à l'analyse de sensibilité. Estimation haute des tolérances mécaniques.

Elément du concentrateur	Rotation en y (°)	Décalage en x (µm)	Décalage en z (µm)
POE	0,3	±100	±500
SOE	2	±50	±100
Cellule	3	±50	±100

4.3.2.5 Analyse multicritères

Pour simplifier l'étude des mobilités et leur impact sur l'angle d'acceptance, la solution la plus radicale consiste à agréger les cinq paramètres retenus en un seul.

La finalité de cette étude est de définir un cahier de charges pour les fabricants à partir des tolérances mécaniques du système. Généralement, un usineur fabrique une pièce en respectant une valeur d'incertitude maximale applicable à toutes les cotes de l'objet. En d'autres termes, les tolérances mécaniques du système sont définies par une valeur unique d'amplitude maximale pour chaque mobilité du concentrateur. Comme les paramètres ne sont pas indépendants et cumulent leur influence sur l'angle d'acceptance, il s'agit maintenant de trouver le pire cas de désalignement. C'est-à-dire, la combinaison des mouvements de chaque élément du concentrateur qui influe le plus sur la transmittance et sur l'angle d'acceptance.

Tout d'abord, la direction de chaque mobilité est choisie de manière avoir la décroissance de l'angle d'acceptance la plus rapide possible. Sur les cinq degrés de libertés retenus, chaque mobilité est déplacée dans le sens qui a le plus d'impact sur l'angle d'acceptance, à savoir :

- la rotation de la POE dans le sens anti horaire (y^+),
- la translation de la POE dans le sens des x^+ et des z^+ ,
- la translation de la cellule dans le sens des x^- et des z^- .

Cette combinaison de mobilités est illustrée dans la Figure 4.13 où l'on remarque que la direction des rayons lumineux, en particulier pour les angles d'incidence positifs, sont au bord de la cellule. En augmentant d'avantage l'amplitude des déplacements dans cette direction, les pertes de transmittance sont très conséquentes.

Pour simplifier l'étude multiparamétrique, on utilise la méthode de l'agrégation. Chaque déplacement dans la direction décrite précédemment est incrémenté de la même amplitude ε . La Figure 4.13 b) montre le tracé de rayon pour une amplitude $\varepsilon = 80\mu m$. Dans la pire configuration des mobilités, cela correspond à un décalage de la cellule de $-80\mu m$ sur chacun des axes x et z . La POE est décalée de $+80\mu m$ sur l'axe x et sur l'axe z . L'amplitude de sa rotation est l'angle formé par une erreur de $80\mu m$ entre le bord gauche et le bord droit du parquet de lentilles. Avec un pavage de 4×4 lentilles de $19mm$ de côté, la longueur de ce parquet est de $76mm$ et l'angle de rotation du parquet de lentille généré par cette erreur s'exprime :

$$\theta_{POE} = \sin^{-1}\left(\frac{2\varepsilon}{76}\right) \quad \text{Eq. 0.2}$$

Pour $\varepsilon = 80\mu m$, l'angle de la POE est $\theta_{POE} = 0,12^\circ$. C'est l'angle pris par la POE sur la Figure 4.13 b).

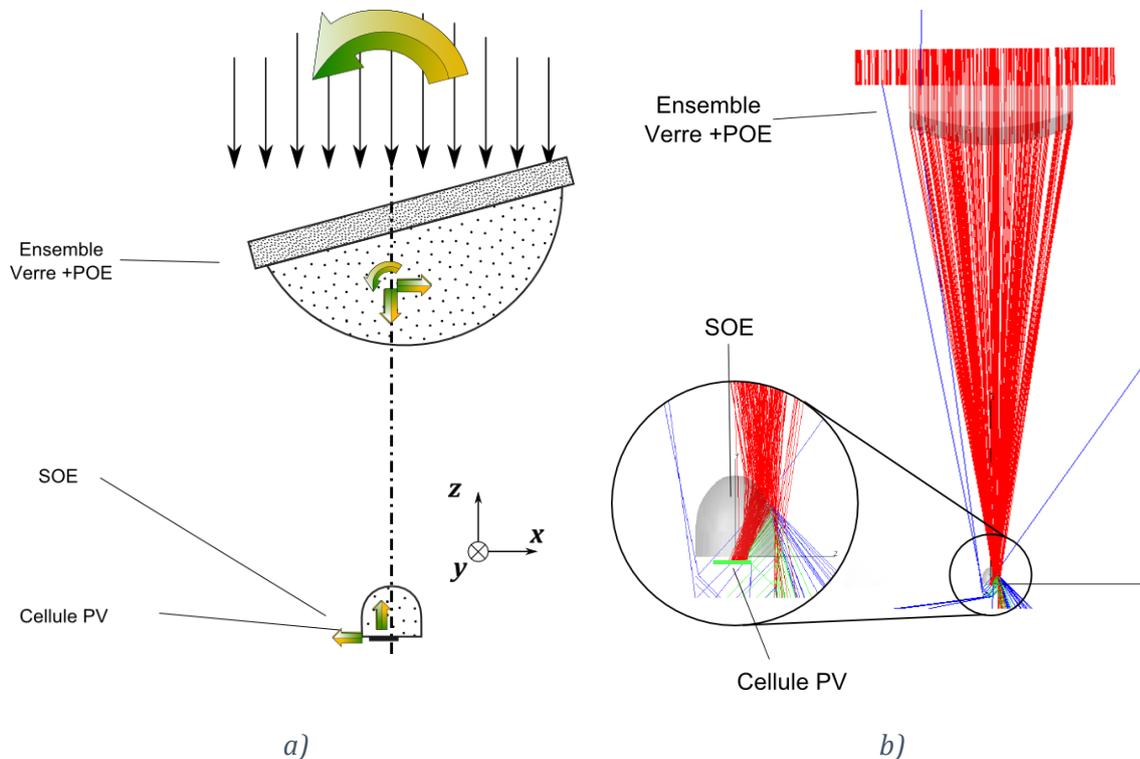


Figure 4.13 : a) Combinaison des déplacements qui impactent le plus l'angle d'acceptance du module. b) Tracé de rayon pour cette association de déplacement avec $\varepsilon=80\mu m$.

L'analyse multicritère des tolérances mécaniques est donc réduite à un seul paramètre. Ce paramètre, l'amplitude des déplacements ε , correspond à l'incertitude sur la position des éléments. Sur la Figure 4.14, une cartographie de la transmittance en fonction de l'angle d'acceptance et de ε résume les résultats de cette analyse multicritère réduite. L'amplitude des déplacements ε varie de $-120\mu\text{m}$ à $+120\mu\text{m}$ et, pour plus de lisibilité, l'échelle de transmission est limitée aux valeurs supérieures à 50%. Sur cette figure, l'angle d'acceptance est très impacté par la pire combinaison de déplacements des éléments du concentrateur. Pour une amplitude supérieure à $\pm 20\mu\text{m}$, l'angle d'acceptance diminue rapidement, en plus d'être décalé par rapport à l'incidence normale. De manière générale, comme il est expliqué dans l'état de l'art, les modules μ -CPV à haute concentration ont un l'angle d'acceptance réel inférieur à l'angle d'acceptance théorique [56]. Dans, ce cas, le second paramètre à maximiser dans le tolérancement mécanique est la transmittance à incidence normale. L'amplitude des déplacements de chaque élément du module μ -CPV est bornée de manière à ce que la transmittance soit supérieure à 99%. La valeur de cette limite correspond à l'incertitude maximale tolérée pour garantir le fonctionnement optimum de notre module μ -CPV. Finalement, les déplacements maximum tolérés pour la fabrication du micro-concentrateur 1000X sont de $\pm 80\mu\text{m}$ sur chaque élément. Cette tolérance est représentée par deux lignes horizontales à $+80\mu\text{m}$ et $-80\mu\text{m}$ sur la Figure 4.14. Ces tolérances constituent la base du cahier des charges défini à la fin de ce chapitre et garantissent un angle d'acceptance d'au moins $\pm 0,5^\circ$ malgré le décalage, et une transmittance d'au moins 99%.

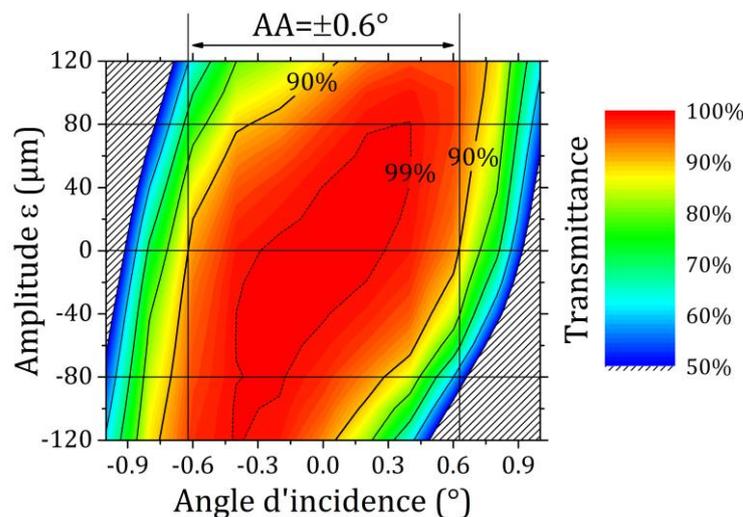


Figure 4.14 : Influence du décalage simultané de chaque élément d'une amplitude ε du micro-concentrateur 1000X sur l'angle d'acceptance.

Pour le micro-concentrateur 275X, la même étude des désalignements a été menée de la même façon, mais ne sera pas détaillé ici, seul les conclusions sont données. Dans un premier temps, les paramètres les plus sensibles sont identifiés. Ensuite la pire combinaison de déplacements des éléments est appliquée avec une incertitude variable pour déterminer les tolérances mécaniques. Comme le système optique est du même type que le micro-concentrateur 1000X, les paramètres les plus sensibles sont les mêmes mais leur amplitude maximale est plus grande. Comme l'étude bibliographique du deuxième chapitre le montre, les tolérances mécaniques sont

plus grandes pour une concentration plus faibles [51]. Dans le cas du micro-concentrateur 275X elles sont estimées à $\pm 100\mu\text{m}$ sur tous les déplacements.

Que ce soit pour le micro-concentrateur 275X ou 1000X, les valeurs de désalignements tolérés ci-dessus sont valables pour le module assemblé. Comme l'assemblage du module comporte plusieurs éléments (moule, entretoise, brides de serrage du verre, circuit imprimé, face arrière du module, etc.), il reste à préciser les tolérances mécaniques de chaque pièce de l'assemblage pour satisfaire les conditions sur l'alignement du module complet.

4.3.3 Déformation de la POE

La forme des lentilles doit également respecter la forme déterminée lors de la conception. Or le moulage introduit forcément des erreurs de formes, sans parler de l'état de surface. D'une part le silicone se rétracte en séchant, d'autre part l'usinage du moule n'est pas parfait. Pour quantifier l'impact des erreurs de formes de la lentille sur les performances du module, l'outil d'optimisation du logiciel Tracepro est utilisé. De la même manière que pour l'optimisation de la forme de la lentille, la surface de la POE est déformée en faisant varier 5 points de contrôles sur son profil 2D (voir Figure 4.15). L'intervalle de mobilité des points de contrôle $[-\varepsilon ; +\varepsilon]$ est variable pour simuler les incertitudes sur la forme de la lentille à la fabrication. A l'état initial, ces points sont positionnés sur la courbe théorique du profil de la lentille et sont reliés par un polynôme du 3^{ème} degré. Ici, comme l'objectif est de trouver le cas le plus impactant sur la puissance reçue par la cellule, la totalité de l'espace à cinq dimensions engendré par les cinq points de contrôle doit être étudié. Pour limiter le nombre d'itération de l'étude, chaque point de contrôle ne sera positionné que sur trois valeurs : $-\varepsilon$, 0 et $+\varepsilon$. A chaque itération, le profil 2D ainsi déformé engendre la POE à section carrée du modèle de concentrateur dans le logiciel de tracé de rayons.



Figure 4.15 : Points de contrôle mobiles sur le profil 2D de la POE pour l'étude de sa déformation.

Pour limiter le temps de calcul, l'angle d'acceptance ne sera pas tracé à chaque itération. A la place, trois sources solaires sont modélisées dans le logiciel de tracé de rayon avec une inclinaison respective de $-0,6^\circ$, 0 et $+0,6^\circ$. De cette manière, la puissance reçue par la cellule contient une information sur l'angle d'acceptance. A titre de comparaison, la référence de puissance est celle reçue à la surface de la cellule lorsque tous les points de contrôle du profil sont dans leur position nominale correspondant au profil théorique de la lentille. La Figure 4.16 représente les cartes d'irradiance de la lentille non-déformée en a) et celle dont la déformation est la plus impactante pour le flux en b). La puissance totale reçue par la cellule est environ

trois fois plus importante que celle affichée par la figure 3.14. Cette différence de puissance est due aux 3 sources utilisées pour cette étude. Une incertitude de $\pm 10\mu\text{m}$ sur la position des points de contrôle du profil engendre une perte de 20,8% du flux total reçu par la cellule (Figure 4.16 b). Cela indique une chute d'angle d'acceptance importante pour le pire cas de déformation dans l'intervalle $[-10\mu\text{m}; +10\mu\text{m}]$. Cette incertitude de $\varepsilon = \pm 10\mu\text{m}$ correspond à l'erreur minimum que peuvent atteindre les deux usineurs que nous avons identifiés pour la réalisation de nos modules. Finalement, l'étude montre que l'erreur de déformation de la lentille découplée des autres défauts d'alignement de l'assemblage est très impactante sur l'efficacité et à l'angle d'acceptance du module.

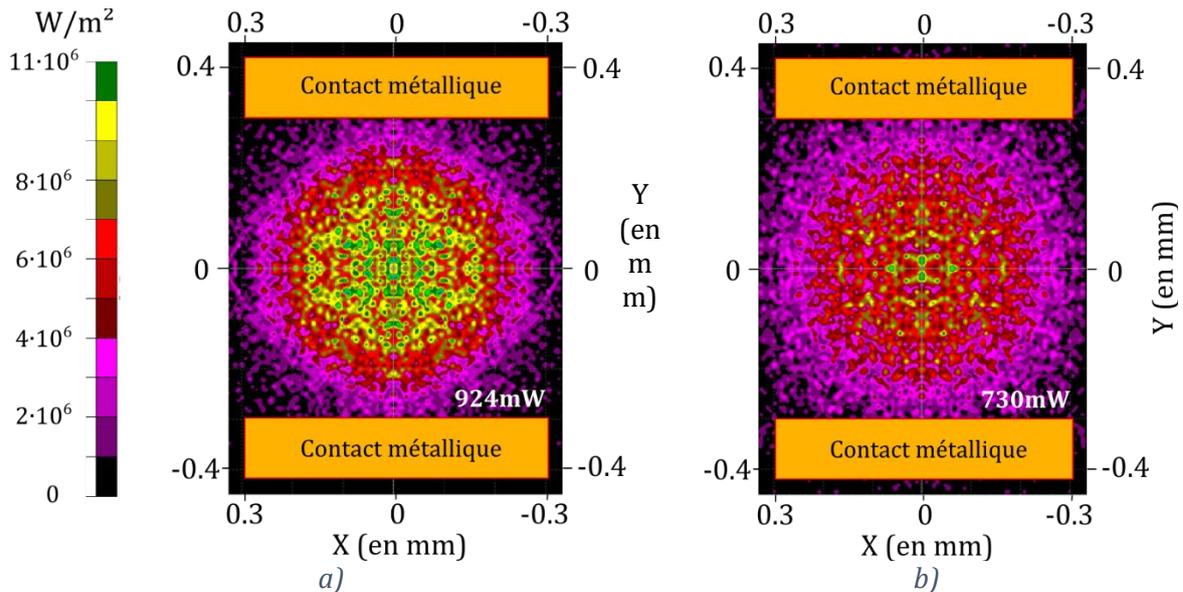


Figure 4.16 : Cartes d'irradiance sur la cellule du micro-concentrateur 1000X.
a) sans déformation de la POE ; b) avec la pire déformation de la POE avec une incertitude de $\pm 10\mu\text{m}$.

4.4 Tolérances mécaniques des pièces réelles

Les modules μ -CPV fabriqués selon le procédé décrit dans la section 4.2 doivent respecter les contraintes sur l'alignement des pièces décrit précédemment. Or l'alignement de chaque élément par rapport à un autre résulte de l'accumulation d'erreurs sur les dimensions de chaque pièce de l'assemblage. Pour que l'assemblage du module satisfasse les tolérances mécaniques définies précédemment, il faut donc définir une limite des incertitudes sur les dimensions de chaque pièce. Le schéma de la Figure 4.17 résume les chaînes de cotes qui définissent l'alignement latéral de ces éléments. Lors du moulage, le positionnement des POE, des SOE et des cellules est réalisé par rapport à l'insert A. Les distances inter-élément notées sur le schéma ci-dessous sont chacune liées à une pièce de l'assemblage et ne sont valables que dans le plan (x, z) . On remarque que le positionnement relatif des inserts A et C est assuré par le moule lors du moulage et par l'entretoise dans le module final par les distances $d_m(A-C)$ et $d_e(A-C)$.

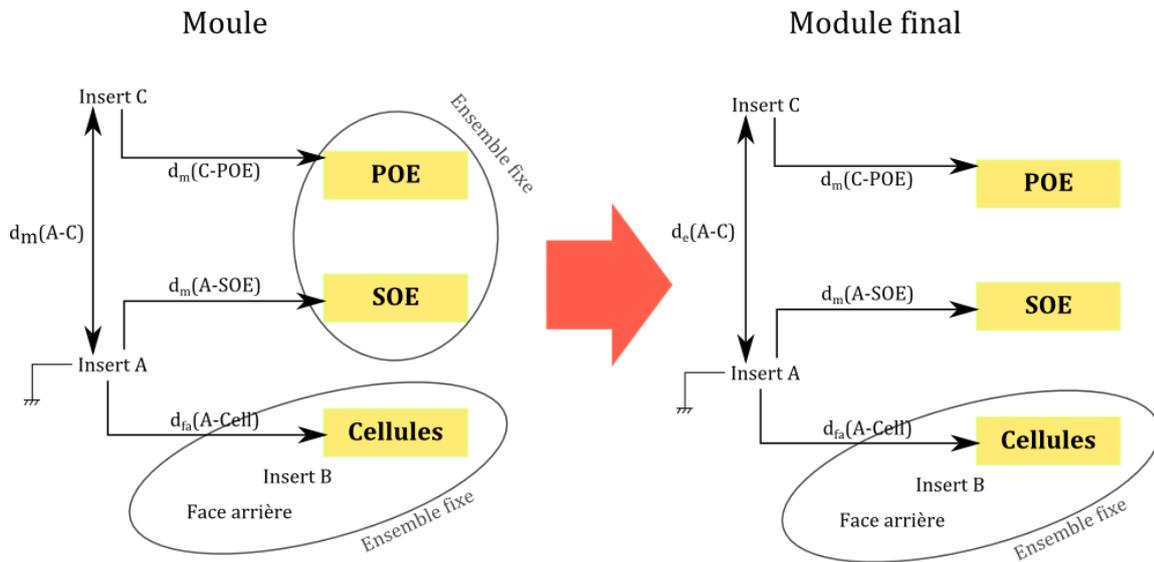


Figure 4.17 : Bilan des cotes qui définissent l'alignement des éléments entre eux dans le plan latéral (x, y). On différencie l'alignement lors du moulage et l'alignement de l'assemblage du module.

4.4.1 Mobilités de la cellule

Bien que les cellules ne soient soumises qu'à deux conditions, une translation sur l'axe x , une autre sur l'axe z , leur alignement avec le reste du module est plus critique que pour les autres pièces. D'une part, l'impact d'un déplacement de la cellule sur l'angle d'acceptance est plus élevé que pour les autres pièces (voir Tableau 0-5). D'une autre part, le placement des cellules met en œuvre des techniques à la fois optiques et mécaniques, ce qui augmente l'incertitude. En effet, le placement (*pick and place*) des cellules sur le circuit imprimé est numérique. Le référentiel de positionnement des cellules est construit à partir des repères visuels détectés par une caméra à reconnaissance de forme. Cette technique permet une précision de positionnement de l'ordre de $\pm 15\mu\text{m}$ des cellules par rapport à ce référentiel. Bien que les repères visuels pour la construction du référentiel soient des guides mécaniques, il existe une incertitude inconnue liée à leur détection. Pour la suite de la chaîne de cotes, le principe est le même que pour la POE. Les erreurs de dimensions des pièces sont additionnées entre l'insert A et la cavité de la SOE. Pour la réalisation des prototypes réalisés dans cette thèse, une précision maximale est demandée à la fois pour l'usinage et l'étape de placement des cellules sur le PCB par la technique du *pick and place*.

4.4.2 Mobilités de la SOE

L'alignement latéral de la SOE par rapport à la cellule dépend du placement des cellules et de la géométrie du moule. L'amplitude du désalignement entre la SOE et la cellule est la somme des incertitudes de deux distances :

- la position de chaque cavité de SOE dans le moule par rapport à l'insert A définie par la distance $d_m(C-SOE)$,
- la position de chaque cellule par rapport à l'insert A définie par la distance $d_{fa}(C-Cell)$.

4.4.3 Mobilités de la POE

L'alignement latéral de la POE par rapport aux cellules dépend de plusieurs pièces, au cours de plusieurs étapes. L'amplitude du désalignement résulte de l'incertitude de chaque cote correspondantes à :

- la position de chaque cavité dans la face avant du moule correspondant à la distance $d_m(\text{C-POE})$,
- la position relative des inserts A et C dans l'entretoise et dans le moule correspondent aux distances $d_e(\text{A-C})$ et $d_m(\text{A-C})$,
- la position de l'insert C correspondant à la distance $d_{fa}(\text{A-Cell})$.

Les incertitudes sur chacune de ces distances s'additionnent dans la chaîne de cote qui définit l'alignement entre la POE et la cellule. Selon le fabricant, chaque pièce usinée comporte des erreurs de dimensions de l'ordre de $\pm 5\mu\text{m}$. Avec une erreur aussi faible sur chaque cote, la chaîne de cote peut donc compter jusqu'à quinze cotes pour respecter l'erreur maximale admise de $\pm 80\mu\text{m}$. Les pièces usinées n'étant ni très complexes ni très nombreuses, les chaînes de cote ne comptent pas plus de huit éléments dans la chaîne. Finalement, les mobilités sensibles de la POE ne sont pas critiques dans l'assemblage du module.

L'erreur sur la distance focale entre la POE et le récepteur dépend de l'erreur sur l'épaisseur de l'entretoise. La cote d'épaisseur de l'entretoise doit être de $54,4^{\pm 0,08}\text{mm}$.

La rotation de la POE autour de l'axe y est déterminée par l'erreur de parallélisme entre les faces avant et arrière de l'entretoise. Ici encore, cette tolérance est spécifiée par une condition sur le parallélisme de la pièce. Par rapport à une surface de référence, en l'occurrence, la face arrière posée sur un marbre, la face avant réelle de l'entretoise doit être comprise entre deux plans parfaits théoriques espacés de $80\mu\text{m}$ autour de la cote de $54,4\text{mm}$. Cette condition est décrite simplement par un symbole normé sur le plan de la pièce en annexe.

4.4.4 Erreur de forme de la lentille

La fabrication des lentilles comporte plusieurs sources d'erreur de forme possibles. Les principales sont l'erreur de forme du moule usiné, le rétreint du silicone lors du séchage et la température. Dans cette étude, l'effet de la température est négligé et toutes les mesures sont effectuées à température ambiante. En revanche le rétreint du silicone a été mesuré dans le moule du micro-concentrateur 1000X. La forme tridimensionnelle de quatre cavités de POE du moule, ainsi que les quatre POE moulées correspondantes ont été mesurées à l'aide d'un profilomètre optique maillant la surface avec un pas de $10\mu\text{m}$ dans la direction x et de $50\mu\text{m}$ dans la direction y . Sur la Figure 4.18, le profil d'une des quatre lentilles analysées est représenté avec la cavité du moule correspondante. Sur l'axe des ordonnées à droite du graphique, la différence de hauteur entre les deux profils est une courbe avec une tendance aléatoire de $0,6\text{nm}$ de moyenne, un écart-type de $1,25\mu\text{m}$ et un écart crête-à-crête de $8,32\mu\text{m}$. Les variations aléatoires de cette courbe montrent que le rétreint du silicone ne dépend pas de l'épaisseur de la lentille, comme le décrit les équations de rétreint de ce type de polymères. On suppose donc que la variation maximale de $\pm 4,15\mu\text{m}$ entre le moule et la lentille correspond à l'erreur de mesure et de traitement des données de l'ordre de 2% de l'amplitude en z . Pour notre étude des tolérances mécaniques, on considère que le rétreint du silicone est négligeable comparé aux erreurs de forme du moule que l'on développera plus tard (de l'ordre de $\pm 10\mu\text{m}$).

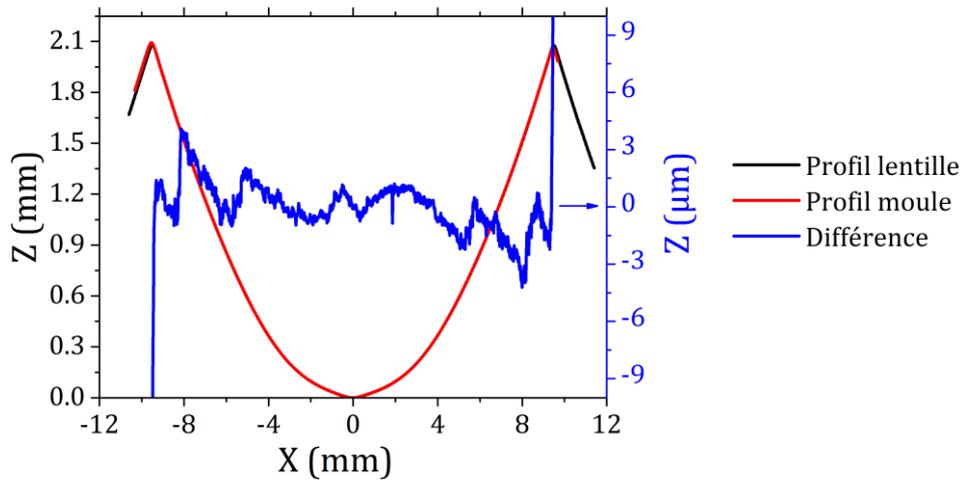


Figure 4.18 : Comparaison des profils d'une lentille moulée et son empreinte dans le moule.

4.5 Réalisation de prototypes étapes par étape

Les modules μ -CPV fabriqués avec le procédé de moulage et d'assemblage en trois étapes décrit dans ce chapitre sont composés de cellules PV à triple jonctions, de pièces mécaniques et d'un circuit imprimé. Par ailleurs les cellules MJSC sont connectées en parallèle d'une diode de bypass pour les protéger des avaries électriques. Dans un premier temps les PCB sont dessinés pour correspondre à la géométrie du moule mais ne comportent pas de contraintes fortes sur la précision géométrique des contacts métalliques. En effet la précision de leur position ne rentre pas en compte dans l'alignement lors du placement des cellules.

4.5.1 Choix des cellules et assemblage de la face arrière

Deux modules μ -CPV ont été réalisés avec des cellules PV à triple jonction de $0,9 \times 0,9 \text{ mm}^2$ et $0,6 \times 0,6 \text{ mm}^2$. Le positionnement et l'interconnexion a été réalisée en collaboration avec le laboratoire de packaging micro-électronique (le LP3D) du CEA-LETI. Les cellules sont collées avec une pâte d'argent conductrice assurant ainsi la connexion de l'anode, borne positive des cellules sur leur face arrière, avec les pistes métalliques du PCB. La cathode, borne positive sur la métallisation en face avant des cellules, est reliée aux pistes du PCB par des micro-fils d'or de $50 \mu\text{m}$ de diamètre. La technique de connexion de ces micro-fils s'appelle le *wire bonding*. Pour les deux micromodules réalisés, les cellules sont connectées en quatre chaînes de quatre cellules en séries. Cette configuration permet d'obtenir quatre chaînes, appelées *string*, d'une tension de 12V. Le courant produit par chaque string est additionné lors de leur mise en parallèle. Ce courant, qui dépend de la taille des cellules et de la concentration du module, n'est pas le même pour les deux dispositifs étudiés. Comme il est expliqué dans le chapitre de bibliographie, la cellule qui produit le plus faible courant d'un string limite le courant délivré par celui-ci. Pour éviter d'endommager les cellules limitantes, une diode de *bypass* est mise en parallèle de chaque cellule. En plus de limiter les pertes dues aux déséquilibres de courants, ces diodes permettent également de protéger les cellules d'éventuels claquages dans certaines conditions de courant et tension [108]. La Figure 4.19 représente le dessin CAO du PCB vue de

dessus. Les plages d'accueil de la face arrière de 16 cellules sont entourées de la plage d'accueil pour les fils de Wirebonding en forme de « U » inversé.

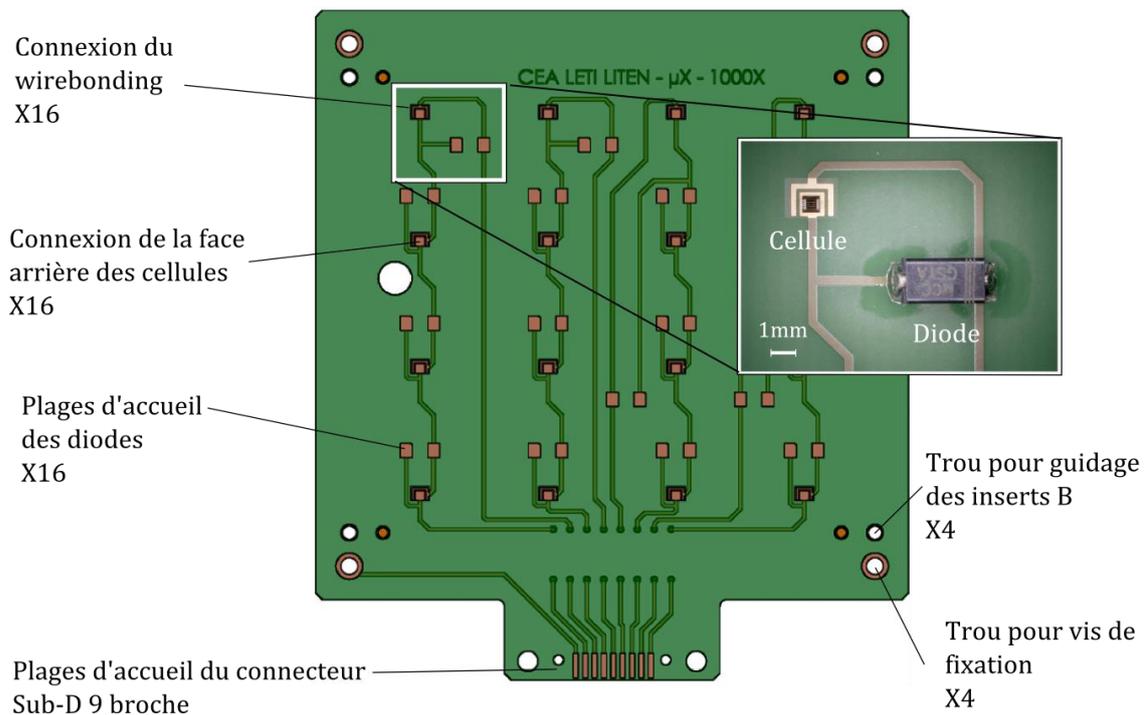


Figure 4.19 : Dessin CAO du PCB (Printed Circuit Board)

La fabrication des circuits imprimés atteint une précision de l'ordre de $1\mu\text{m}$ sur la forme et la position des pistes métalliques. En revanche la précision de positionnement des perçages n'est pas aussi bonne (quelques centaines de μm). C'est pourquoi le repère de positionnement des cellules, l'insert A, est directement usiné dans la plaque métallique avec une précision de l'ordre du μm . Le PCB étant fixé à cette face arrière préalablement au positionnement des cellules, la distance d_{fa} (A-Cellule) est donc indépendante du PCB.

En outre, il faut également prendre en compte la gestion thermique du module. En effet, la concentration de la lumière entraîne une forte densité de puissance à la surface des cellules. Comme celles-ci convertissent environ 40% de la lumière en électricité, il faut évacuer la chaleur générée par les 60% restants. Pour le micro-concentrateur à 275X, cela représente 135mW pour chaque cellule lorsque l'éclairement est de $1000\text{W}/\text{m}^2$. Pour le concentrateur à 1000X, 217mW pour chaque cellule. Dans les deux cas, la colle à base d'argent et les pistes métalliques de $80\mu\text{m}$ d'épaisseur et de $210\mu\text{m}$ de largeur du PCB suffisent à dissiper la chaleur et évitent la surchauffe de cellules.

4.5.2 Fabrication du moule et injection

La plaque arrière, ainsi que toutes les autres pièces métalliques sont fabriquées par usinage à commande numérique. Toutes les pièces, à l'exception des inserts de précision en acier, sont en aluminium. Un outil de coupe avec une pointe en diamant permet d'obtenir un état de surface de très faible rugosité (appelé « miroir ») sur un usinage, caractérisé par un R_a inférieur à $0,4\mu\text{m}$. Afin d'obtenir un R_a plus faible, un des deux usineurs testés injecte des ultrasons dans l'outil en diamant, ce qui permet d'obtenir un état de surface de l'ordre de $0,15\mu\text{m}$.

Les ajustements entre les inserts et les pièces de l'assemblage sont *glissants, sans jeu*, ce qui permet de limiter les incertitudes sur le positionnement tout en facilitant le montage. Le montage des pièces et l'injection du silicone est réalisé à la main, au laboratoire. Le silicone utilisé est le silicone bi-composant Wacker Elastosil RT-601. Le mélange est un rapport de masse de 9 pour 1 entre la résine et le durcisseur. Lors du mélange des deux composants, des bulles apparaissent dans le liquide visqueux. Le dégazage du mélange dans une chambre à vide est donc nécessaire avant de l'injecter l'injection. Sans le dégazage, des bulles d'air seraient présente dans les optiques, ce qui altérerait grandement leur qualité. Pour favoriser l'accroche du silicone sur le verre et sur le PCB, un primaire d'adhésion (Wacker G790) est déposé sur les surfaces moulées. L'injection du silicone est effectué avec une seringue à piston dans les injecteurs prévus à cet effet. Le silicone utilisé réticule à température ambiante (25°C) en 24h. A 70°C, ce temps de séchage n'est que de 35min. Le démoulage, une fois que les pièces sont refroidies, est facilité grâce aux injecteurs qui provoquent automatiquement la rupture de la carotte d'injection, *i.e.* le silicone sec dans le canal d'injection. L'invention de ces injecteurs particuliers fait l'objet d'un brevet en cours de déposition. A la fin de l'étape de moulage, on obtient deux éléments représentés par les Figure 4.20 a) et b).

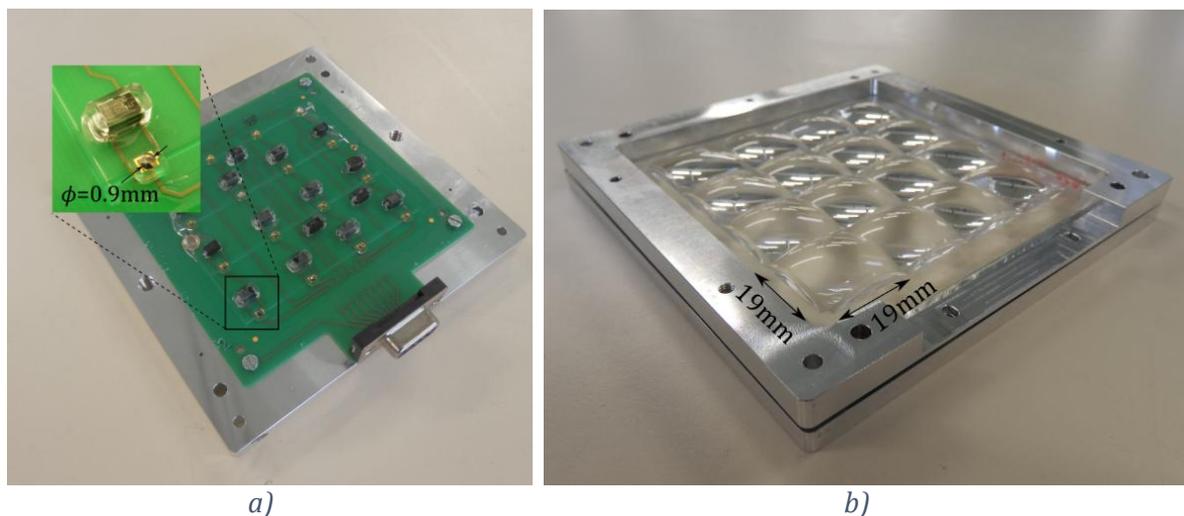


Figure 4.20 : SOE moulées sur les PCB en a) et des POE moulées sur le verre en b).

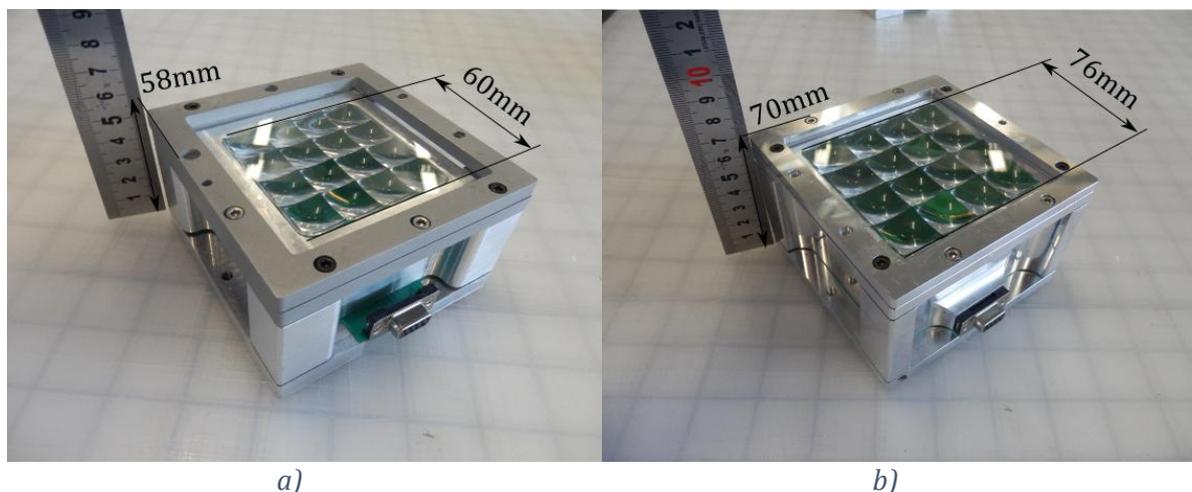


Figure 0.21 : Photographie des modules μ -CPV de a) 275X et b) 1000X avec leur principales dimensions respectives.

Finalement, à partir des moules et des cellules positionnées sur le PCB, l'assemblage des pièces et l'injection du silicone sont réalisés au laboratoire CPV, au CEA INES. La Figure 0.21 montre les deux modules à 275X en a) et 1000X en b).

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, un nouveau procédé de fabrication des modules μ -CPV en trois étapes au lieu de cinq est présenté. Ce procédé comporte une étape de moulage au cours de laquelle les étages de POE et de SOE sont moulés simultanément. En même temps, les éléments optiques sont auto-alignés entre eux grâce à un jeu de références mécaniques. Des simulations par tracé de rayon permettent de déterminer les désalignements maximum que tolère le système afin de garantir le plus grand angle d'acceptance possible. Pour cela, chacune des neuf mobilités du système est étudiée. Au final une tolérance de désalignement de $\pm 80\mu\text{m}$ sur chacun des déplacements du module 1000X est fixée afin de garantir un angle d'acceptance supérieur à $0,5^\circ$ et une transmittance de supérieure à 99%. De plus, une tolérance de $\pm 10\mu\text{m}$ d'erreur sur la forme de la POE est fixée par simulation de tracé de rayon également. Deux modules de 275X et 1000X ont été réalisés avec ce procédé. Cette tolérance constitue le cahier des charges de fabrication d'un module qui a été réalisé en collaboration avec le laboratoire de packaging LP3D au CEA-LETI.

La qualification détaillée de ces modules μ -CPV est décrite dans le chapitre suivant. A travers l'étude du CTM (rapport entre l'efficacité de la cellule seule et l'efficacité du module), nous étudierons les défauts et les avantages de notre procédé de fabrication simplifié.

Caractérisation des performances du micro-concentrateur 1000X

Pour juger de la qualité du procédé de fabrication de modules μ -CPV, il est essentiel de caractériser le module et de déterminer ses performances électriques, et notamment son rapport Cell-to-Module (CTM) et son angle d'acceptance (AA). Le rendement du module divisé par le rendement de la cellule définit le CTM qui intègre l'ensemble des pertes de la cellule au module. Le rendement de la cellule ou du module sont obtenus à partir de leur caractéristique courant-tension (IV). Cette courbe caractérise les composants PV et permet d'obtenir de nombreuses informations sur leurs performances électriques. Dans ce chapitre, on explique en détail comment sont obtenues ces courbes IV pour le module et pour la cellule. Par ailleurs, l'angle d'acceptance du module est également calculé à partir de mesures électriques en simulateur solaire. L'angle d'acceptance est obtenu sur les courbes de la puissance du module en fonction de son inclinaison par rapport au faisceau incident. Ensuite, des expérimentations mécaniques et optiques permettent de comprendre les principaux mécanismes qui influent sur le CTM et sur l'angle d'acceptance. Les pertes optiques sont quantifiées et une méthode d'analyse de la tache focale des concentrateurs est développée. Les pertes liées au désalignement des éléments optiques sont aussi quantifiées avec une expérience dédiée. Enfin, la synthèse de la chaîne de pertes est donnée.

5.1 Mesure des courbes IV

La Figure 5.1 représente une courbe IV quelconque sur laquelle sont représentées les grandeurs caractéristiques d'un dispositif PV. Le courant de court-circuit, noté I_{SC} , est proportionnel à l'éclairement reçu par la cellule. La tension de circuit ouvert, notée V_{OC} , est fixée par la technologie de la cellule PV. Dans le cas des cellules triple jonctions, elle vaut environ 3V. La tension varie très peu (logarithmiquement) en fonction de l'éclairement mais dépend linéairement de la température. Ensuite, le point de maximum de puissance (MPP) correspond à une tension (V_{MP}) et un courant (I_{MP}). Cette puissance électrique maximale, divisée par la puissance lumineuse reçue par la cellule, définit le rendement de conversion. Pour calculer ce rendement, il faut donc connaître l'éclairement reçu par la cellule, la surface de celle-ci ainsi que la puissance maximale fournie par la cellule.

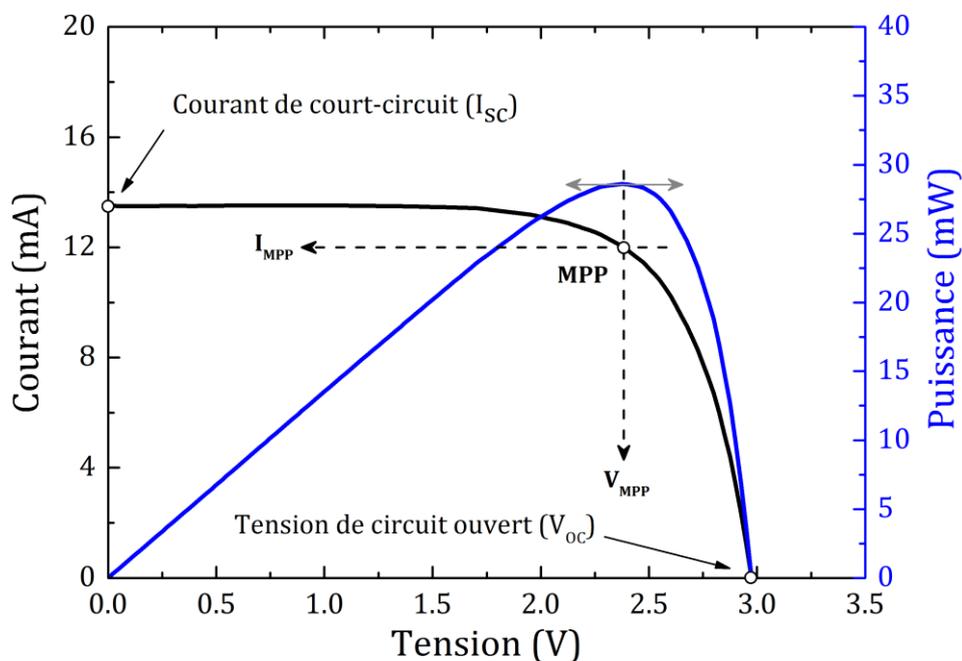


Figure 5.1 : Caractéristique courant-tension (IV) typique pour une cellule photovoltaïque à triple jonction.

En pratique, les courbes IV des cellules et des modules CPV sont mesurées avec des simulateurs solaires multi-flash. A chaque point de la courbe IV, on mesure le courant généré lors du flash pour une valeur de tension imposée. La tension varie point par point de 0V jusqu'à une valeur légèrement supérieure à la V_{OC} . Le flash lumineux, qui dure quelques millisecondes, permet d'obtenir les conditions de spectre et d'intensité de la lumière du soleil, sans échauffer le dispositif. La norme IEC 62670 impose les conditions de mesures pour les systèmes CPV en simulateur solaire (CSTC) comme à l'extérieur (CSOC)[36]. Les conditions standard de test correspondent à un éclairement de 1000W/m^2 avec le spectre AM1.5D et une température de cellule de 25°C .

5.1.1 Les simulateurs solaires

Au laboratoire LCPV, nous disposons de deux simulateurs solaires différents. Le premier, le simulateur solaire cellules représenté sur la Figure 5.2 a), permet de reproduire un éclairage avec le spectre AM1.5 et une concentration comprise entre 1X et plus de 1000X. La concentration varie avec le déplacement de la lampe sur le rail motorisé ainsi qu'un collimateur pour la haute concentration. Le second simulateur solaire, représenté sur la Figure 5.2 b), est utilisé pour la mesure des modules CPV. A la différence du premier, le miroir collimateur n'augmente pas la concentration mais donne un angle d'ouverture de $\pm 0,4^\circ$ aux rayons incidents dans le plan de mesure. Cet angle d'ouverture délimite le cône de lumière qui contient 90% de la puissance émise par le soleil dans les conditions standard opératives (CSOC). Bien que l'angle d'ouverture du disque solaire soit de $\pm 0,27^\circ$, la distribution angulaire de son rayonnement présente un angle de coupure à $0,4^\circ$ qui contient également le halo de diffusion autour du disque solaire, appelé *circumsolar*. C'est d'ailleurs, l'angle d'ouverture qui est utilisé dans la conception des optiques de concentration. D'une part, le spectre et l'intensité de la lumière est contrôlé par des cellules de références appelées isotypes que l'on définira plus tard et par un monomodule de référence dans le simulateur module. Avant de discuter du rendement des cellules et modules mesurés, les paragraphes suivants détaillent la validation des mesures de courbe IV en simulateur solaire. Par exemple, pour le simulateur cellule, les variations du spectre et de l'intensité sont quantifiées.

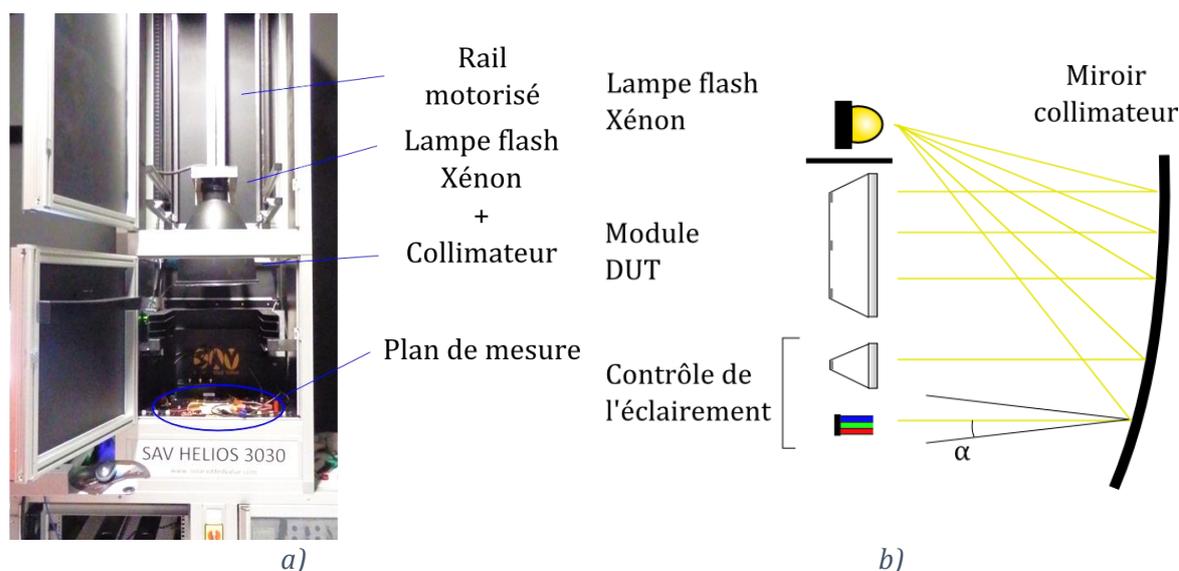


Figure 5.2 : a) Photo du simulateur solaire cellule et b) schéma du simulateur solaire module.

La lampe flash utilisée dans les deux simulateurs solaires est une lampe Xénon. Le graphique en haut de la Figure 5.3 compare le spectre de cette lampe avec le spectre standard AM1.5D pour la même intensité, à savoir $1000\text{W}/\text{m}^2$. Le graphique en bas de la Figure 5.3 représente l'EQE (*External Quantum Efficiency*) des trois jonctions d'une cellule MJSC en fonction de la longueur d'onde. L'EQE représente le pourcentage du nombre d'électrons générés par rapport au nombre de photons reçus par la cellule. En convoluant l'EQE d'une des jonctions avec le spectre de la lumière incidente, on obtient le courant photo-généré par cette jonction. La jonction qui produit le courant le plus faible limite le courant produit par la cellule entière (cf Chapitre 2.). Si

l'intensité de la lumière varie dans la gamme de longueur d'onde [300nm; 700nm], le courant produit par la jonction *Top* varie également. De manière générale la jonction *Bottom* est toujours en excès de courant alors que les jonctions *Top* et *Middle* sont toujours en équilibre proche [109]. Finalement, la cellule n'est affectée que par les variations spectrales globales dans les bandes d'absorption correspondantes aux jonctions *Top*, *Middle* et *Bottom* démarquées sur le graphique de la Figure 5.3. La lumière de la lampe Xénon doit donc reproduire le spectre AM1.5D « discrétisé » sur les 3 jonctions de la cellule à tester.

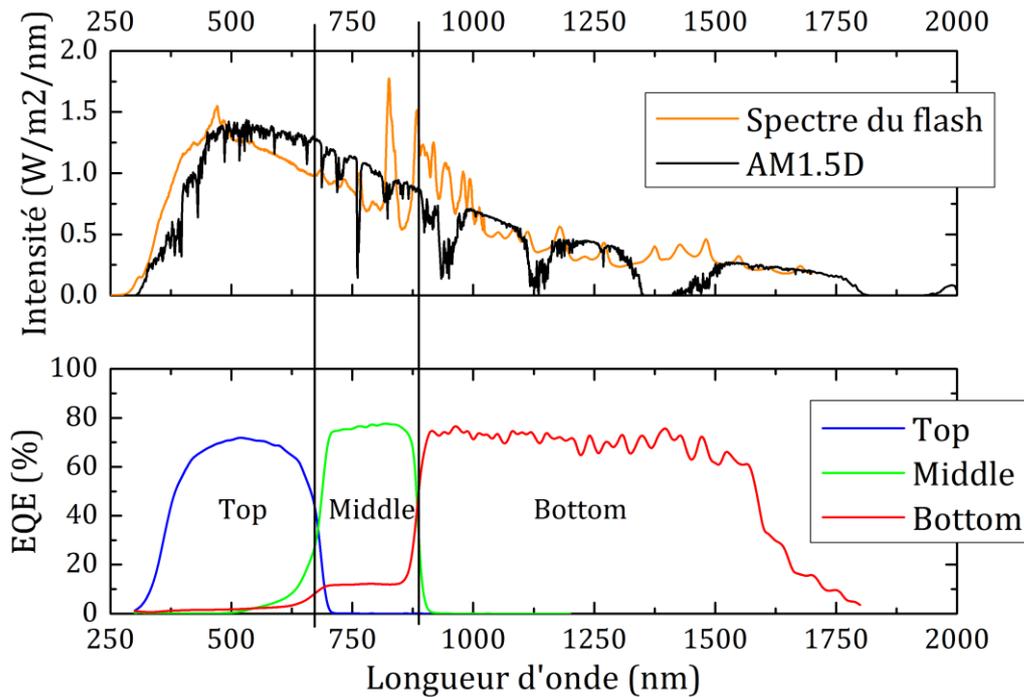


Figure 5.3 : Spectre AM1.5D et de la lampe Xénon du simulateur solaire module. Sur la partie basse du graphique, l'EQE des isotypes est représentée avec la même échelle en abscisse.

Dans un simulateur solaire, le spectre de la lumière est contrôlé par la mesure des courants produits par les isotypes *Top*, *Middle* et *Bottom*. Ces trois isotypes sont trois cellules à triple jonction avec une seule jonction active électriquement. Ainsi, la mesure du courant produit par chaque jonction de la cellule est directement mesurable. En revanche, elles sont du type *Lattice-matched*, une technologie de semi-conducteur dont la définition exacte est donnée dans la référence [110]. Il convient de vérifier si le contrôle de l'éclairement par des isotypes de cette technologie est compatible avec la technologie *métamorphique* des cellules que l'on souhaite tester. Sans rentrer dans la physique du semi-conducteur, la section suivante décrit une méthode pour vérifier cette compatibilité.

5.1.1.1 Contrôle des variations spectrales

Pour quantifier les variations de spectre mesurées par les deux premières isotypes, on introduit le rapport d'équilibre spectral (SMR) :

$$SMR = \frac{DNI_{Top}}{DNI_{Mid}} = \frac{I_{SC_Top}}{I_{SC_Mid}} \quad Eq. 0.1$$

Si les isotopes reçoivent le spectre AM1.5D, le SMR est égal à 1; si l'intensité est plus forte dans la bande spectrale de la *Top* que dans la *Middle*, le SMR est supérieur à 1. La mesure d'une courbe IV doit donc être mesurée pour un SMR égale à 1 pour que cela corresponde aux conditions CSTC.

Comme les cellules mesurées ne sont pas de la même technologie que les isotopes, il est primordial de vérifier si le SMR=1 calculé à partir des isotopes, correspond également à un spectre AM1.5D perçu par les cellules. Pour la suite, on notera les cellules mesurées DUT pour *Device Under Test*. Si la cellule DUT a une autre EQE que les isotopes, il est possible les courants de ses jonctions *Top* et *Middle* ne soient pas à l'équilibre lorsque le SMR des isotopes est à un avec le spectre du Xénon. Un moyen rapide pour vérifier la compatibilité entre le SMR du DUT et des isotopes est le diagramme des jonctions limitante, aussi connu sous le nom de *sub-cell limitation diagram* [109]. Sur ce diagramme (Figure 5.4), la courbe bleue représente l' I_{sc} du DUT normalisée par le DNI mesuré par l'isotype *Top*; la courbe orange celle de la *Middle*. Les fonctions correspondantes à ces deux courbes sont exprimées comme suit :

$$I_{N,Top}(SMR) = \frac{I_{scDUT}}{DNI_{TOP}} ; I_{N,Middle}(SMR) = \frac{I_{scDUT}}{DNI_{Middle}} \quad Eq. 0.2$$

Affichées en fonction du SMR sur le diagramme, les deux courbes de l'Eq. 0.2 permettent d'identifier quelle jonction du DUT est limitante. Par exemple, lorsque la jonction *Top* du DUT est limitante, c'est-à-dire, lorsque $I_{scDUT} = I_{scTop}$, l'Eq. 0.2 devient :

$$I_{N,Top}(SMR) = \frac{I_{scTop}}{DNI_{Top}} ; I_{N,Middle}(SMR) = \frac{I_{scTop}}{DNI_{Middle}} \quad Eq. 0.3$$

Si le DUT est de la même technologie, *i.e.* qui a la même EQE que les isotopes, les courbes $I_{N,Top}(SMR)$ et $I_{N,Middle}(SMR)$ sont des droites du type :

$$I_{N,Top}(x) = constante ; I_{N,Middle}(x) \propto x \quad Eq. 0.4$$

A l'inverse, si le SMR est supérieur à 1, c'est la jonction *Middle* de la cellule qui est limitante et les courbes $I_{N,Top}(SMR)$ et $I_{N,Middle}(SMR)$ prennent cette tendance :

$$I_{N,Top}(X) \propto \frac{1}{X} ; I_{N,Middle}(X) = constante \quad Eq. 0.5$$

Les équations Eq. 0.4 et Eq. 0.5 représentent respectivement les parties *A* et *B* de la Figure 5.4. Par ailleurs, comme la partie de droite est au voisinage de $X=1$, la courbe bleue dans la partie *B* est assimilée à une droite.

Finalement, l'équilibre spectral du DUT (lorsque $I_{scTop}=I_{scMiddle}$) se situe à l'endroit où ont lieu les ruptures de pente des courbes bleue et orange. Cet équilibre de courant entre les jonctions *Top* et *Middle* du DUT reproduit son fonctionnement électrique sous le spectre AM1.5D. Pour valider les mesures de courbes IV, il faut donc que les courbes du diagramme des jonctions limitantes présentent une rupture de pente proche de SMR=1. Ce contrôle simple permet de vérifier que les cellules mesurées perçoivent un spectre AM1.5D effectif.

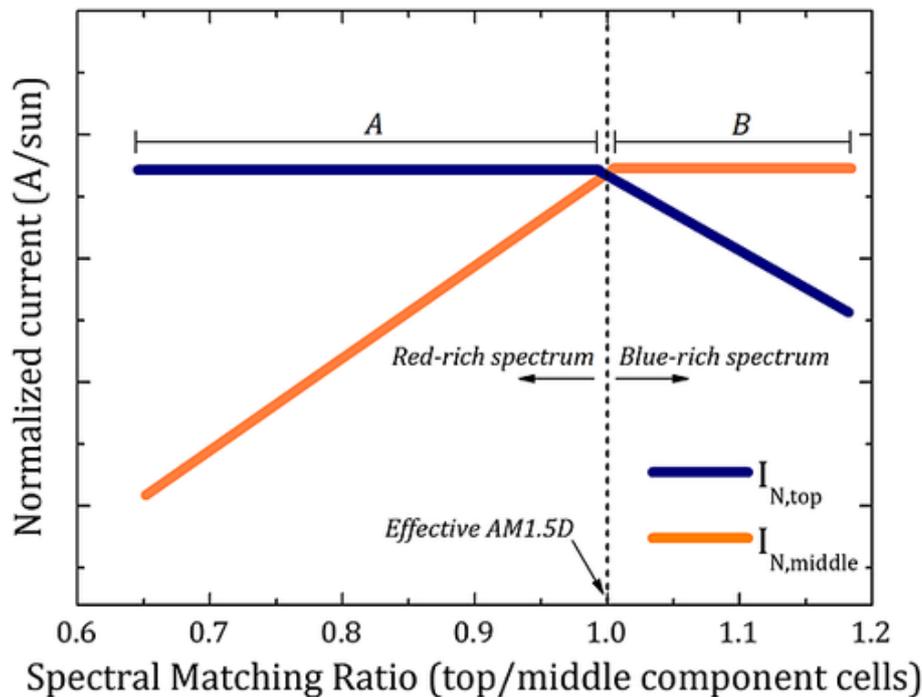


Figure 5.4 : Diagramme des jonctions limitantes pour une cellule DUT de la même technologie que les isotopes.

Malheureusement, les cellules mises en œuvre dans les modules μ -CPV n'ont pas la même EQE que les isotopes et leur équilibre spectral n'est pas du tout atteint quand le SMR des isotopes est égal à un. Contrairement aux isotopes qui sont de la technologie *Lattice-matched*, les cellules du microconcentrateur sont *métamorphiques* [110]. La différence est essentiellement notable sur la jonction *Middle* qui a une bande d'absorption plus large que celle de l'isotype (voir Figure 5.5). Les surintensités émises par la lampe Xénon autour de 900 nm sont donc absorbés par cette jonction et le courant qu'elle produit est alors en excès par rapport à la *Top*. Dans ce cas l'équilibre des courants obtenus sous le spectre AM1.5D n'est pas vérifié. Le courant généré par la cellule, égal à celui de la cellule limitante, est toujours le même mais le déséquilibre des courants augmente le facteur de forme de la courbe IV [111,112].

Pour compenser la sur-illumination de la *Middle*, les pics d'émissions du Xénon sont filtrés. Le filtre, développé spécialement pour reproduire le spectre AM1.5, permet de retrouver un équilibre entre les courants produits par les jonctions mais abaisse l'intensité reçue par la cellule complète. Les spectres du flash Xénon avec et sans filtre sont représentés dans la Figure 5.5. En dessous, les EQE des isotopes et des DUT métamorphiques sont représentées. Sur ces courbes, on constate que la jonction *Middle* de la cellule testée absorbe dans la zone [895nm ; 930nm] alors que ce n'est pas le cas pour l'isotype. Malheureusement, cette zone correspond à un pic d'émission de la lampe Xénon. Bien que la jonction *Top* de la cellule à tester absorbe un peu plus de lumière dans les basses longueurs d'onde également, l'équilibre entre les deux jonctions n'est pas le même. Le spectre de la lumière Xénon filtrée représenté sur la Figure 5.5 ne présente plus de surintensité. L'allure de ce spectre est plus fidèle à celle du spectre AM1.5D. Pour valider cette tendance, on observe le diagramme des jonctions limitantes de la cellule *métamorphique*.

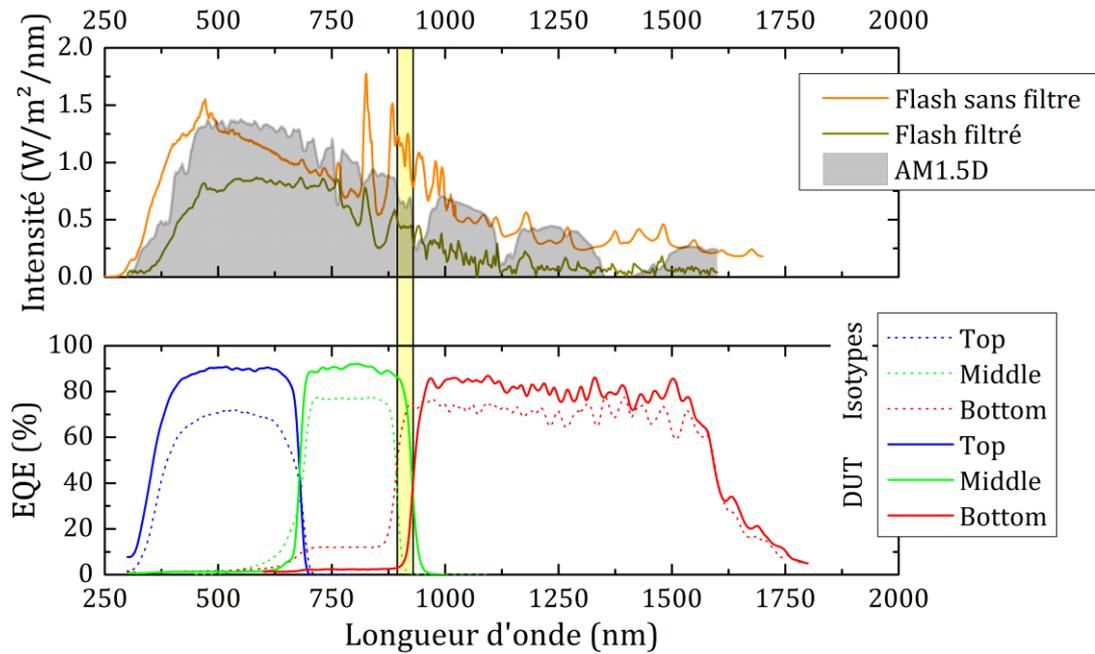


Figure 5.5 : Effet du pic du Xénon sur les cellules à tester (DUT).

Pour quantifier l'importance du déséquilibre des courants de la *Top* et de la *Middle*, on trace le diagramme des jonctions limitantes pour un flash filtré et non filtré (voir Figure 5.6). Sur le diagramme de la lumière non-filtrée, l'équilibre des courants entre les jonctions *Top* et *Mid* est atteint seulement pour un $SMR_{isotypes}=1,09$. Cette valeur de SMR étant sur une extrémité de la courbe, la précision de lecture du $SMR_{isotypes}$ à l'équilibre des courants de la cellule à tester est discutable. A l'inverse, le spectre filtré de la lampe Xénon fait correspondre les points d'équilibre de courant des isotypes et du DUT. La rupture de pente des deux courbes bleu et verte a lieu lorsque le $SMR_{isotypes}$ est égal à 0,99. En d'autres termes, la cellule métamorphique et les isotypes perçoivent le spectre AM1.5D effectif avec une différence de 1% sur leur SMR. Cet écart de 1% sur le spectre n'a pas de conséquence directe sur la mesure de la courbe IV. Au contraire, ce léger décalage entre les deux équilibres place le DUT en fonctionnement *Middle* limitant. De cette manière, le courant mesuré de la cellule correspond à celui délivré par la jonction *Middle*, 1% plus faible que celui produit par la *Top*. Cette différence étant suffisamment faible pour ne pas surestimer le FF de la cellule et en prenant l'isotype *Middle* comme référence de l'éclairement, l'instabilité de l'éclairement dans les autres gammes de longueur d'onde n'a pas d'influence sur le courant produit par le DUT. Finalement, le décalage de 1% sur le $SMR_{Cellule}$ et le $SMR_{isotypes}$ rend la mesure plus précise.

Finalement, avec un filtre adapté le simulateur solaire reproduit l'équilibre des courants obtenus pour le spectre AM1.5D pour les cellules DUT comme pour les références. De cette manière, l'éclairement perçu par les références correspond bien à l'éclairement perçu par les DUT. En revanche, la répartition de cet éclairement dans le plan de mesure doit maintenant être qualifiée.

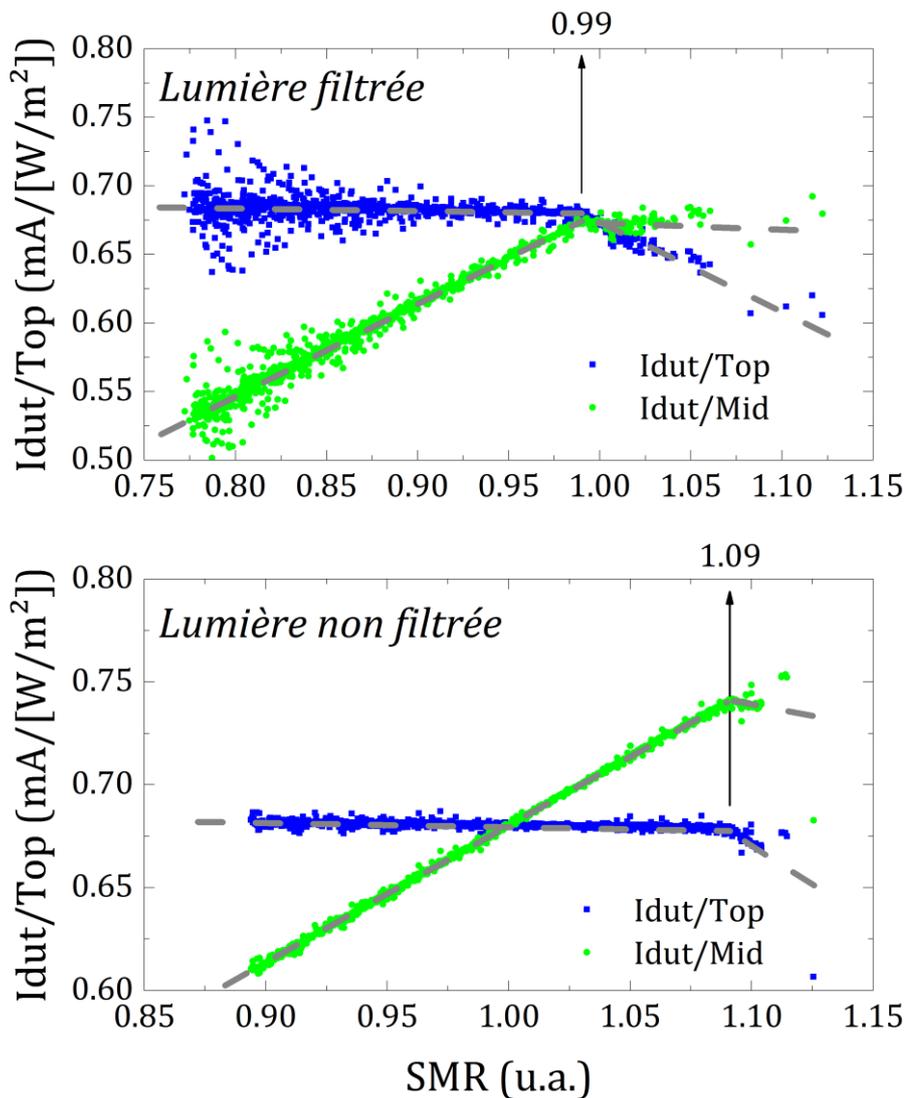


Figure 5.6 : Diagrammes des jonctions limitantes de la cellule DUT pour un éclairement filtré et non filtré en simulateur solaire.

5.1.1.2 Contrôle de l'intensité de la lumière

Dans le plan de mesure d'un simulateur solaire, l'intensité de la lumière n'est pas constante. De plus, les variations d'éclairement enregistrées ne sont pas les mêmes selon l'isotype utilisée. En d'autres termes, le SMR n'est pas constant dans tout le plan de mesure. Dans ce paragraphe, on analyse la répartition de l'éclairement enregistré par chaque isotype dans le plan de mesure du simulateur solaire. L'objectif est de quantifier les erreurs d'homogénéité mais aussi l'écart entre l'éclairement mesuré par les références et l'éclairement moyen dans la zone de mesure. La Figure 5.7 ci-dessous est une photographie du plan de mesure du simulateur solaire cellule. Dans la configuration de mesure, Les cellules de référence ne sont pas au même endroit que la zone de mesure homogène. Par ailleurs, il convient de mesurer l'écart entre l'éclairement reçu par les références et celui qui arrive dans la zone de mesure, à la surface du PCB à tester (DUT).

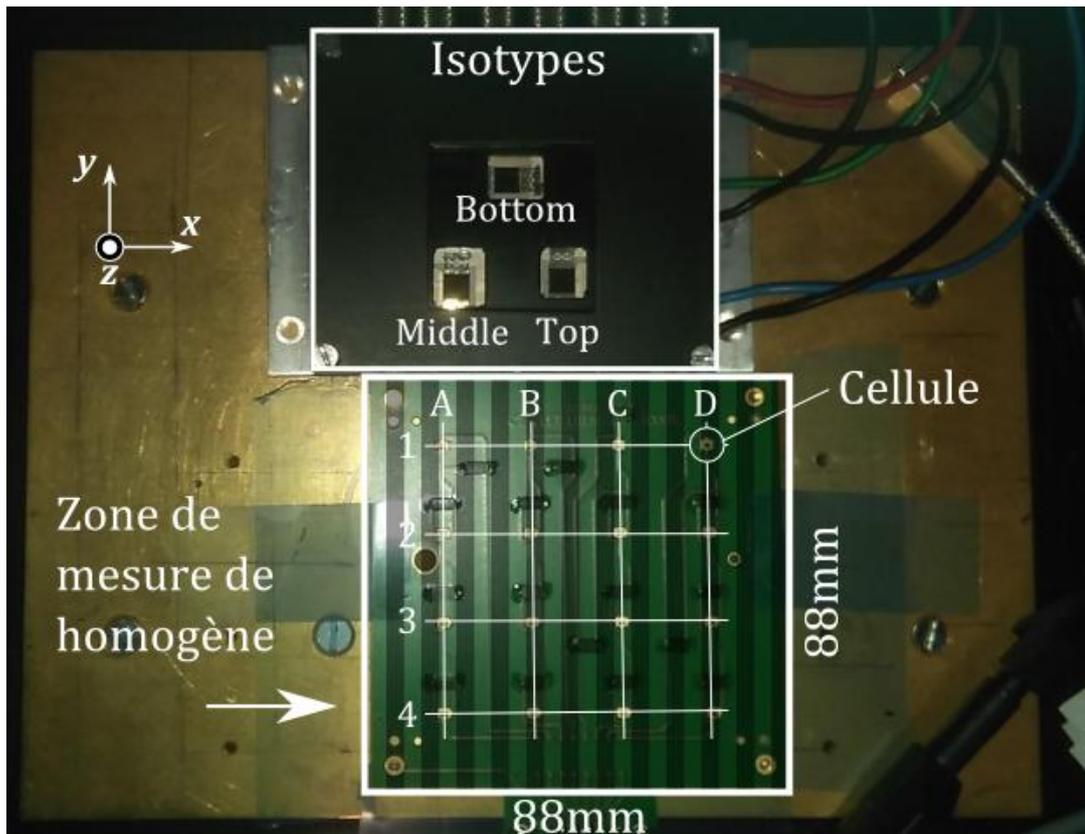


Figure 5.7 : Photo du plan de mesure du simulateur solaire cellule.

Pour quantifier les variations d'éclairement sur la surface du PCB, on déplace les isotypes dans la zone représentée sur la Figure 5.7. De cette manière, on obtient une cartographie de l'irradiance pour les isotypes *Top*, *Middle* et *Bottom* dans la zone de mesure. Sur la Figure 5.8, les trois cartographies de l'irradiance sont représentées avec la cartographie du $SMR_{Top/Mid}$ des isotypes. Pour chaque cartographie, on représente l'emplacement des cellules avec une grille de quatre colonnes et quatre lignes. Dans la zone de mesure où est placé le PCB, on calcule l'éclairement moyen et l'écart type pour chaque isotype et pour le SMR. Les résultats sont affichés dans Tableau 0-1. On voit que les concentrations moyennes perçues par la *Top* et la *Middle* sont égales, donc le SMR moyen sur la zone est de un. En revanche, les variations de concentrations crête-à-crête sont importantes. La concentration perçue par la *Top* varie de -4,5% à +2,5% par rapport à sa valeur moyenne; la *Middle* varie de -2,9% à +2,1%; la *Bottom* varie de -2,7% à +1,9% et le SMR varie de -1,7% à +1,7%. Le SMR est donc compris entre 0,98 et 1,02. Comme on l'a défini dans le paragraphe précédemment, les cellules sont *Top* limitantes lorsque le SMR est inférieur à 0,99 et *Middle* limitantes lorsque le SMR est supérieur à 0,99. D'après la cartographie du SMR ci-dessous, on voit que seule la cellule A1 est *Top* limitante. Le courant produit par les autres cellules est donc dépendant des variations de concentration de la *Middle*. Finalement, le courant produit par chaque cellule peut varier de -2,9% à 2,1%, à cause des variations d'éclairement dans la gamme de longueur d'onde de la *Middle*.

Tableau 0-1 : Moyenne et écart de concentration dans la zone de mesure pour chaque isotype.

	Top	Middle	Bottom	SMR
Moyenne	406X	406X	410X	1,00
Ecart-type	6,82X	4,70X	4,61X	0,01
Ecart Min-Max	7,03%	5,09%	4,65%	3,4%

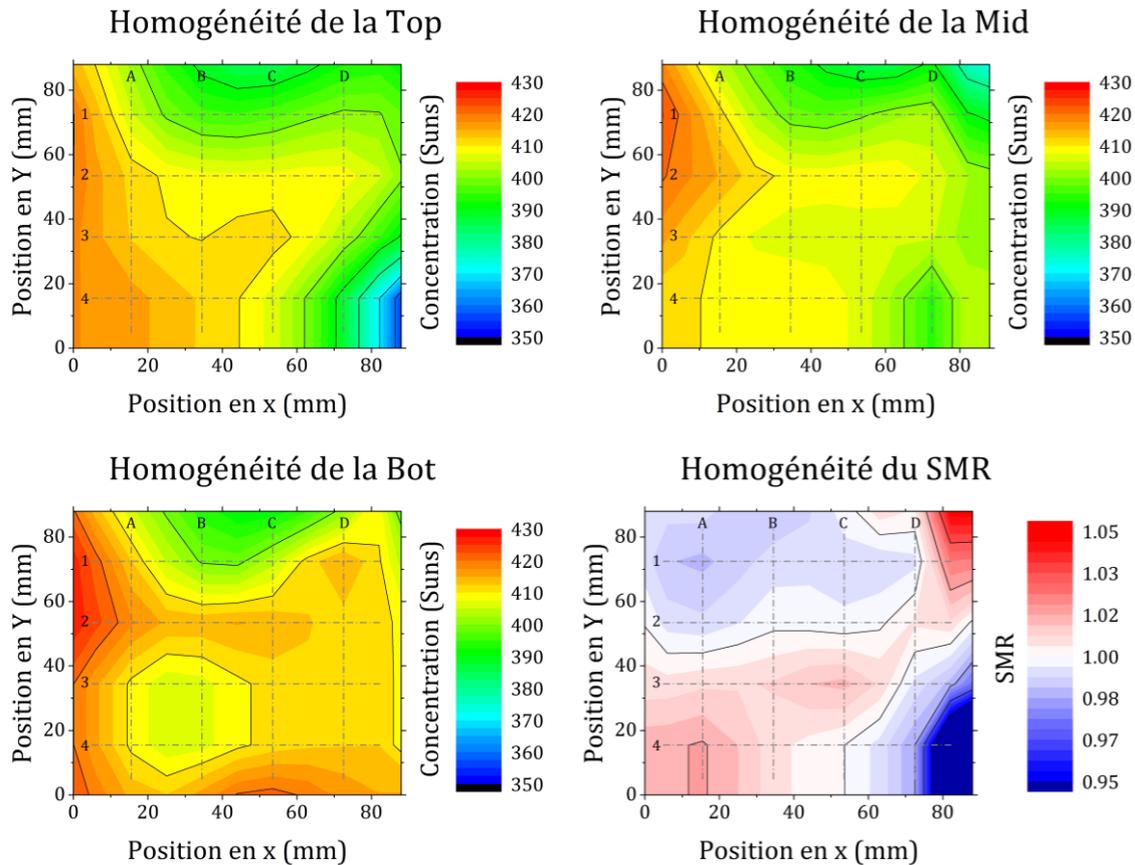


Figure 5.8: Cartographies de l'irradiance mesurée par les trois isotypes de référence ainsi que la cartographie du SMR Top/Mid dans la surface de mesure.

En conclusion, les courbes IV de chaque cellule peuvent varier en intensité de $\pm 3\%$ selon leur position dans le plan de mesure. Et comme les isotypes ne sont pas placés dans le plan de mesure, une corrélation entre l'éclairement dans leur position (voir Figure 5.7) et l'éclairement dans la zone de mesure est effectuée. Par exemple, lorsque la zone de mesure reçoit un éclairement moyen de 406X sur la *Top* et la *Middle*, les références reçoivent un éclairement de 369X sur la *Top* et de 393X sur la *Middle*. Aussi, d'autres mesures montrent une très bonne répétabilité de la répartition de l'éclairement dans la zone de mesure ($< 0,2\%$), l'écart entre la mesure des références et l'éclairement réel dans la zone de mesure est considéré comme constant. En d'autres termes, lorsque la mesure de l'éclairement de référence est de 369X sur la *Top* et 393X sur la *Mid*, l'éclairement est de $406X \pm 3\%$ dans la zone de mesure.

Une étude de l'éclairement dans le plan de mesure du simulateur module effectuée

de la même manière montre une variation de l'éclairement de $\pm 0,5\%$ quelle que soit l'isotype. Le miroir de collimation améliore l'uniformité de l'éclairement. En revanche, l'éclairement invariable impose un éclairement de 361W/m^2 à $\text{SMR}=1$.

5.1.2 Performances des cellules nues

Les courbes IV des cellules métamorphiques du micro-concentrateur 1000X sont mesurées dans les conditions décrites précédemment. Chaque string, correspondant à une chaîne de quatre cellules notée A à D sur la Figure 5.7, est mesuré. Les courbes IV de ces quatre strings sont représentées dans la Figure 5.9 a) ; la courbe IV du PCB complet est représentée en courant et puissance dans la Figure 5.9 b). Ensuite, les performances de chaque string ainsi que celles du module sont données dans le Tableau 0-2.

Tableau 0-2 : Résumé des performances de chaque string de cellules avant la mise en module.

	String A	String B	String C	String D	PCB complet
V_{oc} (V)	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9
I_{sc} (mA)	27,2	26,9	26,9	26,7	107
P_{mp} (mW)	272	266	264	266	1073
V_{pmp} (V)	10,7	10,6	10,8	10,8	10,6
I_{pmp} (mA)	25,5	25,1	24,4	24,7	101
FF (%)	83,9	83,3	82,4	83,9	83,9
Eff (%)	41,9	41,0	40,6	41,0	41,3

Performances pour des cellules de $0,4\text{mm}^2$ @406X SMR=1 et 25°C .

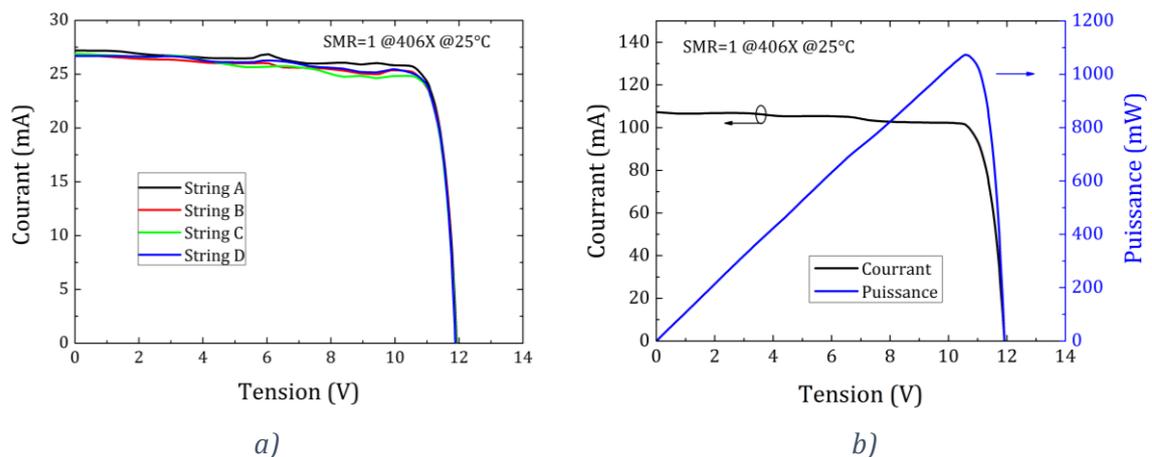


Figure 5.9 : Caractéristiques IV des quatre strings en a) et du PCB complet en b).

Les courbes IV de chaque string présentent des disparités malgré la sélection des cellules placées sur le PCB avec un écart maximum de $\pm 0,2\%$ sur leur rendement. Sur la Figure 5.9 a) notamment, les fluctuations de courant sur la partie constante des courbes sont dues à plusieurs paramètres. D'une part, l'éclairement n'est pas le même sur chaque cellule du string. La variation de courant associée est visible sous forme de

marche comme celles que l'on voit sur la Figure 5.9 b) par exemple. En raison des variations d'éclairement de $\pm 3\%$ dans la zone de mesure, le courant sur chaque string peut varier du même ordre de grandeur par marche de 3V environ correspondant à la V_{oc} de chaque cellule. Par conséquent, la puissance maximale peut varier également de 3%, entraînant la même erreur sur le calcul du rendement. Les rendements mesurés pour chaque string du PCB nu calculés ici seront ensuite comparés à ceux mesurés pour chaque string du PCB mis en module.

5.1.3 Performance des modules

5.1.3.1 Performances électriques

Pour caractériser les micro-X les optiques de concentration nécessitent d'avoir un éclairage collimaté pour reproduire les conditions d'éclairage solaire. Comme il est décrit précédemment, le simulateur solaire module permet donc de mesurer les courbes IV et l'angle d'acceptance du module. Les performances électriques de chaque string ainsi que du module complet sont résumées dans le Tableau 0-3 ci-dessous. De la même manière que les courbes des strings avant mise en module, les courbes de chaque string du module présentent des fluctuations de courant similaires (voir Figure 5.10). D'une part, les courbes comportent des marches de 3V de largeur. D'autre part, on remarque des fluctuations de courant. Ces dernières étant aléatoire dans le temps, elles sont considérées comme du bruit de mesure. A l'inverse des marches constatées sur les courbes IV des strings du PCB avant intégration dans le module, celles-ci ne sont pas dues à la mauvaise uniformité de l'éclairage dans le plan de mesure. En effet l'uniformité mesurée par les mêmes méthodes que celles mesurées dans le simulateur solaire cellule est de $\pm 0,5\%$ seulement. Nous pouvons donc attribuer cette variation à la différence de qualité de chaque optique. Comme les optiques couplées à chaque cellule ne sont pas toutes de la même qualité, cela induit un éclairage variable sur les différentes cellules. Par exemple, le string A, qui présente la plus grosse chute de courant à partir de 6V environ, comporte une bulle dans deux de ses optiques secondaires. Les bulles, affectant l'efficacité des optiques, ont donc un impact visible sur le courant. En d'autres termes, les marches de 3V de largeur observées sur les courbes sont donc significatives des pertes optiques de la cellule.

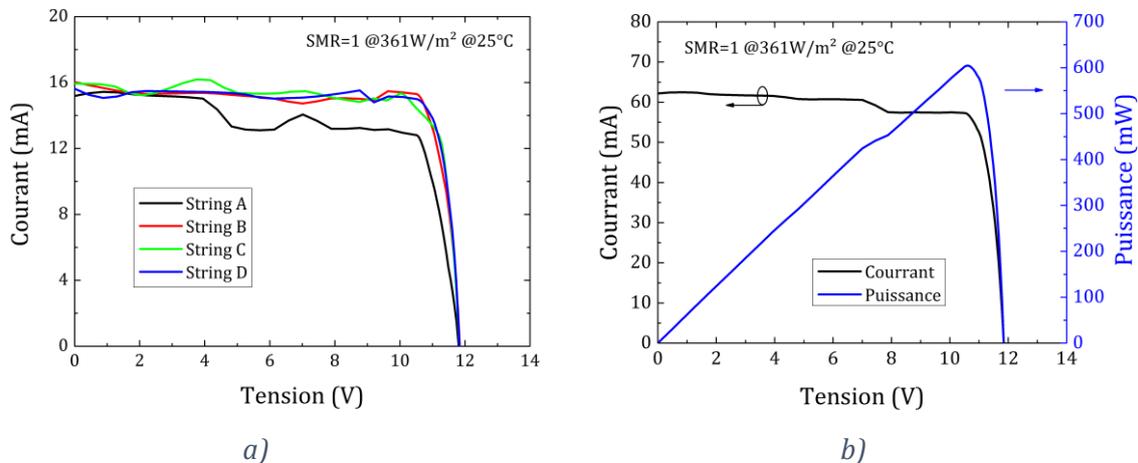


Figure 5.10 : Courbes IV a) de chaque string du module μ -CPV 1000X et b) du module complet

Tableau 0-3 : Résumé des performances de chaque string du module μ -CPV 1000X.

	String A	String B	String C	String D	PCB complet
V_{oc} (V)	11,8	11,8	11,8	11,8	11,9
I_{sc} (mA)	15,2	16,0	15,9	15,6	62
P_{mp} (mW)	135	161	155	158	605
V_{pmp} (V)	10,5	10,6	10,2	10,6	10,6
I_{pmp} (mA)	12,8	15,2	15,2	14,9	57
FF (%)	75	84,8	82	85,7	82
Eff (%)	25,8	30,9	29,6	30,3	29,0

Performances pour un éclairage de $361W/m^2$ @SMR=1 et $25^\circ C$.

En plus des pertes optiques liées aux défauts de fabrication, d'autres, répertoriées dans l'état de l'art, composent le CTM. Pour le moment, nous nous intéressons seulement au calcul de ce CTM, d'autres expériences sont nécessaires pour comprendre la chaîne de pertes qui correspond.

5.1.3.2 Angle d'acceptance

L'autre critère qui définit la qualité de la mise en module, est l'angle d'acceptance. Le simulateur solaire module, sur lequel on peut faire pivoter le plan de mesure en maîtrisant l'angle d'inclinaison, permet de mesurer facilement cet angle d'acceptance. Pour ce faire, la puissance délivrée par le module est mesurée pour chaque angle d'inclinaison du plan de mesure. La courbe d'acceptance angulaire du module, *i.e.* la puissance du module en fonction de son angle par rapport aux rayons incident, est représentée dans la Figure 5.11. Pour le module μ -CPV 1000X, l'acceptance angulaire est mesurée pour l'angle d'élévation et l'angle d'azimut. Sur ces courbes d'acceptances, on constate que l'angle d'acceptance du module complet est de $\pm 0,45^\circ$. En comparaison avec l'angle d'acceptance (AA) du module obtenu par simulation (de $\pm 0,6^\circ$), celui du module réel est plus faible. Lors des simulations par tracé de rayon des tolérances mécanique, on a vu que le mauvais alignement des éléments optiques entre eux participe à la diminution de l'AA. Par exemple, les défauts d'alignement dans la limite maximum définie dans le chapitre précédent fait chuter l'AA à $\pm 0,5^\circ$. Aussi, l'analyse des pertes dans l'état de l'art montre que les erreurs de forme des lentilles ont également un impact négatif sur l'AA. Finalement, la valeur de l'angle d'acceptance réelle est dans l'ordre de grandeur de ce que l'on peut attendre. Par la suite, les mesures de désalignement tenteront d'expliquer plus précisément la perte d'angle d'acceptance du module.

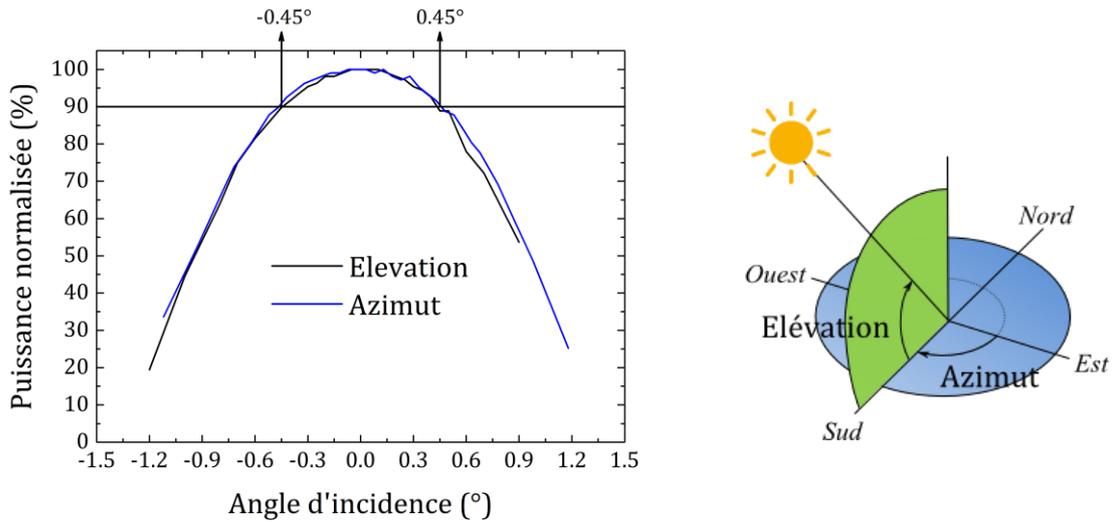


Figure 5.11 : Puissance normalisée du module μ -CPV 1000X en fonction de l'angle d'incidence des rayons en élévation et en azimut.

5.1.4 CTM du micro-concentrateur 1000X

La mesure de la courbe IV dans le simulateur solaire module est réalisée par défaut pour un éclairement de $361 \pm 0,5\%$ W/m² et SMR=1 dans le plan de mesure. Avec une concentration géométrique de 1000X pour le micro-concentrateur dont on souhaite calculer le rapport cell-to-module, la concentration théorique reçue par la cellule est de l'ordre de 361X et ne peut pas être modifiée. Comme le rendement d'une cellule MJSC dépend de la logarithmiquement de la concentration, la mesure du rendement des cellules nues, avant mise en module, doit être du même ordre de grandeur. Les mesures de courbe IV dans le simulateur solaire cellule sont donc mesurées pour une concentration proche de l'éclairement perçue par les cellules dans le module. En minimisant les erreurs d'homogénéité dans le simulateur cellule, la concentration mesurée dans le plan de mesure est de $406 \pm 3\%$ X. D'après les courbes de rendement d'une cellule triple jonction en fonction de la concentration représentées dans le chapitre d'état de l'art, la variation de 10% sur l'éclairement génère une variation de 0,8% sur la mesure du rendement. En comparaison avec les erreurs de mesure cet écart sur la valeur du rendement est considérée comme négligeable.

Les CTM de chaque string et du module μ -CPV 1000X complet sont donnés dans le Tableau 0-4. En raison des erreurs de mesures sur le rendement des cellules, ces valeurs sont précises à environ $\pm 3\%$ près. Comme il est décrit dans le chapitre d'état de l'art, le CTM est représentatif de la totalité des pertes générées par la mise en module. En d'autres termes il permet de quantifier la qualité de la fabrication des modules μ -CPV. Dans les sections suivantes, quelques expériences complémentaires sont détaillées pour proposer une compréhension plus approfondie de la chaîne de pertes du module.

Tableau 0-4 : Récapitulatif des CTM de chaque string et du module complet.

	String A	String B	String C	String D	PCB complet
CTM (%)	61,6%	75,4%	72,9%	74,0%	70,2%

5.2 Mesure de l'efficacité optique

Comme il a été décrit dans le chapitre d'état de l'art, les pertes optiques sont prédominantes dans le CTM. Pour rappel, ces pertes sont réparties en trois catégories : les pertes par réflexion, les pertes par absorption et les pertes diverses (diffusion, erreurs de forme et autres). De plus, on a vu que la non-uniformité de l'éclairement à la surface de la cellule est également responsable de pertes. En somme, l'optique de concentration introduit des pertes de puissance directes (réflexion, absorption, pertes diverses) et une modification de la répartition de l'éclairement sur les cellules (non-uniformités). Le schéma de la Figure 5.17 représente ces quatre phénomènes optiques qui interviennent dans la chaîne de pertes entre la cellule et le module.

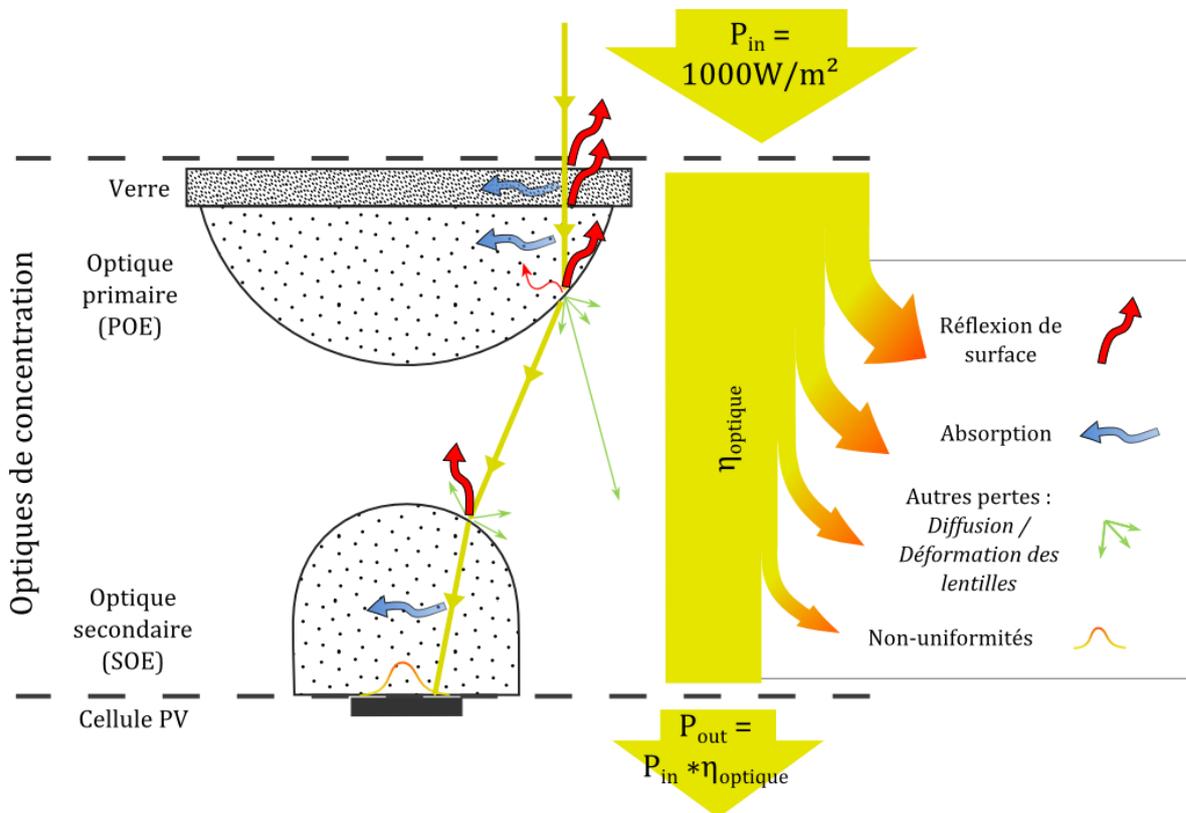


Figure 5.12 : Schéma des pertes optiques dans le module μ -CPV 1000X.

5.2.1 Pertes directes : Réflexion et Absorption

L'état de l'art, vu précédemment, montre qu'il existe des moyens simples pour calculer les pertes par réflexion et par absorption à partir des données sur les matériaux utilisés.

Dans un premier temps, les pertes par réflexion, calculées avec la formule de Fresnel décrite dans le chapitre 2, se calculent à chaque surface entre deux matériaux. La somme de toutes les réflexions représente une perte de 12%. En revanche, comme le verre est traité avec un antireflet, les pertes à la surface supérieure de celui-ci sont de 2% au lieu de 4%. Finalement, les pertes par réflexion ne sont que de 10% pour le micro-concentrateur réalisé.

Ensuite, les pertes par absorption sont calculées par la loi de Beer-Lambert (voir le chapitre 2) à partir des coefficients d'absorption du verre ($\alpha = 0,0097 \text{ mm}^{-1}$) et

du silicone ($\alpha=0,0021\text{mm}^{-1}$). Dans le micro-concentrateur 1000X, ces pertes s'élèvent à 3,5%.

Finalement, ces deux phénomènes sont des pertes importantes dans le concentrateur mais elles sont faciles à quantifier. Les autres pertes optiques (diffusion, pertes dues aux déformations et pertes dues aux non-uniformités de l'éclairement sur la cellule) sont beaucoup plus compliquées à quantifier. La section suivante décrit les méthodes mises en œuvre dans le CPV.

5.2.2 Critères de caractérisation de la tache focale

Dans le CPV et le μ -CPV, la compréhension des pertes de puissance est aussi importante que la connaissance de la distribution de l'éclairement à la surface de la cellule. Typiquement, la norme IEC 62989 [113], parue en mars 2018 et qui spécifie les critères de caractérisation des optiques primaires, décrit trois paramètres à quantifier :

- l'efficacité optique de la POE,
- le diamètre du cercle qui englobe 95% de la puissance lumineuse totale contenue dans le spot lumineux,
- l'uniformité de l'éclairement.

L'efficacité optique d'une POE correspond à sa transmittance dans la gamme de longueur d'onde d'une cellule CPV et pour une cible suffisamment grande pour englober la totalité du flux transmis. Elles comptent les pertes par réflexion par absorption et les pertes diverses qui induisent des pertes de puissance lumineuse. Le spot, ou la tache focale de la POE, présente généralement un profil d'irradiance gaussien circulaire. Son diamètre est un paramètre important dans le fonctionnement d'un concentrateur. Par exemple, les lentilles de Fresnel de modules CPV de taille normale génèrent des taches focales de 5 à 10mm de diamètre. Enfin, l'uniformité de l'éclairement, quantifiée par le *Peak-to-Average Ratio* (PAR), détermine les pertes de non-uniformités. Sur la Figure 5.13 issue de la référence [114], l'éclairement dans le plan focal d'une lentille primaire quelconque est représenté par une surface 3D. Juste en dessous, un graphique représente la puissance contenue dans un cercle centré sur le maximum de l'éclairement en fonction de son diamètre. La puissance encerclée est exprimée en pourcentage de la puissance totale transmise de la POE. Le rayon du spot tel que défini par la norme IEC 62989 est représenté sur ce graphique.

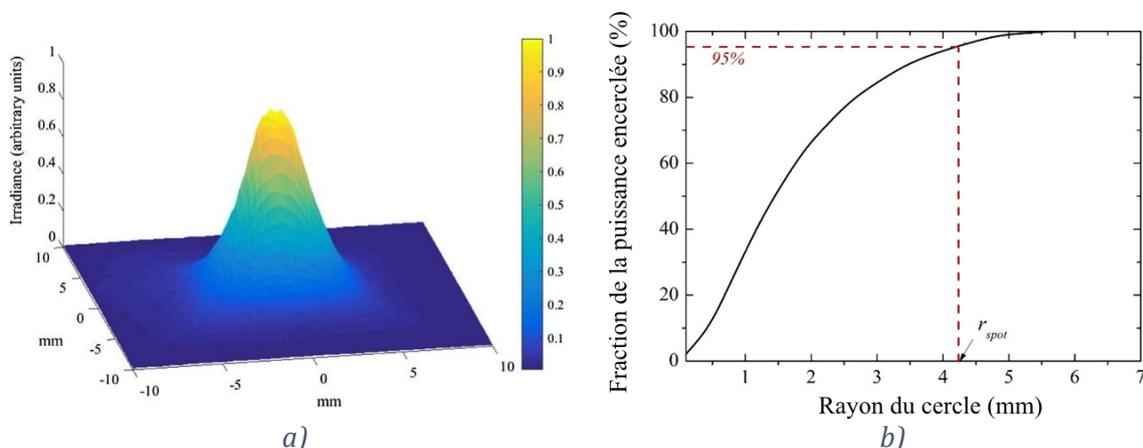


Figure 5.13 : Distribution de l'éclairement dans le plan focal d'une POE quelconque et calcul du rayon de spot qui encerclé 95% de la puissance lumineuse [114].

5.2.3 Banc d'imagerie de la tache focale

Afin de caractériser les trois critères de caractérisation des optiques décrits précédemment, un banc d'imagerie de tache focale a été développé dans le cadre d'une autre thèse du laboratoire (voir Figure 5.15) [115,116]. Cet outil, basé sur le simulateur solaire module, permet de faire l'image de la tache focale d'optiques primaires (lentilles ou miroirs). La tache focale est projetée sur un écran et enregistrée par une caméra CCD. Un jeu de filtres optiques placés entre l'écran et la caméra permet de sélectionner différentes longueurs d'onde afin d'observer les variations spectrales d'éclairement. Pour permettre l'image de la tache focale dans le champ de la caméra, l'écran est un diffuseur en transmission. Finalement, ce dispositif d'imagerie permet d'obtenir une cartographie de l'irradiance dans le plan focal de la lentille à différentes longueurs d'onde. L'intensité du flux incident sur l'optique primaire à tester est de 1000W/m^2 et $\text{SMR}=1$. La roue à filtre utilisée comporte douze filtres passe-bande d'une largeur de 50nm qui couvrent les longueurs d'onde de 400nm à 950nm . La taille de l'image enregistrée est de $12,8 \times 10,24\text{mm}^2$ avec une résolution de $10\mu\text{m}$.

Ce banc d'imagerie a été développé pour des optiques de concentration de grande taille. En général, ces optiques d'une focale de 30cm à 50cm génèrent des tâches focales de 5mm à 10mm de diamètre. Pour ce type de lentille les mesures de distribution d'éclairement concordent avec les mesures électriques d'une cellule de référence placée dans le plan focal de la lentille. Par exemple, Herrero *et al.* mesurent le PAR avec la même méthode et remontent à la quantification des pertes dues aux non-uniformités mesurées sur les cellules [65]. Aussi, Besson *et al.* calculent le SMR à partir des informations spectrales de la mesure et retrouve cette valeur avec les mesures électriques [116,117]. Ces deux expériences de mesure avec le même banc optique représenté sur les Figure 5.15 et Figure 5.14 assurent la validité de la méthode.

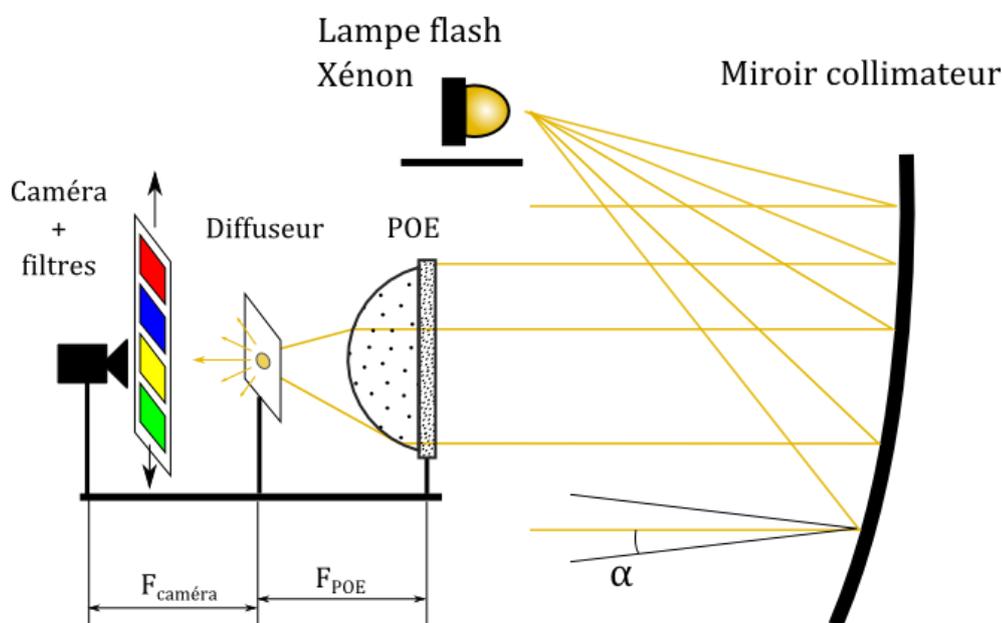


Figure 5.14 : Schéma du banc d'imagerie de la tache focale d'optique de concentration dans le simulateur solaire module

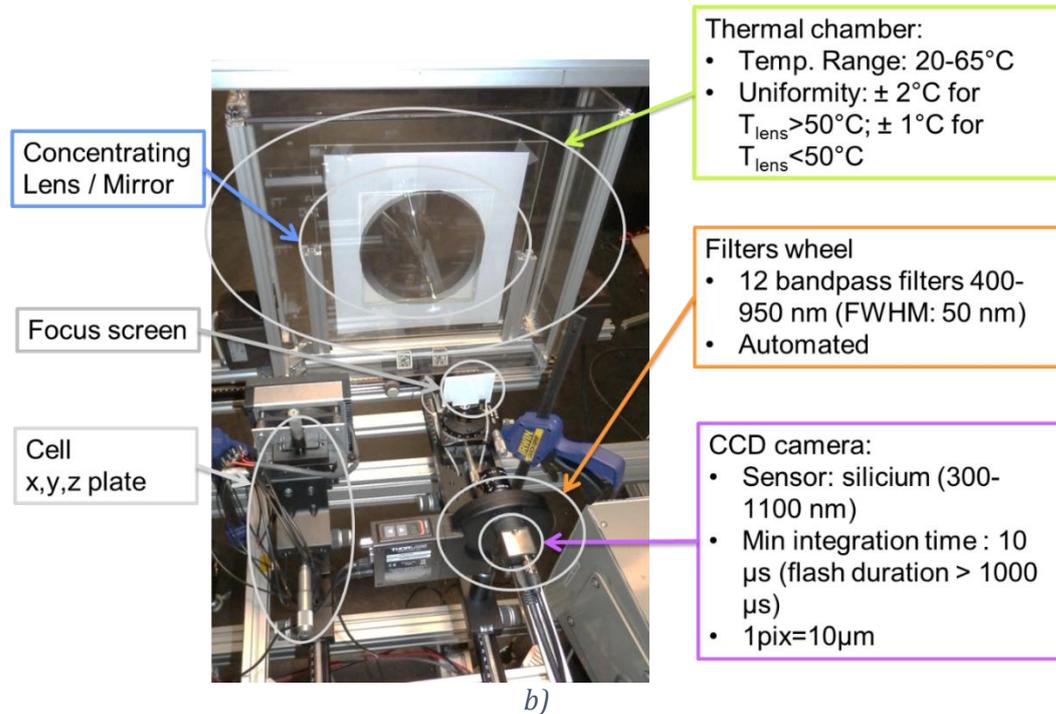


Figure 5.15 : Photographie du banc issu de la référence [116].

Plus précisément, les résultats de mesures électriques qui concordent avec les mesures de non-uniformités du banc d'imagerie montrent une très bonne maîtrise des biais du système d'imagerie. En revanche, ces comparaisons électrique/optique sont effectuées à partir de la même source flash Xénon. Or cette source, associée au miroir collimateur, présente un angle de divergence de 0,4° au lieu de 0,27°. Malheureusement, cette différence d'angle implique une différence dans la taille du spot et dans le calcul du PAR. Les paragraphes suivants montrent en quoi cette différence est importante pour notre analyse.

Dans le simulateur solaire module, la lampe Xénon est placée au point focal du miroir parabolique. Comme le diffuseur est lui aussi dans le plan focal de la POE, qui est une lentille convergente, la lampe et le diffuseur sont conjugués. Ainsi, la tache observée sur le diffuseur est l'image de la lampe. Ensuite, la caméra enregistre l'image de la lampe projetée sur le diffuseur qui sert alors d'écran. Finalement, la taille de la tache focale est donc régie par les relations de conjugaison d'optique géométrique :

$$\frac{r_{lampe}}{F_{miroir}} = \tan \alpha = \frac{r_{spot}}{F_{POE}} \quad Eq. 0.6$$

Le rayon de la tache focale r_{spot} dépend donc de l'angle de divergence α du faisceau collimaté et de la distance focale des lentilles ($F_{POE}=57\text{mm}$), voir Figure 5.16. L'angle de divergence du faisceau collimaté α dépend de la taille de la lampe ($r_{lampe}=42\text{mm}$) et de la focale du miroir ($F_{POE}=6\text{m}$). Dans cette configuration, l'angle de divergence α est égal à 0,4°. Il ne correspond donc pas à celui du disque solaire qui est de 0,27° et la tache focale observée par le banc de caractérisation optique est surestimée. De plus, l'image projetée sur le diffuseur est une image du filament de la lampe. La répartition d'éclairement dans le plan focal ne reproduit pas exactement celle, plus homogène, créée par le disque solaire. D'après les relations de conjugaison de l'Eq. 0.6, le diamètre du spot est de 0,54mm pour un angle de divergence de 0,27° et de 0,79mm pour un angle de 0,4°. A titre de comparaison, on calcule les diamètres des spots simulés par

tracé de rayons avec deux sources modélisant les angles de divergence de $0,27^\circ$ et de $0,4^\circ$. Ces diamètres valent respectivement $0,56\text{mm}$ et $0,76\text{mm}$ sur les cartes d'irradiance simulées. Le diamètre de la tache focale simulée est donc très proche de celui calculé par les lois de conjugaison. En revanche, il est important de noter que ce diamètre est celui du cercle qui englobe 100% de la puissance transmise par la POE. En conclusion, on remarque que l'angle de divergence du faisceau collimaté a une influence non-négligeable sur le diamètre du spot.

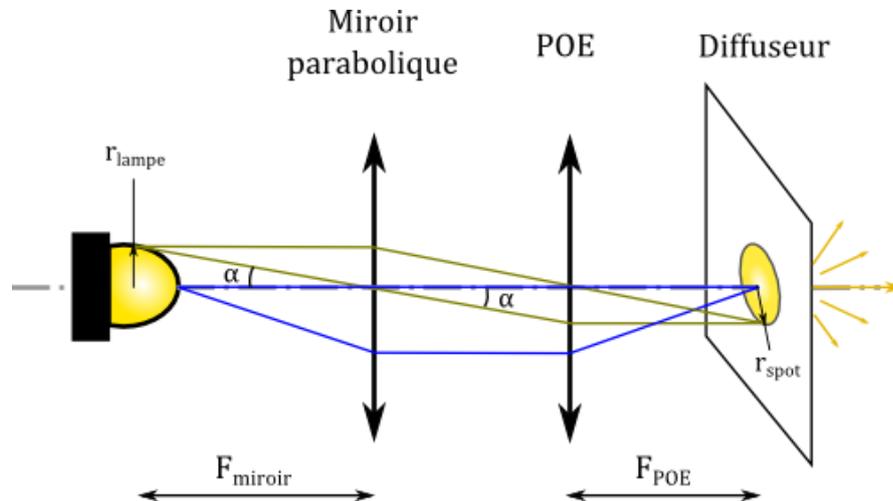


Figure 5.16 : Conjugaison entre la lampe, le miroir, la POE et le diffuseur dans le simulateur solaire.

L'image de la lampe est projetée sur la face d'entrée du diffuseur mais de l'autre côté, les rayons ne suivent plus une trajectoire balistique. Par définition le diffuseur diffuse chaque rayon et répartit l'énergie qu'il transporte dans toutes les directions. De cette manière la tache observée par la caméra est une image de la lampe Xénon très floue. La tache observée ne correspond donc pas parfaitement à la répartition de l'éclairement que perçoit la cellule.

5.2.4 Tache focale de la POE du micro-concentrateur 1000X

Conformément aux recommandations de la norme IEC 62989, le diamètre du spot est calculé comme étant « le diamètre du cercle englobant 95% de la puissance transmise ». Afin de comparer les cartographies d'irradiance simulées par tracé de rayon et mesurées par le système d'imagerie, on utilisera désormais la définition de la norme pour comparer les diamètres de spot. La distribution de l'éclairement étant mesurée avec une divergence de $0,4^\circ$ dans le simulateur solaire, on la compare avec les simulations correspondantes aux mêmes conditions sur la divergence angulaire. La Figure 5.17 ci-dessous représente les cartographies d'irradiance du spot simulé et a) et mesuré en b). Sur ces cartographies, on constate que le spot de la POE mesuré est plus grand que celui simulé. En effet, la simulation montre un diamètre de spot de $0,62\text{mm}$ alors que la mesure montre un diamètre de $0,9\text{mm}$. Les profils d'irradiance passant par le centre de la tache focale montrent que la tache focale de la lentille réelle est plus diffuse que celle simulée. Les bords de la tache focale réelle sont beaucoup moins abrupts que ceux de la tache focale simulée. La diffusion de la tache est due non-seulement aux défauts de la lentille (état de surface diffusant, erreur de forme de la lentille) mais aussi au diffuseur en transmission utilisé comme écran de projection pour l'image de la tache focale. En effet, sans le diffuseur, la tache focale ne

serait pas un disque mais reproduirait la forme de la lampe avec son filament caractéristique. Par exemple la référence [118] étudie la répartition d'amplitude dans le plan focale d'une lentille de concentration flashée par une lampe Xénon et représente ces résultats par des cartographies d'irradiance non-circulaires.

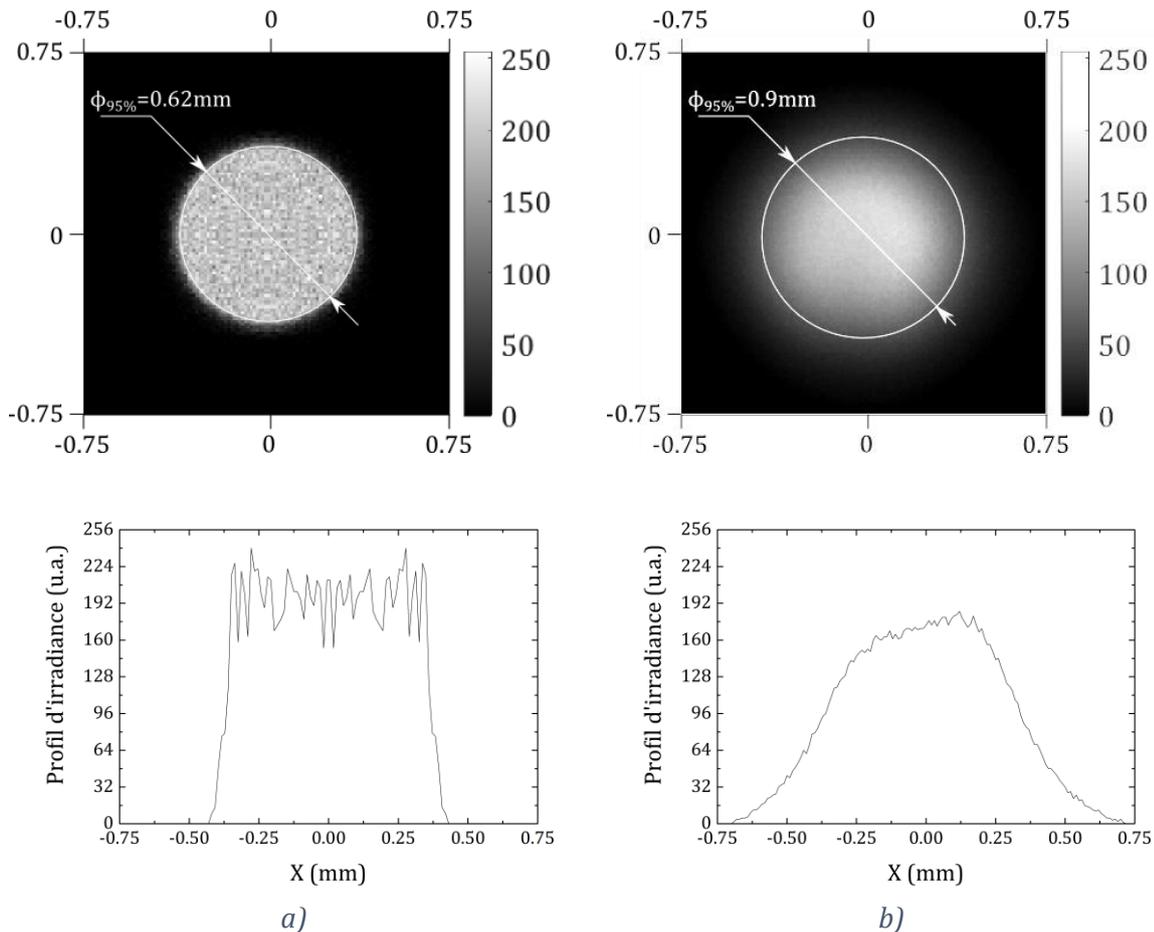


Figure 5.17 : Image du spot de la POE 1000X a) simulé et b) mesuré.

En résumé, l'imagerie de spot avec notre banc d'optique permet de reproduire très fidèlement les résultats de mesure électriques dans le simulateur solaire. En revanche, la source Xénon de $0,4^\circ$ d'ouverture angulaire ne reproduit pas exactement la source solaire de $0,27^\circ$ d'ouverture avec une distribution homogène de la lumière dans le disque solaire. Afin de qualifier avec plus de précision les performances optiques d'une POE avec notre banc d'imagerie, il faut adapter la source lumineuse de notre banc d'imagerie. A l'inverse de la mesure électrique qui doit reproduire le spectre et l'intensité du soleil, la source utilisée pour la caractérisation optique doit reproduire l'uniformité et l'ouverture angulaire du soleil. Une solution simple que l'on a commencé à mettre en œuvre consiste à installer une sphère intégratrice autour du bulbe de la lampe. Cela permet à la fois de réduire l'ouverture angulaire de la source à $0,27^\circ$ et d'uniformiser la luminance de la source. Malheureusement cette solution n'a pas encore été suffisamment étudiée pour être validée. Cependant ce banc de caractérisation permettrait de traiter des sujets encore peu abordés dans la littérature du CPV. En effet, parmi les quatre causes de pertes optiques identifiées dans l'état de l'art et rappelées dans le schéma de la Figure 5.12, l'absorption et les réflexions sont des phénomènes connus et facilement quantifiables. A l'inverse, les causes de la diffusion de la tache focale et son impact sur les performances des

modules ne sont bien connus de la littérature. En ce qui concerne les pertes dues aux non-uniformités de l'éclairage sur la cellule, de nombreuses études permettent de les quantifier pour des cellules de taille centimétrique. Pour les cellules submillimétriques, cet effet est moins connu. Afin de donner un ordre de grandeur des pertes dans notre système, on peut assimiler notre système à celui de Espinet-Gonzales qui a une concentration de 1000X, un PAR=5, une cellule de 1mm^2 pour lequel les pertes de non-uniformité sont de 1,5% [61]. D'après les simulations, le PAR de notre système est de 6,44, le facteur de concentration est de 1000X et la cellule de $0,6 \times 0,6\text{mm}^2$. Bien que le PAR soit un peu surestimé par le modèle de simulation sans diffusion et que notre cellule soit plus petite, on considère, par analogie, que les pertes par non-uniformité de notre système sont autour de 1,5% également.

5.3 Alignement des optiques dans le module réel

Dans la chaîne de pertes d'un module μ -CPV, les pertes optiques sont prédominantes mais ne sont pas seules. D'après l'état de l'art et les simulations décrites au chapitre précédent, le désalignement des éléments du module a une influence non-négligeable sur l'angle d'acceptance du module et, *a fortiori*, sur son rendement. Dans le chapitre précédent, chaque cas de degré de mobilité des éléments du module a été étudié. On a vu que l'angle d'acceptance pouvait passer de $\pm 0,6^\circ$ à $\pm 0,5^\circ$ dans les limites de désalignement que l'on a fixées par le tolérancement mécanique. Plus faible, l'angle d'acceptance mesuré sur le module final est de $\pm 0,45^\circ$. A la différence des angles d'acceptance calculés par simulation, cette valeur mesurée est valable pour un module complet de 4×4 monomodules et non pour un seul monomodule. L'ordre de grandeur correspond au pire cas de désalignement autorisé mais il est plutôt dans la fourchette basse. Dans cette section on souhaite donner une explication à cette chute de l'angle d'acceptance. D'après l'état de l'art, le désalignement mécanique a une influence importante sur l'angle d'acceptance. On cherche donc à quantifier le désalignement des éléments du module réel pour faire l'étude des pertes en angle d'acceptance. Dans un premier temps, on s'intéresse à l'alignement des cellules par rapport aux SOE. Dans un second à l'alignement des POE par rapport au récepteur (*i.e.* couple SOE-cellule).

5.3.1 Désalignement Cellule-SOE

Dans le procédé de moulage qui fait l'objet de cette thèse, l'alignement des SOE avec les cellules est différent de l'alignement des POE avec les cellules. De plus, le mouvement de la SOE par rapport à la cellule génère plus de perte en angle d'acceptance que celui de la POE. Pour rappel, les deux mobilités les plus importantes dans l'alignement SOE-Cellule sont les translations de la cellule dans la direction radiale par rapport à l'axe optique et dans la direction longitudinale. La seconde mobilité n'a pas pu être contrôlée. En revanche le décalage radial des cellules par rapport à leur position idéale a été mesuré par un projecteur de profil Mitutoyo avec une précision de mesure de $\pm 5\mu\text{m}$. De la même manière, le décalage radial des SOE est contrôlé par un microscope Keyence d'une précision équivalente. Ensuite, la comparaison des deux jeux de mesures permet d'obtenir le décalage entre chaque SOE par rapport à sa cellule. Le graphique de la Figure 5.18 représente les erreurs de positionnement pour chaque récepteur. La lettre de chaque étiquette donne le nom de son string ; le numéro de sa position dans le string. Pour résumer le décalage absolu des cellules par rapport à leur SOE, un histogramme permet d'identifier

facilement le maximum et le minimum. On constate que la limite de $80\mu\text{m}$ fixée lors du tolérancement mécanique est bien respectée puisque l'écart radial maximum entre une cellule du PCB et sa SOE est de $50,7\mu\text{m}$. Ce désalignement radial correspond au décalage de $-32\mu\text{m}$ selon x et $-39\mu\text{m}$ selon y du récepteur A2. A titre comparatif, le contrôle de qualité de notre fournisseur de pièces usinées donne un désalignement maximum de la SOE par rapport à la cellule de $52\mu\text{m}$ au maximum.

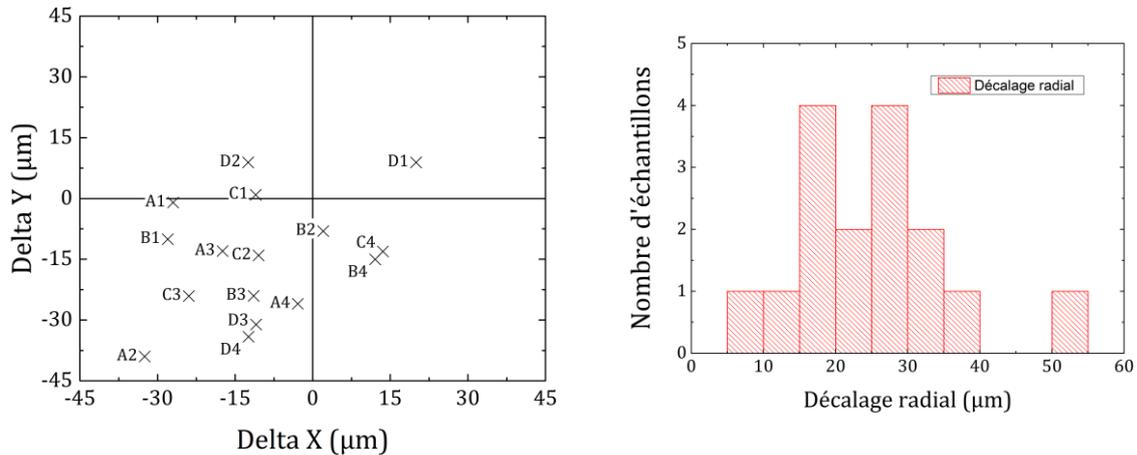


Figure 5.18 : Décalage de chaque cellule du PCB par rapport à sa SOE respective dans le plan (x,z) . A droite on représente les décalages radiaux sur un histogramme.

5.3.2 Désalignement POE-récepteur

Comme la POE n'est pas directement fixée à la cellule dans le module μ -CPV, on peut étudier les performances du module en fonction des mobilités de la POE par rapport au récepteur. Pour cela, on utilise le simulateur solaire module pour mesurer le courant produit par la cellule en fonction de ces déplacements. Pour cette expérience le module 1000X est démonté et chaque étage de lentilles est installé séparément sur un banc de réglage micrométrique. Ce banc de réglage permet de déplacer chaque étage de lentille selon cinq degrés de liberté : trois translations et deux rotations. Pour plus de cohérence avec les simulations par tracé de rayon, on ne s'intéresse qu'à un monomodule et non au module complet. L'effet des mobilités du système sur I_{sc} est donc étudié pour un seul couple de POE-récepteur parmi les seize qui composent module. Au préalable le réglage de l'alignement du système est primordial pour pouvoir faire l'étude expérimentale des tolérances du décalage POE-récepteur dans les mêmes conditions que la simulation par tracé de rayon. Parmi les paramètres à respecter, le rayonnement incident doit être colinéaire à l'axe optique du monomodule ; Le plan de la POE doit être parallèle au plan du récepteur ; le récepteur doit être à la distance focale de la lentille et tous deux doivent être colinéaires à l'axe optique du système. Une fois le monomodule aligné de manière à fournir I_{sc} maximum, par la suite cette valeur d' I_{sc} est la valeur nominale, on procède à l'étude des décalages entre la POE et le récepteur en fonction de I_{sc} mesuré.

Pour cette étude, le dispositif pour lequel on a mesuré l'impact du décalage de la POE par rapport au récepteur est un monomodule dont la cellule n'est pas parfaitement alignée à la SOE dans le récepteur. De plus, ce dispositif test, autre que celui dont on connaît le rendement et le décalage de chaque couple de cellule-SOE, a été fabriqué sans respecter le cahier des charges. Le décalage de la cellule par rapport à la SOE est supérieur à ceux observés dans le module principal. La Figure 5.19a) ci-

dessous montre le décalage mesuré de la cellule par rapport à sa position idéale ; la Figure 5.19b), le décalage mesuré entre la SOE et sa position idéale. Le décalage entre cette cellule et la SOE est de $-57\mu\text{m}$ selon x et de $-41\mu\text{m}$ selon y , ce qui correspond à un décalage radial absolu de $70,2\mu\text{m}$. Contrairement à ce qui est étudié par simulation, l'angle d'acceptance n'est pas mesuré ici pour chaque itération du déplacement de la POE. Seul le courant de court-circuit de la cellule est mesuré pour chaque position de la POE.

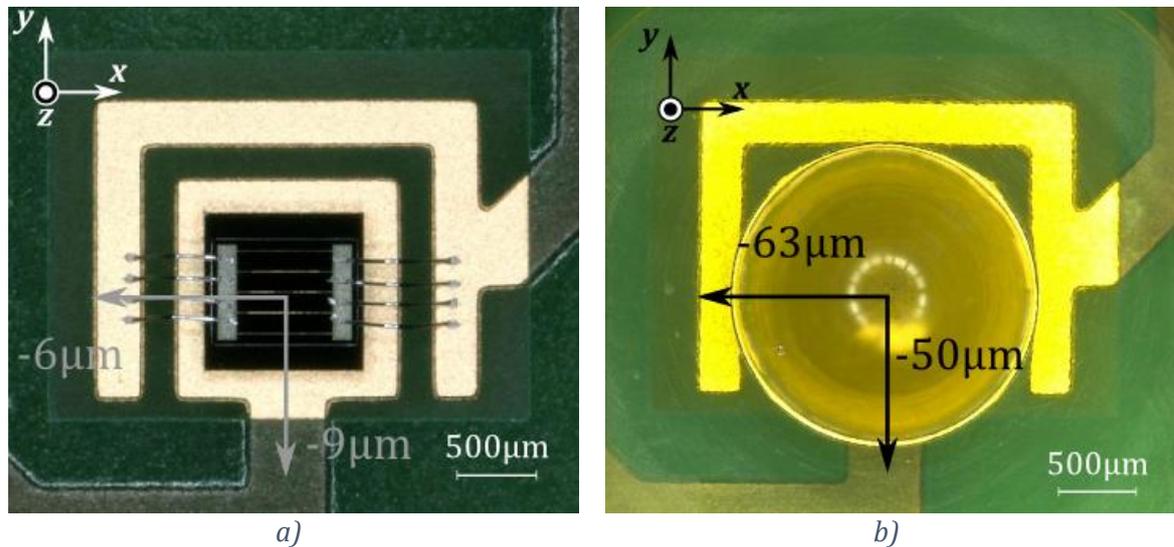


Figure 5.19 : Décalage de a) la cellule et b) la SOE dans le récepteur du monomodule mesuré.

Les courbes d' I_{sc} en fonction de la position de la POE sont tracées et comparées aux courbes théoriques obtenues grâce au logiciel de tracé de rayon. La source simulée a un angle d'ouverture de $0,4^\circ$ et le spectre solaire pour reproduire l'éclairement dans le simulateur solaire. De plus, pour une meilleure comparaison le décalage de la cellule par rapport à la SOE mesurée sur le monomodule réel est appliqué dans le modèle de simulation. Ensuite, la translation de la POE selon les axes x , y et z (l'axe optique) est réalisée indépendamment d'un axe à un autre. Pour chaque position de la POE sur un des axes, on mesure le courant dans le simulateur solaire ; on enregistre la puissance totale reçue à la surface de la cellule. Comme I_{sc} est proportionnel à la puissance lumineuse reçue par la cellule, on compare les deux courbes avec leur valeur normalisée par rapport à la valeur nominale. Sur ces courbes représentées dans la Figure 5.20, les courbes théoriques sont représentées par des lignes, les valeurs expérimentales sont représentées par des points. Plusieurs différences apparaissent entre les simulations et les résultats expérimentaux. Tout d'abord, l'évolution de I_{sc} en fonction du déplacement est plus rapide sur les résultats expérimentaux. Dans les trois cas de déplacement de la POE, les mesures montrent une tolérance plus faible au déplacement que les simulations. Ensuite les tendances des courbes expérimentales sont plus grossières pour le décalage selon x et y . L'asymétrie des courbes simulées n'est pas reproduite exactement par les courbes expérimentales. A l'inverse, la courbe expérimentale qui montre l'effet de la défocalisation présente la même asymétrie, c'est-à-dire que la décroissance de I_{sc} est plus importante pour les z^+ que pour les z^- . Ces différences entre simulation et mesure sont en cohérence avec les images de la tache focale de la POE. Comme celle-ci est plus large et plus diffuse sur le module réel (voir Figure 5.17), lorsque la tache focale se déplace latéralement sur la cellule à cause du déplacement latéral de la POE,

les pertes de flux sont quasiment directes. A l'inverse, la tache focale plus petite permet un léger déplacement latéral à la surface de la cellule avant de générer des pertes de puissance. Le plateau sur les courbes simulées est caractéristique de ce déplacement sans impact sur la puissance totale reçue par la cellule. Comme le modèle de simulation ne prend pas en compte la diffusion à chaque surface optique, la tache focale simulée est plus petite donc le plateau sur l'angle d'acceptance est plus large que dans la réalité.

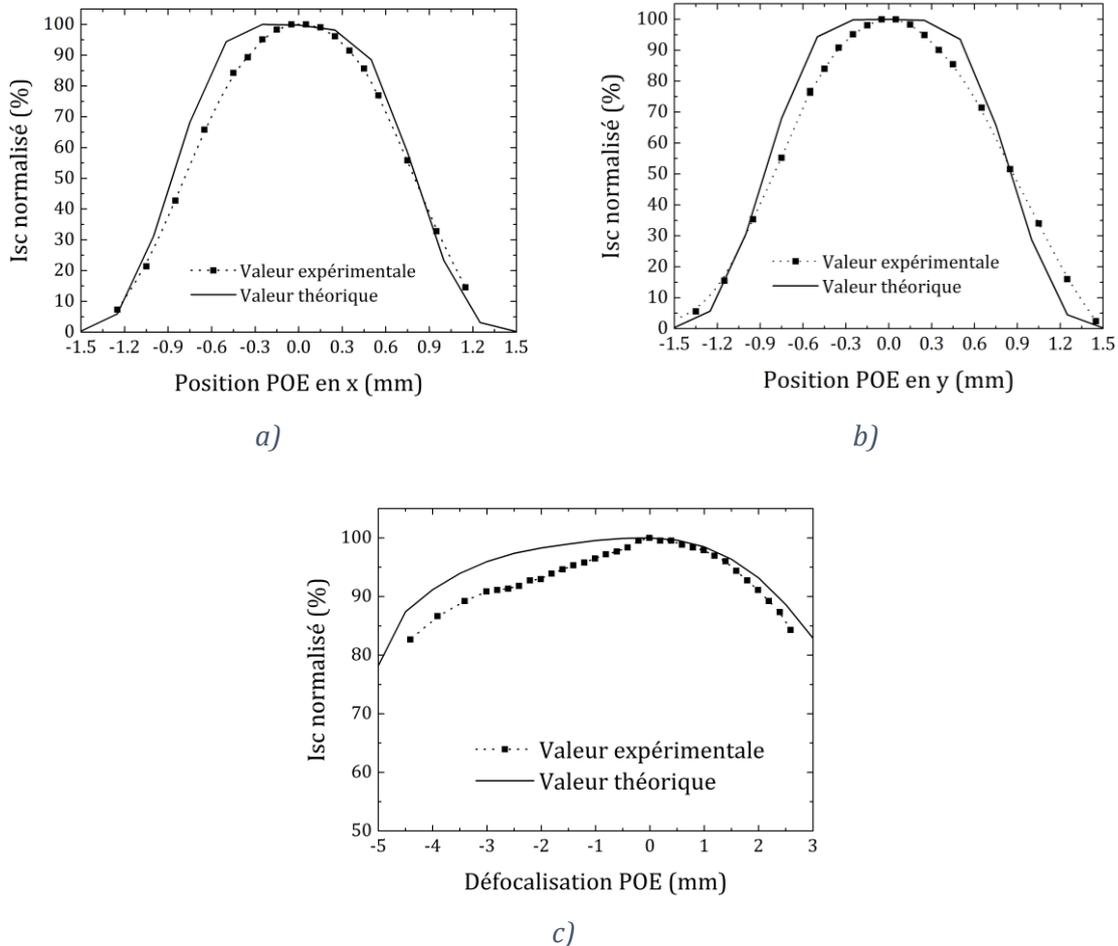


Figure 5.20 : Courbes du courant de court-circuit du monomodule en fonction de a) le décalage en x de la POE, b) le décalage en z la POE c) la défocalisation de la POE

L'incertitude réelle sur la position de la POE par rapport à la cellule mesurée par le fournisseur de pièces usinées est de $\pm 71\mu\text{m}$ au maximum. En comparaison avec l'amplitude des déplacements mesurés ou simulés, cette incertitude est dans la zone négligeable des déplacements de la POE. Cette conclusion est en accord avec l'étude des tolérancements du chapitre 4. Les désalignements des éléments du module réalisé par le procédé en trois étapes respectent bien le cahier des charges.

En revanche, l'étude expérimentale des mobilités montre des différences avec le modèle de simulation. Il convient de développer ce modèle sans hypothèse de non-diffusion de la lumière dans le concentrateur par exemple. Encore peu connue de la littérature spécifique au CPV, les phénomènes de diffusion méritent des études plus précises afin de développer des modèles plus précis mais aussi afin d'estimer son impact dans la chaîne de pertes des micro-concentrateurs.

5.4 Déséquilibre de courant dans le module

Dans la section précédente, on a vu que les déplacements de la POE et de la SOE par rapport à la cellule n'ont pas d'influence sur l' I_{sc} d'un monomodule. Ce constat sur un monomodule nous permet de dire que la chute de courant dans un string de quatre cellules n'est pas due aux erreurs d'alignement. Sur les courbes IV du module Figure 5.10, on remarque que trois Strings ne présentent pas de « marche » de courant. Sur ces trois strings B, C et D, le courant est donc équilibré entre les quatre cellules et cela traduit une bonne uniformité dans la qualité des monomodules qui constituent ces trois strings. Leur rendement moyen est de 30,26% avec un écart-type de 2%. A l'inverse, le string A présente une chute de courant sur sa courbe IV et son rendement est plus faible que les autres : 25,8%. Cela représente une perte de puissance absolue de 16,8% par rapport aux trois autres strings.

Dans ce string, une bulle est observée dans une des SOE. Ce défaut de moulage est très impactant pour l'efficacité optique du concentrateur. Pour estimer la perte liée à la présence de cette bulle dans l'optique secondaire, on la modélise dans le logiciel de tracé de rayon. Pour ce faire, une sphère vide de 600 μm de diamètre est incluse dans la SOE. La Figure 5.21 compare la trajectoire des rayons dans la SOE avec et sans bulle pour le micro-concentrateur 1000X. On constate que les rayons sont déviés à la surface de la bulle. Celle-ci a tendance à les faire diverger. De plus, la bulle ajoute deux dioptries à la trajectoire des rayons donc deux sources de réflexion supplémentaires (voir la section sur les réflexions dans le chapitre d'état de l'art). Au final, la différence de puissance lumineuse reçue par la cellule calculée par simulation est de 22%. La taille et la forme de la bulle n'étant pas connue, ce résultat est différent de celui mesuré sur le système réel. En revanche, l'ordre de grandeur des pertes permet de dire que la présence d'une bulle dans une SOE est très préjudiciable au rendement du module. Une seule bulle dans un string de quatre cellules fait chuter son rendement de 15% à 20%. Il convient donc de modifier les caractéristiques du moule afin d'éviter la formation de bulles lors de l'injection.

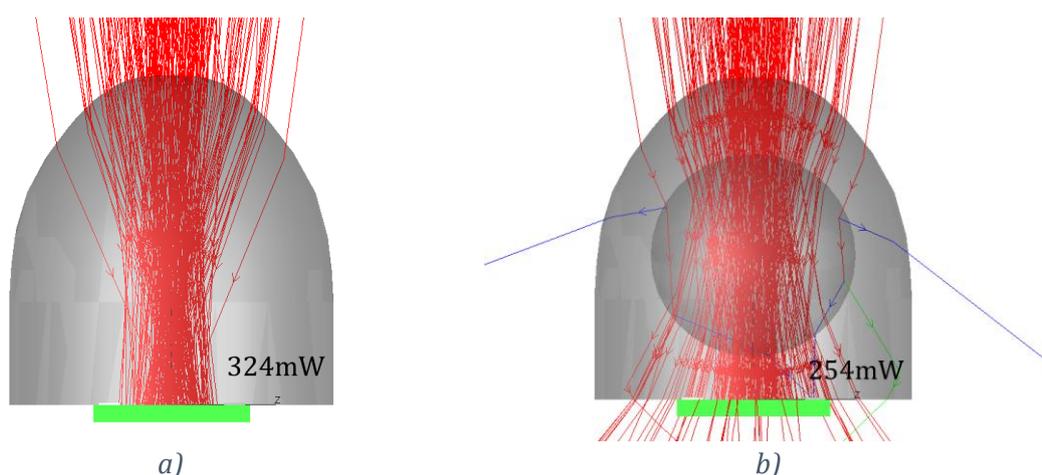


Figure 5.21 : Comparaison de la trajectoire des rayons a) sans bulle et b) avec bulle dans la SOE du micro-concentrateur 1000X.

Lors de l'injection du silicone liquide dans la face arrière du moule qui comporte les empreintes des SOE, il y a plusieurs sources de bulles. Dans notre cas, le silicone est dégazé avant d'être injecté donc, les bulles ne viennent pas du mélange initial. En revanche, le silicone liquide est injecté avec un certain débit et passe brutalement des

canaux d'injection de $0,5\text{mm}^2$ de section aux cavités des SOE de $2,5\text{mm}^2$ de section. Des observations lors du moulage montrent que c'est précisément à cet endroit que se forment les bulles présentes dans les SOE. Malgré les précautions pour évacuer les bulles du moule, la présence de bulles dans les SOE séchées est encore très probable tant que le moule ne sera pas modifié. Une étude spécifique doit donc être menée pour optimiser ce problème lors de l'injection.

5.5 Synthèse et conclusion

Dans ce chapitre, on a passé en revue toutes les techniques de caractérisation du module μ -CPV 1000X. Les mesures de courbes IV ont été développées pour extraire avec le plus de précision possible le rapport cellule-à-module (CTM). Ce rapport représente la somme des pertes qui apparaissent lors de l'intégration des cellules dans le module. Il est donc représentatif de la qualité du procédé de fabrication. Pour le prototype de micro-concentrateur à 1000X le CTM est de 70,2%. Un autre chiffre marquant de la qualité d'un module est son angle d'acceptance. Celui du module réel est de $\pm 0,45^\circ$. Comparé aux simulations, qui donnent $\pm 0,6^\circ$, cet angle d'acceptance est plus faible mais conforme aux pertes attendues à cause de l'alignement des éléments du concentrateur. Finalement, les contraintes d'alignements, qui sont très fortes dans le procédé de fabrication en trois étapes qui fait l'objet de cette thèse, sont maîtrisées sur les seize monomodules qui composent le module complet.

Parmi les pertes qui composent le CTM, les pertes par réflexion et par absorption valent respectivement 10% et 3,5%. Les pertes dues au déséquilibre de courant sont de 3,9%, d'après les mesures électriques. Pour les pertes dues aux non-uniformités, on les estime à 1,5% d'après la bibliographie. Les pertes dues à la diffusion et à l'erreur de forme des lentilles ne sont pas quantifiées par mesure. En revanche, le CTM permet de déduire que leur impact collectif est de 10,9%. Cet impact, très important dans la chaîne de pertes mérite d'être étudié plus en profondeur.

En comparaison avec la chaîne de pertes des micro-modules de l'état de l'art, les pertes par réflexions sont les plus grandes. A cause du nombre important de surfaces optiques sans antireflet. Les pertes par absorption sont inférieures à la valeur médiane entre 0,9% et 7,6%. Les pertes dues au désalignement de notre module sont nulles, en dessous du minimum de l'état de l'art et celles liées au déséquilibre du courant, à cause de l'imperfection d'une des SOE, sont légèrement supérieures à la valeur médiane. Les autres pertes (diffusion, erreur de forme et non-uniformité) n'ont pas d'élément de comparaison. Finalement, le CTM de notre module est inférieur à celui de l'état de l'art (compris entre 71,4% et 86,7%). En revanche, les incertitudes de calcul du CTM des autres modules ne sont pas quantifiées.

En comparant les performances optiques du micro-concentrateur développé dans cette thèse à celles de l'état de l'art, on remarque que les pertes en réflexions sont élevées. Pour les faire diminuer, le nombre de surfaces optiques doit être limité ou un traitement antireflet peut être effectué sur chacune d'entre elles. La première solution nécessite une modification de la conception optique, le second induit des coûts supplémentaires. Les autres pertes prédominantes de notre micro-concentrateur sont la diffusion et la non-uniformité de flux. Avant de proposer des solutions pour diminuer ces pertes, un outil de mesure doit être développé pour les caractériser. Pour cela, le banc d'imagerie dans le simulateur solaire doit être adapté. Ces deux types de pertes étant encore peu connus de la littérature, il serait intéressant de traiter ce problème. En revanche, la qualité de surface de notre moule étant en dessous de

l'état de l'art, les diffusions dues aux rugosités de surfaces de nos lentilles moulées est sans doute plus importante que celles des modules de l'état de l'art.

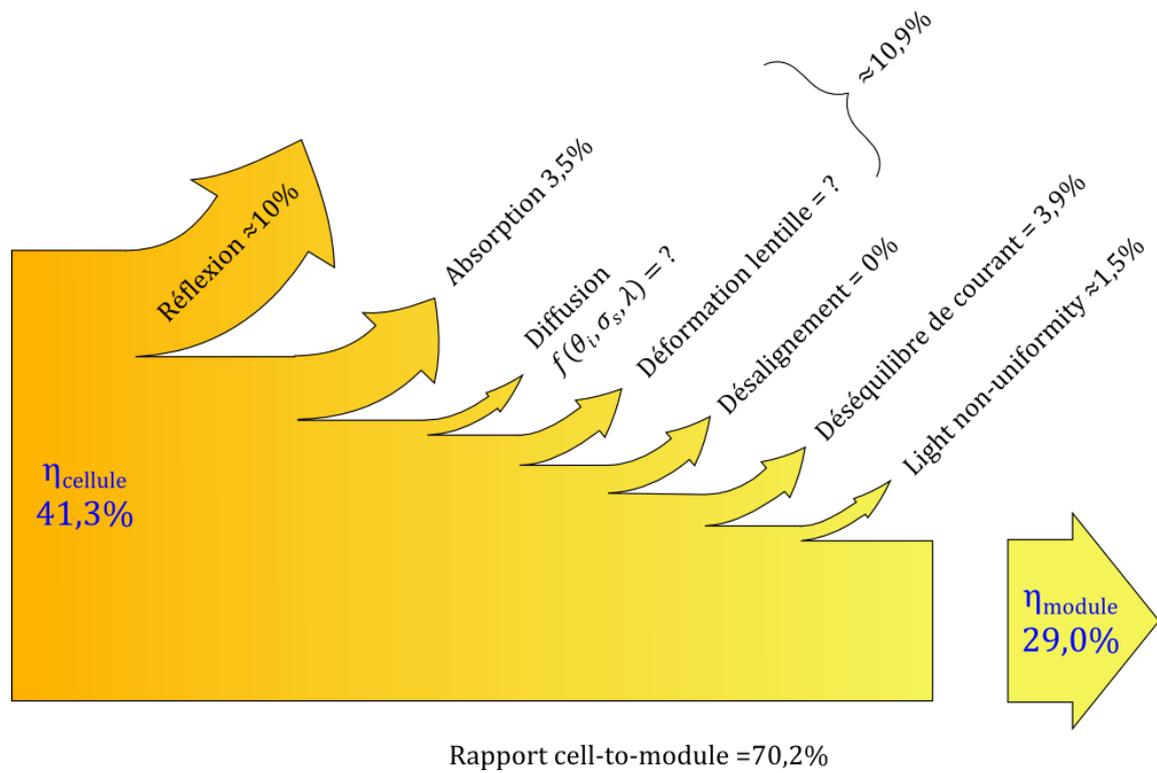


Figure 5.22 : Chaîne de pertes mesurées ou calculées du micro-concentrateur 1000X.

Conclusion

La tendance actuelle de miniaturisation des modules CPV offre une perspective intéressante de réduction des coûts et une amélioration de leur rendement. En ce sens, ma thèse propose un nouveau concept de fabrication de modules micro-concentrateurs. En associant des procédés du domaine de la micro-électronique et de la mécanique de précision, un procédé auto-alignant a été développé et étudié. Cette thèse repose alors sur trois axes d'étude :

- La conception optique de micromodules à haute concentration
- La fabrication de ces modules avec un procédé en trois étapes au lieu de cinq
- La compréhension de la chaîne de pertes des modules μ -CPV

Enfin, la caractérisation avancée des dispositifs réalisés permet de d'améliorer la compréhension de la chaîne de pertes des modules micro-concentrateurs.

Etat de l'art

En premiers lieux, une étude bibliographique a permis d'identifier l'état de l'art de la micro-concentration autour des trois axes de recherches cités ci-dessus. La conception optique est basée sur des lois d'optique géométrique avec comme objectif de concentrer la lumière en maximisant l'efficacité optique et l'angle d'acceptance du module. L'efficacité optique a un impact direct sur le rendement du module et l'angle d'acceptance sur sa production annuelle d'énergie.

Mon travail de recherche bibliographique a également permis d'établir une liste des phénomènes à l'origine de pertes pour l'ensemble des micro-concentrateurs de l'état de l'art. Cette étude m'a permis montrer que la perte de rendement lors de la mise en module est principalement due à des phénomènes optiques. Les pertes par réflexion (entre 2,2% et 10%), par absorption (de 0,9% à 7,6%) et les pertes de déséquilibre de courant (de 1% à 5%) ont une influence directe sur le rendement du module. Ensuite, les erreurs de forme des optiques et le désalignement des éléments du concentrateur créent des pertes d'angle d'acceptance au premier ordre puis sur le rendement au second ordre. De plus, ces deux phénomènes sont exacerbés avec la concentration du module. Plus la concentration est élevée, plus leur effet sur l'angle d'acceptance est important. L'état de l'art a montré un impact sur le rendement compris entre 0% et 4% pour la déformation des optiques et de 0,7% à 3% pour le désalignement mécanique. D'autres phénomènes ont un impact sur le rendement et l'angle d'acceptance mais n'ont pas été quantifiés par l'étude bibliographique. Par exemple, la diffusion à la surface des lentilles à cause de leur rugosité est un phénomène connu en optique mais son impact sur le rendement d'un concentrateur n'est pas encore chiffré. Aussi, de nombreuses publications montrent qu'un éclairage d'intensité non-uniforme à la surface de la cellule induit des pertes non-

négligeables sur les cellules de plus de un cm^2 mais très peu d'étude se sont penchées sur le problème pour les micro-cellules (taille inférieure à 1mm^2). Finalement, l'étude bibliographique sur le domaine de l'état de l'art m'a permis d'identifier les principaux phénomènes responsables de pertes dans les micro-concentrateurs. Cette étude fait l'objet d'un article de review, publié dans Solar Energy [70].

Conception optique

Avant de développer le procédé de fabrication du micro-concentrateur, l'optique de concentration a été conçue. Dans notre cas, le type d'optique retenu pour nos modules à haute concentration ($>300\text{X}$) a été le concentrateur à deux étages de lentilles. Dans ce dispositif, une lentille primaire (POE) concentre la lumière sur une optique secondaire (SOE) qui augmente l'angle d'acceptance du module et uniformise l'éclairement à la surface de la cellule. La POE est une simple lentille convergente asphérique avec la face supérieure plane et la face inférieure convexe. La SOE est un dôme homogénéisateur dont la méthode de conception a été inspirée du *SILLO* (Single Optical surface design) de L.W. James. Le profil des lentilles a été calculé pour $\lambda=589\text{nm}$ puis optimisé pour le spectre solaire avec un logiciel de tracé de rayon. Les simulations par tracé de rayon reproduisent la distribution spectrale et angulaire du rayonnement solaire. A partir de cette méthode de conception, deux micro-concentrateurs ont été conçus. Le premier, avec des cellules de $0,9\times 0,9\text{mm}^2$ et une concentration de 275X , mesurait $41,8\text{mm}$ de distance focale avec une POE de $15\times 15\text{mm}^2$. Le second, dont la caractérisation a été approfondie, possède des cellules de $0,6\times 0,6\text{mm}^2$ avec un facteur de concentration de 1000X pour une distance focale de 57mm et une POE de $19\times 19\text{mm}^2$. Leur angle d'acceptance a été simulé par le logiciel de tracé de rayon pour une valeur respective de $\pm 0,6^\circ$ et $\pm 0,7^\circ$.

Procédé de fabrication des micro-concentrateurs

Les procédés de fabrication des modules CPV et μ -CPV à deux étages de lentille, comme c'est le cas pour micro-concentrateur développé pendant ma thèse, comportent habituellement cinq étapes. La fabrication des POE et des SOE est réalisée séparément, les cellules sont interconnectées et positionnées sur la face arrière du module, les SOE sont posées une à une sur chaque cellule puis le module complet est assemblé. Dans le procédé proposé ici, les POE et les SOE ont été fabriquées simultanément par un moule qui assure également leur alignement sur l'axe optique du concentrateur. Ce principe d'auto-alignement des optiques a l'avantage de réduire de cinq à trois le nombre d'étapes dans le procédé en utilisant un jeu de repères mécaniques. Ce procédé innovant a été valorisé par deux brevets déposés, un avant et un pendant ma thèse, et a été présenté en conférence [32]. On a vu dans l'état de l'art que le mauvais alignement des lentilles engendre une chute de l'angle d'acceptance et, en cas de déplacement très important, une perte de rendement. Les distances entre les différents repères mécaniques, qui assurent l'alignement du système, ont dues respecter une certaine tolérance pour limiter ces pertes. Pour déterminer les valeurs limites d'erreur que chacune des pièces de l'assemblage peut admettre, l'angle d'acceptance a été étudié par les simulations de désalignement selon les neuf degrés de libertés des éléments optiques. Au préalable, l'étude de sensibilité de ces paramètres a montré que quatre mobilités sur neuf sont négligeables ou corrélées à d'autres. Ensuite, l'étude multicritère sur les cinq

restantes a permis de dégager la tolérance du concentrateur aux erreurs de positionnement. Chaque élément du micro-concentrateur 1000X fut contraint de respecter sa position par rapport à l'axe optique à $\pm 80\mu\text{m}$ près afin de garantir un angle d'acceptance supérieur à $0,5^\circ$ et une efficacité optique supérieure à 99%. En accord avec l'état de l'art, le micro-concentrateur avec une concentration plus faible (275X) a montré une plus grande tolérance aux désalignements ($\pm 100\mu\text{m}$). Finalement, les valeurs maximales de déplacements tolérées ont conditionnées la précision de positionnement des cellules et la précision d'usinage du moule et des pièces mécaniques de l'assemblage. Ensuite, l'injection du silicone et l'assemblage du module ont été réalisés au laboratoire avant caractérisation des performances réelles du module.

Caractérisation du micro-concentrateur 1000X

Pour juger de la qualité de l'assemblage du module réel, j'ai mesuré son CTM et son angle d'acceptance. Le CTM représente les pertes de rendement lors de la mise en module, l'angle d'acceptance représente la qualité de l'assemblage et de la forme des optiques. Les mesures de ces deux critères ont été effectuées en simulateurs solaires. Pour calculer le CTM, les caractéristiques IV des cellules avant et après leur mise en module ont été mesurées dans deux simulateurs solaires différents. Le premier, pour la mesure des cellules nues, permet d'adapter l'intensité de l'éclairement pour qu'il corresponde à la concentration du module. Le second, avec une intensité de l'éclairement invariable, dispose d'un miroir collimateur qui induit un angle de divergence de $0,4^\circ$ à la lumière du flash Xénon. Ces deux simulateurs solaires sont multflash avec une lampe Xénon. L'intensité de la lumière à 1X est de $1000\text{W}/\text{m}^2$ mais le spectre brut de la lampe ne correspond pas exactement le spectre solaire AM1.5D. Un filtre adapté a été utilisé pour reproduire les mêmes conditions de photo-génération pour les cellules du micro-concentrateur que pour les isotypes qui mesurent l'éclairement de référence. Dans le simulateur solaire module, les courants photo-générés par les jonctions *Top* et *Middle* dans chaque dispositif (cellules du concentrateur et références) se sont équilibrés pour un éclairement de $361\text{W}/\text{m}^2$ avec une variation de $\pm 0,5\%$ dans le plan de mesure. Comme le micro-concentrateur concentre 1000 fois la lumière, les mesures de courbe IV sur les cellules nues ont été effectuées à une valeur proche de $1000 \times 361\text{W}/\text{m}^2$. Le meilleur compromis entre l'équilibre des courants photo-générés et l'uniformité dans le plan de mesure que j'ai obtenu correspond à un éclairement de $406 \times 1000\text{W}/\text{m}^2$ avec une variation de $\pm 3\%$. Dans ces conditions, le rendement des seize cellules nues avant mise en module à 406X, AM1.5D et 25°C a été mesuré à 41,3%. Le rendement du module complet à $361\text{W}/\text{m}^2$, AM1.5D et 25°C a été mesuré à 29%, ce qui correspond à un CTM de 70,2%. Ce résultat, légèrement inférieur à celui de l'état de l'art, est en partie lié à la présence d'une bulle créée lors de l'injection du silicone dans une SOE d'un des strings. En effet, le rendement de ce string a été mesuré à 25,8% alors que les trois autres sont compris entre 29,6% et 30,9% pour un CTM d'environ 74%.

L'angle d'acceptance du module complet a été mesuré à $\pm 0,45^\circ$, donc légèrement inférieur à celui correspondant au désalignement maximum toléré, simulé à $\pm 0,5^\circ$. Pourtant, la position relative des cellules par rapport à leur SOE a été mesurée avec un écart maximum de 50,7mm donc bien en dessous des $80\mu\text{m}$ qui donnent un angle d'angle d'acceptance de $\pm 0,5^\circ$. De la même manière, l'écart maximum entre une POE

et une Cellule a été mesuré à $70,2\mu\text{m}$, ce qui est également inférieur à la tolérance de $80\mu\text{m}$ fixée. En somme, les déplacements des éléments du concentrateur respectent les tolérances déterminées par simulation et la qualité de l'assemblage est répétable pour chaque monomodule. Cela valide donc la fiabilité du procédé en trois étapes qui a été développé au cours de cette thèse.

En revanche une l'étude expérimentale a montré que le déplacement de la POE du concentrateur réel était plus impactante sur le courant de court-circuit du module que ce qu'on a déterminé par simulation [34]. A la différence des lentilles parfaites du modèle de simulation, la mesure du profil de la POE a montré que sa déformation maximale était supérieure à la limite fixée. De plus, l'état de surface rugueux des lentilles, dont l'effet est négligé dans la simulation, est responsable de diffusions. Dans la chaîne de pertes du module, tous les phénomènes ont été quantifiés mis à part l'effet de l'erreur de forme et de la rugosité. L'analyse de cette chaîne de pertes a même montré que ces deux effets cumulés ont un effet prédominant sur le rendement du module. En conclusion, les hypothèses de non-diffusion et de forme parfaite des lentilles dans les modèles de simulation sont en partie responsables de l'écart constaté entre expérimentations et mesures.

Perspectives

A travers le développement et l'analyse d'un micro-concentrateur, les problématiques abordées au cours de cette thèse sont la maximisation du rendement et la réduction des coûts de fabrication. Le procédé développé pendant la thèse s'est révélé être une solution intéressante pour réduire les coûts sans altérer la qualité de la mise en module. Cette solution pourrait être industrialisée mais quelques axes d'amélioration ont été identifiés, notamment en ce qui concerne les pertes de rendement. Le développement de ces axes d'améliorations peut être bénéfique pour le rendement de notre module mais peut également améliorer la connaissance de la chaîne de pertes dans le domaine du CPV.

Afin de limiter au maximum les pertes de rendement, les choix de conception optique pourront limiter les pertes par réflexion et absorption sans ajouter de traitement antireflet, plus coûteux, à chaque surface. Des solutions alternatives aux deux étages de lentilles permettront à la fois de réduire le nombre de surface susceptible de générer des réflexions de Fresnel, de réduire l'épaisseur des modules pour diminuer l'effet de l'absorption et d'augmenter l'angle d'acceptance. Ces solutions pourront également être réalisées par moulage avec le procédé de fabrication en trois étapes.

D'autre part, l'analyse de la chaîne de pertes du micro-concentrateur 1000X réalisé a montré que la diffusion et la déformation des lentilles était une cause importante de baisse du rendement. D'après nos mesures, ces deux effets étaient responsables d'un tiers des pertes totales du concentrateur 1000X. Dans l'état de l'art, des modèles théoriques validés par l'expérience ont permis d'estimer les pertes d'angle d'acceptance en fonction de l'erreur de forme de la surface d'une lentille de concentration. Il serait très intéressant d'implémenter un de ces modèles pour quantifier l'effet de la déformation sur le micro-concentrateur 1000X.

En revanche, l'effet de la diffusion sur les performances d'un concentrateur n'est pas quantifié dans la littérature CPV. Pourtant, des outils de mesure et de modélisation ont permis de quantifier l'amplitude de la diffusion en tant que telle. Une étude des différents paramètres d'une optique de concentration (Diamètre du spot, PAR, efficacité optique) corrélée à ces mesures de diffusion apportera une

meilleure compréhension de la chaîne de pertes des concentrateurs CPV. Pour cela le développement du banc de caractérisation optique est nécessaire. La divergence du faisceau collimaté doit être de $0,27^\circ$ au lieu de $0,4^\circ$ et une solution alternative au diffuseur, qui sert d'écran de projection de la tache focale, devra être trouvée. Une des solutions identifiées en cours de déploiement sur le banc, est l'utilisation d'une sphère intégratrice pour obtenir la bonne divergence et uniformiser l'éclairement de la lampe xénon. Pour l'imagerie de micro-spot, la caméra pourra être placée directement dans le plan focal de la POE, sans grossissement. A partir de la caractérisation de la diffusion de surface de la POE analysée, cette étude permettrait non-seulement de comprendre un peu mieux l'effet de la diffusion mais aussi d'affiner les modèles par tracé de rayon. Très largement utilisés en conception d'optique de concentration, ces modèles permettraient d'ajuster au mieux l'optimisation des optiques ainsi que l'étude des tolérances mécaniques.

En conclusion, le développement du banc d'imagerie de la tache focale permettrait d'étudier l'effet de la diffusion et des inhomogénéités de l'éclairement à la surface de la cellule ; la compréhension de ces deux phénomènes dans la chaîne de pertes des modules μ -CPV n'étant pas encore acquise à ce jour sur le plan international.

Références

- [1] Jancovici J-M. A quand la rupture énergétique ? 2017.
- [2] IEA. Key World Energy Statistics 2017. International Energy Agency; 2017.
- [3] World BG, Solargis. Global Solar Atlas 2016. <http://globalsolaratlas.info/> (accessed May 23, 2018).
- [4] Académie des sciences. Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences. Paris: Gauthier-Villars; 1839.
- [5] Chapin DM, Fuller CS, Pearson GL. A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power. *J Appl Phys* 1954;25:676–7. doi:10.1063/1.1721711.
- [6] Sputnik crisis. Wikipedia 2018.
- [7] Philipps S, Warmuth W. Photovoltaics Report 2018.
- [8] Robinson C. 3rd Atlas/NIST Workshop on Photovoltaic Materials Durability. NIST 2015. <https://www.nist.gov/news-events/events/2015/12/3rd-atlasnist-workshop-photovoltaic-materials-durability> (accessed June 24, 2018).
- [9] Bloomberg F. New Energy Outlook 2017 | Bloomberg New Energy Finance | Bloomberg Finance LP. Bloom New Energy Finance 2017. <https://about.bnef.com/new-energy-outlook/> (accessed May 7, 2018).
- [10] Trube J. International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV). VDMA photovoltaic equipment; 2018.
- [11] NREL. Best Research-Cell Efficiencies 2018. <https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png> (accessed May 23, 2018).
- [12] Fonash S. Solar Cell Device Physics. 2nd ed. Elsevier; 2010.
- [13] IEC 62108: Concentrator photovoltaic (CPV) modules and assemblies – Design qualification and type approval, n.d.
- [14] Yastrebova N. High-efficiency multi-junction solar cells: Current status and future potential - Semantic Scholar 2007.
- [15] Philipps S, Bett A. Current status of CPV technology 2017. <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/current-status-of-concentrator-photovoltaic-cpv-technology-in-englischer-sprache.pdf> (accessed April 4, 2016).
- [16] Haney M, Gerbi J, Schiff E. ARPA-E | MOSAIC program : Micro-scale Optimized Solar-cell Arrays with Integrated Concentration 2015. <https://arpa-e.energy.gov/?q=arpa-e-programs/mosaic> (accessed November 29, 2017).
- [17] Trendforce Corp. Price Quotes_EnergyTrend PV 2018. <https://pv.energytrend.com/pricequotes.html> (accessed June 4, 2018).
- [18] Kost C, Mayer JN, Thomsen J, Hartmann N, Senkpiel C, Philipps SP, et al. Levelized Cost of Electricity: PV and CPV in Comparison to Other Technologies 2013:5.
- [19] Algora C, Rey-Stolle I, Galiana B, González JR, Baudrit M, García I. III-V concentrator solar cells as LEDs. *III-Vs Rev* 2005;18:40–2. doi:10.1016/S0961-1290(05)71233-3.

- [20] Nielson GN, Okandan M, Cruz-Campa JL, Lentine AL, Sweatt WC, Gupta VP, et al. Leveraging scale effects to create next-generation photovoltaic systems through micro- and nanotechnologies. *vol. 8373*, 2012, p. 837317-837317-10. doi:10.1117/12.919464.
- [21] Mulligan WP, Terao A, Daroczi SG, Pujol OC, Cudzinovic MJ, Verlinden PJ, et al. A flat-plate concentrator: micro-concentrator design overview, 2000, p. 1495-7. doi:10.1109/PVSC.2000.916177.
- [22] Jared BH, Saavedra MP, Anderson BJ, Goeke RS, Sweatt WC, Nielson GN, et al. Micro-concentrators for a microsystems-enabled photovoltaic system. *Opt Express* 2014;22:A521-7. doi:10.1364/OE.22.00A521.
- [23] Domínguez C, Jost N, Askins S, Victoria M, Antón I. A review of the promises and challenges of micro-concentrator photovoltaics. *AIP Conf Proc* 2017;1881:080003. doi:10.1063/1.5001441.
- [24] Itou A, Asano T, Inoue D, Arase H, Matsushita A, Hayashi N, et al. High-efficiency thin and compact concentrator photovoltaics using micro-solar cells with via-holes sandwiched between thin lens-array and circuit board. *Jpn J Appl Phys* 2014;53:04ER01. doi:10.7567/JJAP.53.04ER01.
- [25] La jeune pousse Insolight multiplie par deux le rendement des panneaux solaires. *Echo Sol* 2016. <http://www.lechodusolaire.fr/jeune-pousse-insolight-multiplie-deux-rendement-panneaux-solaires/> (accessed September 13, 2016).
- [26] Chinello E, Modestino MA, Coulot L, Ackermann M, Gerlich F, Psaltis D, et al. A 25.1% Efficient Stand-Alone Solar Chloralkali Generator Employing a Microtracking Solar Concentrator. *Glob Chall* 2017;1:n/a-n/a. doi:10.1002/gch2.201700095.
- [27] Ghosal K, Fisher B, Lilly D, Gabriel J, Seel S, Burroughs S. Ultrahigh Efficiency HCPV Modules and Systems. *IEEE J Photovolt* 2016;6:1360-5. doi:10.1109/JPHOTOV.2016.2590884.
- [28] Furman B, Menard E, Gray A, Meitl M, Bonafede S, Kneeburg D, et al. A high concentration photovoltaic module utilizing micro-transfer printing and surface mount technology, 2010, p. 000475-80. doi:10.1109/PVSC.2010.5616766.
- [29] Price JS, Sheng X, Meulblok BM, Rogers JA, Giebink NC. Wide-angle planar microtracking for quasi-static microcell concentrating photovoltaics. *Nat Commun* 2015;6:6223. doi:10.1038/ncomms7223.
- [30] Gupta PK. Efficiency of fresnel lenses. *Appl Energy* 1981;9:173-83. doi:10.1016/0306-2619(81)90029-5.
- [31] Hayashi N, Inoue D, Matsumoto M, Matsushita A, Higuchi H, Aya Y, et al. High-efficiency thin and compact concentrator photovoltaics with micro-solar cells directly attached to a lens array. *Opt Express* 2015;23:A594. doi:10.1364/OE.23.00A594.
- [32] Ritou A, Voarino P, Bernardis S, Hilt T, Aitmani A, Dominguez C, et al. Micro-concentrator with a self-assembly process. *CPV-12 Proc.*, vol. 1766, AIP Publishing; 2016, p. 080005. doi:10.1063/1.4962103.
- [33] Price JS, Grede AJ, Wang B, Lipski MV, Fisher B, Lee K-T, et al. High-concentration planar microtracking photovoltaic system exceeding 30% efficiency. *Nat Energy* 2017;2:17113. doi:10.1038/nenergy.2017.113.
- [34] Ritou A, Voarino P, Goubault B, David N, Bernardis S, Raccurt O, et al. Mechanical tolerances study through simulations and experimental

- characterization for a 1000X micro-concentrator CPV module. AIP Conf Proc 2017;1881:030007. doi:10.1063/1.5001418.
- [35] Sheng X, Bower CA, Bonafede S, Wilson JW, Fisher B, Meitl M, et al. Printing-based assembly of quadruple-junction four-terminal microscale solar cells and their use in high-efficiency modules. *Nat Mater* 2014;13:593–8. doi:10.1038/nmat3946.
- [36] IEC 62670-3. IEC 62670-3:2017 | IEC Webstore | energy efficiency, rural electrification, solar power, solar panel, photovoltaic, PV, smart city, LVDC. Int. Electrotech. Comm., 2017.
- [37] Victoria Pérez M. New concepts and techniques for the development of high-efficiency concentrating photovoltaic modules. *Telecomunicacion*, 2014.
- [38] Xie WT, Dai YJ, Wang RZ, Sumathy K. Concentrated solar energy applications using Fresnel lenses: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2011;15:2588–606. doi:10.1016/j.rser.2011.03.031.
- [39] Born M, Wolf E. Ch1 : Basic properties of the electromagnetic field. *Princ. Opt. Electromagn. Theory Propag. Interf. Diffr. Light*, 2000, p. 70.
- [40] Rubin M. Optical properties of soda lime silica glasses. *Sol Energy Mater* 1985;12:275–88. doi:10.1016/0165-1633(85)90052-8.
- [41] McIntosh KC, Abbott M, Sudbury B. PV lighthouse material database. PV Lighthouse 2011. www.pvlighthouse.com.au (accessed April 9, 2018).
- [42] McIntosh KR, Cotsell J, Norris AW, Powell NE, Ketola BM, Corporation DC. An Optical Comparison of Silicone and Eva Encapsulants for Conventional Silicon Pv Modules: A Ray-Tracing Study 2009.
- [43] Harvey JE, Schröder S, Choi N, Duparré A. Total integrated scatter from surface with arbitrary roughness, correlation widths, and incident angles. *Opt Eng* 2012.
- [44] Bennett JM. Measurement of the rms roughness, autocovariance function and other statistical properties of optical surfaces using a FECO scanning interferometer. *Appl Opt* 1976;15:2705–21. doi:10.1364/AO.15.002705.
- [45] Fest E. Scattering from Optical Surface Roughness and Coatings. *Stray Light Anal. Control*, 2013, p. 61–77.
- [46] Davies H. The reflection of electromagnetic waves from a rough surface. *Proc IEE - Part IV Inst Monogr* 1954;101:209–14. doi:10.1049/pi-4.1954.0025.
- [47] Harvey J, Krywonos A, Vernold CL. Modified Beckmann-Kirchhoff scattering model for rough surfaces with large incident and scattering angles. *Opt Eng* 2007;46:078002. doi:10.1117/1.2752180.
- [48] Victoria Pérez M, Askins S, Herrero R, Dominguez C. Measuring primary lens efficiency: A proposal for standardization, Friebourg: AIP Publishing; 2016. doi:10.1063/1.4962123.
- [49] Fang FZ, Zhang XD, Weckenmann A, Zhang GX, Evans C. Manufacturing and measurement of freeform optics. *CIRP Ann* 2013;62:823–46. doi:10.1016/j.cirp.2013.05.003.
- [50] Winston R, Minano JC, Benitez PG, Bortz W contributions by NS and JC. Ch14 : Manufacturing tolerances. *Nonimaging Opt.*, Academic Press; 2005, p. 395–413.
- [51] Shanks K, Ferrer-Rodriguez JP, Fernández EF, Almonacid F, Pérez-Higueras P, Senthilarasu S, et al. A >3000 suns high concentrator photovoltaic design based on multiple Fresnel lens primaries focusing to one central solar cell. *Sol Energy* 2018;169:457–67. doi:10.1016/j.solener.2018.05.016.

- [52] Herrero R, Askins S, Antón I, Sala G. Evaluation of misalignments within a concentrator photovoltaic module by the module optical analyzer: A case of study concerning temperature effects on the module performance. *Jpn J Appl Phys* 2015;54:08KE08. doi:10.7567/JJAP.54.08KE08.
- [53] González-Correa D, Osorio-Gómez G, Mejía-Gutiérrez R. Concept of a methodical process for the design of concentrating photovoltaic systems according to the context of use. vol. 9937, *International Society for Optics and Photonics*; 2015, p. 993700. doi:10.1117/12.2237209.
- [54] Drew K, Morris N, Sinclair M, Myrskog S, Morgan JP. Sensitivity analysis applied to a concentrator photovoltaic system, 2014, p. 2917–20. doi:10.1109/PVSC.2014.6925542.
- [55] Herrero R, Antón I, Victoria M, Domínguez C, Askins S, Sala G, et al. Experimental analysis and simulation of a production line for CPV modules: impact of defects, misalignments, and binning of receivers. *Energy Sci Eng* 2017;5:257–69. doi:10.1002/ese3.178.
- [56] Menard E, Sullivan M, Wilson J, Fisher B, Seel S, Meitl M, et al. Optics development for micro-cell based CPV modules. vol. 8108, *International Society for Optics and Photonics*; 2011, p. 810805. doi:10.1117/12.893385.
- [57] Si FT, Isabella O, Zeman M. Too Many Junctions? A Case Study of Multijunction Thin-Film Silicon Solar Cells. *Adv Sustain Syst* 2017;1:1700077. doi:10.1002/adsu.201700077.
- [58] Nishioka K, Takamoto T, Nakajima W, Agui T, Kaneiwa M, Uraoka Y, et al. Analysis of triple-junction solar cell under concentration by SPICE. vol. 1, 2003, p. 869-872 Vol.1.
- [59] Baig H, Heasman KC, Mallick TK. Non-uniform illumination in concentrating solar cells. *Renew Sustain Energy Rev* 2012;16:5890–909. doi:10.1016/j.rser.2012.06.020.
- [60] Photovoltaic Devices – SUNLAB Solar Research Lab 2018. <http://sunlab.eecs.uottawa.ca/photovoltaic-devices/> (accessed May 15, 2018).
- [61] Espinet González P. Advances in the modeling, characterization and reliability of concentrator multijunction solar cells. phd. E.T.S.I. Telecomunicación (UPM), 2012.
- [62] Fidaner O, Suarez FA, Wiemer M, Sabnis VA, Asano T, Ito A, et al. High efficiency micro solar cells integrated with lens array. *Appl Phys Lett* 2014;104:103902. doi:10.1063/1.4868116.
- [63] Espinet-González P, Rey-Stolle I, Algora C, García I. Analysis of the behavior of multijunction solar cells under high irradiance Gaussian light profiles showing chromatic aberration with emphasis on tunnel junction performance. *Prog Photovolt Res Appl* 2015;23:743–53. doi:10.1002/pip.2491.
- [64] Franklin E, Coventry J. Effects of highly non-uniform illumination distribution on electrical performance of solar cells, The Australian National University; 2002.
- [65] Herrero R, Victoria M, Domínguez C, Askins S, Antón I, Sala G. Concentration photovoltaic optical system irradiance distribution measurements and its effect on multi-junction solar cells. *Prog Photovolt Res Appl* 2012;20:423–30. doi:10.1002/pip.1145.
- [66] Hayashi N, Matsushita A, Inoue D, Matsumoto M, Nagata T, Higuchi H, et al. Nonuniformity Sunlight-Irradiation Effect on Photovoltaic Performance of

- Concentrating Photovoltaic Using Microsolar Cells Without Secondary Optics. *IEEE J Photovolt* 2016;6:350–7. doi:10.1109/JPHOTOV.2015.2491598.
- [67] Kaushika ND, Rai AK. An investigation of mismatch losses in solar photovoltaic cell networks. *Energy* 2007;32:755–9. doi:10.1016/j.energy.2006.06.017.
- [68] Mabillet L. Vers la compréhension des mécanismes de dégradation et de vieillissement des assemblages photovoltaïques pour des applications sous haute concentration. Paris 11, 2014.
- [69] Steiner M, Siefer G, Bett AW. An investigation of solar cell interconnection schemes within CPV modules using a validated temperature-dependent SPICE network model. *Prog Photovolt Res Appl* 2012;22:505–14. doi:10.1002/pip.2284.
- [70] Ritou A, Voarino P, Raccurt O. Does micro-scaling of CPV modules improve efficiency? A cell-to-module performance analysis. *Sol Energy* 2018;173:789–803. doi:10.1016/j.solener.2018.07.074.
- [71] Saleh BEA, Teich MC. *Fundamentals of photonics*. 2nd ed. Wiley-Interscience; n.d.
- [72] Winston R, Minano JC, Benitez PG, Bortz W contributions by NS and JC. *Nonimaging Optics*. Academic Press; 2005.
- [73] Benitez P, Minano JC, Blen J, Mohedano R, Chaves J, Dross O, et al. Simultaneous multiple surface optical design method in three dimensions. *Opt Eng* 2004;43:1489–502. doi:10.1117/1.1752918.
- [74] Ullah I, Lv H, Whang AJ-W, Su Y. Analysis of a novel design of uniformly illumination for Fresnel lens-based optical fiber daylighting system. *Energy Build* 2017;154:19–29. doi:10.1016/j.enbuild.2017.08.066.
- [75] Miñano JC, Benítez P, González JC. RX: a nonimaging concentrator. *Appl Opt* 1995;34:2226–35. doi:10.1364/AO.34.002226.
- [76] Renzi M, Cioccolanti L, Barazza G, Egidi L, Comodi G. Design and experimental test of refractive secondary optics on the electrical performance of a 3-junction cell used in CPV systems. *Appl Energy* 2017;185:233–43. doi:10.1016/j.apenergy.2016.10.064.
- [77] Arroyo RM, Minano JC, Benitez P, Alvarez JL, Hernandez M, Gonzalez J-C, et al. Ultracompact nonimaging devices for optical wireless communications. *Opt Eng* 2000;39:2740–8. doi:10.1117/1.1308173.
- [78] Algora C, Ignacio R-S. *Handbook of concentrator photovoltaic technology*. vol. 1. Wiley. n.d.
- [79] Ries H, Rabl A. Edge-ray principle of nonimaging optics. *J Opt Soc Am A* 1994;11:2627. doi:10.1364/JOSAA.11.002627.
- [80] Mohedano R, Leutz R. Ch4 : CPV Optics. *Handb. Conc. Photovolt. Technol.*, vol. 1. Wiley, 2016, p. 187–238.
- [81] James LW. Use of imaging refractive secondaries in photovoltaic concentrators. *NASA STIRecon Tech Rep N* 1989;89.
- [82] Askins S, Victoria Pérez M, Herrero R. Hybrid Dome with Total Internal Reflector as a Secondary Optical Element for CPV, 2016.
- [83] NREL: SMARTS - SMARTS Files n.d. https://www.nrel.gov/rredc/smarts/smarts_files.html#smarts292 (accessed July 13, 2018).
- [84] Kumar RV, Buckett J. *Float Glass*☆. *Ref. Module Mater. Sci. Mater. Eng.*, Elsevier; 2017. doi:10.1016/B978-0-12-803581-8.01850-6.

- [85] Klein LC, editor. Sol-Gel Optics: Processing and Applications. Springer US; 1994.
- [86] Schaub M, Schwiegerling J, Fest E, Shepard RH, Symmons A. Molded Optics: Design and Manufacture. CRC Press; 2016.
- [87] Hopmann C, Röbig M. High Precision Optics for LED Applications Made of Liquid Silicone Rubber (LSR) 2017;33:12.
- [88] Bäumer S, Pfeffer M, Bauer T. Handbook of Plastic Optics, 2nd Edition. WileyCom n.d. <https://www.wiley.com/en-us/Handbook+of+Plastic+Optics%2C+2nd+Edition-p-9783527635450> (accessed April 6, 2018).
- [89] Chen J, Gu C, Lin H, Chen S-C. Soft mold-based hot embossing process for precision imprinting of optical components on non-planar surfaces. Opt Express 2015;23:20977–85. doi:10.1364/OE.23.020977.
- [90] Bennett JM, Decker DL. Surface Characterization Of Diamond-Turned Metal Optics. In: Liebenberg DH, editor., 1981, p. 534–44. doi:10.1117/12.932095.
- [91] Weick C. Vers un module photovoltaïque à concentration ultra-intégré : développement du concept et des moyens de caractérisation associés. Université Grenoble Alpes, 2017.
- [92] Ng SH, Tjeung R, Wang ZF. Hot embossing on polymethyl methacrylate. Proc. Electron. Packag. Technol. Conf. EPTC, 2007, p. 615–21. doi:10.1109/EPTC.2006.342784.
- [93] Kumar V, Shrivastava RL, Untawale SP. Fresnel lens: A promising alternative of reflectors in concentrated solar power. Renew Sustain Energy Rev 2015;44:376–90. doi:10.1016/j.rser.2014.12.006.
- [94] Borrelli NF. Microoptics Technology : Fabrication and Applications of Lens Arrays and Devices. CRC Press; 2004. doi:10.1201/9781420030907.
- [95] Chang C-Y, Yang S-Y, Huang L-S, Hsieh K-H. Fabrication of polymer microlens arrays using capillary forming with a soft mold of micro-holes array and UV-curable polymer. Opt Express 2006;14:6253–8. doi:10.1364/OE.14.006253.
- [96] Moore S, Gomez J, Lek D, You BH, Kim N, Song I-H. Experimental study of polymer microlens fabrication using partial-filling hot embossing technique. Microelectron Eng 2016;162:57–62. doi:10.1016/j.mee.2016.05.009.
- [97] Pan CT, Wu TT, Chen MF, Chang YC, Lee CJ, Huang JC. Hot embossing of microlens array on bulk metallic glass. Sens Actuators Phys 2008;141:422–31. doi:10.1016/j.sna.2007.10.040.
- [98] Luo Y, Wang L, Ding Y, Wei H, Hao X, Wang D, et al. Direct fabrication of microlens arrays with high numerical aperture by ink-jetting on nanotextured surface. Appl Surf Sci 2013;279:36–40. doi:10.1016/j.apsusc.2013.03.148.
- [99] Kim JY, Brauer NB, Fakhfour V, Boiko DL, Charbon E, Grutzner G, et al. Hybrid polymer microlens arrays with high numerical apertures fabricated using simple ink-jet printing technique. Opt Mater Express 2011;1:259–69. doi:10.1364/OME.1.000259.
- [100] Zhu X, Zhu L, Chen H, Li Z, Zhang W. Fabrication of high numerical aperture micro-lens array based on drop-on-demand generating of water-based molds. Opt Laser Technol 2015;68:23–7. doi:10.1016/j.optlastec.2014.11.003.
- [101] Yu W, Yuan X-C. UV induced controllable volume growth in hybrid sol-gel glass for fabrication of a refractive microlens by use of a grayscale mask. Opt Express 2003;11:2253–8. doi:10.1364/OE.11.002253.

- [102] Yang H, Chao C-K, Wei M-K, Lin C-P. High fill-factor microlens array mold insert fabrication using a thermal reflow process. *J Micromechanics Microengineering* 2004;14:1197. doi:10.1088/0960-1317/14/8/012.
- [103] Zhu Z, To S, Zhu W-L, Huang P. Feasibility study of the novel quasi-elliptical tool servo for vibration suppression in the turning of micro-lens arrays. *Int J Mach Tools Manuf* 2017;122:98–105. doi:10.1016/j.ijmachtools.2017.06.004.
- [104] Lee B-K, Kim DS, Kwon TH. Replication of microlens arrays by injection molding. *Microsyst Technol* 2004;10:531–5. doi:10.1007/s00542-004-0387-2.
- [105] Chakrabarti M, Dam-Hansen C, Stubager J, Pedersen TF, Pedersen HC. Replication of optical microlens array using photoresist coated molds. *Opt Express* 2016;24:9528–40. doi:10.1364/OE.24.009528.
- [106] Ahgaki M. Micro lens molding piece, micro lens molding piece producing method, micro lens stamper, micro lens stamper producing method, micro lens mold member, plastic lens array sheet and projector. US6898014B2, 2005.
- [107] Dominguez C. Procédé de Fabrication d'un concentrateur Photovoltaïque à Structure optique munie d'un double étage de lentilles optiques. 3029038, 2016.
- [108] Janssen H, Sonneveld P, L. A.M . Swinkels G, van B. A. J T, de H. F Z. The Effect of Shadow Lines on a Low Concentrating Photovoltaic System. *AIP Conf Proc* 2011;1407. doi:10.1063/1.3658315.
- [109] Domínguez C, Antón I, Sala G, Askins S. Current-matching estimation for multijunction cells within a CPV module by means of component cells. *Prog Photovolt Res Appl* 2013;21:1478–88. doi:10.1002/pip.2227.
- [110] King R, Law D, Edmondson K, Fetzer C, Sherif R, Kinsey G, et al. Metamorphic and Lattice-Matched Solar Cells Under Concentration. 2006 IEEE 4th World Conf. Photovolt. Energy Conf., Waikoloa, HI: IEEE; 2006, p. 760–3. doi:10.1109/WCPEC.2006.279567.
- [111] Meusel M, Adelhelm R, Dimroth F, Bett AW, Warta W. Spectral mismatch correction and spectrometric characterization of monolithic III–V multi-junction solar cells. *Prog Photovolt Res Appl* 2002;10:243–55. doi:10.1002/pip.407.
- [112] Osterwald CR, Wanlass MW, Moriarty T, Steiner MA, Emery KA. Concentrator cell efficiency measurement errors caused by unfiltered xenon flash solar simulators. *AIP Conf Proc* 2014;1616:149–53. doi:10.1063/1.4897049.
- [113] IEC TS 62989. IEC TS 62989:2018 | IEC Webstore | Primary optics for concentrator photovoltaic systems. *Int. Electrotech. Comm.*, 2018.
- [114] Victoria M, Askins S, Herrero R, Antón I, Sala G. Assessment of the optical efficiency of a primary lens to be used in a CPV system. *Sol Energy* 2016;134:406–15. doi:10.1016/j.solener.2016.05.016.
- [115] Besson P. Compréhension des comportements électrique et optique des modules photovoltaïques à haute concentration, et développement d'outils de caractérisations adaptés. Université de Lyon, 2016.
- [116] Besson P, White PM, Dominguez C, Voarino P, Garcia-Linares P, Lemiti M, et al. Spectrally-resolved measurement of concentrated light distributions for Fresnel lens concentrators. *Opt Express* 2016;24:A397. doi:10.1364/OE.24.00A397.
- [117] Herrero R, Victoria M, Domínguez C, Askins S, Antón I, Sala G. Understanding causes and effects of non-uniform light distributions on multi-junction solar

- cells: Procedures for estimating efficiency losses. AIP Conf. Proc., vol. 1679, AIP Publishing; 2015, p. 050006. doi:10.1063/1.4931527.
- [118] Rapp C, Straub V, Rooyen DW van, Thor WY, Siefer G, Bett AW. Optical investigation of a sun simulator for concentrator PV applications. Opt Express 2015;23:A1270-9. doi:10.1364/OE.23.0A1270.

Contributions scientifiques

Conférences internationales

-A. Ritou, P. Voarino, S. Bernardis, T. Hilt, A. Aitmani, C. Dominguez, M. Baudrit, *Micro-concentrator with self-assembly process*, AIP Conference Proceedings of the 12th International Conference on Concentrator Photovoltaics, 25-27 April 2016, Freiburg, Germany, 1766, pp. 080005-1– 080005-6 (2016).

-P. Voarino, A. Ritou, C. Weick et al., *Characterization of the Influence of Temperature on Achromatic Mirrors by means of METHOD*, AIP Conference Proceedings of the 12th International Conference on Concentrator Photovoltaics, 25-27 April 2016, Freiburg, Germany, 1766, pp. 050008-1–050008-6 (2016).

-A. Ritou, P. Voarino, B. Goubault, N. David, S. Bernardis, O. Raccurt, M. Baudrit, *Mechanical tolerances study through simulations and experimental characterization for a 1000X micro-concentrator CPV module*, AIP Conference Proceedings of the 13th International Conference on Concentrator Photovoltaics, 01-03 May 2017, Ottawa, Canada, 1881, pp. 030007-1– 030007-6 (2017).

-A. Ritou, O. Raccurt, P. Voarino et M. Baudrit, *A tool to characterize the electrical influence of the thermal and mechanical behaviors of materials of optics for CPV applications*, MRS Spring Meeting & Exhibit, 17-21 April 2017, Phoenix, Arizona, 53, pp. 3123-3128 (2017).

Journal avec comité de lecture

-A. Ritou, P. Voarino et O. Raccurt, *Does micro-scaling of CPV modules improve efficiency? A cell-to-module performance analysis*, Solar Energy, Elsevier, Octobre 2018, 173, Pages 789-803 (2018).

Brevet

-A. Ritou et P. Voarino, *Dispositif de moulage de lentilles et procédé de fabrication de lentilles*, Dépôt en cours (2018)

