



**HAL**  
open science

# Compréhension des comportements électrique et optique des modules photovoltaïques à haute concentration, et développement d'outils de caractérisations adaptés

Pierre Besson

## ► To cite this version:

Pierre Besson. Compréhension des comportements électrique et optique des modules photovoltaïques à haute concentration, et développement d'outils de caractérisations adaptés. Energie électrique. Université de Lyon, 2016. Français. NNT : 2016LYSEI013 . tel-01445014

**HAL Id: tel-01445014**

**<https://theses.hal.science/tel-01445014>**

Submitted on 24 Jan 2017

**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.

N° d'ordre 2016LYSEI013

Année 2015

**Thèse de Doctorat de l'Université de Lyon**  
**Compréhension des comportements  
électrique et optique des modules  
photovoltaïques à haute concentration,  
et développement d'outils de  
caractérisations adaptés**

Présentée devant  
L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon

Pour obtenir  
Le grade de docteur

École doctorale : École doctorale Electronique, Electrotechnique, Automatique  
de Lyon

Par  
Pierre Besson  
(Ingénieur INSA)

Soutenance prévue le 04 février 2016 devant la Commission d'examen

**Jury MM.**

---

A. DOLLET	Directeur de recherche CNRS-PROMES	Rapporteur
A. KAMINSKI	Professeur IMEP-LAHC, Grenoble-INP	Rapporteur
C. DOMINGUEZ	Maître de conférences Madrid-UPM	Examinateur
Y. JOURLIN	Professeur LHC-Univ. St-Etienne	Examinateur
A. VOSSIER	Chargé de recherche CNRS-PROMES	Examinateur
M. LEMITI	Professeur INL-INSA Lyon	Directeur
M. BAUDRIT	Directeur de laboratoire CEA-INES	Invité

Thèse effectuée au Laboratoire du Photovoltaïque à Concentration du CEA-INES

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

SIGLE	ECOLE DOCTORALE	NOM ET COORDONNEES DU RESPONSABLE
<b>CHIMIE</b>	<b>CHIMIE DE LYON</b> <a href="http://www.edchimie-lyon.fr">http://www.edchimie-lyon.fr</a>  Sec : Renée EL MELHEM Bat Blaise Pascal 3 <sup>e</sup> étage <a href="mailto:secretariat@edchimie-lyon.fr">secretariat@edchimie-lyon.fr</a> Insa : R. GOURDON	<b>M. Stéphane DANIELE</b> Institut de Recherches sur la Catalyse et l'Environnement de Lyon IRCELYON-UMR 5256 Équipe CDFA 2 avenue Albert Einstein 69626 Villeurbanne cedex <a href="mailto:directeur@edchimie-lyon.fr">directeur@edchimie-lyon.fr</a>
<b>E.E.A.</b>	<b>ELECTRONIQUE, ELECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE</b> <a href="http://edeea.ec-lyon.fr">http://edeea.ec-lyon.fr</a>  Sec : M.C. HAVGOUDOUKIAN <a href="mailto:Ecole-Doctorale.eea@ec-lyon.fr">Ecole-Doctorale.eea@ec-lyon.fr</a>	<b>M. Gérard SCORLETTI</b> Ecole Centrale de Lyon 36 avenue Guy de Collongue 69134 ECULLY Tél : 04.72.18 60.97 Fax : 04 78 43 37 17 <a href="mailto:Gerard.scorletti@ec-lyon.fr">Gerard.scorletti@ec-lyon.fr</a>
<b>E2M2</b>	<b>EVOLUTION, ECOSYSTEME, MICROBIOLOGIE, MODELISATION</b> <a href="http://e2m2.universite-lyon.fr">http://e2m2.universite-lyon.fr</a>  Sec : Safia AIT CHALAL Bat Darwin - UCB Lyon 1 04.72.43.28.91 Insa : H. CHARLES <a href="mailto:Safia.ait-chalal@univ-lyon1.fr">Safia.ait-chalal@univ-lyon1.fr</a>	<b>Mme Gudrun BORNETTE</b> CNRS UMR 5023 LEHNA Université Claude Bernard Lyon 1 Bât Forel 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cédex Tél : 06.07.53.89.13 <a href="mailto:e2m2@univ-lyon1.fr">e2m2@univ-lyon1.fr</a>
<b>EDISS</b>	<b>INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES-SANTE</b> <a href="http://www.ediss-lyon.fr">http://www.ediss-lyon.fr</a> Sec : Safia AIT CHALAL Hôpital Louis Pradel - Bron 04 72 68 49 09 Insa : M. LAGARDE <a href="mailto:Safia.ait-chalal@univ-lyon1.fr">Safia.ait-chalal@univ-lyon1.fr</a>	<b>Mme Emmanuelle CANET-SOULAS</b> INSERM U1060, CarMeN lab, Univ. Lyon 1 Bâtiment IMBL 11 avenue Jean Capelle INSA de Lyon 696621 Villeurbanne Tél : 04.72.68.49.09 Fax :04 72 68 49 16 <a href="mailto:Emmanuelle.canet@univ-lyon1.fr">Emmanuelle.canet@univ-lyon1.fr</a>
<b>INFOMATHS</b>	<b>INFORMATIQUE ET MATHEMATIQUES</b> <a href="http://infomaths.univ-lyon1.fr">http://infomaths.univ-lyon1.fr</a>  Sec : Renée EL MELHEM Bat Blaise Pascal 3 <sup>e</sup> étage <a href="mailto:infomaths@univ-lyon1.fr">infomaths@univ-lyon1.fr</a>	<b>Mme Sylvie CALABRETTO</b> LIRIS – INSA de Lyon Bat Blaise Pascal 7 avenue Jean Capelle 69622 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72. 43. 80. 46 Fax 04 72 43 16 87 <a href="mailto:Sylvie.calabretto@insa-lyon.fr">Sylvie.calabretto@insa-lyon.fr</a>
<b>Matériaux</b>	<b>MATERIAUX DE LYON</b> <a href="http://ed34.universite-lyon.fr">http://ed34.universite-lyon.fr</a>  Sec : M. LABOUNE PM : 71.70 –Fax : 87.12 Bat. Saint Exupéry <a href="mailto:Ed.materiaux@insa-lyon.fr">Ed.materiaux@insa-lyon.fr</a>	<b>M. Jean-Yves BUFFIERE</b> INSA de Lyon MATEIS Bâtiment Saint Exupéry 7 avenue Jean Capelle 69621 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72.43 71.70 Fax 04 72 43 85 28 <a href="mailto:Ed.materiaux@insa-lyon.fr">Ed.materiaux@insa-lyon.fr</a>
<b>MEGA</b>	<b>MECANIQUE, ENERGETIQUE, GENIE CIVIL, ACOUSTIQUE</b> <a href="http://mega.universite-lyon.fr">http://mega.universite-lyon.fr</a>  Sec : M. LABOUNE PM : 71.70 –Fax : 87.12 Bat. Saint Exupéry <a href="mailto:mega@insa-lyon.fr">mega@insa-lyon.fr</a>	<b>M. Philippe BOISSE</b> INSA de Lyon Laboratoire LAMCOS Bâtiment Jacquard 25 bis avenue Jean Capelle 69621 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72 .43.71.70 Fax : 04 72 43 72 37 <a href="mailto:Philippe.boisse@insa-lyon.fr">Philippe.boisse@insa-lyon.fr</a>
<b>ScSo</b>	<b>ScSo*</b> <a href="http://recherche.univ-lyon2.fr/scso/">http://recherche.univ-lyon2.fr/scso/</a>  Sec : Viviane POLSINELLI Brigitte DUBOIS Insa : J.Y. TOUSSAINT <a href="mailto:viviane.polsinelli@univ-lyon2.fr">viviane.polsinelli@univ-lyon2.fr</a>	<b>Mme Isabelle VON BUELTZINGLOEWEN</b> Université Lyon 2 86 rue Pasteur 69365 LYON Cedex 07 Tél : 04.78.77.23.86 Fax : 04.37.28.04.48

\*ScSo : Histoire, Géographie, Aménagement, Urbanisme, Archéologie, Science politique, Sociologie, Anthropologie

## Remerciements

Le travail de thèse présenté dans ce manuscrit a été effectué dans le laboratoire du photovoltaïque à concentration du Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA), sur le site de l'Institut National de l'Énergie Solaire au Bourget-Du-Lac. Aussi, je tiens tout d'abord à remercier Stéphane Guillerez pour m'avoir accueilli dans son service et donné les moyens de réaliser ce travail. J'en profite également pour remercier l'équipe du centre pour leur patience et leur disponibilité.

Je remercie Mathieu Baudrit qui m'a fait confiance au moment de me choisir pour réaliser cette thèse, a encadré mon travail et qui m'a soutenu jusqu'au rendu du manuscrit. J'exprime également toute ma gratitude à Mustapha Lemiti pour son écoute, sa sagesse et son appui tout au long de ce travail.

Mes pensées vont ensuite à toute l'équipe du laboratoire. Ce fût un réel plaisir de passer trois années à vos côtés, et j'espère retrouver ce subtil mélange de convivialité et de travail dans le futur. Je remercie notamment : Philippe Voarino, pour m'avoir épaulé et soutenu; Pablo Garcia-Linares et César Dominguez, pour avoir partagé leurs connaissances avec passion et leurs précieux conseils. Mais aussi : Yannick, Clément, Arnaud, Thomas, Loïc, et Christophe qui ont contribué à l'accomplissement de mon travail de recherche. Enfin, j'ai une pensée toute particulière pour Yves Delesse, qui rayonne toujours.

Aussi, j'ai eu la chance de côtoyer l'équipe du Sunlab de l'université d'Ottawa lors de mon séjour de quatre mois au Canada. C'est naturellement que je souhaite exprimer toute ma sympathie et mes remerciements à ses membres pour leur aide. Merci notamment à Karin pour sa gentillesse et son accueil et Henry Schreimer pour ses critiques constructives. Je dois également beaucoup à Patrick M. White qui a contribué avec sa curiosité et son talent à l'avancement des travaux de thèse.

Cette aventure de trois années n'aurait pas la même saveur sans les personnes proches qui m'ont conforté dans mes choix avec leur écoute et bien sûr une bonne dose d'humour. L'équipe alsacienne, les piliers comme on dit, merci d'être là dans tous les moments ! Merci aux Grenoblois, Chartrousins et Chambériens, qui m'ont aidé à reprendre des forces avec leur bonne humeur et leurs projets motivants. Merci aussi à Raphaëlle pour son soutien.

Ces remerciements ne peuvent s'achever sans une pensée pour ma famille. Vous avez toujours trouvé la bonne recette, au propre comme au figuré, pour m'encourager et me motiver. Enfin, je remercie Julia et son sourire. Cette thèse et moi te devons beaucoup.



## Abstract

The goal of this doctoral thesis is to bring answers to a better understanding of the electrical and optical behavior of CPV modules, under different operating conditions.

In the first part, a study on module performance under real conditions is presented. Using an outdoor automated test bench, the sensitivity of four different CPV module technologies to most operating conditions relevant to CPV systems has been studied, namely DNI, spectrum, cell and lens temperature and clearness of the sky. In order to isolate the influence of a single operation parameter, the analysis of outdoor monitoring data from one month to two years is performed. The results show how the optical design influences the sensitivity of the electrical parameters to the mentioned operating conditions. The effect of lens temperature on cell current has been found to be maximum for the CPV module without Secondary Optical Element. Also the  $V_{oc}$  thermal coefficient was found to vary between module technologies. Finally, the important variations of the fill factor for one technology underlines the need of studying non-uniformities effects on the cell performance.

According to the results observed outdoors, an indoor tool was developed in order to uncorrelate outdoor parameters. A test bench that measures multi-spectral irradiance profiles, through CMOS imaging and bandpass filters in conjunction with electrical  $IV$  curves, is used as a mean to visualize and characterize the effects of chromatic aberrations and nonuniform flux profiles under controllable testing conditions. The bench allows decoupling the temperatures of the Primary Optical Element and cell allowing the analyze of their respective effects on optical and electrical performance. In varying the temperature of the Primary Optical Element, the effects on electrical efficiency, focal distance, spectral sensitivity, acceptance angle, or multi-junction current matching profiles can be quantified. Calibration procedures and validation process are detailed.

Finally, the developed testbench is used for analyzing the behavior of three different CPV devices : one without Secondary Optical Element, and two with different Secondary Optical Elements. The impacts of cell position and lens temperature on the cell performance are quantified optically and electrically. The results show how these parameters modify the current density distribution of the subcells, and hence the electrical behavior of the device. They underline more specifically how spectral and spatial non-uniformities affect the cell

performance for the different devices. The device without SOE shows a strong sensitivity to lens temperature and POE-cell distance, that will correspond to a decrease of energy production under real conditions of operation.

---

## Résumé

Le travail de thèse effectué a pour objectif d'amener vers une meilleure compréhension des comportements électrique et optique des modules CPV, dans des conditions environnementales variables.

La première partie est consacrée à l'étude de la performance des modules en conditions réelles de fonctionnement. Quatre technologies de module, toutes équipées de cellules triple-jonctions, mais de concentrateurs optiques différents, ont été testées en extérieur sur des périodes de un mois à deux ans. Le banc d'acquisition du CEA-INES a permis de suivre les performances électriques (courbes IV) et les paramètres ambiants (ensoleillement, température, indicateur de spectre) sur cette période. Les résultats montrent que la sensibilité à la température de lentille, la température de cellule et au spectre incident varie selon le type d'architecture optique. La sensibilité la plus importante à la température de lentille a été obtenue pour un dispositif sans optique secondaire. Le coefficient en température de la tension  $V_{oc}$  a également été calculé et varie entre les technologies. Enfin, les variations importantes de facteur de forme avec le spectre incident observées pour une technologie, mettent en évidence la nécessité d'étudier les phénomènes de non-uniformités d'irradiance sur la cellule.

Dans une deuxième partie, le développement d'un banc de test en intérieur permettant de mesurer les performances électriques et optiques est présenté. Ce banc a pour objectif de permettre la reproduction des conditions réelles de fonctionnement des modules de façon contrôlée en intérieur, afin d'analyser leur comportement. Un système d'imagerie, couplé à un jeu de filtres optiques, est utilisé pour déterminer la distribution spatiale et spectrale d'irradiance sur la cellule. Associé à un traceur de courbes IV, il vise à caractériser les effets de flux non-uniformes sur la cellule. Le banc de mesure a pour avantage de découpler les paramètres d'études, telles que la température de la lentille et la température de la cellule, et permet ainsi de décorrélérer leurs effets respectifs sur l'ensemble optique-cellule, ce qui n'est que difficilement possible sur des mesures en extérieur. Le procédé de calibration et la validation du dispositif sont détaillés dans le manuscrit.

Enfin, dans une dernière partie, le banc développé est utilisé pour caractériser trois différents dispositifs CPV : un sans optique secondaire, et deux avec des optiques secondaires différentes. Les impacts de la distance lentille-cellule et de la température de lentille sur les performances de la cellule sont quantifiés optiquement et électriquement. Les résultats montrent comment ces paramètres modifient la distribution de densités de courant des sous-cellules, et donc le comportement électrique du dispositif. Ils soulignent plus spécifiquement comment les non-uniformités spectrales et spatiales affectent les performances de la cellule pour les différents concentrateurs. Le dispositif sans optique secondaire montre une sensibilité

importante à la température de la lentille et la distance optique primaire-cellule, qui se traduit par une perte de production d'énergie dans des conditions réelles de fonctionnement.

# Sommaire

<b>Liste des figures</b>	<b>xiii</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>xix</b>
<b>Nomenclature</b>	<b>xxi</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 Contexte . . . . .	1
1.1.1 La transition énergétique et l'énergie solaire . . . . .	2
1.1.2 Le photovoltaïque à concentration . . . . .	6
1.1.3 Les opportunités et les challenges du CPV . . . . .	9
1.2 Composition et fonctionnement des systèmes CPV . . . . .	10
1.2.1 La ressource solaire . . . . .	11
1.2.2 Les cellules solaires multi-jonctions . . . . .	13
1.2.3 Les optiques à concentration et leurs caractéristiques . . . . .	20
1.2.4 Vers un système fonctionnel . . . . .	27
1.3 Travail de recherche proposé . . . . .	28
1.3.1 Contexte et objectifs . . . . .	29
1.3.2 Structure du travail de thèse . . . . .	30
<b>2 Étude des performances des modules CPV en conditions réelles de fonctionnement</b>	<b>31</b>
2.1 De la variabilité des performances des modules en extérieur . . . . .	31
2.1.1 Impact des facteurs environnementaux . . . . .	33
2.2 Protocole d'analyse de performances en extérieur . . . . .	35
2.2.1 Plateforme d'étude . . . . .	35
2.2.2 Caractérisation spectrale de la ressource solaire . . . . .	38
2.2.3 Caractérisations électrique des modules et technologies étudiées . . . . .	40
2.3 Analyse globale des données . . . . .	43

2.3.1	Caractérisation initiale des modules en intérieur . . . . .	43
2.3.2	Période d'analyse et définition de critères de filtrage pertinents . . .	46
2.3.3	Adéquation des modules avec les conditions du site étudié . . . . .	49
2.4	Influence du rayonnement solaire . . . . .	53
2.4.1	Impact du spectre solaire . . . . .	54
2.4.2	Étude du diagramme des sous-cellules . . . . .	58
2.4.3	Impact du rayonnement circumsolaire . . . . .	60
2.5	Influence de la température cellule . . . . .	62
2.5.1	Détermination de la température de cellule en extérieur . . . . .	63
2.5.2	Impact de la température de cellule . . . . .	65
2.6	Influence de la température lentille . . . . .	67
2.6.1	Détermination de la température de lentille . . . . .	67
2.6.2	Impact de la température de lentille . . . . .	69
2.7	Conclusions . . . . .	71
<b>3</b>	<b>Développement de METHOD: instrument de mesures optiques et électriques pour les technologies CPV</b>	<b>75</b>
3.1	Introduction sur les non-uniformités . . . . .	75
3.1.1	Les non-uniformités spatiales . . . . .	75
3.1.2	Les non-uniformités spectrales . . . . .	76
3.1.3	Techniques de caractérisation des non-uniformités et de leurs impacts	77
3.2	Développement du banc de caractérisation METHOD . . . . .	78
3.2.1	Description du banc de mesure METHOD . . . . .	79
3.2.2	Caractéristiques du module d'imagerie . . . . .	81
3.2.3	Caractérisation de la chambre thermique . . . . .	84
3.3	Caractérisation et validation du dispositif de mesure optique . . . . .	89
3.3.1	Spécificités et corrections liées à la mesure par imagerie . . . . .	89
3.3.2	Calibration spectrale du dispositif de mesure . . . . .	93
3.3.3	Déclenchement sous lumière pulsée . . . . .	98
3.4	Validation par la mesure électrique du banc d'imagerie . . . . .	99
3.4.1	Application de la calibration à un concentrateur réel . . . . .	100
3.4.2	Extraction des courants par imagerie et comparaison à des mesures électriques . . . . .	102
3.4.3	Calibration de la mesure optique pour des cellules triple-jonctions .	105
3.5	Conclusions . . . . .	106

---

<b>4</b>	<b>Analyse des comportements optique et électrique de dispositifs CPV sous conditions contrôlées</b>	<b>109</b>
4.1	Présentation des dispositifs étudiés . . . . .	109
4.2	Comportement des dispositifs pour différentes distances focales . . . . .	113
4.2.1	Dispositif n°1: lentille de Fresnel et cellule nue . . . . .	114
4.2.2	Dispositif n°2: lentille de Fresnel et pyramide réfractive . . . . .	119
4.2.3	Dispositif n°3: lentille de Fresnel et optique Fresnel-Köhler . . . . .	123
4.3	Impact de la température lentille . . . . .	127
4.3.1	Introduction sur les effets de température de lentille . . . . .	127
4.3.2	Comportements optique et électrique des différents dispositifs . . . . .	128
4.3.3	Cartographie de performances des optiques . . . . .	133
4.4	Corrélation des résultats avec des mesures extérieures . . . . .	135
4.4.1	Extrapolation des mesures à des conditions réelles de fonctionnement	136
4.4.2	Calcul des pertes énergétiques sur l'année . . . . .	138
4.5	Conclusions . . . . .	140
<b>5</b>	<b>Conclusions</b>	<b>143</b>
5.1	Résumé des principaux résultats . . . . .	143
5.2	Pistes de réflexion pour de futures recherches . . . . .	145
5.3	Contributions scientifiques . . . . .	146
	<b>Références</b>	<b>149</b>



# Liste des figures

1.1	Concentrations historiques de $CO_2$ jusqu'à l'année 2000 en partie par millions	2
1.2	Évolution de la puissance photovoltaïque installée annuellement sur la période 2000-2013	3
1.3	Graphique des records d'efficacité de différentes technologies de cellules PV	5
1.4	Capacité CPV annuelle installée en MW par type (HCPV ou LCPV) sur la période 2002-2013	7
1.5	Photographies de centrales CPV de grande taille	8
1.6	Evolution des rendements records pour les cellules, les modules et les systèmes CPV	9
1.7	Représentation de la part diffuse, directe et circumsolaire du rayonnement solaire.	11
1.8	Spectres solaires obtenus pour différentes masses d'air traversées	12
1.9	Schéma électrique d'une cellule solaire simple jonction.	14
1.10	Caractéristique électrique $IV$ d'une cellule solaire.	14
1.11	Comparaison de la conversion du spectre solaire par une cellule simple jonction Si, et une cellule multi-jonctions GaInP/GaInAs/Ge	15
1.12	Structure simplifiée d'une cellule triple-jonctions à croissance monolithique, de type GaInP/GaAs/Ge	16
1.13	Variation du rendement, du fill factor $FF$ et de la tension $V_{oc}$ d'une cellule triple-jonctions avec le facteur de concentration $X$	18
1.14	Efficacité quantique externe d'une cellule triple-jonctions à $10^\circ C$ et à $70^\circ C$	19
1.15	Schéma du concept de la lentille de Fresnel	21
1.16	Profil 2D de différentes optiques secondaires (gauche) et courbes de transmission angulaire pour ces mêmes optiques (droite)	23
1.17	Courbe de puissance d'un module CPV en fonction de l'angle de désalignement de l'axe optique du module par rapport aux rayons incidents.	26
1.18	Vu éclaté des éléments d'un système CPV, de la cellule jusqu'au suiveur solaire	28

2.1	Rendement d'un module CPV mesuré en extérieur sur un an, en fonction de la température de cellule et du $DNI$ . . . . .	32
2.2	Interactions entre les paramètres environnementaux en conditions réelles de fonctionnement et les performances d'un module CPV. . . . .	33
2.3	Photographie du suiveur solaire deux axes du CEA avec plusieurs modules CPV installés . . . . .	36
2.4	Schéma des données mesurées par la station météorologique et photographie des capteurs montés sur le suiveur Kipp & Zonen . . . . .	38
2.5	Schéma de principe de l'architecture d'un spectro-pyrhéliomètre © <i>Black Photon</i> . . . . .	39
2.6	Composition spectrale du rayonnement en fonction de la valeur de $SMR_{mid}^{top}$ (gauche) et photographie du spectro-pyrhéliomètre servant à mesurer ce paramètre (droite) © <i>Solar Added Value</i> . . . . .	40
2.7	Architecture optique des quatre modules CPV analysés. . . . .	41
2.8	Courbes $IV$ des différentes technologies mesurées dans le simulateur solaire pour modules CPV . . . . .	44
2.9	Puissance relative des technologies étudiées en fonction de l'angle de désalignement de l'axe optique du module par rapport aux rayons incidents. . . . .	45
2.10	Puissance délivrée pour chaque technologie sur la période d'étude considérée	46
2.11	Impact des phénomènes de condensation et d'ombrage sur la caractéristique $IV$ des modules . . . . .	47
2.12	Désalignement angulaire du suiveur solaire en azimuth et en élévation sur la période allant de Août 2013 à Septembre 2015. . . . .	48
2.13	Histogramme des rendements observés pour chaque technologie étudiée sur l'ensemble de leur période de mesure . . . . .	50
2.14	Variation du $SMR_{mid}^{top}$ en fonction de l'heure de la journée . . . . .	51
2.15	Cartographie des conditions spectrales et de température pour le site d'étude sur la période allant de Juin 2014-Juin 2015 . . . . .	52
2.16	Cartographie du rendement (échelle colorimétrique) des modules testés en fonction de la température ambiante $T_{amb}$ et des conditions spectrales $SMR_{mid}^{top}$	52
2.17	Relation entre $DNI$ et $I_{sc}$ (gauche), ainsi que le rapport $I_{sc}/DNI$ pour le module A . . . . .	54
2.18	Impact du ratio $SMR_{mid}^{top}$ sur le rapport $I_{sc}/DNI$ (indicateur d'efficacité optique) pour les technologies étudiées . . . . .	55
2.19	Impact du ratio $SMR_{mid}^{top}$ sur le facteur de forme $FF$ pour les technologies étudiées . . . . .	56

2.20	Impact du ratio $SMR_{mid}^{top}$ sur le rendement $\eta$ pour les technologies étudiées .	57
2.21	Evolution du rapport $I_{sc}/DNI$ en fonction de l'indicateur de spectre $SMR_{mid}^{top}$	58
2.22	Exemple d'un diagramme de sous-cellule pour module équipé de cellule triple-jonction <i>lattice-matched</i> . . . . .	59
2.23	Diagrammes des sous-cellules <i>top</i> et <i>middle</i> des technologies étudiées . . . .	60
2.24	Irradiance solaire relative en fonction de l'angle de mesure pour deux différents profils de circumsolaire ( $0^\circ$ correspondant au centre du soleil) . . . .	61
2.25	Impact de l'indicateur $DNI/GNI$ sur le paramètre $I_{sc}/DNI$ pour différentes irradiances . . . . .	62
2.26	Tension $V_{oc}$ mesurée en fonction de la température de cellule $T_{cell}$ estimée et de la concentration pour le module C . . . . .	64
2.27	Relation entre la tension $V_{oc}$ et la température de cellule $T_{cell}$ . . . . .	65
2.28	Impact de la température de cellule $T_{cell}$ sur la courant $I_{sc}$ (gauche) et le facteur de forme $FF$ (droite) pour la technologie C . . . . .	66
2.29	Schéma électrique équivalent du modèle thermique utilisé pour déterminer la température de lentille $T_{lentille}$ . . . . .	68
2.30	Relation entre la grandeur $I_{sc}/DNI$ normalisée par l'aire de lentille et la température $T_{lentille}$ pour le module C, pour différentes compositions spectrales (échelle colorimétrique) . . . . .	69
2.31	Variation de l'indicateur d'efficacité optique $I_{sc}/DNI$ normalisé par l'aire de lentille en fonction de la température $T_{lentille}$ pour chaque technologie . . . .	70
2.32	Variations des principaux paramètres d'étude sur la période allant de Juin 2014 à Juin 2015. . . . .	72
2.33	Amplitude de variations des grandeurs électriques $I_{sc}/DNI$ , $V_{oc}$ et $FF$ en fonction de différentes conditions d'opération. Les données sont exprimées en % de variation par rapport à des mesures en conditions CSTC. . . . .	73
3.1	Schéma de principe du banc de caractérisation METHOD . . . . .	80
3.2	Photographies du simulateur solaire pour module CPV . . . . .	81
3.3	Efficacité quantique de la caméra CMOS et des trois jonctions d'une cellule <i>lattice-matched</i> . . . . .	82
3.4	Transmittances des douze filtres passe-bande mesurées au spectrophotomètre	83
3.5	Transmittance du diffuseur en opale mesurée au spectrophotomètre sur la plage 350-1800 nm. . . . .	84
3.6	Photographie du banc d'expérimentation METHOD avec les caractéristiques des différents composants. . . . .	85

3.7	Angle maximal d'incidence des rayons sur le récepteur en fonction du nombre-f de l'optique primaire. . . . .	86
3.8	Evolution du courant $I_{sc,i}$ pour des cellules isotypes <i>top</i> et <i>middle</i> , normalisé par la valeur de $DNI_i$ correspondante . . . . .	87
3.9	Photographies de la chambre thermique et du dispositif de mesures électrique et optique situé à l'arrière de la chambre . . . . .	88
3.10	Variation de la température de la lentille en fonction du temps pour un cycle de chauffe, refroidissement . . . . .	89
3.11	Principe de mesure du banc de caractérisation optique METHOD. Les images brutes sont converties en irradiances spectrales pour chaque pixel au moyen de facteurs de corrections et de calibrations. . . . .	90
3.12	Signal normalisé par la valeur moyenne du signal de l'image pour un éclairage uniforme du diffuseur . . . . .	92
3.13	Irradiance spectrale de la source de calibration sans filtre, et pour chaque filtre passe-bande, à une distance de 50 cm de la lampe . . . . .	93
3.14	Images du diffuseur éclairé avec la lampe de calibration pour différentes longueurs d'onde et positions angulaires de la source de calibration . . . . .	94
3.15	Schéma du comportement non-lambertien du diffuseur, et de la composante spéculaire du rayonnement dans la lumière transmise (©Newport). . . . .	95
3.16	Variation de la constante spectrale de calibration en fonction de l'angle d'incidence des rayons sur le diffuseur . . . . .	96
3.17	Distribution de l'angle d'incidence des rayons au point focal d'une lentille de nombre-f 1,5 . . . . .	97
3.18	Périodes d'acquisition des images au cours du flash correspondantes à quatre compositions spectrales de la source lumineuse. . . . .	99
3.19	Profils 3D du signal normalisée de l'image pour une lentille sans SOE à trois longueurs d'onde . . . . .	100
3.20	Profil 2D du signal normalisé pour le filtre passe-bande 600 nm . . . . .	100
3.21	Haut: Signal normalisé pour une coupe transversale de l'image (voir figure 3.20). Bas: Irradiances spectrales calculées pour 3 pixels de la coupe transversale . . . . .	101
3.22	Efficacités quantiques externes des cellules isotypes <i>top</i> , <i>middle</i> et <i>bottom</i> mesurées au CEA. La cellule isotype <i>bottom</i> est représentée à titre indicatif. . . . .	103
3.23	Densités de courant calculées par imagerie pour les isotypes <i>top</i> et <i>middle</i> étudiées. Les images sont prises pour un $DNI$ de 800 W/m <sup>2</sup> . . . . .	103

3.24	Comparaison entre le courant $I_{sc}$ mesuré et le courant $I_{sc}$ calculé par imagerie pour l'isotype <i>top</i> (gauche) et l'isotype <i>middle</i> (droite) . . . . .	104
3.25	Diagramme des sous-cellules d'une cellule triple-jonctions mesuré au CEA. On observe une limitation franche des sous-cellules <i>top</i> et <i>middle</i> pour respectivement les zones A et B du diagramme. . . . .	105
4.1	Représentations des trois architectures optiques testées. . . . .	110
4.2	Principe de fonctionnement du dispositif Fresnel-Köhler. Le dispositif entier est représenté (gauche), ainsi qu'un zoom sur l'optique secondaire (droite) .	111
4.3	Photographie des diffuseurs utilisés dans le cadre de l'étude. De droite à gauche: diffuseur sans SOE, diffuseur avec pyramide réfractive inversée, et diffuseur avec optique secondaire de Fresnel-Köhler. . . . .	112
4.4	Valeurs du rapport $I_{sc,imagerie}/I_{sc,elec}$ pour les sous-cellules <i>top</i> et <i>middle</i> , à différents $SMR_{mid}^{top}$ , pour les trois dispositifs testés. . . . .	113
4.5	$I_{sc}$ normalisé, rendement normalisé, $FF$ pour le dispositif n°1 à différentes distances POE-cellule pour différentes irradiances. . . . .	114
4.6	Grandeurs électriques d'intérêt pour l'étude des non-uniformités à différentes positions de cellule (trois graphiques du haut). Distributions spatiales des densités de courant $J_{top}$ et $J_{mid}$ et du rapport $J_{top}/J_{mid}$ pour les mêmes positions (cartographies du bas). Les mesures sont réalisées pour le dispositif n°1 à 600 W/m <sup>2</sup> , $SMR_{mid}^{top}=1,1$ . . . . .	117
4.7	Diagramme des sous-cellules du dispositif n°1 pour trois distances POE-cellule.	118
4.8	$I_{sc}$ normalisé, rendement normalisé, $FF$ pour le dispositif n°2 à différentes distances POE-cellule pour différentes irradiances. . . . .	120
4.9	Grandeurs électriques d'intérêt pour l'étude des non-uniformités à différentes positions de cellule (trois graphiques du haut). Distribution spatiale des densités de courant $J_{top}$ et $J_{mid}$ et du rapport $J_{top}/J_{mid}$ pour les mêmes positions (cartographies du bas). Les mesures sont réalisées pour le dispositif n°2 à 600 W/m <sup>2</sup> , $SMR_{mid}^{top}=1,1$ . . . . .	121
4.10	Diagramme des sous-cellules du dispositif n°2 pour trois distances POE-cellule.	123
4.11	$I_{sc}$ normalisé, rendement normalisé, $FF$ pour le dispositif n°3 à différentes distances POE-cellule pour différentes irradiances.. . . .	124
4.12	Grandeurs électriques d'intérêt pour l'étude des non-uniformités à différentes positions de cellule (trois graphiques du haut). Distribution spatiale des densités de courant $J_{top}$ et $J_{mid}$ et du rapport $J_{top}/J_{mid}$ pour les mêmes positions (cartographies du bas). Les mesures sont réalisées pour le dispositif n°2 à 600 W/m <sup>2</sup> , $SMR_{mid}^{top}=1,1$ . . . . .	125

4.13	Diagramme des sous-cellules du dispositif n°3 pour trois distances POE-cellule.	126
4.14	Variation relative de l'indice de réfraction avec la température pour le PMMA et le silicone et déformation produite sur une dent d'une lentille de Fresnel SoG pour une variation de température de 25°C . . . . .	127
4.15	Distributions spatiales des densités de courant $J_{top}$ et $J_{mid}$ et du rapport $J_{top}/J_{mid}$ pour les différents dispositifs à deux températures de lentille. Les mesures sont réalisées à 600 W/m <sup>2</sup> , $SMR_{mid}^{top}=1,1$ . . . . .	129
4.16	$I_{sc}$ normalisé, rendement normalisé, $FF$ pour les trois dispositifs à différentes températures de lentille pour différentes irradiances. . . . .	131
4.17	Cartographie "température $T_{lentille}$ -distance focale relative" du courant de court-circuit $I_{sc}$ pour les trois dispositifs. . . . .	134
4.18	Cartographie "température $T_{lentille}$ -distance focale relative" du facteur de forme $FF$ pour les trois dispositifs. . . . .	134
4.19	$DNI$ cumulé sur le site du Bourget-Du-Lac pour la période allant de Juin 2014 à Juin 2015 en fonction des conditions spectrales et de la température de lentille. . . . .	136
4.20	Rapport spectral $SMR_{MC}^*$ pour lequel un <i>current matching</i> s'observe en fonction de différentes conditions de mesures en intérieur. . . . .	137
4.21	Rapport spectral $SMR_{MC}^*$ modélisé à partir des mesures en intérieur pour les conditions extérieures d'opération. . . . .	138
4.22	Pertes en courant de court-circuit pour une année en fonction du $SMR_{MC}^*$ d'optimisation. . . . .	139
4.23	Pertes en courant de court-circuit sur une année pour différentes distances focales relatives pour les dispositifs n°1 et n°3. . . . .	140

# Liste des tableaux

2.1	Spécifications des principaux paramètres de mesure de la station météorologique Vaisala. . . . .	37
2.2	Paramètres électriques des technologies mesurées dans des conditions CSTC. . . . .	44
2.3	Critères de filtrage appliqués aux données mesurées en extérieur. . . . .	49
3.1	Temps de délai à appliquer pour le déclenchement de l'acquisition d'image en fonction des conditions spectrales . . . . .	99



# Nomenclature

## Liste des abréviations

AM	<i>Air Mass</i> ou masse d'air
AM1.5D	Spectre de référence pour une irradiance directe à la surface terrestre
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i> ou dispositif à transfert de charge
CEA	Commissariat à l'Energie Atomique
CM	<i>Current Matching</i> ou équilibre des courants
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i> ou Semi-conducteur à Oxyde de Métal Complémentaire
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de carbone
COP21	<i>21<sup>st</sup> Conference Of the Parties</i>
CPV	<i>Concentrator Photovoltaic</i> ou photovoltaïque à concentration
CSR	<i>CircumSolar Ratio</i> ou ratio circumsolaire
CSTC	<i>Concentrator Standard Test Conditions</i> ou conditions de test standardisées pour concentrateurs
CTE	<i>Coefficient of Thermal Expansion</i> ou coefficient d'expansion thermique
DTIRC	<i>Dielectric Total Internal Reflection</i> ou diélectrique à réflexion totale interne
FK	Fresnel-Köhler

---

FWHM	<i>Full Width Half Maximum</i> ou largeur à mi-hauteur du maximum
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
HCPV	<i>High Concentrator Photovoltaic</i> ou photovoltaïque à haute concentration
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IES-UPM	<i>Instituto de Energia Solar</i> de l'Université Polytechnique de Madrid
IV	Caractéristique courant tension
LCOE	<i>Levelized Cost of Energy</i> ou coût actualisé de l'énergie
LCPV	<i>Low Concentrator Photovoltaic</i> ou photovoltaïque à basse concentration
MCPV	<i>Medium Concentrator Photovoltaic</i> ou photovoltaïque à moyenne concentration
METHOD	<i>Measurement of Electrical, Thermal and Optical Devices</i> ou mesures électriques, thermiques et optiques pour dispositifs
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
PMMA	Polyméthacrylate de méthyle
POE	<i>Primary Optical Element</i> ou optique primaire
PV	Photovoltaïque
RTP	<i>Refractive Truncated Pyramid</i> ou pyramide réfractive inversée
SMR	<i>Spectral Matching Ratio</i> ou rapport d'équilibre spectral
SOE	<i>Secondary Optical Element</i> ou optique secondaire
SoG	<i>Silicon-on-Glass</i> ou silicone sur verre
SR	<i>Spectral Response</i> ou réponse spectrale
STC	<i>Standard Test Conditions</i> ou conditions de test standardisées
TIR	<i>Total Internal Reflection</i> ou réflexion totale interne
XTP	<i>Reflective Truncated Pyramid</i> ou pyramide réfléchive inversée

**Liste des symboles**

$\alpha$	Angle d'incidence des rayons sur une surface
$\beta_{V_{oc}}$	Coefficient de température pour la tension $V_{oc}$
$\delta$	Angle de déviation par rapport à l'axe optique
$\varepsilon_{Az}$	Erreur angulaire d'alignement du suiveur solaire en azimuth
$\varepsilon_{El}$	Erreur angulaire d'alignement du suiveur solaire en élévation
$\eta$	Rendement
$\eta_{optique}$	Rendement optique
$\lambda$	Longueur d'onde
$A_{in}$	Aire d'entrée considérée
$A_{module}$	Aire d'un module (face avant)
$A_{out}$	Aire de sortie considérée
$A_{pixel}$	Aire d'un pixel
$AA$	Angle d'acceptance
$AA_{xx\%}$	Angle d'acceptance pour xx% de la puissance
$Calib$	Facteur de calibration spectrale
$CM$	<i>Current matching</i> ou équilibre des courants
$Corr_{elec}$	Facteur de correction d'image par la mesure électrique
$Corr_{filtre}$	Facteur de correction de non-idéalité des filtres
$Corr_{uniformité}$	Facteur de correction d'uniformité)
$DNI$	<i>Direct Normal Irradiance</i> ou irradiance normale directe
$E(\lambda)$	Irradiance spectrale
$E_g$	Energie de bande interdite ( <i>bandgap</i> ) d'un semi-conducteur

---

$E_{QE}(\lambda)$	Efficacité Quantique Externe
$FF$	<i>Fill Factor</i> ou facteur de forme
$G_{in}$	Aire d'entrée considérée
$G_{out}$	Irradiance pour une aire d'entrée considérée
$GNI$	<i>Global Normal Irradiance</i> ou irradiance globale normale
$I_{mpp}$	Courant au point de puissance maximum
$I_{N,i}$	Courant normalisé par le DNI pour la jonction ou cellule $i$
$I_{sc,i}$	Courant de court-circuit pour la jonction ou cellule isotype $i$
$I_{sc}$	Courant de court-circuit
$J_{sc,i}$	Densité de courant de court-circuit pour la jonction ou cellule isotype $i$
$J_{sc}$	Densité de courant de court-circuit
$k$	Constante de Boltzmann
$M_{Aire}$	Matrice de pixels correspondante à l'aire d'une cellule
$n$	Facteur d'idéalité de la diode
$N_s$	Nombre de cellules en série
$n_{air}$	Indice de réfraction de l'air
$n_{verre}$	Indice de réfraction du verre
$P_{in}$	Puissance lumineuse pour une aire d'entrée considérée
$P_{mpp}$	Puissance au point de puissance maximum
$P_{out}$	Irradiance pour une aire d'entrée considérée
$q$	Charge de l'électron
<i>Réponse</i>	Rapport entre le signal électrique d'un pixel et la puissance lumineuse incidente

---

$R_s$	Résistance série
$R_{conduction}$	Résistance thermique de conduction
$R_{convection}$	Résistance thermique de convection
$R_{shunt}$	Résistance shunt
$Ref$	Réflexions de Fresnel
<i>Signal</i>	Signal mesuré par imagerie
$SMR_i^j$	<i>Spectral Matching Ratio</i> ou rapport d'équilibre spectral entre les jonctions ou cellules isotopes $i$ et $j$
$SMR_{MC}$	Rapport spectral $SMR_{mid}^{top}$ pour lequel les jonctions <i>top</i> et <i>middle</i> sont équilibrées en courant
$SR(\lambda)$	Réponse spectrale
$T_{amb}$	Température ambiante
$T_{cell}$	Température de cellule
$T_{lentille}$	Température de lentille
$T_{module}$	Température de module (face arrière)
$V_{mpp}$	Tension au point de puissance maximum
$V_{oc}$	Tension en circuit ouvert
$X$	Concentration lumineuse effective



# Chapitre 1

## Introduction

Dans le contexte actuel de changement climatique et de développement des énergies non carbonées, cet ouvrage propose d'apporter des éléments de réponse scientifiques et techniques sur l'étude d'une technologie renouvelable émergente : le photovoltaïque à concentration (CPV). Lors de cette partie introductive, nous nous intéresserons d'abord au rôle que joue l'énergie solaire dans la transition énergétique. Nous aborderons ensuite le sujet sous un regard plus technique, en présentant la place et les enjeux du CPV dans les technologies solaires existantes. Les éléments constitutifs d'un module et leur fonctionnement seront abordés et nous verrons l'importance que joue une meilleure compréhension du comportement du module dans l'amélioration de la technologie. Puis viendra alors la présentation du sujet, et la description des travaux de recherche effectués.

### 1.1 Contexte

"Le temps du monde fini commence", constatait Paul Valéry en 1945. Soixante dix ans se sont écoulés, et la problématique d'un monde aux ressources limitées apparaît désormais comme une urgence majeure. En effet, l'exploitation intensive des ressources a fait plonger le monde dans deux grandes crises intimement liées entre elles : l'une énergétique, qui débuta avec le choc pétrolier à partir du début des années 70, et l'autre climatique, dont la conscience se généralisa seulement à l'aube du XXI<sup>ème</sup> siècle. La réponse à apporter à ce double défi n'est évidemment pas simple, et les problématiques soulevées doivent être abordées sous une multitude d'angles : sociétaux, comportementaux, environnementaux, économiques ou encore scientifiques et techniques. C'est sous ce dernier aspect que nous allons aborder la transition énergétique, volet essentiel de la transition vers un monde plus durable.

### 1.1.1 La transition énergétique et l'énergie solaire

La problématique du changement climatique et de la disponibilité de l'énergie est désormais planétaire. La crise énergétique provient de la finitude des ressources énergétiques fossiles, comprenant le pétrole, le gaz et le charbon, énergies produisant de surcroît un accroissement considérable de gaz à effet de serre. Or, la sécurité énergétique est une des préoccupations majeures des principaux pôles économiques de la planète et celle-ci n'existerait plus en cas de rupture ou d'épuisement de la chaîne du pétrole. Quant à la véracité du changement climatique, elle est désormais établie : les récents travaux du Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) font état d'une hausse moyenne de  $0,85^{\circ}\text{C}$  de la température moyenne à la surface du globe dans leur cinquième rapport paru en 2014 [1]. Les émissions de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) d'origine anthropique ont augmenté de  $2,2\%$  en moyenne sur la dernière décennie, et celles-ci augmentent encore davantage depuis 2010 (Fig. 1.1). Avec un degré de certitude de  $95\%$  selon ce même rapport quant à la responsabilité de l'activité humaine de ce réchauffement, un consensus largement partagé par la communauté scientifique et les citoyens apparaît : il est urgent de modifier nos modes de production d'énergie et de réduire nos émissions de gaz à effet de serre.

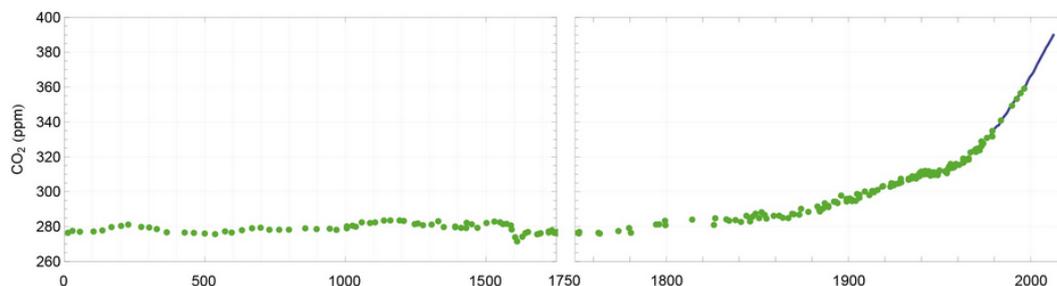
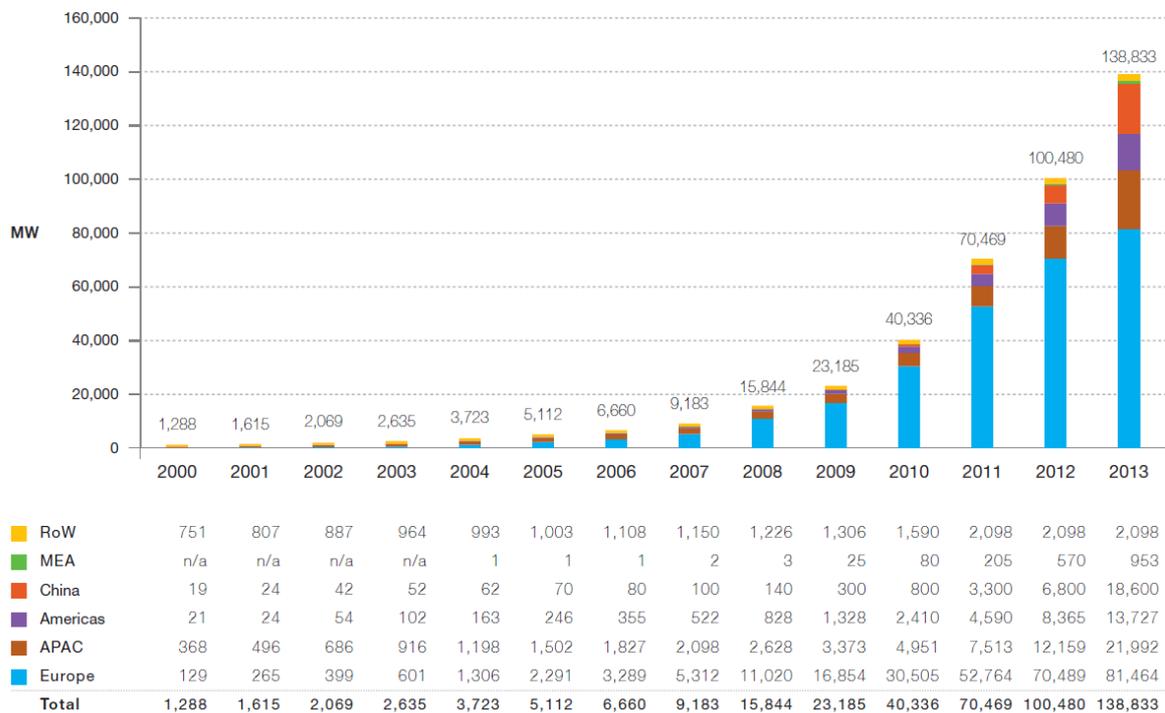


Figure 1.1: Concentrations historiques de  $\text{CO}_2$  (dioxyde de carbone) jusqu'à l'année 2000 en partie par millions (ppm) (à gauche) et zoom sur la période industrielle (à droite) [2].

L'objectif ambitieux de limiter le réchauffement planétaire à  $2^{\circ}\text{C}$  d'ici 2100 demande des "bouleversements institutionnels et technologiques" selon les mots employés par le GIEC. Sur le plan institutionnel, cela nécessite que les différents états s'entendent pour mettre en place un cadre réglementaire approprié, à l'instar du protocole de Kyoto. La conférence de Paris 2015 (COP21) sur le climat va dans ce sens et traduit une certaine volonté internationale de définir à une échelle planétaire des politiques à adopter. Sur le plan technologique, cela implique de réaliser des économies d'énergie avec des systèmes plus efficaces d'une part, et d'augmenter de manière importante la part des énergies sobres en carbone d'autre part.

Face à ce défi, l'énergie photovoltaïque (PV) constitue une réponse technologique clé et est amenée à jouer un rôle majeur dans la production d'énergie renouvelable. Selon un

rapport de l'European Photovoltaic Industry Association, c'est ainsi que ces 15 dernières années l'industrie solaire a connu une croissance exponentielle, avec un marché annuel de plus de 38 GW en 2014 [3]. La figure 1.2 illustre cette tendance, où l'on observe également que la Chine et la partie Asie Pacifique ont été en 2013 les moteurs de cette croissance. L'Europe reste toutefois en tête en terme de capacité installée avec plus de 80 GW de capacité photovoltaïque cumulée installée en 2013, soit près de 60% de la capacité mondiale installée et 3% de la demande en électricité du continent européen.



RoW : Reste du monde; MEA : Moyen-Orient et Afrique; APAC : Asie Pacifique

Figure 1.2: Évolution de la puissance photovoltaïque installée annuellement sur la période 2000-2013.[3]

Il existe aujourd'hui une grande variété de technologies photovoltaïques commercialement disponibles. Chacune tentant d'atteindre le prix de revient le plus bas, elles ont toutefois des spécificités et des marchés qui peuvent différer. Ces technologies ont en commun la production d'électricité à partir du rayonnement solaire et peuvent être regroupées en catégories. Les modules les plus répandus sur le marché sont les modules à base de silicium, mais d'autres technologies émergent peu à peu. Les différentes familles, par ordre de part de marché dans le monde, sont les suivantes :

- Les modules à base de silicium cristallin : ils sont composés de cellules de 150 à 200  $\mu\text{m}$  d'épaisseur, qui sont découpées dans un lingot ou une brique obtenus par fusion,

moulage et cristallisation. On différencie le silicium mono-cristallin (mono-c-Si), de meilleure qualité, et le silicium multi-cristallin (multi-c-Si).

- Les modules dits "technologie couche-mince" : connaissant un fort développement ces dernières années, cette technologie est fondée sur l'utilisation de couches extrêmement fines (quelques  $\mu\text{m}$ ) déposées sur un substrat (verre, plastique, acier,...). Les matériaux les plus répandus sont le silicium amorphe (a-Si), le telluride de cadmium (CdTe) ou encore le cuivre-indium-gallium-diselenide (CIGS).
- Les modules basés sur les cellules multi-jonctions : ces cellules sont composées de couches superposées convertissant différentes parties du spectre solaire, ces cellules ont d'abord été réservées aux applications spatiales de par leurs coûts. En les couplant à des optiques de concentration, elles deviennent compétitives pour des applications terrestres.
- Les modules issus de technologies dites "émergentes" : ces technologies sont diverses et tendent à émerger commercialement ces dernières années. On peut citer entre autre les cellules organiques, les cellules à colorant (connues sous le nom de "cellule Grätzel") ou encore les cellules à base de structure dite pérovskite.

La figure 1.3 illustre les rendements records des différentes technologies, obtenus en laboratoire ou par des industriels [4]. Nous remarquons notamment le palier atteint par les technologies silicium et couche mince, laissant penser que les gains de rendement dans les prochaines années seront faibles. En revanche, pour les cellules multi-jonctions, les efficacités records continuent de croître chaque année à un rythme soutenu depuis les années 2000. Il est intéressant d'observer que la pente de cette croissance varie avec le nombre de jonctions. Pour des cellules à deux jonctions et sous concentration, le rendement record passe de 30% à 34,1% de 1995 à 2012. Pour les cellules à 3 jonctions, la croissance est plus rapide : de l'ordre de 32% à 44,7% en moins de 15 ans, soit près de 1% par an. Enfin, suite aux récents travaux sur les cellules quatre jonctions, nous constatons un gain de 2% en rendement absolu en à peine 18 mois pour atteindre le rendement record de 46%. Les perspectives sont donc prometteuses et la barrière d'efficacité de 50% semble atteignable lors de la prochaine décennie. Mais de telles cellules s'avèrent coûteuses à réaliser : le procédé de fabrication est plus lent, l'architecture est complexe et les matériaux sont rares. L'exploitation commerciale de tels rendements à un coût compétitif demande donc l'intégration des cellules dans des modules photovoltaïques à concentration (CPV).

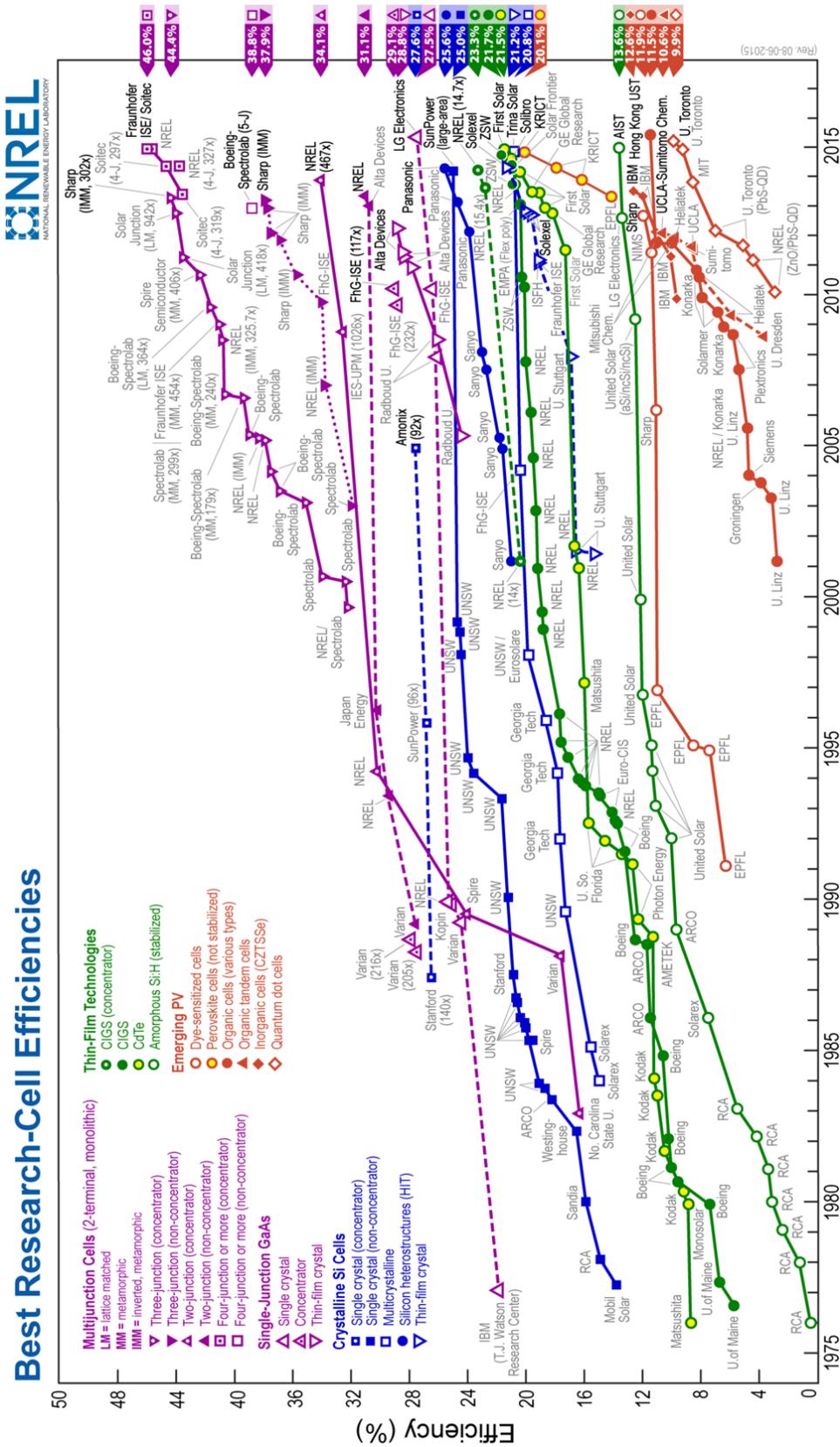


Figure 1.3: Graphique des records d'efficacité des différentes technologies de cellules PV. Les cellules multi-jonctions atteignent le rendement record de 46% et compte-tenu des tendances, les rendements pourraient atteindre 50% lors de la prochaine décennie [4] ©Renewable Energy Laboratory (NREL).

Le principe du photovoltaïque à concentration repose sur l'utilisation d'optiques de concentration peu coûteuses concentrant une grande surface de lumière incidente sur des cellules à haut-rendement. L'avantage est double : la surface de cellule est ainsi réduite et les rendements de conversion sont plus élevés à plus haute concentration. Suite aux progrès récents à tous les niveaux du module et à la baisse des coûts de fabrication, il est ainsi possible d'atteindre des coûts de l'électricité produite comparables au photovoltaïque à base de silicium dans des régions à fort ensoleillement [5].

### 1.1.2 Le photovoltaïque à concentration

Le leitmotiv originel du photovoltaïque à concentration fût l'augmentation du rendement des cellules solaires. En effet, dans leur article de 1960 intitulé « Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells » [6], Shockley et Queisser ont défini un rendement de conversion maximum d'environ 30% pour des cellules solaires simple-jonction sous un flux lumineux de  $1000 \text{ W/m}^2$  et un spectre de référence AM1.5G<sup>1</sup>. C'est aussi dans cet article qu'ils posent les premières bases du concept du CPV puisqu'ils mentionnent que le rendement devrait augmenter avec l'intensité lumineuse incidente sur la cellule. Cette intensité se caractérise par le taux de concentration sur la cellule, noté  $X$  ou nombre de Soleils, correspondant à la puissance lumineuse irradiant la cellule divisée par  $1000 \text{ W/m}^2$ . La meilleure preuve de la véracité des prédictions de Shockley et Queisser arriva en 1986 quand l'université de Stanford battit deux records du monde en matière de rendement de conversion de cellules solaires à base de silicium avec des cellules de structure semiconductrice semblable : 20% de rendement à 1X et 27% de rendement à 140X [7]. Le concept du CPV était prouvé! En effet, en ayant recours à des dispositifs optiques classiques, il est possible de concentrer la lumière. Nous introduisons ici la notion de concentration géométrique, qui fait référence au rapport entre l'aire d'entrée de la lumière, correspondante à la surface de l'optique de concentration, et la surface de la cellule.

Les avancées techniques dans le domaine des cellules multi-jonctions depuis les années 2000 et les politiques fortes en faveur des énergies renouvelables ont créé un intérêt nouveau pour ces technologies à concentration. Il existe une large variété de systèmes qui ont vu le jour depuis les années 90, avec différents facteurs de concentration, tailles de cellules et architectures optiques. Nous retrouvons principalement trois types de famille : le photovoltaïque à haute concentration, dit HCPV, avec des concentrations géométriques comprises entre 300 et 1000; le photovoltaïque à moyenne concentration, dit MCPV, avec des concentrations géométriques comprises entre 100 et 300 et enfin le photovoltaïque à basse concentration, dit

<sup>1</sup>Ces conditions d'irradiation constituent les conditions standard de test (STC) pour la mesure des performances des cellules photovoltaïques, définies dans la norme IEC60904-3

LCPV, pour les concentrations géométriques inférieures à 100. Cette classification n'est pas standardisée aujourd'hui et il est possible de trouver dans la littérature d'autres typologies. Ainsi, on trouvera par exemple une classification des familles selon le type de suiveur solaire utilisé : pas de suiveur solaire, suiveur un axe ou suiveur deux axes [8]. Si l'on s'en tient au critère de concentration, on note que plus de 90% des installations ont été réalisées avec des modules HCPV [9].

Le nombre d'installations de grande échelle, supérieures au MW, a connu un essor depuis 2002 (Fig. 1.4). Le premier projet excédant le MW a ainsi été développé en Espagne en 2006, et depuis un nombre croissant de grands projets ont vu le jour. A titre d'exemple, on peut citer deux projets emblématiques de cette croissance (voir photos Fig.1.5) : le projet "Golmud 1" situé en Chine, d'une puissance de 59,8 MW, et le projet "Touwsrivier" situé en Afrique du Sud, avec une puissance totale de 44,2 MW. La capacité annuelle installée reste toutefois faible au regard du photovoltaïque à base de silicium (100 MW en 2013 pour le CPV, comparé à un peu plus de 35 GW pour les technologies silicium), mais le marché tend à se diversifier géographiquement et des projets en France, en Chine, en Italie ou aux Etats-Unis sont à l'ordre du jour.

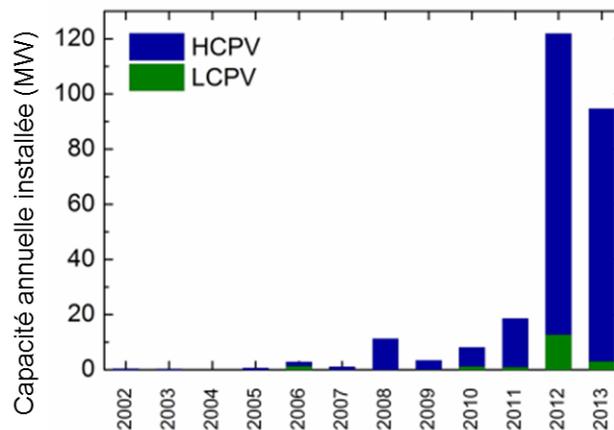


Figure 1.4: Capacité CPV annuelle installée en MW par type (HCPV ou LCPV) sur la période 2002-2013. Les chiffres donnés proviennent d'annonces publiques [9].

En matière de rendements, les modules à concentration s'avèrent être à la pointe des technologies photovoltaïques. Le Fraunhofer ISE et Soitec ont récemment publié un communiqué [10] sur des modules de recherche mesurés à 38,9% de rendement en conditions CSTC<sup>1</sup>. Bien que les technologies soient différentes par leur concept et leur design, la majorité des fabricants de module optent pour des technologies de concentrateurs optiques à lentille de

<sup>1</sup>CSTC fait ici référence à *Concentrator Standard Test Conditions*, conditions définies dans la norme IEC62670 [11] : spectre équivalent AM1.5D, irradiances de 1000 W/m<sup>2</sup> et température de cellule de 25°C.



Figure 1.5: Photographies de centrales CPV de grande taille. De gauche à droite : le projet 'Golmud 1' de 60 MW situé en Chine (©Suncore); une centrale de 44 MW en Afrique du Sud (©Soitec).

Fresnel avec des facteurs de concentration compris entre 500 et 1000. En ce qui concerne le LCPV, la convergence est moins marquée et le panel de design de technologies s'avère encore plus large. Dans cette thèse, nous nous centrons sur les modules HCPV et, pour éviter toute confusion, le terme CPV fera référence à ce type de technologie dans la suite du document. Une étude des dernières avancées en terme de rendement est visible sur la figure 1.6, où l'on peut observer l'efficacité de la technologie CPV à différentes échelles : cellule, module et système. Il est intéressant de noter la différence observée entre le rendement module et le rendement cellule, problématique qui sera abordée dans cette thèse.

En ce qui concerne le coût, les systèmes CPV ont fait l'objet de diverses études concernant leur compétitivité par rapport aux autres technologies solaires. L'équipe du SUNLAB de l'université d'Ottawa s'est intéressée à cette problématique [5], du point de vue du prix système et de son évolution par rapport aux volumes annuels déployés. Le prix moyen d'un système CPV se situe dans une fourchette de  $3,0 \pm 0,7$  \$/W pour l'année 2013, légèrement supérieur aux prix des systèmes PV pour la même période, qui est de  $2,4 \pm 0,9$  \$/W [13]. Toutefois, des prix plus compétitifs dans le futur sont à entrevoir: les volumes de production des modules CPV sont très faibles au vu de la capacité PV (le rapport étant d'environ 0,1% en 2013) et l'économie d'échelle liée à une production de masse devrait leur permettre une diminution rapide des coûts. La viabilité économique des systèmes CPV peut aussi s'étudier selon le coût de l'énergie actualisé, plus connu sous le nom de *Levelized Cost Of Energy* (LCOE). Cet indicateur, fréquemment utilisé dans le domaine de la production d'énergie, regroupe l'ensemble des coûts inhérents à un système de production d'énergie - investissement, coût d'exploitation - et divise ce coût par l'énergie produite sur la durée de fonctionnement du système. Il dépend logiquement de certains paramètres

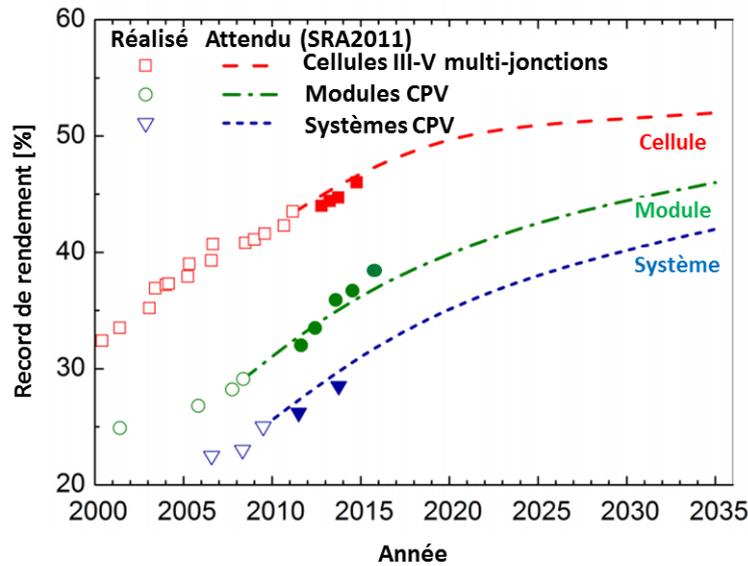


Figure 1.6: Evolution des rendements records pour les cellules, les modules et les systèmes CPV. Le graphique est tiré de [9] auquel ont été ajoutés les records obtenus en 2015 [10, 12].

comme l'ensoleillement, les coûts de la main d'œuvre et les hypothèses économiques sur l'investissement réalisé. Le Fraunhofer ISE et le NREL ont publié récemment une étude à ce sujet, en réunissant des informations de la littérature [9]. Les calculs font état d'un LCOE compris entre 0,10 €/kWh à 0,15 €/kWh pour des lieux avec un ensoleillement annuel direct de 2000 kWh/m<sup>2</sup>/an. Ainsi, le CPV s'avère plus compétitif que le solaire à concentration (CSP) et tend à faire jeu égal avec le PV pour certaines régions. Voyons maintenant les avantages et difficultés rencontrés par les technologies CPV pour un développement à plus large échelle.

### 1.1.3 Les opportunités et les challenges du CPV

En dépit des rendements records, les défis et contraintes de la technologie CPV sont nombreux. L'utilisation d'optiques de concentration permet de réduire la taille des cellules, ce qui représente indéniablement un avantage en matière de coût et de disponibilité des matériaux. En revanche, cette fonction optique de concentration nécessite l'utilisation de suiveur solaire haute-précision, avec la maintenance associée et la nécessité d'avoir des composants fiables dans le temps. Cependant, bien que l'utilisation de suiveur augmente la source de pannes sur les installations CPV, cela confère aussi aux systèmes CPV une courbe de production d'énergie au cours de la journée beaucoup plus intéressante. En effet, pour des journées avec

un ciel clair, la production est relativement stable sur la période de fonctionnement puisque la conversion de l'énergie lumineuse est maximisée en se positionnant face au soleil.

La fonction optique de concentration implique également que les modules CPV ne captent que la lumière directe du soleil. Ce sont donc des technologies vouées à des régions à fort ensoleillement direct, soit à l'exportation dans le cas d'une fabrication en Europe par exemple. Sont également pointés du doigt comme freins au développement d'une filière photovoltaïque à concentration à grande échelle, le manque de normes et standards clairs sur lesquels peuvent se reposer les différents acteurs (industrie, banque, laboratoire), et un retour d'expérience suffisant pour attester de la fiabilité des systèmes dans le temps. La campagne actuelle de mise en place de standards internationaux pour les différents composants des systèmes CPV (suiveur solaire, lentille, module) témoigne d'une volonté de l'ensemble des acteurs d'obtenir une base de certification utilisable par tous.

Pour finir, comme nous l'avons mentionné, cette technologie n'a pas encore bénéficié de l'effet de production de masse dont a profité le photovoltaïque. Un déploiement à grande échelle nécessiterait une augmentation des volumes de productions qui se répercuterait immédiatement en une baisse des coûts des systèmes. Ce mécanisme est mis en exergue par l'analyse de "la courbe d'apprentissage", caractéristique du déploiement d'une technologie. Cette courbe relie le prix des systèmes aux volumes déployés et permet d'obtenir le facteur d'apprentissage, chiffre correspondant à la baisse des coûts pour un doublement de volume. Il a été étudié dans [5], et la valeur de ce facteur d'apprentissage se situe autour de 20% pour la technologie CPV.

## 1.2 Composition et fonctionnement des systèmes CPV

Un système CPV repose sur la combinaison de trois composants, les deux premiers servant de base à ce que l'on appelle un module CPV :

- Le récepteur photovoltaïque : il est constitué de cellules multi-jonctions fabriquées à partir de matériaux III-V (éléments des colonnes III et V du tableau périodique) montées sur un support mécanique servant d'interface électrique et thermique.
- Des optiques de concentration : réfractives ou réfléchives, elles peuvent contenir plusieurs "étages" avec d'abord une optique primaire (POE pour Primary Optical Element) et selon les critères de conception, une optique secondaire (SOE pour Secondary Optical Element).
- Un suiveur solaire pour positionner le dispositif optique face au soleil tout le long de la journée. La cellule est en effet placée au point focal de l'optique de concentration.

Un désalignement a alors pour effet de concentrer la lumière à l'extérieur de la cellule. La précision et la robustesse du suiveur sont donc primordiales, compte-tenu des contraintes d'alignement et du poids des modules.

Mais avant d'aborder l'aspect conception et fonctionnement d'un module, nous allons définir quelques concepts et spécificités liés à l'utilisation de la ressource solaire dans des applications photovoltaïques à concentration.

### 1.2.1 La ressource solaire

Le rayonnement solaire est composé d'une partie diffuse et une partie directe (Fig. 1.7). Le flux direct du rayonnement correspond aux rayons provenant de l'angle solide limité au disque solaire, soit  $\pm 0,27^\circ$ . La partie diffuse provient des réflexions et de la diffusion par le ciel hémisphérique et par le sol. Le rayonnement "global" représente la somme des composantes directe et diffuse. A la périphérie du disque solaire, nous observons un mince anneau lumineux, sorte d'auréole solaire, correspondant à un rayonnement diffus important. Ce rayonnement est qualifié de rayonnement circumsolaire. Les instruments de mesure de rayonnement direct ont un angle d'ouverture de  $\pm 2,5^\circ$ , conformément aux normes en vigueur [14]. Ainsi, la mesure du rayonnement direct correspond à l'addition du rayonnement provenant du disque solaire et du rayonnement circumsolaire. Les modules CPV convertissent les rayons solaires d'angle d'incidence inférieures à une certaine valeur (de l'ordre de  $1^\circ$  pour les modules HCPV), et il est admis d'utiliser le terme de rayonnement direct pour le rayonnement converti.

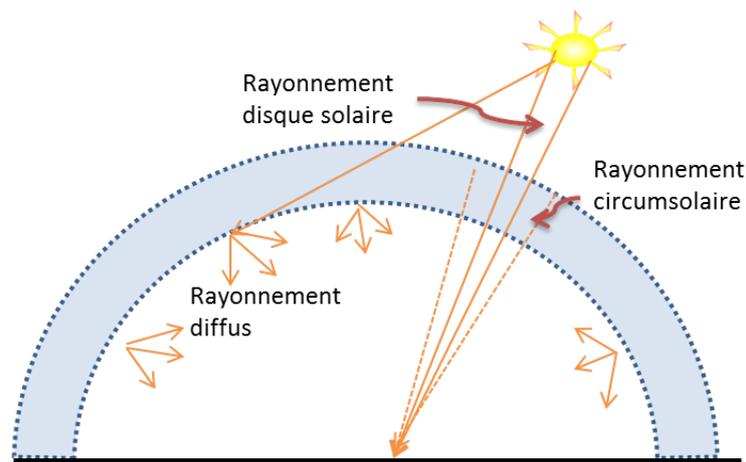


Figure 1.7: Représentation de la part diffuse, directe et circumsolaire du rayonnement solaire.

L'intensité et la composition spectrale du rayonnement solaire atteignant la surface de la terre, varient en fonction de la composition chimique de l'atmosphère (ozone, humidité,

dioxyde de carbone, polluants, poussière,...) et de la masse d'air à traverser (AM pour *Air Mass* dans la littérature) [15]. Cette masse d'air correspond à l'épaisseur atmosphérique que la lumière doit traverser, normalisée par l'épaisseur atmosphérique à la normale de l'observateur (soit le zenith). Les différents composants atmosphériques affectent des parties spécifiques du spectre, avec un impact variable en fonction de la masse d'air. Il en résulte que l'atmosphère peut être vue comme un filtre de transmittance spectrale variable, en fonction de la position du soleil et de sa composition. La figure 1.8 illustre cet effet, et présente le spectre terrestre pour différentes masses d'air notée *AM*. Les valeurs choisies 1, 1,5 et 2 correspondent aux positions respectives du soleil par rapport au zenith de  $0^\circ$ ,  $48,2^\circ$  et  $60^\circ$ . La génération de spectre est réalisée par le logiciel de modélisation SMARTS2 [16] et les conditions atmosphériques ont été fixées aux valeurs trouvées dans les normes et définies par le standard G-173 [17].

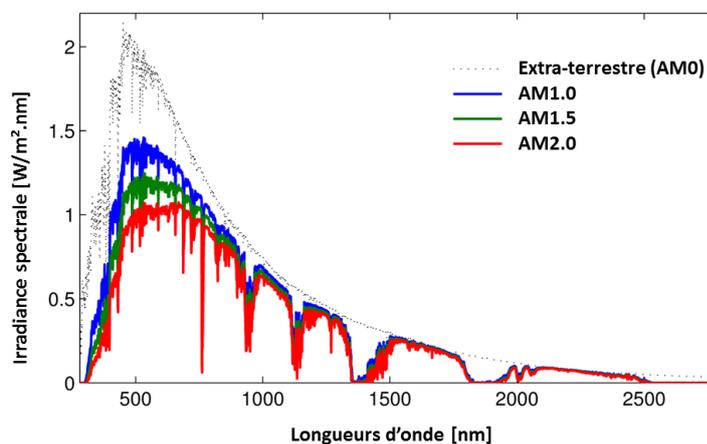


Figure 1.8: Spectres solaires obtenus pour différentes masses d'air traversées. Les spectres ont été modélisés via le logiciel SMARTS2 pour des conditions standards de composition atmosphérique.

Les trois irradiances spectrales modélisées, correspondantes à différentes positions du soleil dans le ciel, présentent bien des variations en matière de composition spectrale. Ces variations s'accroissent logiquement pour des atmosphères de composition différente (en terme d'aérosol ou de vapeur d'eau par exemple) [15]. Nous verrons comment caractériser cette composition spectrale dans le chapitre 2. Ainsi, les spectres solaires dépendent de variables si nombreuses que des spectres standards ont été établis afin de fournir une base à l'évaluation théorique des effets du rayonnement solaire et à la caractérisation normée des cellules et modules photovoltaïques. Les conditions du spectre AM1.5 ont été choisies par l'ASTM "en raison de leur caractère représentatif des conditions moyennes dans les 48 états contigus des États-Unis" [17]. Elles correspondent à un coefficient de trouble de 0,27, à une

inclinaison de  $37^\circ$  face au Soleil et un albédo de 0,2. Le terme AM1.5D fait référence à la part directe du rayonnement de référence. Intéressons-nous maintenant à la conversion de cette énergie lumineuse en électricité.

## 1.2.2 Les cellules solaires multi-jonctions

La production d'électricité par une cellule photovoltaïque repose sur le choc entre des photons d'une certaine énergie et les électrons d'un matériau semi-conducteur. Lorsque l'énergie transmise par le photon est supérieure à une certaine quantité, appelée énergie de bande interdite ou plus communément *énergie de gap* ( $E_g$ ), propre à chaque matériau semi-conducteur, les électrons excités par les photons peuvent passer de la bande valence à la bande de conduction du semi-conducteur. Cette migration vers la bande de conduction crée un nombre équivalent de lacunes, nommées trous, dans la bande de valence. Ces paires "électrons - trous" ne sont pas stables et existent pour une durée de temps limitée (temps de vie des porteurs minoritaires). Afin d'éviter le phénomène de recombinaison, il est nécessaire de séparer durablement les paires "électron-trou". Cette séparation se fait par l'action combinée d'un champ électrique créé par la jonction p-n et par l'application d'une tension aux bornes de cette jonction ayant pour but d'extraire les charges ainsi produites par l'excitation lumineuse [18].

La caractéristique courant-tension d'une cellule solaire, plus connue sous le nom de caractéristique  $IV$ , peut se représenter par le modèle électrique d'une cellule solaire. En effet, la cellule solaire simple jonction est une diode, qui sous illumination génère un courant  $I_L$  d'intensité proportionnelle avec l'intensité de l'énergie lumineuse incidente. La courbe  $IV$  de la cellule correspond à la superposition de la caractéristique de la diode avec le courant photogénéré. Des effets résistifs limitent la génération de puissance par le dispositif. Les plus caractéristiques sont la résistance série  $R_s$  et la résistance parallèle, ou résistance shunt  $R_{sh}$ . Elles sont incluses dans la représentation électrique de la cellule selon le schéma de la figure 1.9. La courbe  $IV$  est représentée sur la figure 1.10.

Les points caractéristiques de la courbe sont : le courant généré à tension nulle, appelé courant de court-circuit  $I_{sc}$ ; la tension pour laquelle il n'y a pas de circulation de courant, appelée tension en circuit ouvert  $V_{oc}$ ; le point de puissance maximale  $P_{mpp}$ , et ses valeurs de tension  $V_{mpp}$  et de courant  $I_{mpp}$  correspondantes. A ce point est également associé le facteur de forme ou *fill factor*  $FF$ , équivalent au ratio entre le point de puissance maximale  $P_{mpp}$  et le produit  $I_{sc} \cdot V_{oc}$ . Tous ces points dépendent de la cellule considérée, de sa température, et de son illumination (intensité de la lumière, spectre, uniformité de l'illumination).

Le rendement maximal de conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique par un matériau semi-conducteur est connu sous le nom de limite Shockley-Queisser, que nous

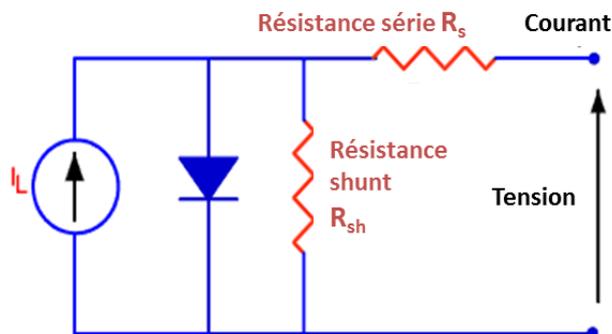


Figure 1.9: Schéma électrique d'une cellule solaire simple jonction.

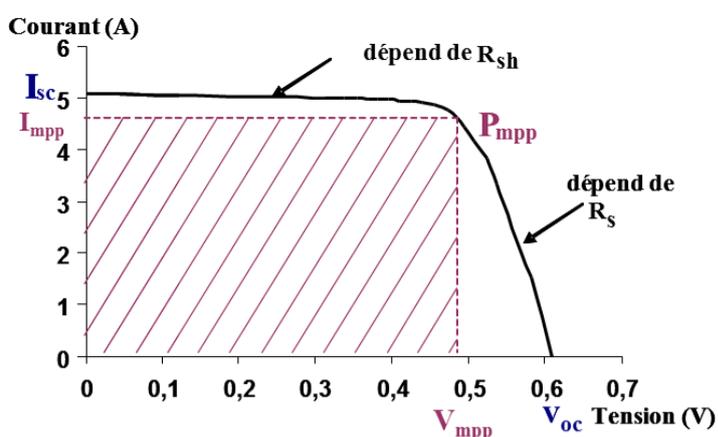


Figure 1.10: Caractéristique électrique  $IV$  d'une cellule solaire.

avons introduite précédemment. Elle se définit par la puissance maximale que l'on puisse extraire d'une jonction p-n et se situe à 33,7% pour un matériau d'énergie de gap  $E_g$  1,34 eV sous spectre solaire d'irradiance 1000 W/m<sup>2</sup> (29% pour le silicium de  $E_g$  1,1 eV). Cette efficacité passe à 42,6% [19] pour une irradiance optimisée. Cette limitation est la résultante de deux phénomènes :

- La réponse spectrale est la valeur du courant de court-circuit de la cellule par unité de flux monochromatique incident. Cette réponse spectrale est maximale pour les photons d'énergie égale à  $E_g$ . Pour les photons d'énergie supérieure (soit des longueurs d'onde inférieures), les électrons sont extraits avec un excès d'énergie perdu sous forme de chaleur. La réponse spectrale diminue alors lorsque la longueur d'onde diminue.
- Pour les photons d'énergie inférieure à  $E_g$ , la réponse spectrale est nulle : leur énergie ne peut être convertie car insuffisante pour faire passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction.

Pour augmenter la limite Shockley-Queisser, il convient de maximiser la réponse spectrale sur un maximum de longueurs d'onde. Ceci devient possible lorsque l'on combine plusieurs jonctions p-n d'énergies de gap différentes, de sorte à avoir des jonctions optimisées pour différentes longueurs d'onde. En assemblant un nombre infini de jonctions p-n, la limite de conversion atteint les 85% [6]. La figure 1.11 illustre ce principe en comparant une cellule solaire silicium simple jonction et une cellule à trois jonctions typique de modules à haute concentration. Le challenge technique consiste à assembler des matériaux d'énergie de gap  $E_g$  différente, et d'obtenir un dispositif fonctionnel et efficace sous différents spectres solaires.

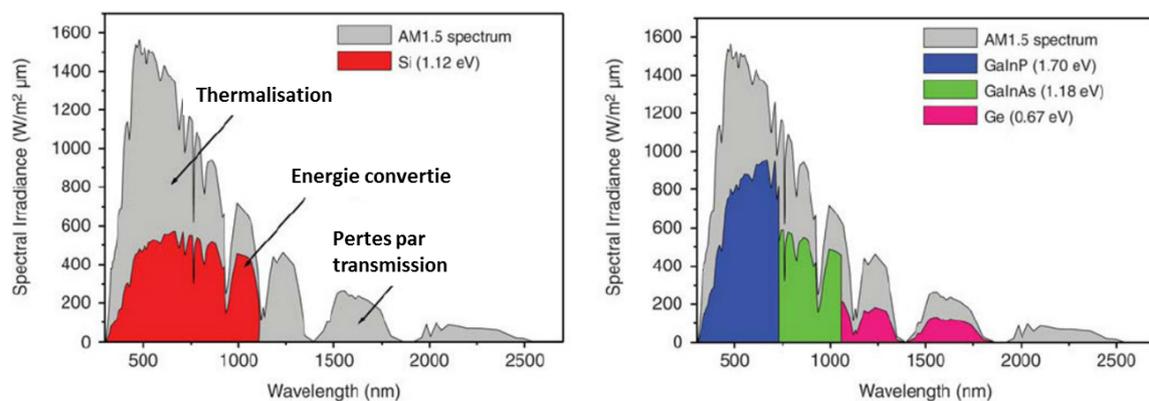


Figure 1.11: Comparaison de la conversion du spectre solaire par une cellule simple jonction Si, et une cellule multi-jonctions GaInP/GaInAs/Ge [20].

Une réponse technologique a été apportée par l'apparition des cellules multi-jonctions, qui offrent aujourd'hui les rendements records des dispositifs photovoltaïques (Fig.1.3). Les jonctions sont assemblées par ordre de décroissant d'énergie de gap  $E_g$ , de sorte à ce que la lumière traverse d'abord la couche d'énergie de gap plus élevée. Les photons d'énergie supérieure à cette énergie de gap sont converties, et ceux d'énergie inférieure atteignent la deuxième jonction. Le processus se répète alors, selon le nombre de jonctions assemblées. Les travaux de recherche ont d'abord porté sur les cellules à double jonctions GaInP/GaAs. Ces cellules comportent un empilement de deux jonctions, l'une réalisée en GaInP, matériau de gap élevé (1,85 eV) qui absorbe les photons de plus forte énergie, que l'on fait croître sur une autre cellule, fabriquée avec un matériau de gap plus faible comme le GaInAs (1,45 eV) et qui absorbe les photons d'énergie inférieure. S'est ensuite développée la cellule triple-jonctions GaInP/GaInAs/Ge (1,85eV/1,42eV/0,67eV) en combinant les gaps de chacun des matériaux des jonctions empilées, cette architecture optimise la couverture du spectre solaire, et on atteint alors des rendements supérieurs à 40% sous concentration lumineuse [21–23]. Les jonctions sont dénommées par leur position en suivant le chemin de la lumière

dans le dispositif : ainsi la jonction GaInP est dite *top*, celle en GaInAs est appelée *middle*, et enfin la *bottom* fait référence à celle en Ge<sup>1</sup>. Ces cellules sont produites industriellement et équipent la plupart des modules photovoltaïques à concentration commerciaux. Les cellules les plus efficaces à ce jour possèdent quatre jonctions [24], mais ne sont pas encore intégrées dans des modules commerciaux. La figure 1.12 représente l'architecture des différentes couches matériaux au sein d'une cellule de type GaInP/GaInAs/Ge.

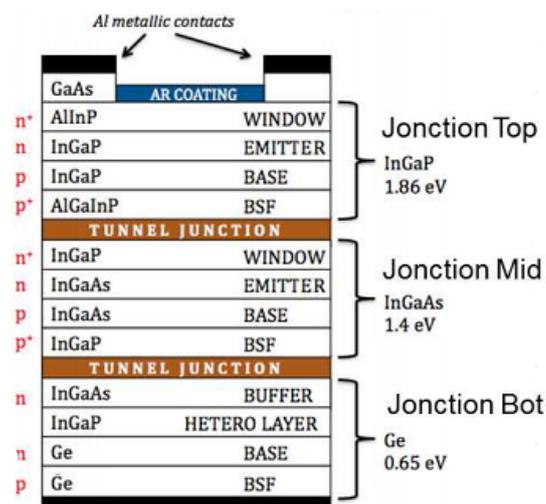


Figure 1.12: Structure simplifiée d'une cellule triple-jonctions à croissance monolythique, de type GaInP/GaAs/Ge [20].

Intéressons-nous maintenant à la variation des paramètres électriques principaux (tension de circuit ouvert  $V_{oc}$ , courant de court-circuit  $I_{sc}$ , rendement  $\eta$ ) avec trois grandeurs importantes : la concentration, le spectre et la température de la cellule. Nous tâcherons de dresser les grandes lois régissant ces variations, sans détailler les principes physiques engendrant ces phénomènes sur lesquels nous reviendrons dans la suite du mémoire :

- **Influence de la concentration** : le niveau d'irradiance a un effet direct sur la génération de courant de la cellule multi-jonctions. Pour un spectre donné, on assume une relation de linéarité entre la densité de courant de court-circuit  $J_{sc}$  et l'intensité lumineuse reçue [25]. La tension en circuit ouvert  $V_{oc}$  varie avec le taux de concentration  $X$  défini précédemment, selon une loi logarithmique :

$$V_{oc}(X) = V_{oc,ref} + \frac{kT_{cell}}{q} \ln(X) \quad (1.1)$$

<sup>1</sup>Nous conserverons les acronymes anglais, pour des questions de cohérence avec la littérature

Avec  $k$ ,  $T_{cell}$  et  $q$ , respectivement la constante de Boltzmann ( $1,380266E-23$  J/K), la température de cellule et la charge de l'électron ( $1,60218E-19$  Coulomb). L'indice *ref* fait référence aux conditions standards de mesure, soit une irradiance de  $1000$  W/m<sup>2</sup>.

Le rendement à une certaine concentration  $X$  peut s'obtenir à partir de l'équation suivante:

$$\eta(X) = \frac{FF(X) \cdot V_{oc}(X) \cdot I_{sc}(X)}{X \cdot P_{in,ref}} \quad (1.2)$$

Avec  $P_{in,ref}$  la puissance lumineuse sur la cellule équivalente à  $1000$  W/m<sup>2</sup>.

On en déduit:

$$\eta(X) = \eta_{ref} \cdot \left( \frac{FF(X)}{FF_{ref}} \right) \cdot \left( 1 + \frac{\frac{kT_{cell}}{q} \cdot \ln(X)}{V_{oc,ref}} \right) \quad (1.3)$$

Ainsi l'augmentation de la tension de circuit-ouvert  $V_{oc}$  avec la concentration va accroître le rendement de la cellule. Cependant, cette tendance est limitée par les pertes par résistance série qui augmentent quadratiquement avec le courant photogénéré, et entraînent une diminution du facteur de forme  $FF$ . A une certaine concentration, ces pertes deviendront le facteur limitant et le rendement ne pourra alors plus augmenter. Il existe donc une concentration pour laquelle le rendement est maximal, concentration à prendre en compte dans la conception d'un module. Ce phénomène est illustré par la figure 1.13. Les concentrations optimales se situent autour de plusieurs centaines de soleils pour les cellules multi-jonctions actuelles [27]. Il est intéressant de noter que les cellules multi-jonctions ont l'avantage de présenter une tension élevée et un courant faible en rapport à une cellule simple jonction type silicium. Les pertes ohmiques en sont d'autant plus réduites, ce qui les rend plus favorables aux applications concentrées.

- **Influence du spectre incident** : La densité de courant générée  $J_{sc,i}$  par une jonction  $i$  peut s'obtenir en multipliant la réponse spectrale  $SR_i(\lambda)$  par le spectre lumineux incident  $E(\lambda)$ , avec  $\lambda$  correspondant à la longueur d'onde, selon l'équation 1.4 :

$$J_{sc,i} = \int_{\lambda} SR_i(\lambda) E(\lambda) d\lambda \quad (1.4)$$

Dans les dispositifs considérés dans cette thèse, les jonctions sont au nombre de trois, assemblées en série. Cette architecture engendre une limitation de courant de la cellule par la jonction générant le courant le plus faible. L'excès de courant des autres jonctions est perdu sous forme de chaleur. Afin de maximiser le courant pour un spectre solaire donné, il est alors souhaitable d'avoir un bon équilibre entre les courants de chaque jonction. Il est possible d'agir sur ce courant en modifiant le

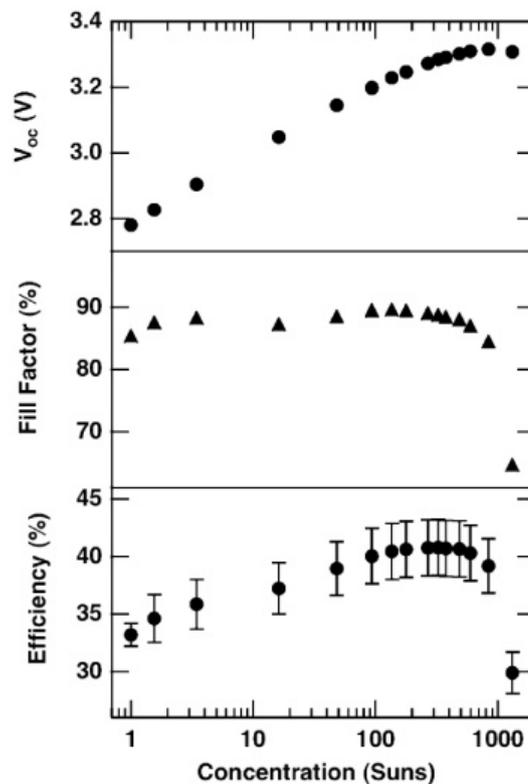


Figure 1.13: Variation du rendement, du fill factor  $FF$  et de la tension  $V_{oc}$  d'une cellule triple-jonctions avec le facteur de concentration  $X$  [26].

matériau (donc son énergie de gap), et son épaisseur. Le design global de la cellule est généralement optimisé pour un spectre donné, typiquement le spectre AM1.5D. Ce spectre, comme nous l'avons expliqué précédemment, se veut représentatif du spectre atteignant la Terre. Il correspond également au spectre utilisé dans les protocoles de tests intérieurs servant à caractériser les modules CPV [11]. Mais les variations de position du soleil et les conditions atmosphériques locales modifient la transmission de la lumière. Nous constatons donc d'importantes variations spectrales, qui vont impacter le fonctionnement des cellules multi-jonctions de manière plus significative que pour des cellules silicium à simple jonction. Ces variations ont été étudiées théoriquement [28–30] et expérimentalement en laboratoire sur des cellules [31]. A l'échelle du module et pour des conditions extérieures de fonctionnement, des méthodes ont été développées pour étudier cette sensibilité spectrale [32, 33] (nous reviendrons sur ces procédés dans le chapitre 2). Cependant, peu de laboratoires disposent de tels outils et davantage de recherche sur l'influence des optiques de concentration sur la sensibilité spectrale des modules CPV est nécessaire.

- Influence de la température cellule** : la température va avoir un effet sur la réponse spectrale de la cellule, engendrant un décalage de l'énergie de gap vers des valeurs inférieures [34]. Ce phénomène, observable sur la réponse spectrale (fig. 1.14), a pour conséquence une baisse de la tension en circuit-ouvert de chaque sous-cellule, engendrant une baisse de la tension en circuit ouvert  $V_{oc}$  de la cellule, mais dans une moindre mesure que pour les cellules silicium [30]. Alors que la valeur typique du coefficient thermique en tension  $dV_{oc}/dT_{cell}$ , appelé  $\beta_{V_{oc}}$ , est de l'ordre  $-0,4\%/^{\circ}\text{C}$  pour le silicium, ce coefficient est plus faible pour les cellules triple-jonctions. De plus, il a la particularité de dépendre de la concentration. Pour les cellules triple-jonctions utilisées dans le cadre de ce travail, plusieurs études ont montré des valeurs de l'ordre de  $-0,3\%/^{\circ}\text{C}$  pour une irradiance de 1 soleil, qui diminue pour atteindre  $-0,12\%/^{\circ}\text{C}$  à 1000 soleils [35]. La deuxième conséquence de ce décalage de la réponse spectrale est la modification du courant de court-circuit. Cette variation est en générale faible, et positive, puisque nous observons une diminution de l'énergie de gap du matériau et donc une partie plus importante de photons convertibles en électrons. Des coefficients thermiques en courant  $\alpha$  de l'ordre de  $0,07\%/^{\circ}\text{C}$  sont généralement admis, bien que d'autres valeurs ont déjà été reportées dans la littérature [36]. La variation de ce coefficient avec la concentration n'a pas encore été précisément mesurée, du à la difficulté de faire varier la concentration sans impacter le spectre.

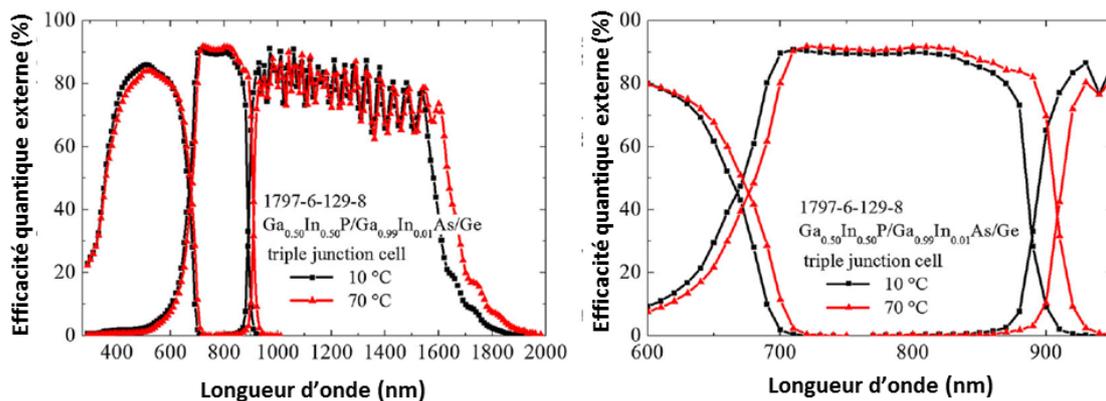


Figure 1.14: Efficacité quantique externe d'une cellule triple-jonctions classique à 10°C et à 70°C [36]. Le graphe de gauche présente les 3 jonctions, alors que le graphe de droite est un zoom sur la région 'middle', où l'on observe le décalage de la réponse vers les grandes longueurs d'onde pour une température plus élevée.

### 1.2.3 Les optiques à concentration et leurs caractéristiques

Afin de réduire la surface de cellule, et de profiter des rendements plus élevés de la cellule à haute concentration, il est nécessaire de concentrer la lumière plusieurs centaines de fois sur la cellule. La concentration peut se faire en une étape : le disque solaire est directement dirigé sur la cellule via une optique primaire; ou en deux étapes : les rayons sont concentrés sur une optique secondaire placée au-dessus de la cellule. Le recours à une optique secondaire a différents objectifs : augmenter la concentration, homogénéiser le flux sur la cellule, ou encore augmenter l'angle d'acceptance du module, notion définie par la suite.

Pour ce qui est de l'optique primaire, la vaste majorité des technologies actuelles utilisent des systèmes réfractifs (lentilles), focalisant la lumière en un point. Il existe d'autres manières de concentrer la lumière : miroir parabolique, guide d'onde, concentrateur linéaire en sont les exemples les plus connus. Mais la disponibilité des lentilles sur le marché, leur coût et leur fabrication à façon tendent à imposer la lentille dans les systèmes HCPV. Ce concentrateur peut se retrouver principalement sous deux formes dans le cadre de la technologie CPV : plano-convexe ou à motifs de Fresnel. C'est ce dernier type qui est le plus répandu dans les modules commerciaux actuels.

#### Les optiques primaires à base de lentille de Fresnel

Les raisons pour lesquelles la lentille de Fresnel est préférée à une lentille plano-convexe sont les mêmes qui conduisent à sa première utilisation dans l'éclairage par Augustin Jean Fresnel en 1822. Il s'agit d'une lentille plano-convexe découpée de sections annulaires concentriques optimisées pour alléger l'élément et augmenter la transmission. Pour chacune des sections, la courbure est conservée, mais l'épaisseur réduite. Sur la figure 1.15, l'équivalent de Fresnel d'une lentille plano-convexe est représenté. Ainsi les lentilles convexes, à faible *nombre-f* (rapport entre la distance focale et le diamètre de la lentille), peuvent être aplanies, résultant en un gain de poids, de taille et logiquement, de coût. C'est aujourd'hui le concentrateur le plus utilisé.

Deux procédés sont utilisés actuellement pour fabriquer ces lentilles, l'un utilisant du silicone et l'autre du plastique de type *polymethyl methacrylate* ou PMMA. Dans le cas du silicone, celui-ci est moulé sur du verre [38]. Le côté verre fait alors face à l'extérieur, et aux éléments comme la pluie ou le vent. Pour le PMMA, la lentille est entièrement en plastique et fabriquée par moulage [39]. A transmittance égale, le choix entre ces deux matériaux peut se faire en fonction des problématiques suivantes :

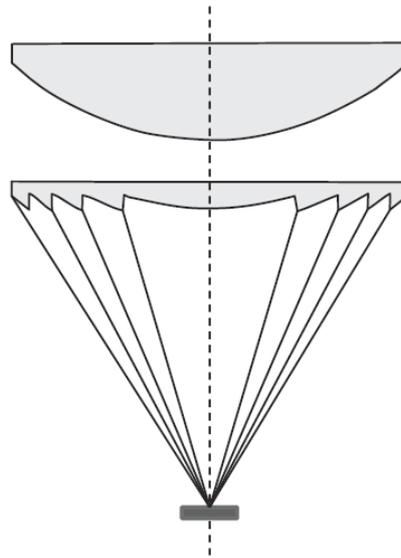


Figure 1.15: Schéma du concept de la lentille de Fresnel [37].

- Les lentilles en PMMA sont généralement moins coûteuses à fabriquer [40], mais la problématique de ce matériau est sa fiabilité à long terme, impactée par la dégradation due aux rayons ultraviolets et à l'abrasion [41].
- Les lentilles de type SoG se comportent mieux face aux rayons UV. L'inconvénient de cette solution provient de la différence de coefficient thermique d'expansion entre le verre et le silicone. Cette différence est source de contraintes et de déformation qui vont affecter les performances de la lentille à différentes températures [42, 43].

Dans le cas d'un système utilisant une lentille de Fresnel, il existe une certaine limite à la concentration maximale atteignable par l'optique. Deux phénomènes inhérents aux lentilles, ainsi qu'un troisième plus spécifique aux lentilles de Fresnel, limitent cette valeur. Premièrement, les rayons solaires ne sont pas parfaitement parallèles, ils atteignent le sol avec une ouverture angulaire de  $\pm 0,27^\circ$ . De ce fait le spot lumineux au point focal n'est pas ponctuel. Deuxièmement, un phénomène inhérent aux optiques réfractives, sur lequel nous reviendrons plus tard, est le phénomène d'aberrations chromatiques. Il est causé par la variation de l'indice de réfraction du matériau composant la lentille en fonction de la longueur d'onde. Il en résulte que la focale n'est pas située au même endroit pour toutes les longueurs d'onde du spectre. Ceci a pour conséquence une augmentation de la taille du spot lumineux, et une inhomogénéité spectrale du spot [44]. Troisièmement, la forme des dents de la lentille de Fresnel n'est pas idéale, le procédé de fabrication induisant des défauts géométriques. Cette imperfection va aussi engendrer un élargissement du spot lumineux.

Ces trois phénomènes sont importants dans la mesure où la taille du spot impacte directement la précision avec laquelle le soleil doit être suivi. Plus le spot est étendu par rapport à la taille de la cellule, plus il aura tendance à sortir de la cellule lors d'un léger désalignement, causant une perte de flux lumineux sur la cellule. En conséquence, il existe un lien direct entre concentration et angle d'acceptance du module. Ainsi, bien qu'en théorie il soit possible d'atteindre des taux de concentrations de 1000 avec un angle d'acceptance de  $\pm 2,5^\circ$  dans le cas d'optique idéal (pas d'aberrations, forme des dents idéal), les systèmes actuels avec une seule optique se situent plutôt autour de  $\pm 0,4^\circ$  pour des concentrations de l'ordre de 500 fois [43, 45]. Ce rapport entre angle d'acceptance et concentration est primordial, et de manière générale plus la concentration augmente plus l'angle d'acceptance diminue. Afin de préserver un bon compromis entre ces grandeurs, il est nécessaire d'avoir recours à des optiques secondaires.

### Les optiques secondaires

Nous avons vu que les concentrateurs réels diffèrent des concentrateurs idéaux, notamment du fait d'aberrations chromatiques et de la forme des dents de la lentille de Fresnel. En plaçant une deuxième optique directement sur la cellule, aux abords de la focale de l'optique primaire, il est possible d'améliorer l'acceptance angulaire et la concentration [45]. Ce type de dispositif homogénéise le flux sur la cellule [46]. Les inhomogénéités (spectrales et spatiales) créées par l'optique primaire sont en partie "corrigées", et de facto les pertes associées à ces inhomogénéités réduites. Cette deuxième optique constitue toutefois une nouvelle interface optique source de pertes, ainsi qu'un nouvel élément à intégrer au module. Cette intégration tend à complexifier la conception et la fabrication, dans la mesure où la position de l'optique secondaire est un point critique et qu'il faille l'intégrer sur une cellule sans la dégrader ni l'endommager. Il existe donc un compromis entre l'optimisation des performances du module, et l'augmentation des coûts suite à l'ajout d'une optique secondaire.

Il existe aujourd'hui une certaine variété de conception dans les optiques secondaires, qui peuvent être regroupées en deux types :

- Les optiques secondaires réfléchives : il s'agit de réflecteurs tridimensionnels creux. Ils ont l'avantage d'être facilement usinables, mais ne sont pas 100% réfléchifs (la réflexion est plutôt proche de 85%). Ils vont donc se comporter très bien lors d'un très bon alignement, puisqu'il ne se situe pas (ou peu) sur le passage des rayons lumineux. Ces optiques vont en revanche impacter la performance du module lorsque les rayons sont réfléchis [47]. Nous pouvons citer entre autre la pyramide tronquée inversée (XTP, le X faisant référence à réflexion et TP pour *Truncated Pyramid*) [48].

- Les optiques secondaires réfractives : plus répandues, elles sont constituées d'un diélectrique transparent (du verre ou du plastique typiquement) qui redirige les rayons vers la cellule. Elles présentent l'avantage de protéger la cellule, et montrent une bonne réflectivité interne (près de 100%). En revanche, il est nécessaire de les coupler à la cellule, et elles s'avèrent plus coûteuses que les optiques réfléchives. La palette d'optiques secondaires réfractives utilisées dans des modules commerciaux est plus large que pour les optiques réfléchives : on citera ainsi la pyramide réfractive inversé (RTP, pour *Refractive Truncated Pyramid*) [49], le dôme [50], ou encore le diélectrique à réflexion totale interne (DTIRC pour *Dielectric Total Internal Reflector*) [51]. Pour ces deux derniers exemples, il est important de mentionner l'aspect non-imageant de ces optiques, le principe étant de maximiser l'intensité de la lumière atteignant la cellule, en s'affranchissant de la contrainte imageante des dispositifs optiques classiques [52].

Une partie représentative de ces optiques a été étudiée par les laboratoires de l'*Instituto de Energia Solar* de l'Université Polytechnique de Madrid (IES-UPM). Leur efficacité optique, critère de performance des optiques de concentrations que nous détaillerons par après, a été calculée par simulation optique pour un angle de désalignement allant jusqu'à  $2^\circ$ . La figure 1.16 illustre les profils des optiques étudiées et les résultats obtenus.

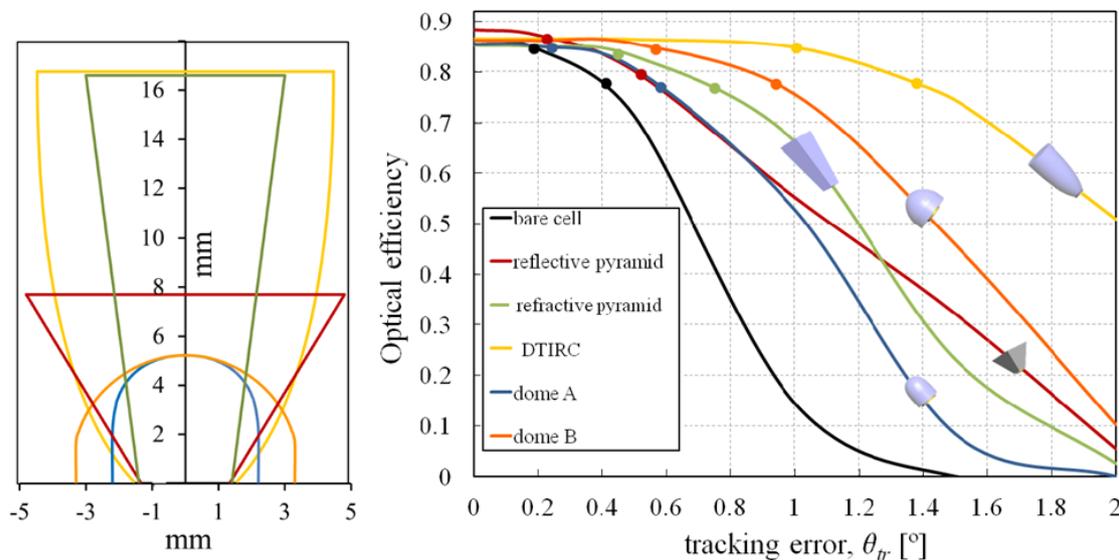


Figure 1.16: Profil 2D de différentes optiques secondaires (gauche) et courbes de transmission angulaire pour ces mêmes optiques (droite). Les dispositifs testés sont : pas d'optiques secondaire (noir), la pyramide réfléchive (rouge) et réfractive (vert), le diélectrique à réflexion interne totale (DTIRC)(jaune), un dôme A (bleu) et un dôme B(orange) [43].

Nous constatons que l'efficacité optique maximale est obtenue à incidence normale, lorsque le dispositif est aligné. Ensuite, le dispositif sans optique secondaire (*bare cell* sur le graphe) présente les performances les plus faibles en terme de transmission angulaire. L'ajout d'une deuxième optique permet d'accroître la tolérance au désalignement entre l'axe optique et l'angle d'incidence des rayons. Dans le cas de l'optique réfléchive, nous observons une efficacité maximale supérieure aux autres dispositifs réfractifs, puisque la lumière atteint la cellule de manière directe sans rebondir sur les parois du dispositif. L'ajout d'une interface air-verre dans le cas des optiques secondaires réfractives induit des pertes supplémentaires.

La conception de telles optiques est réalisée à l'aide d'outils de modélisation, en fonction de critères diverses: maximisation de la puissance lumineuse en sortie, uniformité du faisceau ou encore tolérance au désalignement. Cependant, le comportement réel des optiques peut différer du fait des approximations et incertitudes inhérentes aux outils de simulation. Des moyens de mesure avancés, sur lesquels nous reviendrons dans le chapitre 3, sont alors nécessaires pour caractériser le comportement de l'optique, et estimer le rôle de ce comportement sur les performances électriques du module.

### Caractéristiques des optiques à concentration

Plusieurs grandeurs permettent d'analyser les performances d'optiques de concentration. Nous allons d'abord définir les trois grandeurs principales qui servent à caractériser des optiques de concentration : le rendement optique, l'uniformité de la lumière sur la cellule, et l'angle d'acceptance. Nous verrons ensuite dans quelle mesure la température de fonctionnement, variable en conditions extérieures, affecte les propriétés des optiques de concentration.

#### Le rendement optique

Le concept de rendement optique  $\eta_{optique}$  est le premier critère de performance d'un concentrateur. Il se définit par le rapport entre la puissance en sortie du concentrateur  $P_{out}$  sur la puissance lumineuse en entrée du concentrateur  $P_{in}$ . Il peut ainsi s'exprimer par la formule de l'équation 1.5, où  $G$  correspond à la puissance lumineuse par unité de surface (irradiance), et  $A_{in}$  et  $A_{out}$  correspondent à l'aire considérée en entrée et en sortie du concentrateur :

$$\eta_{optique} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{G_{out} \cdot A_{out}}{G_{in} \cdot A_{in}} \quad (1.5)$$

Les éléments optiques modifient généralement le spectre de la lumière incidente, de par l'absorption de certaines longueurs d'onde et la dispersion des couleurs. C'est pourquoi

$\eta_{optique}$  est une grandeur spectrale, de sorte à ce qu'il existe un rendement optique pour chaque longueur d'onde.

Il est également important de bien définir la position et l'aire de surface de sortie (la cellule, ou l'entrée de l'optique secondaire peuvent par exemple être utilisées comme surface de sortie). En effet, pour une taille de cellule donnée, il est possible que certains rayons lumineux convergent à l'extérieur de cette surface. De la même manière, au delà d'une certaine taille de cellule, la puissance lumineuse collectée n'augmente plus de manière significative. Connaître cette variation entre rendement optique et taille de cellule est essentiel lors de la conception du module.

### L'homogénéité de la lumière

La deuxième grandeur importante concerne l'homogénéité de la lumière sur la surface de la cellule. Les optiques, conçues sans critère d'uniformité, produisent un spot lumineux non-uniforme sur la cellule. Cette inhomogénéité de la lumière sur la cellule se caractérise par une grandeur appelé *Peak-to-Average Ratio*, soit PAR, et se définit par l'irradiance maximale observée divisée par la moyenne d'irradiance pour la surface considérée.

Dans le cas d'optiques réfractives, les aberrations chromatiques vont ajouter des non-uniformités spectrales à ces inhomogénéités spatiales. Chaque point de la cellule voit alors un spectre différent, et le courant produit va varier en conséquence. Nous constatons de ce fait des pertes associées à ces phénomènes. Premièrement, un excès de courant localisé va accentuer les effets de résistance série [53], mais aussi d'augmenter la température localement. Ensuite, les inhomogénéités spectrales créent une limitation du courant qui varie spatialement : certaines zones de la cellule peuvent être limitées par la sous-cellule *top* par exemple, et d'autres parties peuvent être limitées par la sous-cellule *middle* [44]. Il en résulte des phénomènes de perte qui font l'objet d'un intérêt croissant. Leurs études nécessitent des moyens innovants, capables de reproduire des non-uniformités sous flux concentré, avec des dispositifs de mesure adapté.

### L'angle d'acceptance

L'angle d'acceptance est une grandeur caractérisant la tolérance angulaire d'un module au désalignement  $\alpha$  entre sa normale et les rayons solaires incidents. Pour le déterminer, il est nécessaire de connaître la variation de la puissance du module en fonction de l'angle de désalignement : cette fonction est appelée la courbe de transmission angulaire. L'angle d'acceptance  $AA_{90\%}$  est alors défini par l'angle pour lequel la puissance atteint 90% de la puissance maximum (typiquement pour  $\alpha = 0^\circ$  où l'optique primaire se situe dans un plan

perpendiculaire aux rayons du soleil). La figure 1.17 représente la courbe de transmission angulaire d'un module CPV, où l'on peut observer la valeur  $AA$  correspondant à l'angle d'acceptance. L'angle d'acceptance est un des plus importants facteurs de qualité d'un module CPV avec le rendement optique et le rendement cellule. Il définit la robustesse du design optique face au désalignement du suiveur solaire. Il impacte donc directement le coût du suiveur et la production d'énergie.

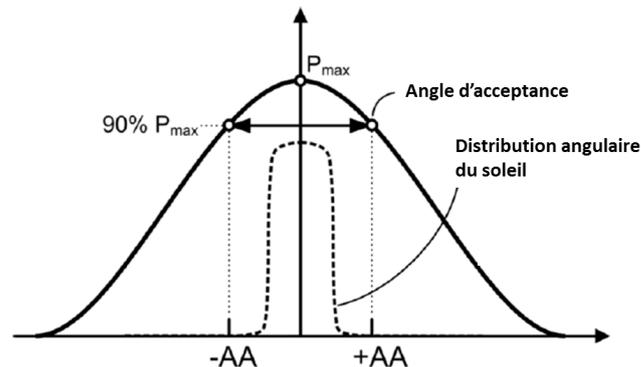


Figure 1.17: Courbe de puissance d'un module CPV en fonction de l'angle de désalignement de l'axe optique du module par rapport aux rayons incidents. La distribution angulaire de l'énergie du disque solaire est représentée à titre comparatif. L'angle d'acceptance est défini pour une puissance égale à 90% de la puissance maximale [37].

### Effet de la température sur les performances de la lentille

En fonctionnement réel, les optiques sont exposées à différentes conditions ambiantes, notamment de température et d'humidité. Comme nous l'avons vu, les lentilles équipant les modules commerciaux sont en silicone ou en PMMA. Ces deux matériaux présentent la particularité d'avoir des coefficients thermiques d'expansion (CTE) bien supérieurs au verre (plus de 10 fois supérieur). Cette expansion thermique plus significative conduit à une variation de l'indice de réfraction en fonction de la température [54], et une déformation de la lentille. Ces deux phénomènes vont modifier la distribution spatiale et spectrale sur la cellule et ainsi impacter le fonctionnement du module CPV.

Des études récentes ont cherché à quantifier et mieux comprendre cet impact pour les modules à lentille PMMA ou SoG [55, 56]. Dans le cas du PMMA et du silicone, nous observons une expansion de la matière constitutive de la lentille. Pour la lentille SoG, la différence de CTE entre le verre et le silicone crée des modifications de la structure de Fresnel. La première conséquence est une modification de la distance focale avec la variation d'indice de réfraction. Ensuite pour le SoG, la différence de CTE provoque un stress mécanique au

contact des deux matériaux. Celui-ci est absorbé par une déformation du profil des dents de Fresnel en silicone, matériau élastique. Ces déformations sont très faibles mais peuvent affecter la taille de la tâche lumineuse sur la cellule [43]. Les résultats expérimentaux et de modélisation des différentes études ont montré que l'influence de la température de lentille n'est pas négligeable. Elle dépend essentiellement de la distance cellule-lentille de départ et de la température à laquelle la lentille a été durcie [57] (nous reviendrons sur ces aspects dans le chapitre 4). Dans la mesure où les technologies CPV sont amenées à fonctionner dans des climats avec une large gamme de températures ambiantes, il est essentiel de comprendre comment la température de lentille varie avec ces conditions et quel rôle, encore mal connue aujourd'hui, joue cette température sur la production d'énergie.

#### 1.2.4 Vers un système fonctionnel

Afin que le dispositif cellule-optique soit opérationnel et fonctionnel en extérieur, les différents éléments doivent être assemblés mécaniquement. L'assemblage de ces éléments est visible sur la figure 1.18.

Tout d'abord la cellule est intégrée sur un substrat, métallique ou isolé électriquement. Ce dernier est un élément structurel, qui agit comme interface entre la cellule et le reste du module. Une bonne conductivité thermique est requise afin d'évacuer la chaleur générée par la lumière concentrée non convertie en électricité. L'assemblage de la cellule sur le récepteur se fait par brasure, et la connexion électrique de la face supérieure de la cellule est réalisée par le procédé dit *wire-bonding*. Comme évoqué précédemment, il est possible de placer une optique secondaire sur le dessus de la cellule. Cet ensemble substrat-cellule-optique secondaire correspond au récepteur CPV.

Ensuite, les lentilles sont maintenues à une position fixe des cellules dans un assemblage appelé module. Ce module doit être rigide, tout en minimisant les déformations issues des conditions thermiques variables, et étanche aux intempéries. Les lentilles sont généralement accolées en un seul ensemble, un parquet de lentilles, pour des raisons évidentes de facilité d'assemblage. Le plan des récepteurs est parallèle aux lentilles, et a comme fonction de dissiper la chaleur à l'extérieur du module. Selon la puissance à évacuer, il peut être opportun d'ajouter des dissipateurs thermiques placés à l'arrière du module, au dos des récepteurs. L'architecture électrique du module varie selon les fabricants et le nombre de cellules, mais il est en général préférable d'assembler les cellules en série pour minimiser le courant des modules et donc les pertes ohmiques.

Compte-tenu des faibles angles d'acceptance des assemblages (de l'ordre du degré), les modules HCPV sont montés sur des suiveurs solaires deux axes. La structure doit être suffisamment rigide, pour que les rayons du soleil atteignent l'ensemble des cellules avec

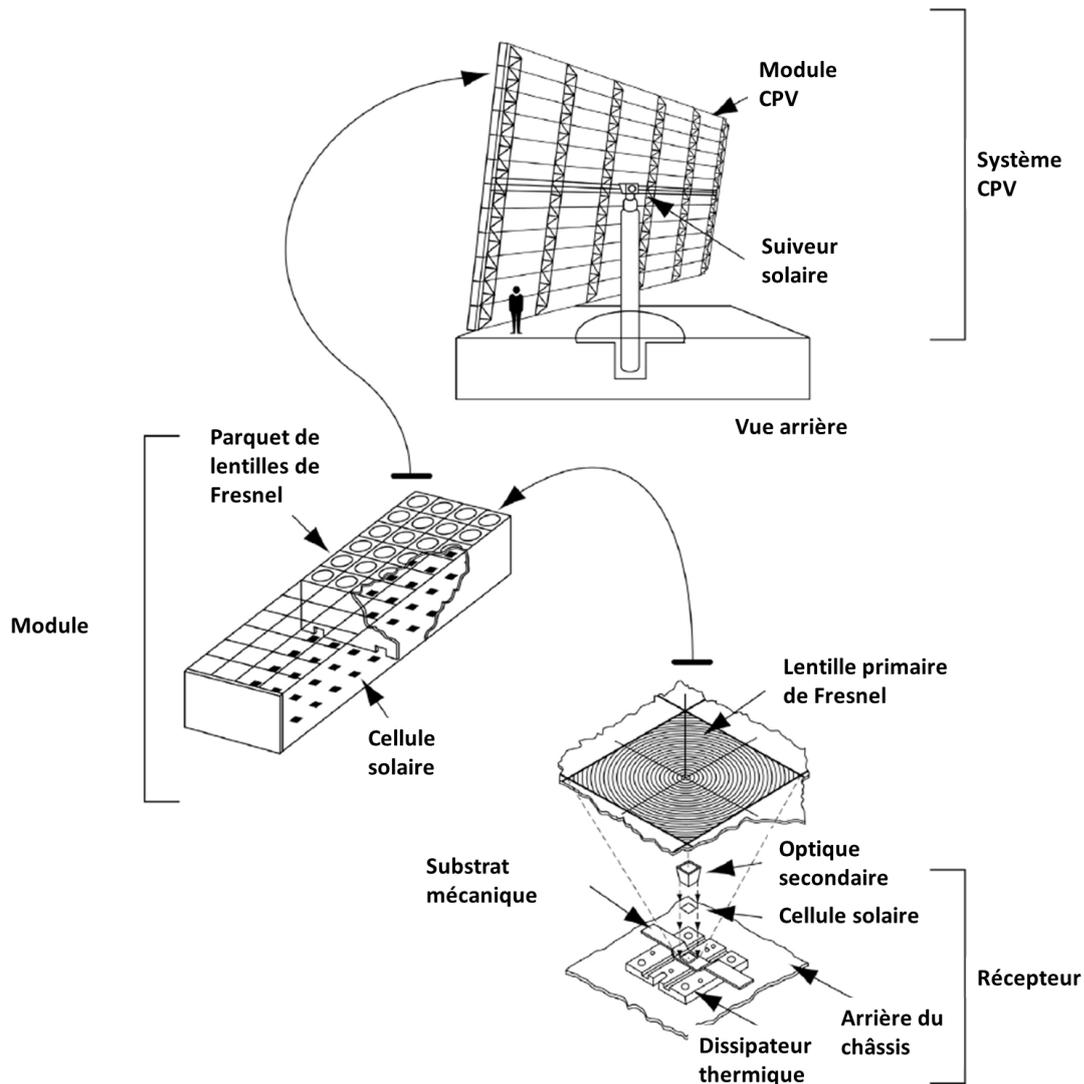


Figure 1.18: Vu éclaté des éléments d'un système CPV, de la cellule jusqu'au suiveur solaire [58].

la même intensité lumineuse. Une bonne précision de suivi, combiné à une tolérance au désalignement, est indispensable pour minimiser les pertes de productible.

### 1.3 Travail de recherche proposé

Cette introduction a permis de mettre en exergue deux spécificités des modules CPV par rapport aux module PV. Premièrement, l'utilisation de cellules multi-jonctions implique une sensibilité accrue aux conditions d'irradiance variables. Ensuite, le recours à des optiques de concentration ajoute de la complexité aux modules. Le comportement thermique, l'uniformité

du faisceau, la sensibilité à l'alignement sont autant de phénomènes susceptibles d'impacter les performances du module. Mieux comprendre l'impact de ces phénomènes est essentiel à l'amélioration du design des modules et à l'optimisation de l'ensemble optique-cellule.

### 1.3.1 Contexte et objectifs

Le laboratoire CPV du service des modules photovoltaïques du CEA à l'INES, au sein duquel a été réalisée cette thèse, a été créé en 2011. En tant que groupe de recherche récent, il a choisi de centrer son expertise sur le développement d'outils de caractérisation avancée dédiés aux systèmes CPV sur toute la chaîne de valeur, de la cellule au système. Cette expertise aujourd'hui reconnue internationalement le place en tant qu'acteur majeur dans les domaines suivants : la caractérisation de modules en intérieur et en extérieur, le design et prototypage de solutions innovantes, la simulation/modélisation d'optiques de concentration, et l'étude des suiveurs solaires. L'aspect pluridisciplinaire, et l'approche globale privilégiée a permis au laboratoire d'acquérir une certaine reconnaissance à l'international. En témoigne la conférence internationale CPV-11 organisée à Aix-les-Bains par le laboratoire en Avril 2015.

Cette thèse s'inscrit dans cet esprit multi-disciplinaire du groupe de recherche, ainsi que cette montée en puissance de 2012 à 2015. Le travail réalisé a visé une consolidation des savoirs du groupe dans un premier temps. Ensuite, en s'appuyant sur les dispositifs obtenus par le biais de projets aussi bien institutionnels que industriels, il s'est orienté vers la mise en place de protocoles et de moyens de caractérisation essentiels à une meilleure compréhension de la technologie CPV. Ces outils ont permis l'étude des performances dans des conditions réelles de fonctionnement dans un premier temps, puis dans un second temps une analyse approfondie en intérieur de certains des phénomènes de pertes énergétiques des modules CPV. En résumé, le travail de thèse a pour objectifs :

- D'étudier et analyser comment la performance des modules CPV varie en fonction des conditions environnementales réelles. Les sujets suivants sont traités : comment les paramètres électriques sont affectés par des conditions d'ensoleillement variables? Quel part joue le comportement thermique de l'optique dans les pertes de performance?
- De mettre en place des moyens de mesure en intérieur capables d'étudier les phénomènes de perte. Nous tentons de répondre aux questions suivantes : Comment l'imagerie du spot lumineux permet-elle de mieux comprendre les phénomènes de perte? Dans quelle mesure ce spot lumineux est modifié par l'architecture optique, et son comportement avec la température? Quelles en sont les conséquences en matière de performance?

### 1.3.2 Structure du travail de thèse

Après ce premier chapitre introductif sur la technologie CPV, le rapport de thèse est suivi de quatre chapitres :

- Le chapitre 2 traite du fonctionnement des modules en conditions réelles. Quatre technologies, avec des architectures optiques différentes, seront testées et étudiées. Nous verrons les moyens mis en œuvre pour réaliser cette étude et acquérir les données de mesure nécessaire. A partir de ces données, un travail d'analyse sera réalisé et permettra de corrélérer l'évolution des paramètres électriques avec les conditions environnementales. Une attention particulière sera portée sur l'impact de la température de la lentille sur les performances des modules.
- Dans le troisième chapitre, nous aborderons l'évaluation des performances de dispositifs optique-cellule en intérieur. Le développement d'un outil de caractérisation optique et électrique sera détaillé. Cet outil, appelé METHOD, permet de mesurer l'irradiance sur la cellule, et d'étudier ses variations en fonction de la distance focale ou de la température de lentille. La mise en place de tels outils nécessite une bonne compréhension des subtilités liées à la mesure sous lumière pulsée, ainsi qu'une caractérisation approfondie du moyen de mesure. Nous verrons comment l'imagerie du spot lumineux et les mesures électriques permettent d'obtenir des informations clés quant aux performances du module dans différentes conditions d'irradiation et de fonctionnement.
- Le quatrième chapitre aura pour sujet l'étude de différentes architectures optique-cellule. A partir des moyens de mesure développés, une analyse approfondie du fonctionnement des différents dispositifs sera effectuée. Nous nous pencherons ici sur l'analyse des phénomènes de perte dans des conditions d'opération variables et l'accent sera alors mis sur l'importance d'optimiser un module pour des conditions variables de fonctionnement. Les différents dispositifs étudiés seront comparés et nous nous pencherons plus spécifiquement sur la comparaison entre systèmes avec et sans optique secondaire.
- Finalement, les principaux résultats scientifiques de la thèse seront résumés dans le chapitre 5 de conclusion et de futurs axes de recherche seront évoqués. Les publications effectuées dans des journaux, ainsi que les contributions à des conférences internationales, seront présentées en fin de mémoire de thèse.

## **Chapitre 2**

# **Étude des performances des modules CPV en conditions réelles de fonctionnement**

Ce deuxième chapitre est consacré à l'étude des performances électriques et optiques des modules CPV en fonction de paramètres environnementaux variables. Nous verrons tout d'abord en quoi le comportement en extérieur d'un module CPV diffère de celui d'un module à technologie silicium sans concentration, et pourquoi nous observons une plus grande variabilité des performances pour le photovoltaïque à concentration. Ensuite, nous décrirons le banc de mesure et les données pertinentes à mesurer pour analyser le fonctionnement du module en conditions réelles. Quatre technologies équipées de cellules triple-jonctions, mais d'architectures optiques différentes, ont été analysées sur différentes périodes temporelles. Nous montrerons alors l'importance du travail de filtrage des données, via la mise en place d'un logiciel adapté, pour la phase d'analyse des mesures. Les critères de performance des différents modules seront étudiés et comparés sous l'angle de différentes variables, telles que l'ensoleillement, la température de cellule, la composition du spectre solaire, ou encore la température de lentille.

### **2.1 De la variabilité des performances des modules en extérieur**

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, les caractéristiques électriques d'un module CPV sont affectées par un certain nombre de paramètres environnementaux. Dans le cas du photovoltaïque non concentré utilisant des cellules à simple jonction, les performances

dépendent principalement de l'irradiance et de la température de cellule. Pour le CPV, basé sur des cellules multi-jonctions, d'autres paramètres vont impacter le comportement du module, tels que le spectre, la température de l'optique ou l'angle d'incidence de la lumière, entre autres. Afin d'illustrer cette variabilité, la figure 2.1 représente les rendements d'un module CPV équipé de cellules III-V en conditions réelles mesurés sur un an.

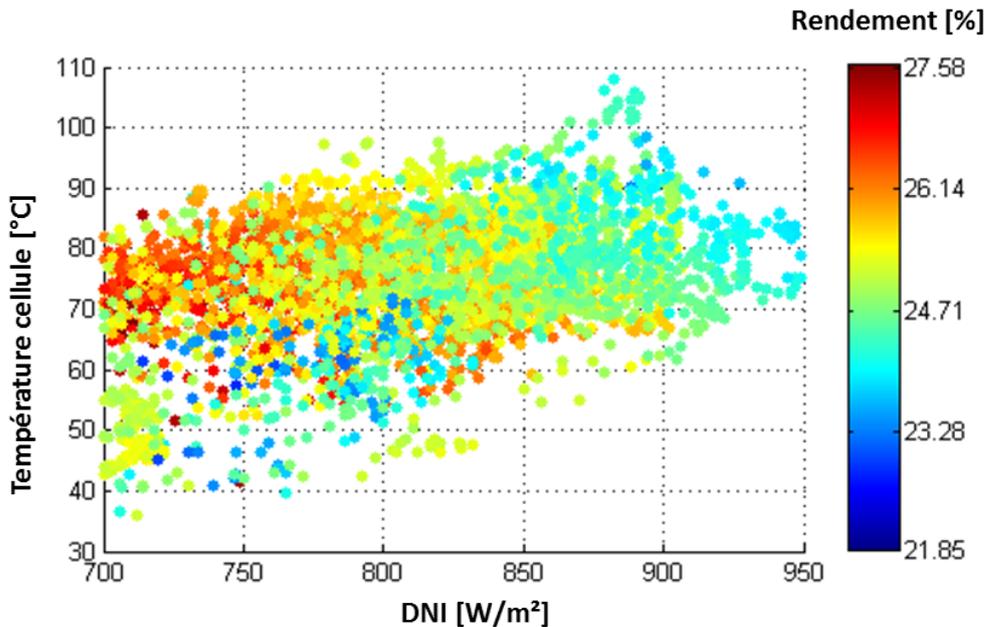


Figure 2.1: Rendement d'un module CPV (échelle colorimétrique) mesuré en extérieur sur un an, en fonction de la température de cellule et du *DNI*.

Pour chaque couple *DNI* - température de cellule, nous observons une large dispersion des valeurs de rendement. Cette dispersion est particulièrement visible au centre du nuage de points, sur une zone située entre 750 et 850  $W/m^2$ , et entre 65 et 75°C. Pour des mêmes conditions, le rendement peut présenter des écarts de 5,5% en valeur absolue, soit une variation relative de l'ordre de 20%. Il est donc clair qu'en ne prenant en compte que la température de cellule et le *DNI*, on ne peut établir de relation directe entre le rendement et ces conditions ambiantes.

La figure 2.1 est intéressante à un autre égard, alors que les cellules III-V qui équipent ce module ont des rendements mesurés en laboratoire de l'ordre de 40%, le rendement moyen du module en extérieur se situe autour de 25%. Plusieurs sources de pertes provoquent cette diminution entre le rendement de la cellule et le rendement du module. Parmi ces sources de perte, on peut citer la différence entre conditions réelles et conditions de test standardisées en laboratoire, le désalignement du suiveur solaire, l'impact des éléments optiques ou encore les performances de la cellule sous un flux continu non-uniforme. Afin de maximiser la

production d'énergie sur l'année, il est important de comprendre comment ces phénomènes opèrent, dans quelle mesure ils impactent les paramètres électriques et comment les prendre en compte dès la conception du module pour optimiser les performances.

### 2.1.1 Impact des facteurs environnementaux

La figure 2.2 décrit l'impact des facteurs environnementaux sur le fonctionnement du module CPV, et comment ces facteurs interagissent avec les éléments constitutifs du module. Les cases à fond ou contour bleu sont liées aux paramètres modules (optiques et électriques); les cases à fond ou contour ocre traitent de la ressource solaire, quant aux cases à fond ou contour orange, elles sont en rapport avec les conditions ambiantes d'opération. Enfin, la case verte correspond à la précision d'alignement du suiveur solaire. Les cases pleines correspondent aux paramètres mesurables en extérieur. 'Mesurable' est à prendre ici dans le sens de directement accessible. Ainsi, la température de cellule n'apparaît pas comme mesurable, puisque ceci nécessiterait d'ouvrir un module, et de placer un thermocouple sur la cellule, ceci impactant le fonctionnement du module par ailleurs. Dans ce chapitre, nous nous attacherons à corrélérer les paramètres quantifiables situés sur la droite du diagramme (données météorologiques, précision du suiveur et comportement de l'optique) aux performances électriques du module mesuré. Cette analyse visera à comprendre comment chaque élément du dispositif intervient dans l'étape de conversion d'énergie.

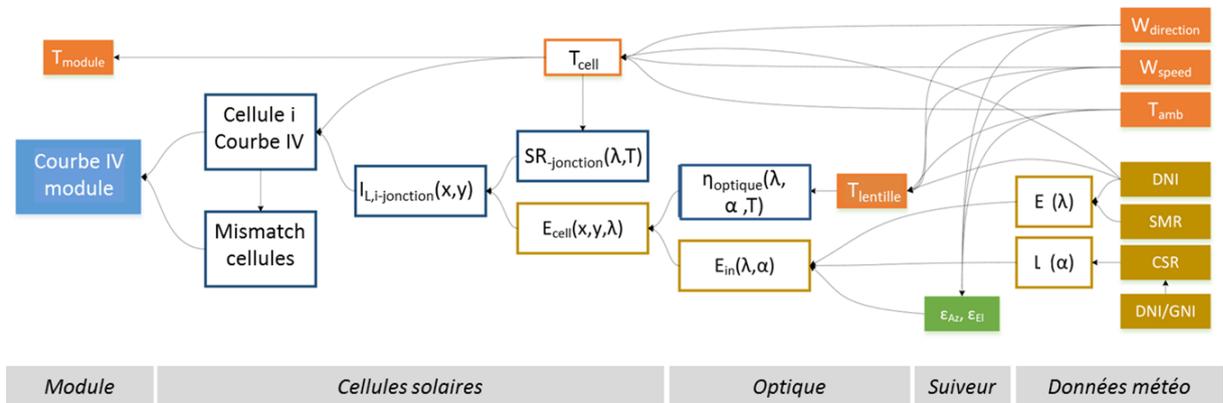


Figure 2.2: Interactions entre les paramètres environnementaux en conditions réelles de fonctionnement et les performances d'un module CPV [59].

Pour illustrer la sensibilité des performances du module aux conditions ambiantes, analysons comment la ressource solaire va impacter le comportement des différents composants. Plusieurs éléments de cette ressource sont à considérer: l'intensité de la lumière directe (*DNI*), la composition spectrale et l'angle d'incidence de la lumière sur le module. A

noter que le  $DNI$  correspond à la puissance du rayonnement électromagnétique direct par unité de surface, soit l'intégrale de l'irradiance spectrale  $E(\lambda)$  sur la longueur d'onde. Une erreur d'alignement due au suiveur solaire, caractérisée par les grandeurs  $\varepsilon_{Az}$  et  $\varepsilon_{El}$  (erreur d'alignement en azimuth et en élévation par rapport à un alignement optique idéal face au soleil), va directement impacter la quantité d'énergie lumineuse par unité de surface reçue par le module  $E_{in}(\lambda, \alpha)$ . En effet, l'angle d'incidence de la lumière ne sera plus à la normale du module. En conséquence, la focalisation de la lumière est impactée, provoquant une modification de l'irradiance sur les cellules et donc du comportement électrique.

Par ailleurs, des phénomènes d'absorption et de réflexion, dus à l'optique de concentration, vont modifier l'énergie lumineuse disponible. Par optique de concentration, nous entendons ici optique primaire pour un module à un seul étage optique et optique primaire plus optique secondaire pour un module à deux étages optiques. Ce rapport entre énergie incidente et énergie transmise est appelé efficacité optique  $\eta_{optique}(\lambda, \alpha, T_{lentille})$ , et dépend de la longueur d'onde, de la température de la lentille et de l'angle d'incidence de la lumière. Pour la lumière atteignant la cellule, il est important de préciser que la distribution spectrale et spatiale, caractérisée par la grandeur  $E_{cell}(x, y, \lambda)$  n'est pas forcément uniforme et dépend de l'optique utilisée et de l'alignement du module (comme nous l'avons vu au chapitre 1). Cette irradiance spectrale et spatiale, ainsi que la température de cellule  $T_{cell}$  vont alors impacter la capacité de la cellule à transformer la lumière en énergie électrique. Cette influence peut s'observer sur les courbes IV de la cellule.

Nous avons décrit comment la courbe IV d'un dispositif unitaire optique-cellule est impactée par les paramètres ambiants. Un module est un assemblage de une ou plusieurs chaînes de cellules en série (appelées *string*). La réponse électrique globale du module dépend du degrés d'homogénéité des réponses électriques des sous-éléments. Toute variabilité des paramètres entre les éléments unitaires introduit des pertes, nous parlons alors de phénomène de *mismatch*<sup>1</sup> entre les cellules. Ce *mismatch* est la résultante de différents facteurs: un éclairage du module qui varie spatialement, des cellules intrinsèquement différentes, un alignement optique différent entre chaque élément (provoqué par les tolérances de montage) ou encore un comportement optique des lentilles inhomogène. Voyons maintenant quels indicateurs vont nous permettre d'étudier ces performances.

Afin d'analyser le comportement des modules en extérieur, différentes grandeurs sont à considérer. Dans le chapitre 1, nous avons introduit certaines de ces grandeurs, et leur comportement. A la lumière des éléments apportés dans les paragraphes précédents, revenons sur ces caractéristiques en apportant quelques précisions.

<sup>1</sup>Nous garderons la terminologie anglaise pour désigner l'inadéquation ou le décalage entre la réponse des cellules. Ceci pour des raisons de clareté, le terme se voulant très parlant, et de cohérence avec la littérature. Pour la notion d'adéquation, nous utiliserons alors le terme opposé: le *matching*.

Dans cette étude, nous nous intéresserons bien entendu au rendement du module, indicateur clé des performances. Le rendement est calculé à partir de la puissance  $P_{mpp}$  produite par le module, valeur extraite de la caractéristique  $IV$  mesurée. Il est ainsi important de bien comprendre les variations de courant et de tension, notamment à travers l'étude du courant de court-circuit  $I_{sc}$ , de la tension en circuit-ouvert  $V_{oc}$  et du facteur de forme FF. La variation des performances du module en fonction des conditions ambiantes est en conséquence principalement analysée via l'étude de ces grandeurs. L'impact sur le rendement est une conséquence logique des tendances observées.

D'autres indicateurs dérivés des indicateurs mentionnés servent la pertinence des analyses, et peuvent être utilisés comme filtres. Un paramètre que nous utiliserons souvent est le ratio  $I_{sc}/DNI$ : il est considéré comme un indicateur du rendement optique du concentrateur pour un spectre donné, puisque dans ces conditions le courant de court-circuit est proportionnel à la lumière atteignant la cellule. Cette valeur peut être normalisée par l'aire de la lentille (ouverture optique) afin de donner une grandeur de comparaison entre technologies. Un autre indicateur d'intérêt est la grandeur  $(I_{sc} - I_{mpp})/I_{mpp}$ : cette valeur dépend des propriétés électriques de la cellule, mais aussi de l'inhomogénéité des réponses électriques entre les cellules du module. En effet, si les cellules produisent des courants différents (suite à une inhomogénéité d'alignement des éléments du module, à un ombrage ou à des réponses électriques différentes), ceci va accentuer l'écart entre le courant de court-circuit  $I_{sc}$  et le courant au point de puissance maximum  $I_{mpp}$ . Similairement, le ratio  $(V_{oc} - V_{mpp})/V_{oc}$  peut servir de critère: il est en rapport avec la perte par résistance série du module et avec le *mismatch* en courant entre les sous-cellules comme nous le verrons par la suite. Présentons maintenant le protocole expérimental permettant de déterminer ces grandeurs.

## 2.2 Protocole d'analyse de performances en extérieur

Cette section est consacrée à la description du système de mesure et du protocole de test mis en place. Plus spécifiquement, nous verrons quel type de suiveur solaire est utilisé, les outils d'instrumentation et les capteurs à disposition, ainsi que les technologies testées lors du projet de recherche. Certaines considérations sur les limitations des instruments et les protocoles de tests seront également expliquées.

### 2.2.1 Plateforme d'étude

Les modules CPV sont testés sur la plateforme expérimentale extérieur du CEA à l'INES au Bourget-Du-Lac, ayant pour coordonnées: "N 45,6416", "E 5,87568". Le suiveur solaire

deux axes (figure 2.3) est fourni par l'entreprise BSQ Solar: c'est une structure à deux moteurs, un pour assurer le mouvement Nord-Sud du suiveur, le deuxième permettant sa rotation de l'Est vers l'Ouest. La précision de suivi cumulée au 90<sup>ième</sup> quartile (Q90) est annoncée à 0,05°, signifiant que 90% du temps le suiveur ne s'écarte pas de plus de 0,05° de son alignement face au soleil.



Figure 2.3: Photographie du suiveur solaire deux axes du CEA avec plusieurs modules CPV installés.

Le suiveur utilise des encodeurs pour mesurer sa position à partir de points de référence. L'algorithme de positionnement est assuré par une boucle en circuit-ouvert, basée sur le calcul de la position théorique du soleil. Des paramètres de correction, prenant en compte les tolérances de montage (plateforme imparfaitement horizontale par exemple) et les imprécisions de calcul, sont déterminés au montage. Cette phase de calibration se fait au moyen de la mesure du courant de court-circuit d'un module CPV de référence, le suiveur cherchant alors à maximiser le courant au long de la journée afin de fixer les valeurs de correction. Les erreurs de suivi sont mesurées au moyen d'un capteur Black Photon BPI-TA1. Sa mesure s'étend sur une gamme de  $\pm 1,2^\circ$  avec une précision de  $\pm 2,4\%$  de la pleine échelle (pour des températures comprises entre  $0^\circ\text{C}$  et  $45^\circ\text{C}$ ).

Une mesure juste et précise des données météorologiques est primordiale pour l'évaluation des performances des modules CPV. La station utilisée est située près du suiveur solaire (à une dizaine de mètres), et peut se décomposer en deux parties: une station d'évaluation de la ressource solaire, et une station mesurant les conditions ambiantes (vent, pression, humidité et température). Cette dernière est une station Vaisala WXT520, dont les paramètres de mesure d'intérêt pour l'étude sont détaillés dans le tableau 2.1.

L'évaluation de la ressource solaire se fait au moyen de capteurs montés sur un suiveur solaire de précision Kipp & Zonen 2AP (précision de suivi  $< 0,05^\circ$  à  $2\sigma$ ). Comme mentionné

Tableau 2.1: Spécifications des principaux paramètres de mesure de la station météorologique Vaisala.

Instrument	Paramètre mesuré	Plage de mesure et incertitude associée
Capteur de vent (transducteurs à ultrasons)	Vitesse du vent	0...60 m/s à $\pm 0,3\%$ à 10 m/s
	Direction du vent	0...360° à $\pm 3\%$
Thermomètre	Température ambiante	-52...+60°C à $\pm 0,3^\circ\text{C}$
Baromètre	Pression atmosphérique absolue	600...1100 hPa à $\pm 0,5$ hPa ( $0^\circ\text{C} < T_{amb} < 30^\circ\text{C}$ )

précédemment, les modules CPV présentent la particularité d'être plus sensibles aux variations du spectre solaire, et d'avoir un angle d'acceptance étroit (généralement inférieur au degré). Ainsi, le lot de paramètres à mesurer s'avère plus large que dans le cas de modules photovoltaïques sans concentration. La station d'instrumentation de ressource solaire, visible sur la figure 2.4, permet la mesure des paramètres suivants:

- **L'irradiance normale directe (DNI en  $\text{W}/\text{m}^2$ ):** un pyréliomètre Kipp & Zonen CHP1 de première classe (classification de la norme ISO 9060, définissant les critères de précision) évalue la composante normale du spectre solaire. Il couvre la gamme de longueurs d'onde 200-4000 nm avec une ouverture angulaire de  $\pm 2,5^\circ$ . Ainsi le pyréliomètre mesure l'énergie provenant du disque solaire, mais aussi une partie du circumsolaire (jusqu'à  $2,5^\circ$  du centre du soleil lorsque le capteur est bien aligné). Compte-tenu du fait que les modules ont un angle d'acceptance inférieur, la puissance lumineuse mesurée par le pyréliomètre peut s'avérer supérieure à l'énergie théoriquement disponible du point de vue de la cellule. Il faut garder à l'esprit que les calculs de rendement et les mesures de rayonnement sont soumis à des normes et standards, et que le *DNI* mesuré avec une ouverture angulaire de  $\pm 2,5^\circ$  est une donnée de référence pour la communauté photovoltaïque.
- **L'irradiance globale normale (GNI en  $\text{W}/\text{m}^2$ ):** un pyranomètre de première classe CMP11 mesure le rayonnement avec un angle de vue de  $180^\circ$ . Bien que le GNI ne soit pas convertible en énergie électrique par le module, sa mesure est importante. Elle permet de qualifier la clarté du ciel via le rapport *DNI/GNI*.
- **La composante spectrale du rayonnement:** la mesure de la composante spectrale est assurée par un spectro-pyréliomètre ICU-3J35 de la compagnie Solar Added Value.

Contrairement à un spectro-radiomètre, coûteux et complexe, il se veut une alternative simple de mesure de la lumière incidente à différentes bandes spectrales. Précisons ici que le capteur mesure la partie directe du rayonnement solaire, avec un angle de vue comparable à celui du pyrhéliomètre de  $\pm 2,8^\circ$ , et qu'en conséquence il est également installé sur le suiveur d'instrumentation.



Figure 2.4: Schéma des données mesurées par la station météorologique (gauche) et photographie des capteurs montés sur le suiveur Kipp & Zonen (droite).

Nous venons de voir les principaux capteurs de mesure de la ressource solaire. Intéressons-nous plus en détail à la caractérisation de la composante spectrale du rayonnement.

### 2.2.2 Caractérisation spectrale de la ressource solaire

Chaque sous-cellule de la cellule triple-jonction, typique des modules HCPV, répond à une bande spectrale différente. Comme ces sous-cellules sont assemblées en série, le courant généré par la cellule est limité par la sous-cellule générant le moins de courant (voir chapitre 1). Ceci est la cause de la sensibilité spectrale accrue des modules CPV. Pour que cette sensibilité puisse être étudiée, il n'est pas nécessaire de connaître l'énergie incidente à chaque longueur d'onde. La mesure de l'énergie aux bandes spectrales de chaque sous-cellule est suffisante. En partant de ce principe, une méthode utilisant des cellules *isotypes* a été définie [33]. Une cellule isotype (ou *component cell* dans la littérature) est une cellule simple-jonction présentant une réponse spectrale similaire à une des sous-cellules des cellules multi-jonctions étudiées. Elle possède une composition identique aux cellules étudiées, à l'exception qu'une seule sous-cellule est active électriquement, les autres jonctions ne l'étant qu'optiquement. Le schéma de la figure 2.5 illustre cette architecture.

Le courant de court-circuit  $I_{sc}$  est proportionnel à la puissance lumineuse incidente dans la bande spectrale où l'isotype répond électriquement. Pour l'isotype  $i$ , ce courant peut alors s'exprimer par l'intégration du spectre  $E(\lambda)$  pondéré de la réponse spectrale  $SR_i(\lambda)$  selon l'équation 1.2 décrit dans le chapitre précédent.

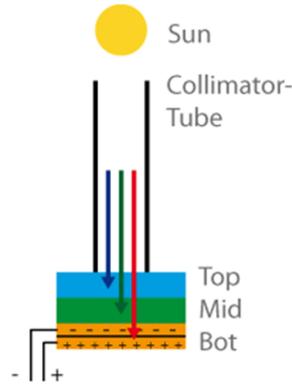


Figure 2.5: Schéma de principe de l'architecture d'un spectro-pyrhéliomètre ©Black Photon.

Ainsi, si la cellule isotype considérée est calibrée pour le spectre de référence AM1.5D 1000 W/m<sup>2</sup>, délivrant le courant de référence  $I_{sc}^*$ , il est possible de déduire une irradiance spectrale effective à la bande spectrale correspondante selon l'équation 2.1. L'acronyme *DNI* est utilisé ici puisque pour le spectro-pyrhéliomètre, seule la part directe du rayonnement est mesurée.

$$DNI_i = 1000 * \frac{I_{SC,i}}{I_{SC,i}^*} \quad (2.1)$$

A partir des  $DNI_i$  effectifs pour chaque jonction, une grandeur qualifiant la composition spectrale du spectre, appelée *Spectral Matching Ratio* ou *SMR*, est définie. Elle correspond au ratio entre les *DNI* donnés par deux isotypes  $i$  et  $j$ . Ainsi il existe plusieurs *SMR* selon les jonctions considérées, qui s'obtiennent à partir de la formule:

$$SMR_j^i = \frac{DNI_i}{DNI_j} \quad (2.2)$$

La plupart des modules commerciaux sont équipés de cellules triple-jonctions GaInP/GaAs/Ge. Pour ce type de structure, la jonction dite *bottom* (en Germanium) produit un excès de courant pour des conditions extérieures réalistes de fonctionnement [60]. Ainsi, seules les jonctions *top* et *middle* limitent la génération de courant. En conséquence, le *DNI* effectif vu par la cellule triple jonction correspondra au  $DNI_{top}$  ou au  $DNI_{mid}$  (*mid* faisant référence à la jonction *middle*). La composition spectrale peut alors se quantifier via une grandeur, le  $SMR_{mid}^{top}$ . Ce  $SMR_{mid}^{top}$  que nous appellerons parfois *SMR* par la suite pour des questions de simplicité d'écriture, est un estimateur de la balance spectrale de la lumière incidente au module. Une valeur de  $SMR_{mid}^{top}$  égale à 1 signifie que le spectre de la lumière est de composition similaire au spectre AM1.5D pour la bande spectrale correspondante aux jonctions *top* et *middle*

d'une cellule triple-jonction. Une valeur inférieure à 1 indique une composante rouge plus importante, tandis qu'une valeur supérieure signifie un spectre plutôt riche en bleu. La figure 2.6 schématise ce concept.

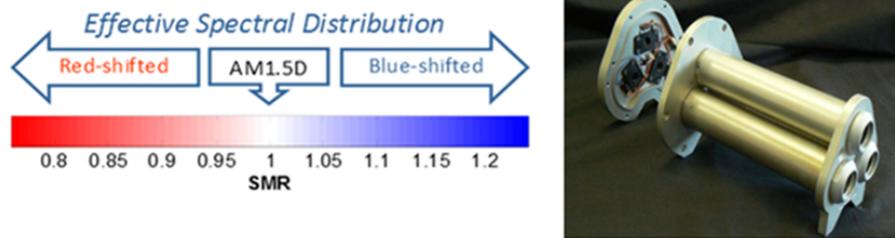


Figure 2.6: Composition spectrale du rayonnement en fonction de la valeur de  $SMR_{mid}^{top}$  (gauche) et photographie du spectro-pyrhéliomètre servant à mesurer ce paramètre (droite) ©Solar Added Value.

La grandeur  $SMR$  est aujourd'hui reconnue internationalement comme un moyen pertinent d'estimer la composante spectrale de la lumière dans le cas des applications à concentration [11]. Plusieurs publications de laboratoires différents y font référence pour leurs études, aussi bien en intérieur qu'en extérieur [61–64]. Son utilisation est recommandée dans les procédures et protocoles des normes en cours d'écriture pour le test de modules CPV en extérieur.

### 2.2.3 Caractérisations électrique des modules et technologies étudiées

L'acquisition de la caractéristique  $IV$  des modules est réalisée par un traceur de courbe  $IV$  automatisé. Une source d'alimentation *Kepeco* paramétrable effectue un balayage en tension, pendant qu'un multimètre *Keithley* mesure le courant en sortie de module. Un programme d'acquisition permet de piloter l'ensemble et de paramétrer jusqu'à douze voies de mesures. Pour chaque mesure  $IV$ , les conditions d'opération (température module, conditions ambiantes, ressource solaire) sont enregistrées. A noter que la température du module est mesurée en face arrière, avec une sonde PT100 fixée au plus près d'une cellule. La fréquence d'acquisition est fixée à 5 minutes, et le temps nécessaire pour chaque balayage est de l'ordre de 3 secondes.

Entre chaque mesure, les modules ne sont pas connectés à une charge et sont donc en circuit-ouvert. Aucune puissance électrique n'est alors dissipée et l'énergie lumineuse incidente est transformée majoritairement en chaleur, une faible partie étant réfléchi. Ainsi, au moment de la mesure de la courbe  $IV$ , la cellule se situe à une température plus élevée que si le module était maintenu à son point de puissance maximum, conformément à des conditions de fonctionnement normales. Cette différence de température dépendra des conditions

ambiantes (vent, température) et de la capacité du module à évacuer la chaleur. Différentes études ont reporté des écarts de l'ordre de 10 à 15 °C [65–67], soit une augmentation de l'ordre de 20% de la grandeur  $T_{cell} - T_{amb}$ . Cet écart va principalement provoquer une diminution de la tension de court-circuit, de l'ordre de 1,6 à 2,4% pour un coefficient thermique de 0,12%/°C, et une augmentation du courant de court-circuit, soit 0,7 à 1% pour un coefficient thermique en courant de 0,07%/°C. L'impact global sur la puissance est donc faible, et de manière plus générale, les études sur la sensibilité spectrale, la température de lentille et la ressource solaire seront considérées applicables à un module en fonctionnement nominal.

Afin d'obtenir une analyse pertinente de la sensibilité des performances aux conditions environnantes, nous avons étudié quatre différentes technologies CPV, toutes de concentration géométrique supérieure à 300. Les cellules utilisées dans ces modules sont des cellules triple-jonctions *lattice-matched* constituées d'un empilement GaInP/GaInAs/Ge, à l'exception de la technologie dénommée C dans la suite du manuscrit. En effet, pour celle-ci, la jonction *bottom* en Ge est substituée par un matériau III-V d'énergie de gap  $\simeq 1$  eV. Il n'existe pas de spectro-pyrhéliomètre adapté à cette architecture de cellule, et nous étudierons ce module de la même manière que pour les autres technologies (les jonctions *top* et *middle* étant similaires). Par ailleurs, les cellules des différentes technologies proviennent de fabricants différents et leurs caractéristiques varient (en matière de taille, de réponse spectrale, et de métallisation). Pour des raisons de confidentialité nous n'avons pas eu accès à ces caractéristiques, et nous nous en tiendrons à analyser la performance des modules.

Ces modules diffèrent également de par leur architecture optique (type d'optique, facteur de concentration). Le schéma de la figure 2.7 illustre ces architectures. Certains acronymes d'optiques utilisées proviennent de la littérature et nous avons choisi de garder la dénomination anglo-saxonne pour une raison de cohérence avec les études existantes.

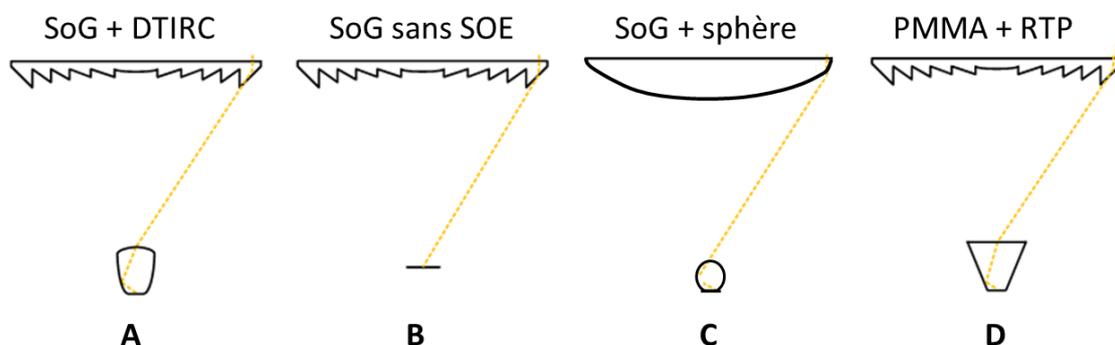


Figure 2.7: Architecture optique des quatre modules CPV analysés.

Détaillons maintenant ces technologies:

- **Technologie A:** Le parquet d'optiques primaires est constitué de 42 lentilles de Fresnel de type SoG, de dimension 17,4x17,4 cm<sup>2</sup> par lentille. La lumière est d'abord concentrée sur une optique secondaire en verre moulée DTIRC, dont nous avons fait mention dans le chapitre 1. La concentration géométrique finale ainsi atteinte est de 1000 sur une cellule carrée de 5,5 mm de côté. Les 42 cellules sont assemblées en série dans le module.
- **Technologie B:** L'optique primaire est une lentille carrée de Fresnel de type SoG de 6 cm de côté. En revanche, aucune optique secondaire n'est utilisée pour ce module, ce qui va impacter la tolérance au désalignement. Pour cette raison également, il n'est pas désirable d'atteindre des hauts facteurs de concentration, et la concentration finale géométrique obtenue est d'environ 500 sur une cellule ronde de 3 mm de diamètre. Pour le module testé, deux *strings* de 49 cellules permettent de convertir l'énergie lumineuse.
- **Technologie C:** De par la taille des lentilles primaires utilisées de 2x2 cm<sup>2</sup>, l'optique primaire utilisée ne requiert pas de configuration de Fresnel. C'est une lentille plano-convexe de type SoG de petite taille focalisant la lumière sur une optique secondaire. L'absence de motif de Fresnel se justifie par la petite taille de la lentille: l'épaisseur de la lentille est suffisamment faible pour mouler une lentille 'pleine'. Le SOE est une micro-bille sphérique en verre attaché à la cellule. L'architecture électrique est la suivante: 22 *strings*, constitués de 30 cellules en série, délivrent la puissance électrique. La concentration géométrique atteinte est de 1100 sur une cellule carrée de 0,6 mm de côté.
- **Technologie D:** Pour cette technologie, du PMMA est moulé pour fabriquer une lentille primaire de Fresnel en forme de dôme, de 20 cm de côté. La lumière est ainsi focalisée sur une optique secondaire réfractive de type RTP. La concentration géométrique est de 820 sur une cellule carrée de 0,7 cm de côté. Le module testé a été spécifiquement conçu pour des études en laboratoires et est constitué d'un seul élément optique-cellule.

Il est important de préciser ici que les modules ont été obtenus au travers de partenariats avec différents fabricants. Le type de module fourni ne correspond pas forcément aux modules commerciaux de ces fabricants: il peut ainsi s'agir de version prototype ou d'essai, qui peut présenter des performances différentes des modules commerciaux. Ainsi cette étude n'a pas pour objet de 'classer' les différentes technologies, mais plutôt de bien comprendre

les phénomènes responsables de la variation des performances en extérieur en fonction de différentes architectures optiques. Passons maintenant à l'analyse des données en extérieur.

## 2.3 Analyse globale des données

Dans cette section, nous allons d'abord étudier les performances des modules dans des conditions standard de laboratoire. Ces données nous seront utiles pour la suite (notamment pour le calcul de la température de cellule) et serviront la pertinence des analyses. Ensuite, nous présenterons un aperçu global des données mesurées en extérieur pour chaque technologie, afin d'illustrer les durées de mesure et la variation de performance des modules en conditions réelles de fonctionnement. Enfin, nous nous attarderons sur l'importance de la définition de critères de filtrages adéquats et adaptés au phénomène étudié.

### 2.3.1 Caractérisation initiale des modules en intérieur

La caractérisation des modules en intérieur dans des conditions standard est effectuée avec un simulateur solaire flash pour modules CPV *Helios3198* [68]. Le simulateur est capable d'illuminer le module avec un éclairage collimaté similaire (angulairement, en intensité et spectralement) à la lumière du soleil en extérieur. Nous reviendrons plus en détail sur ses différents composants et leurs caractéristiques dans le chapitre 3. Conformément à la version actuelle de la norme IEC 62670 [11], les conditions CSTC pour les modules à concentration sont définies par une irradiance normale directe de  $1000 \text{ W/m}^2$ , une température de cellule  $T_{cell}$  de  $25^\circ\text{C}$ , et un spectre lumineux équivalent au spectre solaire AM1.5D.

Lors de la mesure, les conditions spectrales sont évaluées au travers d'un spectro-pyrhéliomètre (voir sous-section 2.2.3), et un capteur auxiliaire mesure les conditions d'irradiance. Ce dernier doit idéalement présenter une sensibilité spectrale et angulaire similaire au module testé [37]. Cependant, ce type de capteur n'a pas été fourni par les fabricants de modules, et nous utilisons un capteur auxiliaire différent. Pour déterminer le moment du flash où le module est aux conditions CSTC, nous avons alors recours au procédé de calibration croisée mentionné dans la norme IEC 62670. Il s'agit de calibrer en  $I_{sc}$  le module à tester en extérieur et d'utiliser cette calibration pour ajuster l'irradiance vue par le capteur auxiliaire du simulateur.

Les modules sont placés au centre d'un support métallique, permettant la rotation des modules selon deux axes complémentaires (azimut et élévation) avec une grande précision ( $0,01^\circ$ ). Il est ainsi possible de s'assurer de l'alignement du module par rapport au faisceau collimaté en ajustant l'angle des deux axes, en maximisant le courant produit à la tension  $V_{mpp}$ .

Cette méthode d'alignement au point de puissance maximum est préférée à la maximisation du courant de court-circuit, dans la mesure où elle permet d'optimiser la performance globale du module. Les courbes  $IV$  mesurées pour chaque module sont visibles sur la figure 2.8. Le tableau 2.2 illustre les caractéristiques clés de ces courbes. Les rendements sont calculés à partir de l'ouverture solaire des modules, correspondant à l'aire des lentilles primaires. Ainsi le cadre des modules n'est pas considéré, ce qui permet une comparaison plus juste entre modules.

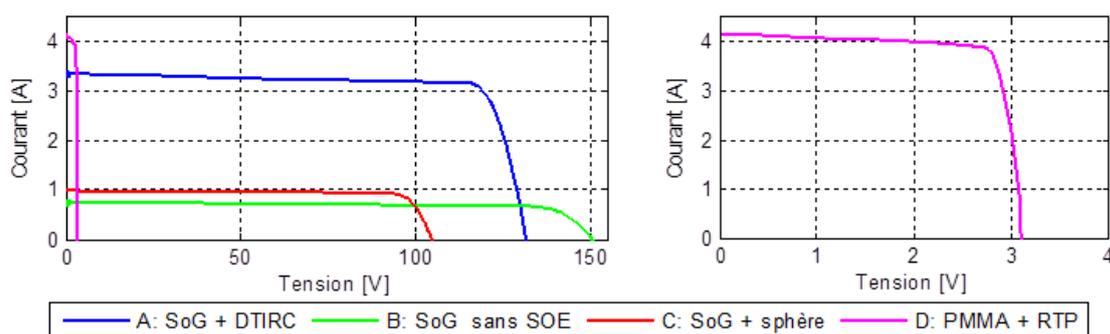


Figure 2.8: Courbes  $IV$  des différentes technologies mesurées dans le simulateur solaire pour modules CPV. Les conditions de mesures correspondent aux conditions CSTC.

Tableau 2.2: Paramètres électriques des technologies mesurées dans des conditions CSTC.

	<b>A</b> <b>SoG + DTIRC</b>	<b>B</b> <b>SoG - sans SOE</b>	<b>C</b> <b>SoG + sphère</b>	<b>D</b> <b>PMMA + RTP</b>
$V_{oc}[V]$	131,63	151,63	105,10	3,12
$I_{sc}[A]$	3,34	0,75	0,97	4,13
$V_{mpp}[V]$	116,9	134,8	94,0	2,79
$I_{mpp}[A]$	3,13	0,69	0,90	3,81
$\eta[\%]$	28,8	28,9	31,6	27,2
$FF[\%]$	83,2	81,0	83,3	82,6

Les courbes  $IV$  montrent la grande différence qu'il y a entre les puissances délivrées par les modules (de 10 W à 365 W), résultante de la variété de taille des modules testés. Nous observons aussi la large gamme de courant et tension mesurés, qui s'explique par différentes tailles d'optiques primaires, de cellules, et des architectures électriques propres à chaque technologie. En revanche, lorsque l'on s'intéresse au rendement  $\eta$  et au facteur de forme  $FF$ , on note que les chiffres sont relativement similaires, avec toutefois un rendement supérieur

pour la technologie C. Il est remarquable d'observer que les modules dépassent tous les 27% de rendement en intérieur, illustrant des performances représentatives de la technologie CPV.

L'alignement des modules a ensuite été modifié selon les deux axes azimuth et élévation du support, afin de caractériser la transmission angulaire des différentes technologies. La figure 2.9 représente la puissance relative en fonction de l'angle de désalignement. Seul l'angle d'azimuth est ici représenté, l'axe d'élévation présentant des résultats très similaires.

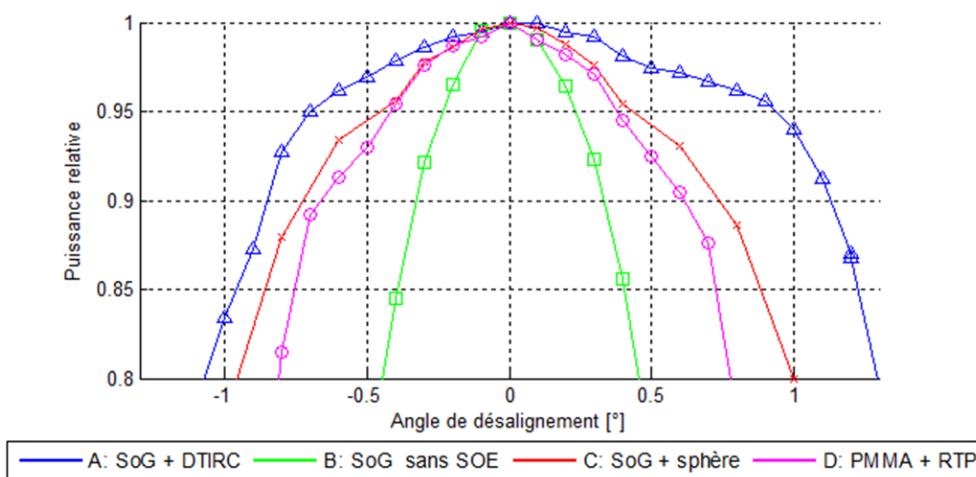


Figure 2.9: Puissance relative des technologies étudiées en fonction de l'angle de désalignement de l'axe optique du module par rapport aux rayons incidents.

La sensibilité au désalignement varie beaucoup selon la configuration optique. Ainsi pour la technologie B, nous observons un angle d'acceptance  $AA_{90\%}$  de  $\pm 0,35^\circ$ , qui va nécessiter un suiveur solaire très précis. Pour des systèmes à deux étages optiques, la tolérance au désalignement est supérieure avec un maximum atteint pour la technologie A. Selon que l'angle de désalignement soit positif ou négatif, l'angle d'acceptance  $AA_{90\%}$  est de respectivement  $1,2^\circ$  et de  $-0,85^\circ$  pour cette technologie. Cette asymétrie s'explique par une différence de réponses électriques des différents éléments "optique-cellule" unitaires du module. Typiquement, des défauts (rayures, défauts de moulage) sur des optiques peuvent être présents sur certaines parties du module, ou encore la position de la cellule vis-à-vis de l'optique varie du fait des tolérances d'ajustement lors du montage du module. Pour les deux dernières technologies, nous nous situons plutôt autour de  $\pm 0,7 - 0,8^\circ$ . Ces critères de tolérance seront utilisés pour filtrer les données de mesure en extérieur que nous allons présenter dans la sous-section suivante.

### 2.3.2 Période d'analyse et définition de critères de filtrage pertinents

La période de mesure est variable selon les modules et a été définie en fonction de la disponibilité des différentes technologies. La figure 2.10 illustre les puissances produites par les différentes technologies en fonction du temps. Pour ces données, le préfiltrage suivant a été utilisé selon les critères suivants:  $DNI$  supérieur à  $100 \text{ W/m}^2$ ;  $T_{amb}$  compris entre  $-10^\circ\text{C}$  et  $50^\circ\text{C}$ ;  $SMR_{mid}^{top}$  compris entre 0,5 et 1,5;  $SMR_{bot}^{top}$  compris entre 0,5 et 1,5 et  $W_{speed}$  compris entre 0 m/s et 10 m/s. Ce préfiltrage permet d'éliminer les valeurs nocturnes, les journées avec un ensoleillement insuffisant, les défauts de capteurs et certaines données aberrantes. En outre, il réduit le volume de données, considérable pour de telles périodes, et les temps de traitement associés aux calculs et aux analyses. Comme nous pouvons le voir, la période de mesure est très variable: elle varie entre deux ans pour les technologies A et D à une vingtaine de jours pour le module B. Malgré une période courte de données, cette dernière technologie est la seule sans optique secondaire et mérite donc d'être comparée aux autres technologies. Nous pouvons aussi être intrigués par la présence de trous de données de plusieurs mois sur les périodes étudiés. Le laboratoire ne dispose que d'un seul suiveur solaire expérimental, et cet équipement a nécessité de lourdes maintenances suite à des pannes de vérin.

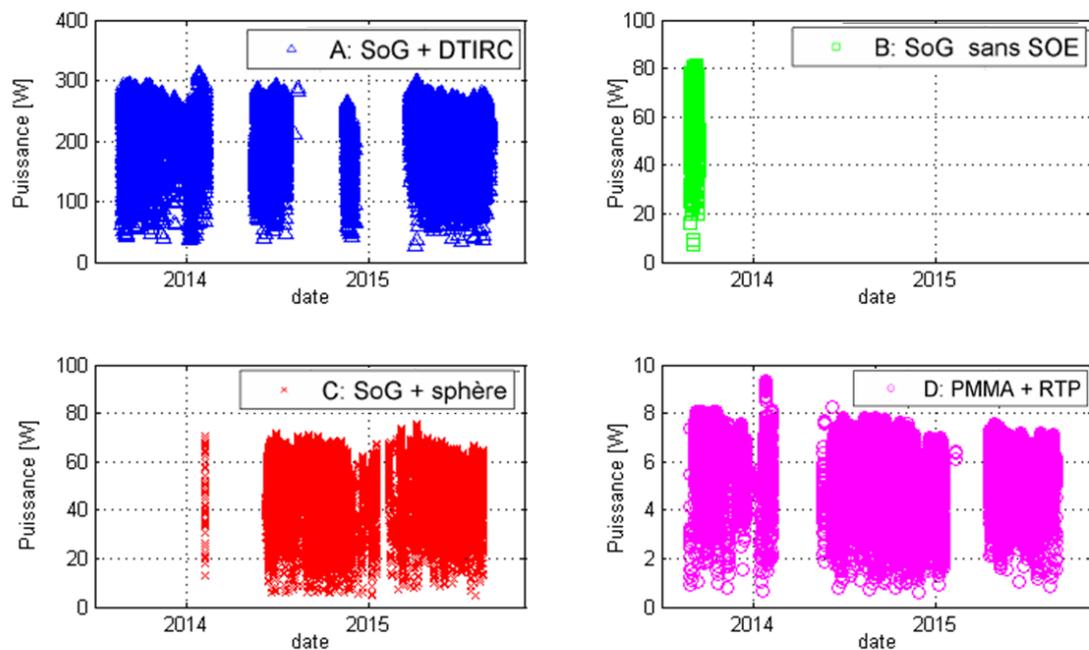


Figure 2.10: Puissance délivrée pour chaque technologie sur la période d'étude considérée.

Une des principales difficultés dans l'analyse de données mesurées en extérieur, est de s'assurer de la qualité et de la représentativité des mesures. En effet, divers phénomènes comme la salissure, les ombrages ou les pannes de suiveur solaire peuvent altérer le comportement du module qui ne se trouve plus dans des conditions représentatives de bon fonctionnement. Pour illustrer ce propos, intéressons-nous aux deux phénomènes suivants: l'ombrage partiel du module (dû à des masques solaires matinaux ou en soirée) et la condensation sur la lentille observable certaines matinées. Différentes courbes  $IV$  sont représentées sur la figure 2.11, où l'on voit l'impact des deux phénomènes. Sur la figure de gauche, nous constatons l'impact de la condensation sur l'efficacité optique du module via la grandeur  $I_{sc}$ . La présence d'eau sur le parquet de lentilles va provoquer une diffusion de la lumière, qui ne pourra être concentrée sur la cellule. On note la présence "d'escaliers" sur la courbe, synonyme de déséquilibre en courant entre les cellules assemblées en série. L'ombrage partiel du module va affecter également la courbe  $IV$  du module en provoquant la chute de courant de certaines cellules. Pour éliminer les données présentant ce type d'effet, les grandeurs  $I_{sc}/DNI$  ou  $(I_{sc} - I_{mpp})/DNI$  peuvent par exemple être utilisées comme filtres.

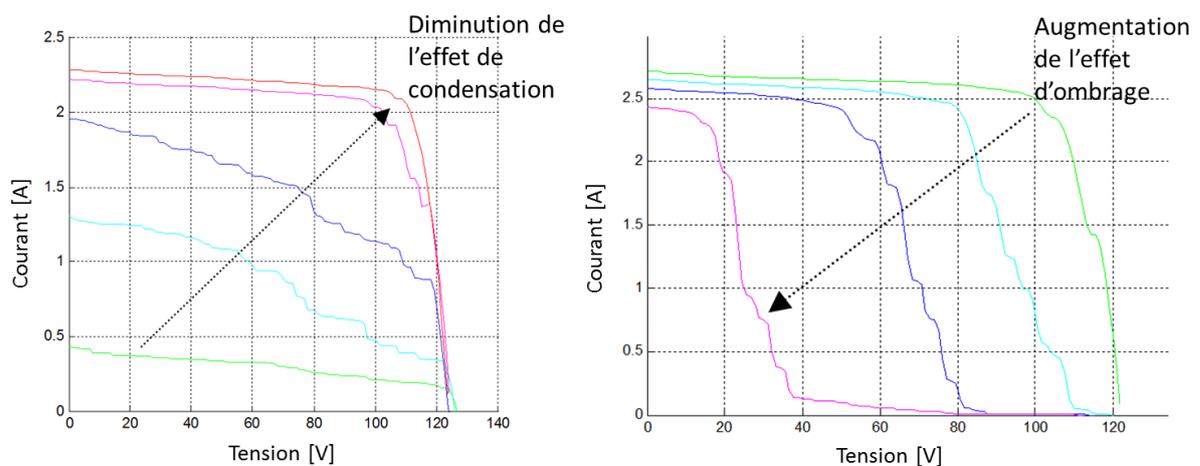


Figure 2.11: Impact des phénomènes de condensation (gauche) et d'ombrage (droite) sur la caractéristique  $IV$  des modules. Les courbes représentées correspondent au module A.

Un autre paramètre d'importance est la précision du suiveur solaire. En effet, comme nous l'avons vu dans la partie 2.3, l'angle d'acceptance des modules varie entre  $0,35^\circ$  et  $0,8^\circ$ . Au-delà de ces angles (pour lequel rappelons-le, la puissance est égale à 90% de la puissance d'un module aligné), la chute de puissance est très rapide. Le travail proposé se focalise sur l'impact des paramètres environnementaux et nous souhaitons donc nous affranchir des erreurs de suivi provoquant ces chutes de performance. En conséquence, il est primordial de décorréler les performances du module à l'alignement du suiveur mesuré via le capteur Black

Photon. Sur la figure 2.12, on peut observer les erreurs de suivi sur l'axe azimuth et élévation pour une période de deux ans. Alors que pour l'année 2013, on mesure un désalignement acceptable du suiveur (de l'ordre de  $0,2^\circ$ ), une dérive apparaît en 2014 sur l'axe d'élévation, suite notamment à plusieurs pannes. Un nouveau vérin a été installé fin 2014 sur cet axe, mais les premiers résultats montrent clairement que le problème s'aggrave. A la lumière de ces résultats, il apparaît critique de filtrer selon ces deux angles. Nous choisissons d'appliquer un filtre pour un angle de désalignement équivalent à 95% de la puissance lorsque le module est aligné (angle d'acceptance nommé  $AA_{95\%}$ ), critère qui permet de conserver un jeu de données suffisant et de bien isoler les performances du module de celles du suiveur.

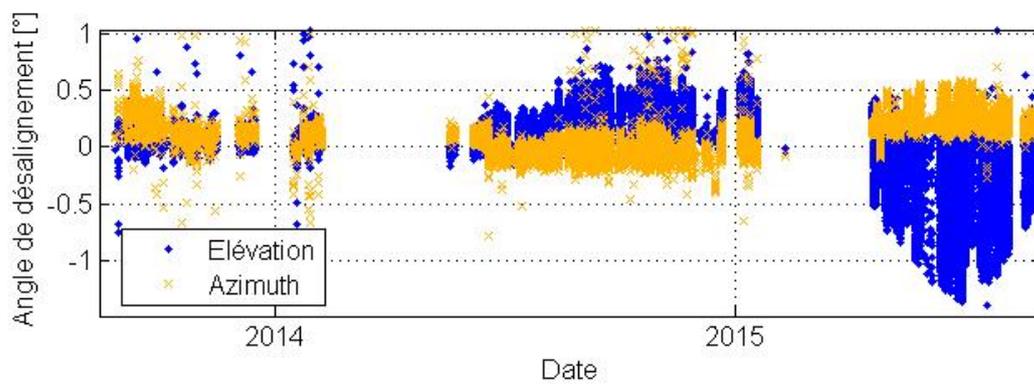


Figure 2.12: Désalignement angulaire du suiveur solaire en azimuth et en élévation sur la période allant de Août 2013 à Septembre 2015.

A la lumière de ces phénomènes impactant les performances (désalignement, effet d'ombrage, condensation...), il apparaît pertinent de définir un filtrage systématique pour chaque technologie pour éliminer l'ensemble des valeurs incohérentes. Différents critères ont été étudiés dans des travaux relatifs à l'estimation de puissance en extérieur [69–71]. En se basant sur ces travaux et sur la norme IEC62670 en cours de finalisation [11], nous avons choisi de définir notre propre jeu de filtres, qualifié de "base", que nous appliquons aux mesures de chaque module. L'enjeu ici est d'obtenir un jeu de données de qualité et significatif, tout en préservant une quantité satisfaisante de mesures. Un logiciel de traitement de données a été développé sous MATLAB, et permet de tester différentes procédures de filtrage. Les critères appliqués aux mesures sont visibles sur le tableau 2.3. Mentionnons que le critère lié aux variations de  $DNI$  permet de limiter les effets de régime transitoire relatifs à la thermique du module. Quant au paramètre  $DNI/GNI$ , il est un indicateur de la clarté du ciel.

Une fois le jeu de données considéré comme propre et significatif, nous pouvons étudier l'impact des paramètres. Comme nous l'avons vu, la dépendance des performances du

Tableau 2.3: Critères de filtrage appliqués aux données mesurées en extérieur.

Paramètre	Critère de validité
$DNI$	600 - 1000 W/m <sup>2</sup>
$T_{amb}$	0 - 40 °C
$SMR_{mid}^{top}$	0,6 - 1,3
$SMR_{bottom}^{top}$	0,6 - 1,3
$DNI/GNI$	> 0,7
Variation de DNI dans les 30 minutes précédant la mesure	< 10%
$T_{module}$	0 - 90 °C
$T_{lentille}$	0 - 50 °C
Rendement $\eta$	0,8.médiane(données) à 1,2.médiane(données)
$I_{sc}/DNI$	0,7.médiane(données) à 1,3.médiane(données)
$(I_{sc} - I_{mpp})/I_{mpp}$	<1,3.médiane(données)
$(V_{oc} - V_{mpp})/V_{mpp}$	<1,3.médiane(données)
Désalignement $\epsilon_{Az}$ et $\epsilon_{El}$	<Angle d'acceptance $AA_{95\%}$

module aux facteurs environnementaux est complexe. Ces facteurs sont souvent corrélés entre eux (dans une certaine mesure), alors que nous souhaitons étudier leur impact de manière isolée. L'outil de traitement de données développé permet de contraindre certaines variables à une plage de valeurs, afin d'étudier l'impact d'autres variables. L'ajout d'une troisième dimension par échelle colorimétrique, comme on peut le voir sur la figure 2.1, s'est montré particulièrement utile pour notre étude. A noter que le logiciel développé intègre aussi le calcul de la température de cellule et de lentille, que nous détaillerons dans les sections suivantes, et qu'il fait actuellement l'objet d'un développement professionnel afin d'être utilisé dans d'autres laboratoires du CEA. Passons maintenant à une analyse globale des performances des différentes technologies pour le site étudié.

### 2.3.3 Adéquation des modules avec les conditions du site étudié

Afin de voir comment le module se comporte globalement, en matière de rendement, nous appliquons le filtrage défini précédemment. Sur les histogrammes de la figure 2.13, nous

pouvons observer la distribution des rendements mesurés en extérieur sur les périodes d'étude. Premièrement, les modules présentent une certaine dispersion des performances. La distribution, à l'exception de la technologie B pour laquelle nous avons le moins de mesure, peut être assimilée à une gaussienne (tendance en orange sur les histogrammes) centrée sur une certaine valeur de rendement. Nous observons une grande variabilité des performances, puisque 99% des valeurs (soit  $3\sigma$ ) se trouvent dans un intervalle de rendements de 4 à 5 % d'étendue selon les technologies (soit environ 20% du rendement mesuré). En comparant la valeur  $x_0$ , soit la valeur centrale de la gaussienne de rendements en extérieur déterminée par régression, aux rendements mesurés en intérieur, les modules montrent de moins bonnes performances en conditions réelles. Cette différence d'efficacité varie selon les technologies: pour les technologies A, C et D, la baisse de rendement observée entre la mesure intérieur et  $x_0$  est de respectivement 13 %, 11% et 18%. Elle se montre inférieure pour la technologie B, où elle atteint 6%. Considérant la faible période d'acquisition de données pour cette dernière technologie, il est difficile de tirer des conclusions quant à une meilleure adaptabilité du module aux conditions du site.

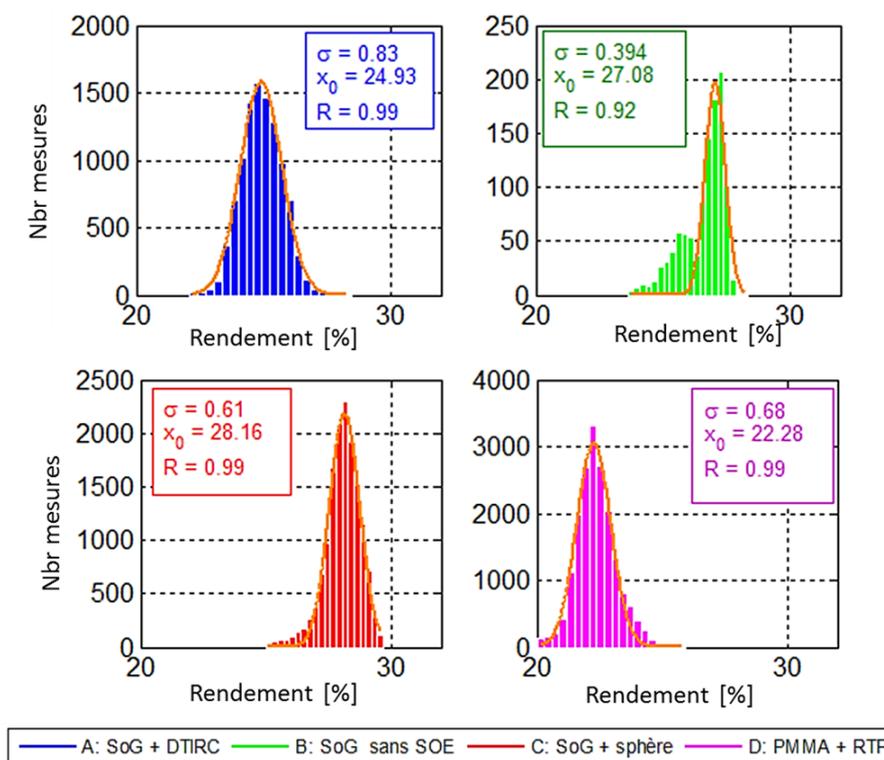


Figure 2.13: Histogramme des rendements observés pour chaque technologie étudiée sur l'ensemble de leur période de mesure. Une régression gaussienne avec ses caractéristiques a été calculée pour chaque distribution.

Pour expliquer cette différence entre rendements mesurés en laboratoire et rendements en conditions réelles, il est important de rappeler que les mesures en intérieur (section 2.3.1) ont été réalisées dans des conditions CSTC ( $DNI = 1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T_{cell}=25 \text{ °C}$  et  $SMR_{mid}^{top}=1$ ). Il est hautement improbable de se retrouver dans de telles conditions en extérieur, pour des raisons liées aux variations spectrales de l'irradiance et à l'influence de la thermique sur le comportement de la lentille et de la cellule. La figure 2.14 représente le  $SMR_{mid}^{top}$  mesuré pour différentes journées (échelle de couleur) en fonction de l'heure. Bien que le maxima s'observe autour du midi solaire (heure à laquelle la couche atmosphérique traversée par la lumière est la plus faible), nous constatons une large variabilité de valeurs, aussi bien au cours de la journée qu'à différentes dates. Cette variation s'explique par le décalage de la position du soleil dans le ciel au cours de l'année, et des conditions atmosphériques différentes.

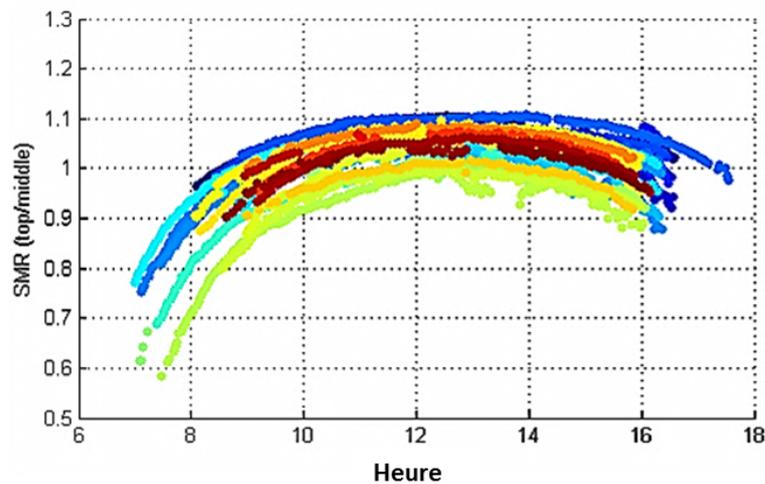


Figure 2.14: Variation du  $SMR_{mid}^{top}$  en fonction de l'heure de la journée. Les couleurs représentent différentes journées au cours d'une année.

Afin de mieux caractériser le site d'étude du Bourget-du-Lac, nous avons suivi l'approche présentée dans [61], où le  $SMR_{mid}^{top}$  est corrélé à la température ambiante du site sur une durée d'un an. Le résultat est visible sur la figure 2.15, où est représenté le nombre d'occurrence pour chaque paire  $SMR_{mid}^{top}-T_{amb}$  sur la période Juin 2014-Juin 2015. Seules les valeurs où le  $DNI$  est supérieur à  $700 \text{ W/m}^2$  sont représentées, conditions dans lesquelles le module est assuré de produire de l'énergie. Il apparaît très clairement que la zone où la température  $T_{amb}$  est comprise entre  $20 \text{ °C}$  et  $30 \text{ °C}$  et la valeur  $SMR_{mid}^{top}$  entre 1 et 1,1, correspond aux conditions dominantes dans lesquelles le module sera amené à fonctionner. Ceci est attendu dans la mesure où les mois estivaux sont les plus chauds, avec un spectre plutôt riche en bleu. De la même manière, nous observons des valeurs plus basses de  $SMR$ , pour les températures entre  $5 \text{ °C}$  et  $15 \text{ °C}$ , correspondant logiquement aux mois d'hiver.

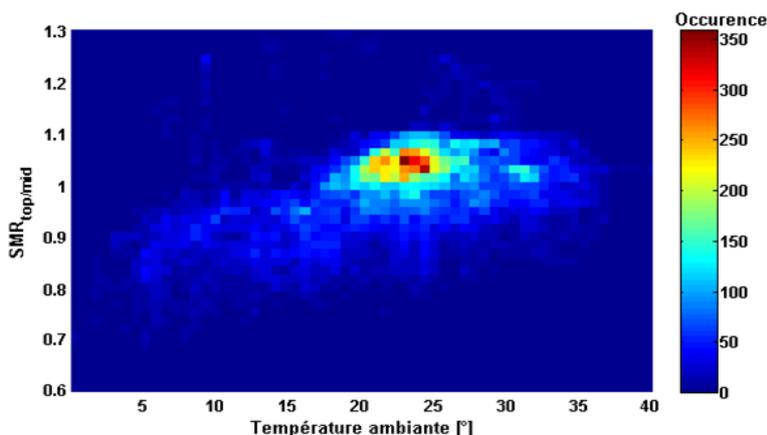


Figure 2.15: Cartographie des conditions spectrales et de température pour le site d'étude sur la période allant de Juin 2014-Juin 2015. L'échelle colorimétrique représente le nombre d'occurrence pour chaque couple  $SMR - T_{amb}$  pour des valeurs de  $DNI > 700 \text{ W/m}^2$ .

En première approche, afin de déterminer le degré d'adaptabilité du module aux conditions du site d'étude, corrélons les rendements des modules aux deux paramètres  $SMR_{mid}^{top}$  et  $T_{amb}$ . La figure 2.16 illustre les résultats obtenus. Des tendances de variations de performances peuvent être dégagées en fonction des modules.

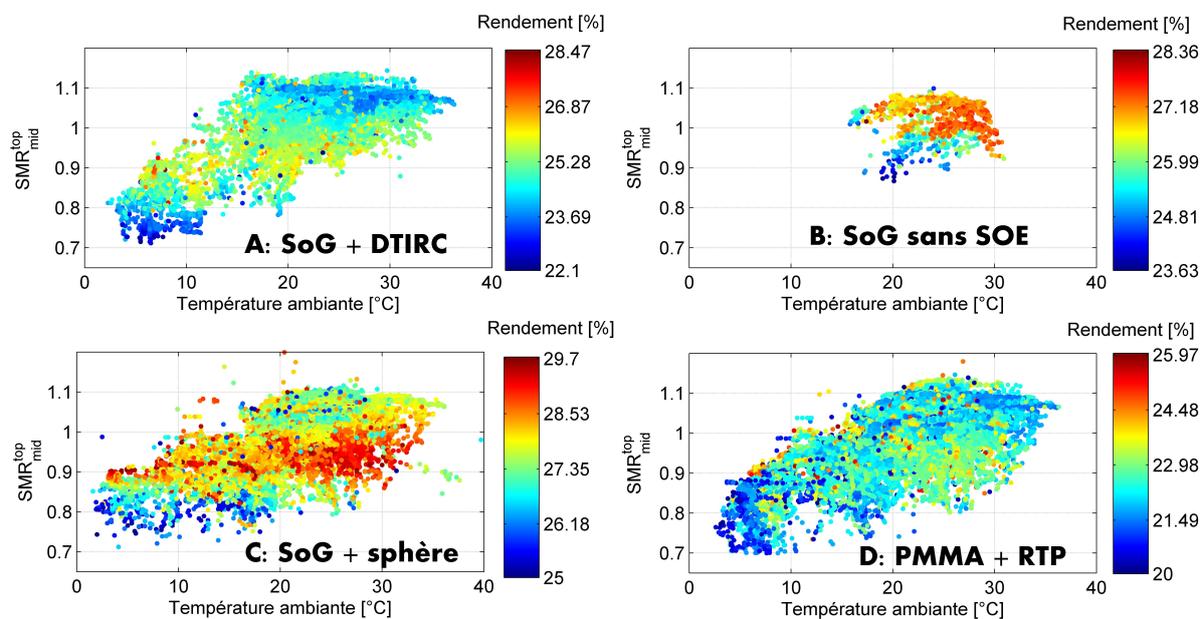


Figure 2.16: Cartographie du rendement (échelle colorimétrique) des modules testés en fonction de la température ambiante  $T_{amb}$  et des conditions spectrales  $SMR_{mid}^{top}$ .

Pour les technologies A et C, nous voyons que le fonctionnement du module est à son maximum autour d'un SMR légèrement supérieur à 0,9. La tendance est moins claire pour la dernière technologie D, bien que pour des températures supérieures à 15 °C, le module fonctionne mieux autour de  $SMR_{mid}^{top}$  de 0,92. Le couple  $SMR_{mid}^{top} - T_{amb}$  optimal varie pour les différentes technologies, malgré des technologies de cellules similaires. C'est donc principalement le comportement spectral et thermique de l'optique de concentration qui va différer selon la configuration optique du module. Seul un module paraît être adapté aux conditions du site: en effet, le rendement observé pour la technologie B est maximal pour une température  $T_{amb}$  comprise entre 20°C et 30 °C et une valeur de  $SMR_{mid}^{top}$  comprise entre 1 et 1,1. L'effet de la température semble plutôt positif pour les technologies à l'exception du module A où la tendance est moins claire. Les optiques de concentration sont différentes pour chaque module et leur comportement pour différentes conditions d'opération va varier. Afin d'étudier cela, nous allons maintenant analyser plus en détail comment varient les performances électriques en analysant l'impact d'une gamme plus large de paramètres environnementaux.

## 2.4 Influence du rayonnement solaire

Le premier paramètre d'intérêt auquel nous allons nous intéresser est la ressource solaire. Dans le cadre des modules CPV, celle-ci peut se définir en terme d'intensité (DNI), de composition spectrale (SMR) et de contribution circumsolaire (CSR). Comme pour des technologies à simple jonction  $pn$ , une linéarité est considérée entre la photogénération de courant et l'intensité de la lumière, à condition que le spectre et la distribution angulaire des rayons incidents ne varient pas (voir chapitre 1). Bien entendu, cette hypothèse ne s'applique pas aux conditions réelles puisqu'au cours du jour et de l'année, nous observons des variations de l'irradiance spectrale. Pour illustrer ce propos, étudions comment le courant  $I_{sc}$  et le rapport  $I_{sc}/DNI$  varie en fonction du  $DNI$  (figure 2.17). Les résultats sont présentés pour le module A sur toute la période d'acquisition.

La grandeur  $I_{sc}/DNI$  n'est pas constante et sa valeur varie entre 2,8 et 3,5 A.m<sup>2</sup>/W. Comme nous l'avons expliqué pour les variations de rendements observées sur les figures 2.13 et 2.16, ce résultat s'explique par la sensibilité spectrale des cellules, le comportement de l'optique de concentration avec la température et la réponse angulaire du module. Il est toutefois intéressant de noter qu'avec l'augmentation du  $DNI$ , la variabilité tend à s'amenuiser. Ceci s'explique pour deux raisons: tout d'abord une corrélation entre le  $DNI$  et le  $SMR$  existe. Comme le montre la figure 2.14, la valeur maximale de  $SMR$  est obtenue en milieu de journée, là où l'ensoleillement (donc le  $DNI$ ) est le plus fort. Ensuite, les valeurs

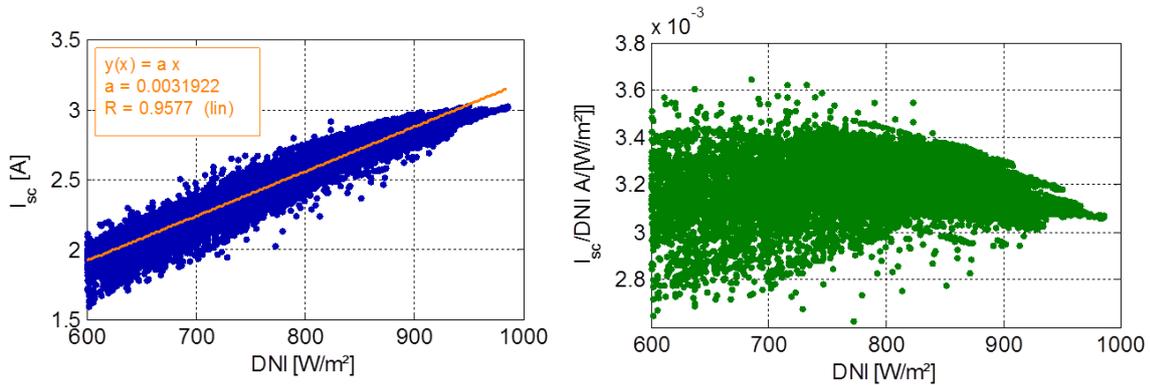


Figure 2.17: Relation entre  $DNI$  et  $I_{sc}$  (gauche), ainsi que le rapport  $I_{sc}/DNI$  pour le module A.

de  $DNI$  supérieures à  $950 \text{ W/m}^2$  sont des valeurs extrêmes d'ensoleillement que l'on peut observer pour des positions du soleil dans le ciel élevées (typiquement le solstice d'été), avec une fréquence d'apparition faible. Logiquement, les conditions ambiantes présenteront une faible variabilité impliquant une faible variabilité de la réponse électrique du module.

### 2.4.1 Impact du spectre solaire

L'influence principale des variations de spectre s'opère sur la génération de courant. En effet, rappelons que l'empilement en série des jonctions de la cellule engendre une limitation du courant de toute la cellule par la jonction générant le moins de courant. Il existe un spectre donné, donc un certain  $SMR_{mid}^{top}$  dans le cadre des cellules étudiées, pour lequel le courant de la sous-cellule *top* équivaut à celui de la sous-cellule *middle*. Ce point de convergence est caractérisé par le terme de *current matching* (équilibre des courants), que nous utiliserons dans la suite du rapport. Des pertes en courant sont attendues en dehors de ce spectre optimal. Cet effet est visible pour les différentes technologies sur la figure 2.18. Les points tracés représentent la valeur  $I_{sc}/DNI$  en fonction du  $SMR_{mid}^{top}$ , normalisée par la taille de lentille pour permettre une meilleure comparaison entre les technologies.

Plusieurs résultats peuvent être tirés de ces courbes. Tout d'abord, nous constatons bien un maxima de photogénération pour chaque module (nommé CM sur les courbes pour *Current Matched*), point où les sous-cellules *top* et *middle* génèrent le même courant. Ce point correspond à une conversion optimale du spectre incident. Pour des valeurs de  $SMR_{mid}^{top}$  supérieures à ce point de *current matching*, la composante bleue est plus importante: un déséquilibre apparaît alors. la jonction *top* génère davantage de courant que la jonction *middle*, et c'est la jonction *middle* qui va imposer la valeur du courant de court-circuit  $I_{sc}$  de la cellule. Le phénomène inverse est observé pour des valeurs de  $SMR_{mid}^{top}$  inférieures

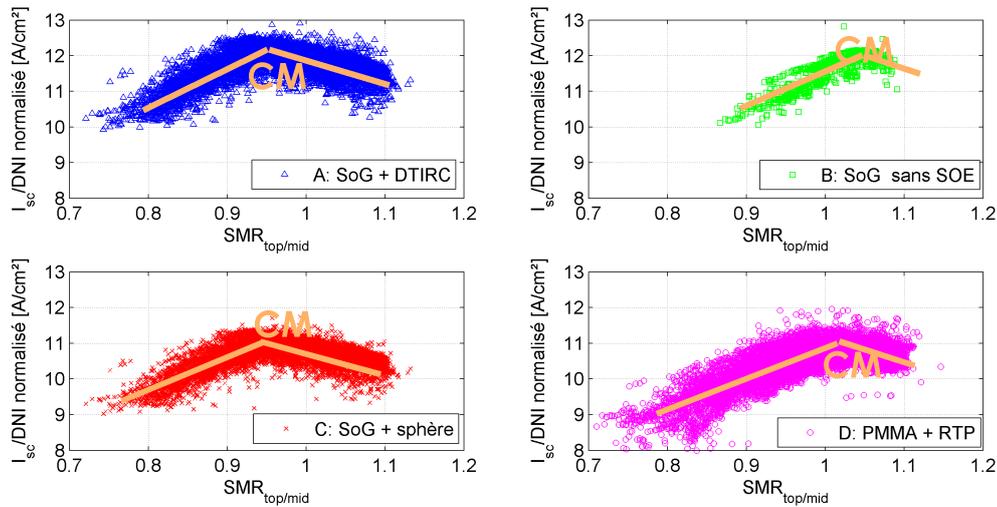


Figure 2.18: Impact du ratio  $SMR_{mid}^{top}$  sur le rapport  $I_{sc}/DNI$  pour les technologies étudiées. La valeur d' $I_{sc}/DNI$  a été normalisée par la surface de lentille pour permettre une meilleure comparaison entre technologies. Les pics observés correspondent aux conditions spectrales de *current matching*.

au point de *current matching*, où la génération de courant est limitée par la jonction *top*. Le  $SMR_{mid}^{top}$  pour lequel il y a *current matching* varie de manière conséquente en fonction de la technologie considérée: de  $\simeq 0,94$  pour la technologie A, à  $\simeq 1,03$  pour le module B. Ces valeurs sont à corréler aux observations faites dans la section 2.3: le module B se montre plus adapté au site d'étude où une valeur de  $SMR_{mid}^{top}$  de 1,1 prédomine pour des  $DNI > 700 \text{ W/m}^2$ . De telles différences de comportements spectraux ne peuvent s'expliquer par des technologies de cellules différentes puisque les modules testés sont équipés de cellules triple-jonctions proches quant aux deux jonctions *top* et *middle*. C'est le comportement de l'optique de concentration, notamment sa transmittance optique pour la position et l'aire de la cellule considérée, qui va impacter le comportement spectral du module.

La dépendance de la photogénération au spectre incident peut ainsi être approximée par une fonction par morceaux, avec une valeur maximale pour les conditions de *current matching*. La pente des deux tendances (visibles en orange sur la figure 2.18) correspond aux pertes en courant résultant du déséquilibre spectral. Pour une variation de l'ordre de 0,1 du  $SMR_{mid}^{top}$ , nous observons une chute de la grandeur  $I_{sc}/DNI$  d'environ 10% par rapport à la valeur maximale pour les différentes technologies. Cette perte en courant de court-circuit  $I_{sc}$  va engendrer une baisse de rendement du même ordre de grandeur. Cet impact négatif va logiquement engendrer une baisse du rendement. Mais le rendement dépend également d'autres paramètres comme le facteur de forme  $FF$ . La figure 2.19 représente la variation de ce facteur  $FF$  avec le  $SMR_{mid}^{top}$  pour les différentes technologies.

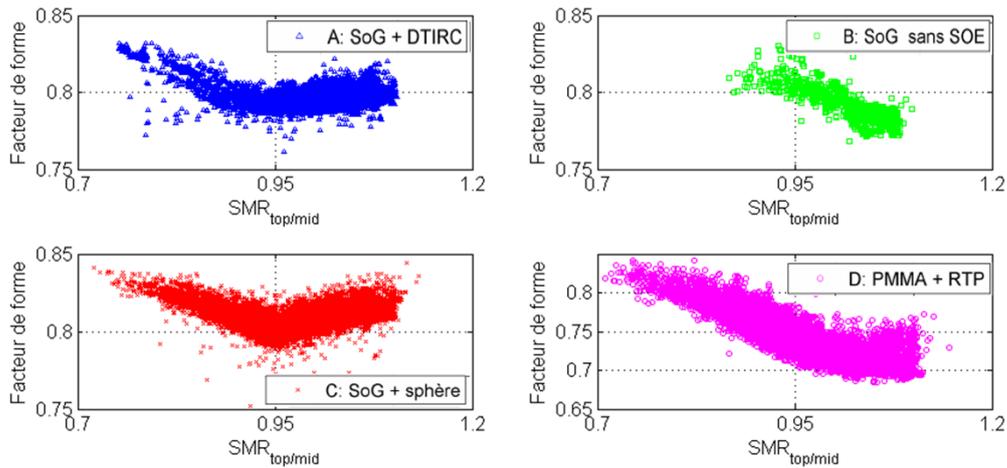


Figure 2.19: Impact du ratio  $SMR_{mid}^{top}$  sur le facteur de forme  $FF$  pour les technologies étudiées.

Nous constatons une valeur minimale du facteur  $FF$  dans les conditions spectrales de *current matching*. L'effet du déséquilibre spectral entre les sous-cellules sur la courbe  $IV$  a été étudié dans [72]. Il a été montré que le facteur de forme  $FF$  augmente avec le déséquilibre spectral entre les sous-cellules. En effet, en parallèle d'une diminution de la photogénération de courant, nous observons une augmentation de la tension au point de puissance maximum, générant une augmentation du  $FF$ . Ceci se concrétise par un minima local au  $SMR_{mid}^{top}$  où il y a *current matching*. L'amplitude des variations diffèrent en revanche pour chaque module. Dans le cas des modules A et C, le facteur de forme se situe entre des valeurs de 84 à 79% . Pour le module B, la valeur oscille plutôt entre 83 et 77% et enfin pour le dernier module D, la plage est très large : de 69 à 85%. Ces variations de facteur de forme  $FF$  sont importantes et le déséquilibre spectral ne peut expliquer à lui seul de telles amplitudes. Dans [46, 73], les travaux se penchent sur d'autres sources de diminution du facteur de forme, et détaillent comment les non-uniformités spectrales et spatiales de l'irradiance sur la cellule, typiques pour chaque optique, causent des pertes de performance électrique. Il est ainsi possible que pour l'architecture optique du module D, des non-uniformités soient à l'origine des variations importantes de facteur de forme. Nous étudierons cela plus en détail dans le chapitre 4.

De l'effet combiné des variations de courant et de facteur de forme, découlent les variations de rendements représentées sur la figure 2.20. Nous constatons pour les modules A, B et C que le rendement évolue avec les mêmes tendances que le courant. En effet, la variation de courant avec le  $SMR_{mid}^{top}$  est plus importante que celle du facteur de forme. En conséquence bien que les tendances observées pour ces deux paramètres s'opposent, c'est la variation de courant qui prédomine sur la production d'énergie par le module. Le module D

fait titre d'exception, puisque le rendement paraît plutôt stable avec les variations spectrales. Dans ce cas l'addition des comportements du facteur de forme et du courant s'annule et le rendement du module semble faiblement impactée par le spectre.

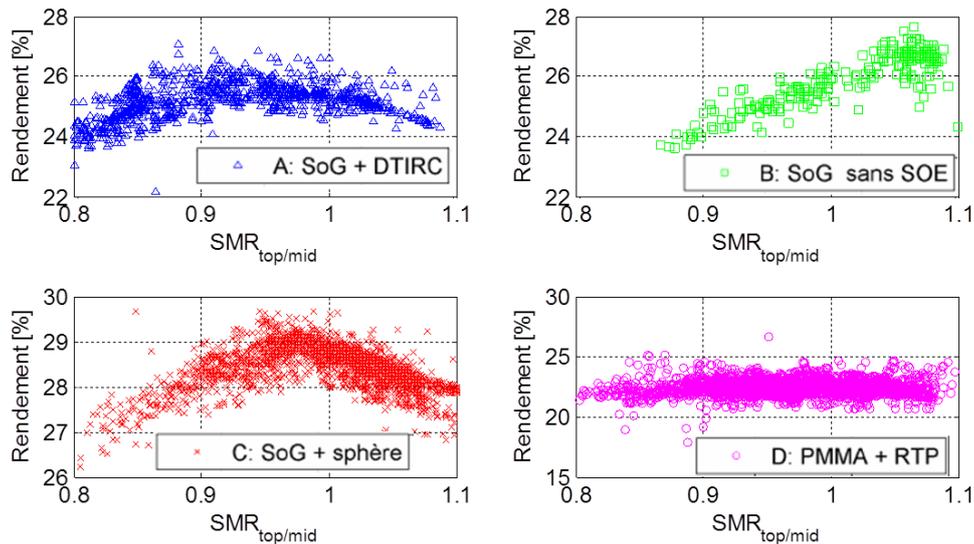


Figure 2.20: Impact du ratio  $SMR_{mid}^{top}$  sur le rendement pour les technologies étudiées. Les valeurs ont été filtrées en  $T_{lentille}$  et  $T_{cell}$  pour s'affranchir des effets liés à ces paramètres.

Les variations observées en terme de facteur de forme ou de l'indicateur  $I_{sc}/DNI$  en fonction de la composition spectrale, bien que présentant des tendances claires, montrent une certaine variabilité. Nous avons volontairement, pour les graphes précédents, décidé d'appliquer des critères de filtrage larges, correspondant au filtrage de base, afin de souligner l'influence dominante de la composition spectrale dans la génération de courant. Ceci ne doit pas faire oublier que d'autres paramètres influent sur la génération de courant. En témoigne la figure 2.21, où le paramètre  $I_{sc}/DNI$  est représenté en fonction du  $SMR_{mid}^{top}$  pour le module B. L'échelle colorimétrique correspond à la température de lentille. Comme nous le verrons dans la section 2.6.2, ce module présente une sensibilité positive à la température  $T_{lentille}$  particulièrement importante. Pour la température  $T_{lentille} \simeq 40^{\circ}\text{C}$ , le point de *current matching* est ici particulièrement visible, i.e pour  $SMR_{mid}^{top}$  égal à 1,04.

Au vu de cette observation, nous allons maintenant appliquer un filtrage plus serré sur les conditions d'opération pour observer la sensibilité spectrale de l'indicateur  $I_{sc}/DNI$ . Nous allons utiliser une représentation graphique différente, appelée le diagramme des sous-cellules, très utile pour l'analyse de limitation spectrale du courant par les sous-cellules.

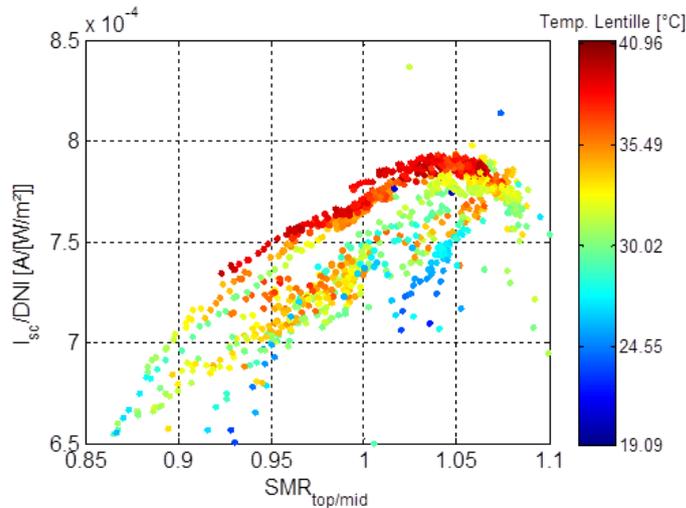


Figure 2.21: Evolution du rapport  $I_{sc}/DNI$  en fonction de l'indicateur de spectre  $SMR_{mid}^{top}$ . L'échelle colorimétrique montre l'influence de la température de lentille  $T_{lentille}$  sur la dispersion des valeurs.

## 2.4.2 Étude du diagramme des sous-cellules

Le diagramme des sous-cellules est une méthode de quantification du *current matching* d'un dispositif CPV sous différentes conditions spectrales. Il a été présenté dans [33] et se base sur l'utilisation d'un spectro-pyrhéliomètre mesurant le rapport spectral  $SMR$ . Pour des cellules isotypes et des sous-cellules de réponses spectrales proches, tout changement d'irradiance produit une variation équivalente du courant de la cellule triple-jonction, et de l'isotype correspondant à la sous-cellule limitante. Nous utilisons ce principe pour identifier les zones spectrales où chaque sous-cellule est limitante. Dans un premier temps, il est nécessaire de normaliser le courant  $I_{sc}$  du module (ou de la cellule) par le  $DNI_i$  de chaque isotype  $i$  selon la formule 2.3:

$$I_{N,i} = \frac{I_{sc}}{DNI_i} \quad (2.3)$$

Où  $I_{N,i}$  correspond au courant du module normalisé par le  $DNI$  de l'isotype  $i$ .

Pour les conditions spectrales dans lesquelles la sous-cellule  $i$  est limitante, la grandeur  $I_{N,i}$  sera constante. Ceci est illustré par la figure 2.22, où le diagramme des sous-cellules a été tracé pour un module mesuré dans le simulateur solaire *Helios*, lui aussi équipé d'un spectro-pyrhéliomètre. Dans la zone gauche où la grandeur  $I_{N,top} = I_{sc}/DNI_{top}$  (bleu) est constante, le module mesuré est limité par la sous-cellule *top*. De manière analogue, pour la zone de droite, où la courbe rouge est constante, le module est limitée par la sous-cellule *middle*. Pour le spectre  $SMR_{mid}^{top}$  égal à 1, soit le spectre de référence AM1.5D, les 2 jonctions

délivrent le même courant. Précisons ici que la forme du diagramme présentée, où les deux zones de chaque courbe (limitation et non-limitation) peuvent être assimilées à des droites, correspond à un comportement idéal. Certains phénomènes, comme les non-uniformités spectrales, peuvent affecter la forme de ce diagramme (tendance et rupture de pente moins nette) [33].

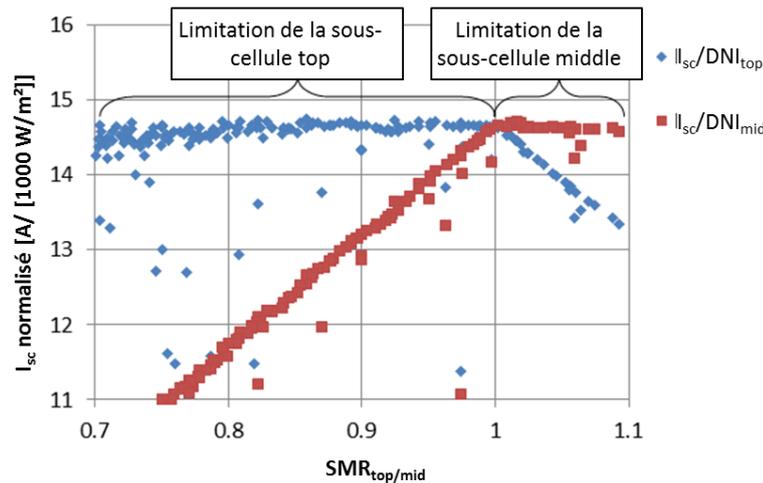


Figure 2.22: Exemple d'un diagramme des sous-cellules *top* et *middle* d'un module équipé de cellules triple-jonction *lattice-matched*. La mesure a été effectuée à l'intérieur du simulateur solaire du CEA pour modules CPV.

Cette méthodologie est appliquée aux modules testés, après avoir resserré le filtre pour des valeurs  $T_{lentille} = 30^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ . Le résultat, illustré sur la figure 2.23, est cohérent avec les observations de la section précédente. Pour les modules A, C et dans une moindre mesure D, nous constatons que pour les régions où la pente est nulle (ou faible), le ratio  $I_{sc}/DNI_{mid}$  est moins élevé que le ratio  $I_{sc}/DNI_{top}$ . Ceci signifie que le rendement optique du module est plus faible pour la région spectrale correspondant à la réponse de la sous-cellule *middle*. Par conséquent, nous constatons un déséquilibre en courant pour le spectre de référence AM1.5D. Le module se retrouve dans des conditions de *current matching* pour des spectres avec  $SMR_{mid}^{top}$  inférieur à 1 (riche en rouge donc). Pour le module B, le *current matching* s'observe pour des spectres riches en bleu.

Ces comportements différents témoignent de l'importance que joue l'optique de concentration dans le comportement spectral du module. En effet, le type de cellules utilisées dans les modules à concentration est généralement optimisé pour le spectre AM1.5D, soit  $SMR_{mid}^{top}$  égal à 1, correspondant aux conditions STC des normes de test. Une fois la cellule intégrée au module, les résultats montrent une modification de cet optimum spectral qui dépend de l'optique considérée. La raison à cela est l'altération du spectre incident par l'optique de

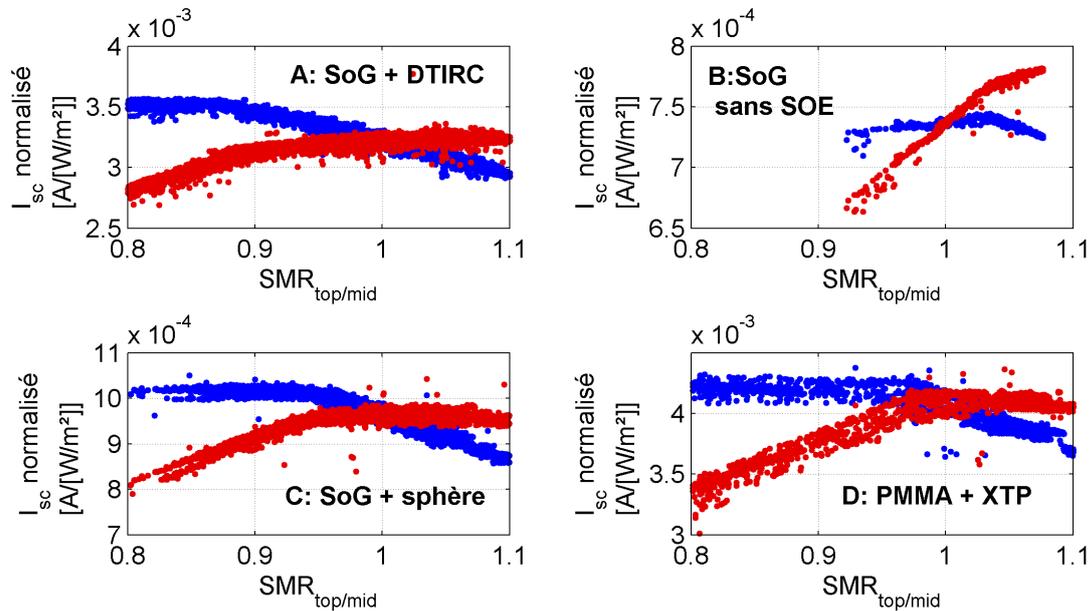


Figure 2.23: Diagramme des sous-cellules *top* et *middle* des technologies étudiées.

concentration, selon sa transmission. La cellule voit alors un spectre incident différent du spectre en entrée d'optique primaire, équivalent à celui mesuré par le spectro-pyrhéliomètre. Nous observons alors logiquement un décalage de l'optimum spectral, et il est primordial de considérer l'ensemble "optique-cellule" quant à l'étude du comportement spectral en extérieur. Notons que ce décalage peut varier avec la température de l'optique, comme nous l'étudierons en détails au chapitre 4. Intéressons-nous maintenant au rôle que peut jouer la part circumsolaire du rayonnement incident.

### 2.4.3 Impact du rayonnement circumsolaire

Le rayonnement circumsolaire a été introduit dans le chapitre 1: il est créé par la diffusion de la lumière dans la région périphérique du disque solaire. Ce phénomène est particulièrement visible pour un ciel brumeux, où le halo solaire est plus important. Pour caractériser le rayonnement circumsolaire, nous définissons le *CircumSolar Ratio* (CSR), correspondant à la fraction du rayonnement direct provenant de la région extérieure au disque solaire ( $\pm 0,27^\circ$ ). La courbe angulaire d'irradiance relative est représentée en figure 2.24 pour des ratios CSR de 5 et 20% (l'échelle des ordonnées est logarithmique) [74].

Compte-tenu de la différence de réponse angulaire entre le pyrhéliomètre et un module CPV (angle d'acceptance  $AA_{90\%}$  de  $0,35$  à  $\sim 1^\circ$  pour les technologies étudiées), la lumière collectée par le capteur de *DNI* peut être supérieure à celle collectée par le module étudié. En

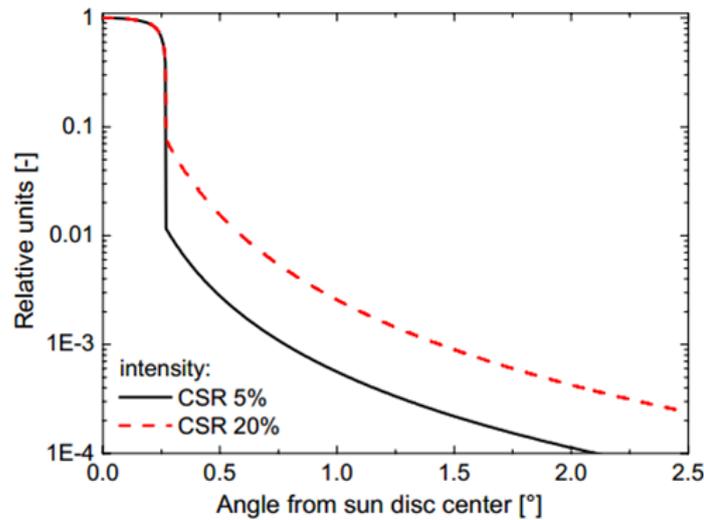


Figure 2.24: Irradiance solaire relative en fonction de l'angle de mesure pour deux différents profils de circumsolaire ( $0^\circ$  correspondant au centre du soleil) [74].

conséquence l'irradiance considérée lors de la mesure électrique du module sera surestimée et le rendement du module sera lui sous-estimé [75]. Ainsi il a été montré que pour une part de rayonnement CSR de l'ordre de 15%, nous constatons une baisse de rendement d'environ 5% pour un module sans optique secondaire [74]. Logiquement cette baisse de rendement dépend de l'angle d'acceptance du module: plus l'angle d'acceptance est grand (se rapproche de celui du pyrhéliomètre), plus la baisse en rendement est faible. Notons également qu'une valeur de CSR de 15% existe uniquement pour des *DNI* faibles, synonymes d'un ciel voilé peu favorable au fonctionnement de modules CPV. En effet, il existe une étroite corrélation entre le CSR et le *DNI*, dans la mesure où le CSR est fonction de la clarté du ciel, donc de la quantité de rayonnement direct. Dans le cadre d'un ciel clair, les valeurs de CSR sont plus typiquement de l'ordre de 1 à 5% [76].

Ne disposant pas de capteurs opérationnels sur le site d'étude pour la période considérée, nous avons recours à une grandeur alternative pour estimer le CSR. Comme mentionné précédemment, le CSR est fonction de la clarté du ciel. Cette clarté peut s'exprimer au moyen du rapport entre le *DNI* et le *GNI*. Plus ce rapport est élevé, plus le ciel est qualifié de clair et moins l'atmosphère est diffusant. Bien que ne constituant pas une quantification du CSR, cette grandeur a l'avantage d'être disponible facilement puisque seul un pyrhéliomètre et un pyranomètre sont nécessaires. La figure 2.25 représente la variation de  $I_{sc}/DNI$  en fonction du  $DNI/GNI$  et du *DNI* (échelle colorimétrique) pour le module A. Lorsque l'on s'intéresse à des *DNI* constants (même couleur de points), une dépendance positive de  $I_{sc}/DNI$  à la grandeur  $DNI/GNI$  est visible. Ceci est en cohérence avec les hypothèses

formulées, dans la mesure où lorsque  $DNI/GNI$  augmente (ciel plus clair), le CSR diminue (pas d'effet de sous-estimation du rendement).

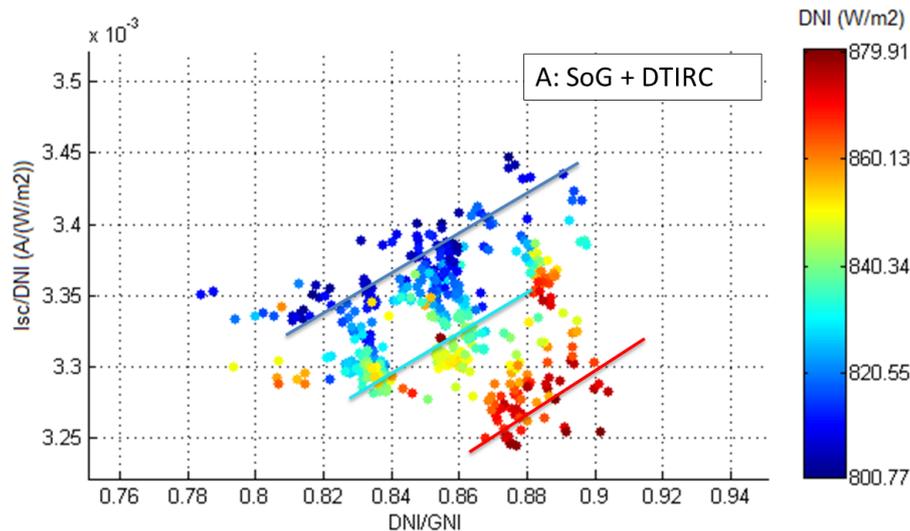


Figure 2.25: Impact de l'indicateur  $DNI/GNI$  sur le paramètre  $I_{sc}/DNI$  pour différentes irradiances (échelle colorimétrique).

Pour les autres technologies, nous n'avons pas observé de tendances claires. Plusieurs raisons peuvent expliquer cela: d'abord mentionnons que les valeurs de CSR typiquement observables sont de l'ordre quelques % pour des valeurs de  $DNI$  supérieures à  $700 \text{ W/m}^2$ , entraînant des variations théoriques de génération de courant faibles, de l'ordre de 1% [74, 77]. Ainsi, même en appliquant des filtres très contraignants (tout en ayant un nombre suffisant de données), l'impact du CSR sur la génération courant est difficile à isoler. De plus, le rapport  $DNI/GNI$  se veut un estimateur grossier du CSR : il ne peut se substituer complètement à la valeur quantitative du CSR et en conséquence ne peut être considéré comme une grandeur fiable d'analyse. Ce rapport a toutefois servi à diminuer la dispersion des valeurs dans le cadre des études menées. Des observations qualitatives ont permis de sélectionner les mesures avec un rapport  $DNI/GNI$  supérieur à 0,75 comme critère de filtrage (voir section 2.3.2).

## 2.5 Influence de la température cellule

La température de cellule est un paramètre important dans la détermination du rendement de la cellule. En effet, la relation de linéarité entre la tension en circuit ouvert  $V_{oc}$  et la température de cellule  $T_{cell}$  est bien connue : nous observons une baisse de la tension  $V_{oc}$  avec l'augmentation de température (voir chapitre 1). Ce coefficient thermique  $\beta_{V_{oc}}$  diminue

au fur et à mesure que la concentration augmente, et on trouve plus généralement des valeurs de l'ordre de  $-0,15 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$  pour les modules HCPV [35, 36]. Compte-tenu de la dépendance positive plus faible du courant de court-circuit (de l'ordre de  $0,05\text{-}0,07 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$  [78]), un impact négatif de la température cellule est attendu sur le rendement du module. Nous allons voir dans un premier temps comment déterminer cette température à partir de la mesure de la température du module. Ensuite, nous étudierons plus généralement comment cette température varie en fonction du module et son influence sur les caractéristiques électriques des modules étudiés.

### 2.5.1 Détermination de la température de cellule en extérieur

La température de cellule  $T_{cell}$  n'est pas disponible directement par la mesure puisque il n'est pas envisageable de placer un thermocouple sur la cellule. Seule la mesure de température  $T_{module}$  en face arrière est disponible. Mais la différence entre cette température et la température de cellule  $T_{cell}$  n'est pas constante et peut varier de l'ordre de  $10^{\circ}\text{C}$  à  $30^{\circ}\text{C}$  en fonction de la capacité du module à dissiper la chaleur, de la qualité d'adhésion au niveau thermique de la sonde de température, de la position de la sonde et des paramètres environnementaux comme le vent et l'irradiance [66].

Plusieurs méthodes existent pour déterminer expérimentalement la température  $T_{cell}$ . Il est ainsi envisageable que le fabricant ait préalablement caractérisé la résistance thermique entre la cellule et l'arrière du module. Il est alors possible de revenir à la température de cellule en connaissant la température en face arrière du module. Cependant, une fois le thermocouple collé, la fiabilité de ce procédé resterait à démontrer compte-tenu des différences de mode opératoire (position de la sonde et qualité d'adhésion notamment). Une deuxième méthode a été étudiée dans [65] et consiste à couvrir le module, puis le découvrir rapidement en mesurant avec une haute fréquence d'acquisition la variation de  $V_{oc}$ . Là aussi, cette méthode est difficilement applicable à des mesures sur du long terme. L'approche que nous privilégions dans ce travail est celle connue sous le nom de "méthode  $V_{oc} - I_{sc}$ " décrite dans [79], et utilisée dans la norme IEC 62670 [11]. Rappelons d'abord comment évolue la tension  $V_{oc}$  pour une seule cellule, avec la température de cellule  $T_{cell}$  (eq. 2.4):

$$V_{oc}(I_{sc}, T_{cell}) = V_{oc}(I_{sc,ref}, T_{cell,ref}) + \frac{nkT_{cell,ref}}{q} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_{sc,ref}}\right) + \beta_{V_{oc}}(T_{cell} - T_{cell,ref}) \quad (2.4)$$

Avec  $n$ , le facteur d'idéalité de la diode. Dans le cadre de cellules triple-jonctions, il est considéré  $\simeq 3$ . L'indice *ref*, fait référence à des mesures effectuées dans des conditions connues, i.e. typiquement les conditions standard de mesures intérieurs STC.

En ajoutant un certain nombre de cellules en série, il est possible d'extraire la température de cellule selon l'équation 2.5:

$$T_{cell} = \frac{V_{oc} - V_{oc,ref} + N_s \beta_{V_{oc}} T_{cell,ref}}{N_s \frac{nk}{q} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_{sc,ref}}\right) + N_s \beta_{V_{oc}}} \quad (2.5)$$

Avec  $N_s$ , le nombre de cellules en série du module.

Cette équation nécessite de connaître  $\beta_{V_{oc}}$ . Ce dernier est déterminé expérimentalement en étudiant la corrélation entre la température du module et la  $V_{oc}$ , ainsi qu'en optimisant le filtrage des données afin de réduire l'impact d'autres facteurs sur la température cellulaire. Nous choisissons ainsi de fixer la vitesse du vent  $W_{speed}$  à une plage allant de 1 m/s à 3 m/s. De la même manière, il est nécessaire de prendre en compte l'influence de la concentration sur la tension en circuit ouvert  $V_{oc}$ . Cette influence est représentée pour le module C sur la figure 2.26, où  $V_{oc}$  est tracée en fonction de la température de cellule estimée. L'échelle colorimétrique représente le DNI.

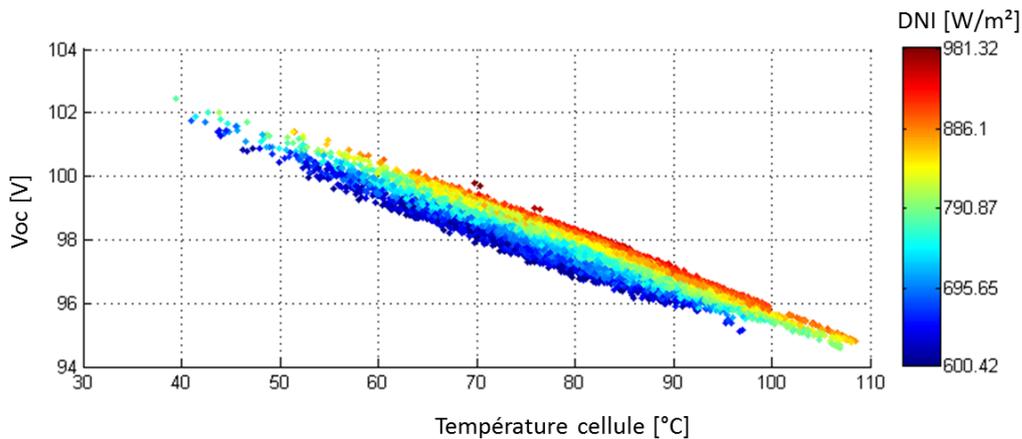


Figure 2.26: Tension  $V_{oc}$  mesurée en fonction de la température de cellule  $T_{cell}$  estimée et de l'irradiance pour le module C (échelle colorimétrique).

Compte-tenu de l'impact de la concentration sur la tension en circuit ouvert  $V_{oc}$ , nous appliquons un filtrage sur le courant de court-circuit  $I_{sc}$ , indicateur de la concentration effective sur la cellule, pour déterminer  $\beta_{V_{oc}}$ . Nous autorisons 3% de variations autour de la valeur moyenne de courant de court-circuit  $I_{sc}$  pour un DNI de  $850 \text{ W/m}^2 \pm 20 \text{ W/m}^2$ . Une fois le coefficient déterminé, nous pouvons calculer la température de cellule pour les autres mesures électriques. Nous considérerons le coefficient applicable à l'ensemble de la plage de mesures. Voyons maintenant les résultats obtenus.

### 2.5.2 Impact de la température de cellule

La variation de la tension en circuit ouvert avec la température de cellule est représentée sur la figure 2.27. Le critère de filtrage appliqué est celui mentionné dans la sous-section précédente. La plage de température cellule plus faible pour le module B est liée à la période de mesure réduite (de mi-Septembre à début Octobre) où les températures ambiantes sont plus faibles que pour les mois estivaux où les autres modules ont été mesurés. Nous observons une variation du coefficient  $\beta_{V_{oc}}$  de  $-0,12\%/^{\circ}\text{C}$  à  $-0,16\%/^{\circ}\text{C}$ , cohérente avec les études menées [35, 36, 80]. Si nous nous en tenons aux modules A, B et D équipées de cellules triple-jonctions GaInP/GaAs/Ge, une certaine variabilité était attendue puisque la concentration géométrique varie entre ces modules. Ce qui est plus surprenant au premier abord est que cette variabilité n'est pas en rapport direct avec le facteur géométrique de concentration. Ainsi le module B qui possède la concentration géométrique la plus faible, montre une dépendance de la tension  $V_{oc}$  à la température plus faible que pour les modules A et D pourtant de concentration géométrique supérieure. L'inverse était attendu puisque le coefficient  $\beta_{V_{oc}}$  diminue (en valeur absolue) avec la concentration.

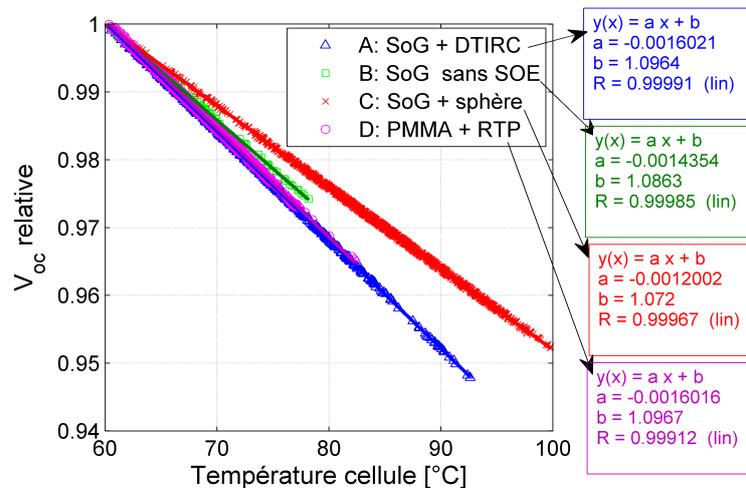


Figure 2.27: Relation entre la tension  $V_{oc}$  et la température de cellule  $T_{cell}$ . La tension  $V_{oc}$  a été normalisée par sa valeur à  $60^{\circ}\text{C}$ .

Une raison plausible expliquant ce phénomène est la distribution spatiale de l'irradiance sur la cellule. Dans le cas d'une distribution non-uniforme (typiquement lorsqu'aucun SOE n'est utilisé), nous constatons une différence entre le niveau moyen de l'irradiance sur la cellule et le niveau de pic atteint localement [46]. Ainsi, bien que la concentration moyenne soit plus faible pour le module B, il est possible que localement on observe des valeurs effectives de concentration plus élevées. La réponse à ce phénomène en terme électrique

est complexe, mais il est nécessaire de considérer ces non-uniformités spatiales lorsque l'on souhaite étudier les effets de la concentration et de la température sur la tension  $V_{oc}$ . Une deuxième implication de cette hypothèse et des résultats, est que le coefficient en température  $\beta_{V_{oc}}$  d'une cellule (déterminé généralement pour un éclairage uniforme) ne peut s'appliquer simplement au module, constitué de cellules éclairées de manière non-uniforme, et qu'il est préférable de mesurer expérimentalement à l'échelle du module ce coefficient.

Lorsque nous nous intéressons à l'effet de la température cellule sur le facteur de forme  $FF$  et le courant de court-circuit  $I_{sc}$ , les tendances sont moins évidentes à démontrer. En effet, compte-tenu des coefficients faibles de dépendance de ces deux paramètres [81], et de la sensibilité importante de la génération de courant à d'autres facteurs comme l'angle de désalignement, le spectre, ou la température de lentille, il est difficile de décorrélérer les effets tout en obtenant un jeu de données suffisant. Ainsi nous limiterons notre analyse pour le module C, module où un compromis a pu être trouvé entre un nombre de données représentatif et une limitation de l'impact des autres paramètres d'étude par un jeu de filtres restrictifs. Ainsi la température de lentille a été filtrée pour des valeurs entre  $32^{\circ}\text{C}$  et  $36^{\circ}\text{C}$ , le  $SMR_{mid}^{top}$  pour des valeurs entre 1,045 et 1,06 et la plage de variation des angles de désalignement azimuth et élévation est fixée à  $\pm 0,15^{\circ}$ . Le résultat est visible sur la figure 2.28.

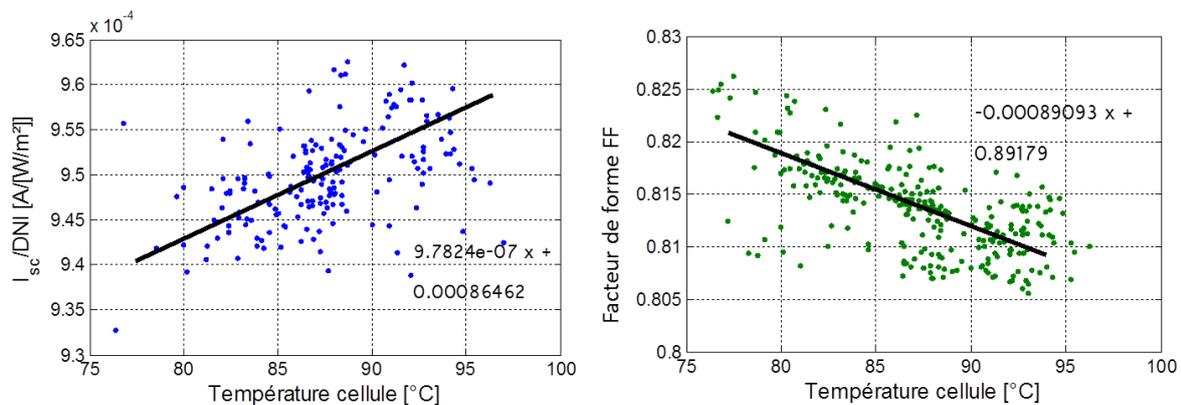


Figure 2.28: Impact de la température de cellule  $T_{cell}$  sur le courant  $I_{sc}$  (gauche) et le facteur de forme  $FF$  (droite) pour la technologie C. Les critères de filtrage ont été optimisés pour s'affranchir de l'impact des autres paramètres.

L'impact de la température cellule sur le courant de court-circuit et le facteur de forme est inverse. Alors que pour la photogénération, nous constatons une augmentation relative du courant de l'ordre de  $0,1\%/^{\circ}\text{C}$  une tendance opposée du même ordre de grandeur ( $-0,1\%/^{\circ}\text{C}$ ) s'observe quant à la variation du facteur  $FF$  avec la température de cellule  $T_{cell}$ . Ces valeurs apparaissent légèrement plus élevées que les résultats obtenus dans [36], où des coefficients

en température de courant entre  $+0,03\%/^{\circ}\text{C}$  et  $+0,08\%/^{\circ}\text{C}$  ont été reportés. Rappelons aussi que le coefficient a été déterminé dans des conditions spectrales fixes, alors qu'une certaine dépendance à ce paramètre a été démontrée. A la lumière de ces observations, il apparaît sage de considérer ces résultats comme qualitatifs, plutôt que quantitatifs, et de retenir la tendance de ces paramètres avec la température de cellule  $T_{cell}$ .

## 2.6 Influence de la température lentille

Lors de leur exposition en extérieur, les lentilles primaires des modules testés ont été soumises à différentes conditions ambiantes. Ainsi, leur température de fonctionnement n'est pas constante. Cette variabilité va impacter les propriétés optiques du concentrateur dans une certaine mesure. Tout d'abord, nous allons présenter le modèle utilisé pour déterminer la température de lentille. Ensuite, nous verrons comment le comportement électrique évolue en fonction de ce paramètre.

### 2.6.1 Détermination de la température de lentille

La température de lentille est un paramètre a priori accessible par la mesure. Cependant, il n'est pas souhaitable de placer une sonde de température sur l'optique: celle-ci serait située sur le chemin optique des rayons lumineux et impliquerait une diminution de l'irradiance sur une des cellules du module. Pour quantifier ce paramètre, nous avons développé un modèle simple [82] qui permet d'estimer la température de lentille à partir de la température  $T_{module}$  mesurée en face arrière, de la température ambiante  $T_{amb}$  et des caractéristiques du module mesuré. Le modèle thermique consiste à reproduire un schéma électrique équivalent du module CPV (fig 2.29), qui s'appuie sur le principe suivant: 1) La lumière concentrée par l'optique provoque l'échauffement de la cellule; 2) La chaleur se dissipe via le substrat et la plaque arrière du module; 3) Cette plaque arrière évacue la chaleur par convection à l'intérieur et à l'extérieur du module; 4) Le volume intérieur chauffée par la convection transfère une partie de cette chaleur à la lentille; 5) La lentille conduit cette chaleur vers l'extérieur.

Où  $R_{convection}$  équivaut à la résistance thermique de convection,  $R_{conduction,lentille}$ , la résistance de conduction de la lentille et  $Q$  la puissance dissipée en face avant du module.

En s'appuyant sur ce modèle, on peut alors calculer la puissance  $Q$  par l'équation 2.6:

$$Q = \frac{T_{module} - T_{amb}}{2R_{convection,interne} + R_{conduction,lentille} + R_{convection,avant}} \quad (2.6)$$

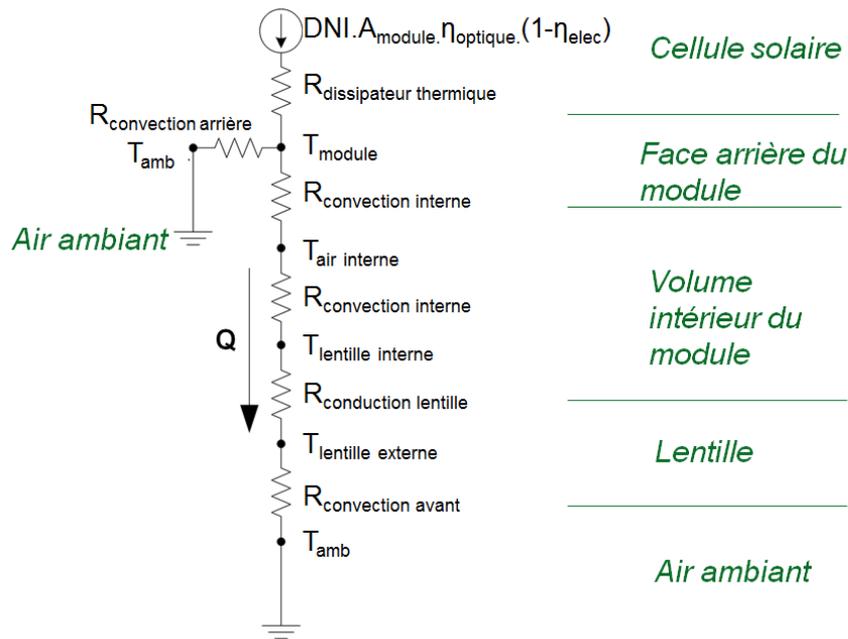


Figure 2.29: Schéma électrique équivalent du modèle thermique utilisé pour déterminer la température de lentille  $T_{lentille}$  [83].

La résistance thermique de conduction  $R_{conduction,lentille}$  a été estimée à partir de la conductivité thermique des matériaux et de l'épaisseur de la lentille. Ne disposant pas des chiffres exacts pour chaque technologie, nous fixons cette valeur à  $0,095/A_{module}$ , avec  $A_{module}$  correspondant à l'aire du module (face avant).

La température de lentille  $T_{lentille,externe}$  s'exprime alors (Eq. 2.7):

$$T_{lentille,externe} = T_{amb} + Q \cdot R_{convection,avant} \quad (2.7)$$

On remplace dans les équations précédentes les résistances de convection par (Eq. 2.8):

$$R_{convection} = \frac{1}{A_{module} \cdot h} \quad (2.8)$$

Où  $h$  est le coefficient de convection du milieu considéré. Dans le cas du volume interne, il sera fixé à la valeur  $h_{interne} = 5W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$  (correspondant à une absence de vent). Pour l'extérieur, il dépendra de la vitesse du vent selon la formule 2.9, utilisée fréquemment dans la littérature relative aux échanges thermiques [84]:

$$h_{externe} = 7.13W_{speed}^{0.78} + 5.35e^{-0.6W_{speed}} \quad (2.9)$$

L'étude décrite dans [82] a permis de tester le modèle sur trois différentes technologies (dont les technologies A et B présentés dans cette thèse. Les modules ont été équipés de capteurs de température sur la lentille en face avant pendant une période de plusieurs dizaines de jours, et les mesures ont alors été comparées aux résultats de modélisation. Une erreur quadratique (RMSE) de  $2,9^{\circ}\text{C}$  a été trouvée pour une période de mesures de 90 jours sur le module A pour des mesures s'étalant sur une plage de  $44^{\circ}\text{C}$ . Les résultats sont jugés satisfaisants et nous appliquons le modèle aux modules testés.

## 2.6.2 Impact de la température de lentille

L'impact de la température de lentille va principalement s'effectuer sur le rendement optique. Nous nous intéressons logiquement à la variation de l'indicateur  $I_{sc}/DNI$  avec la température. Ce paramètre est représenté pour le module C en fonction de  $T_{lentille}$  sur la figure 2.30. L'échelle colorimétrique  $SMR_{mid}^{top}$  permet d'ajouter une dimension spectrale au graphique. Tout d'abord, la gamme de température estimée s'étend sur une plage de  $15^{\circ}\text{C}$  à  $46^{\circ}\text{C}$ . Sur cette plage, nous observons bien une dépendance du rendement optique à spectre constant: pour chaque couleur, une tendance positive à  $T_{lentille}$  se dessine. La quantification de cette tendance nécessite un filtrage serré autour du critère de spectre.

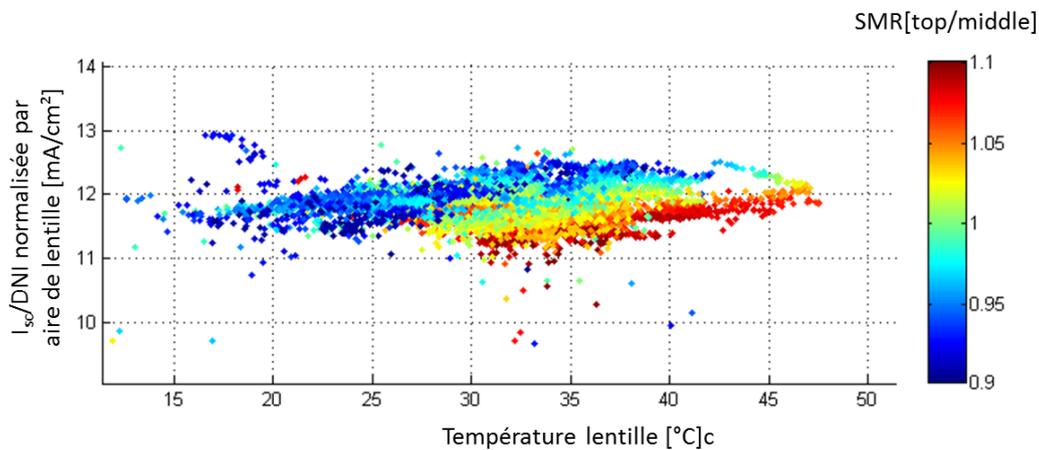


Figure 2.30: Relation entre la grandeur  $I_{sc}/DNI$  normalisée par l'aire de lentille et la température  $T_{lentille}$  pour le module C, pour différentes compositions spectrales (échelle colorimétrique).

Compte-tenu des observations précédentes, nous autorisons des variations de spectre de l'ordre de  $\pm 1\%$  autour d'une valeur de  $SMR_{mid}^{top}$  optimisée pour maximiser la gamme de valeurs  $T_{lentille}$ . Pour le cas du module C présenté précédemment, nous choisissons ainsi une valeur  $SMR_{mid}^{top}$  égale à 0,95. Nous appliquons également un second critère  $DNI/GNI =$

0,87 ± 0,2, afin de limiter la dispersion des valeurs. La valeur  $I_{sc}/DNI$  normalisée par l'aire de lentille, afin d'apparaître sur le même graphique, a été tracée en fonction de la température  $T_{lentille}$  sur la figure 2.31. Les régressions linéaires ont également été ajoutées, avec leurs coefficients associés pour toutes les technologies, ainsi qu'une régression de type exponentiel qui épouse mieux les points pour le cas du module B.

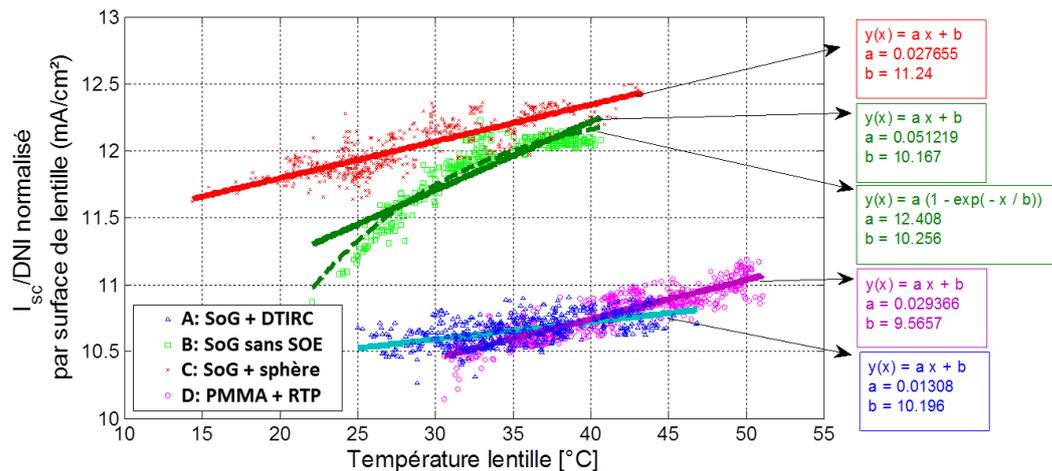


Figure 2.31: Variation de l'indicateur d'efficacité optique  $I_{sc}/DNI$  normalisé par l'aire de lentille en fonction de la température  $T_{lentille}$  pour chaque technologie.

Tout d'abord, nous remarquons que l'ensemble des modules présente une efficacité optique qui varie positivement avec la température de lentille. Cette dépendance est plus ou moins marquée selon les technologies: alors que pour le module A, elle est de 0,013 mA/cm<sup>2</sup>.°C soit moins de 0,1% de la valeur d' $I_{sc}/DNI$ , elle atteint plus de 0,051 mA/cm<sup>2</sup>.°C pour le module B (tendance linéaire), soit environ 0,4% de l' $I_{sc}/DNI$ . Si pour ce même module, on considère les points où la température  $T_{lentille}$  est inférieure à 30°C, la dépendance est encore plus forte. Ce chiffre est à comparer au coefficient thermique en courant de la cellule qui est de l'ordre 0,05-0,07%/°C pour les cellules triple-jonction, soit jusqu'à huit fois inférieur au coefficient de dépendance à la température de lentille.

Ce graphique montre également que les modules sont plus ou moins tolérants à la variation de température de lentille en terme de photogénération: l'ajout d'une optique secondaire SOE tend à diminuer cette tendance, confirmant les résultats menés en intérieur dans [62]. En revanche, contrairement aux attentes et aux études menées sur les lentilles PMMA [42], le module D ne montre pas moins de dépendance que les autres technologies. Ce résultat diffère des observations effectuées dans [59], où un module de même technologie avait montré une sensibilité à la température de lentille moins importante que les technologies SoG. Il est difficile de connaître avec certitude la cause de cette différence de comportement. Un élément

de réponse peut être apporté: le module testé dans ce travail de thèse est constitué d'un seul couple lentille-cellule. L'étude [59] traitait d'un module plus grand, avec 25 éléments lentille-cellule. Ainsi le comportement mécanique du module en fonction de la température peut être différent. Ce comportement implique un changement de la distance lentille-cellule, modifiant la distribution d'irradiance et en conséquence le comportement électrique. Cette hypothèse n'a pas pu être vérifiée expérimentalement.

La température de lentille impacte également la forme de la courbe  $IV$  comme l'a montré l'étude [53] où différents profils ont été testés. Nous nous sommes intéressés à étudier ce phénomène à partir des mesures extérieures. Les résultats attestent de l'existence d'une certaine variation, mais dans une mesure bien moindre: 1% à 4% de variation du facteur  $FF$  pour une différence de température  $T_{lentille}$  de plus de 20°C. Cependant, nous n'avons pu dresser de tendances claires. De plus, compte-tenu de la faiblesse des variations observées, il n'est pas toujours possible de trouver un compromis de filtrage donnant un jeu de données suffisant tout en s'affranchissant suffisamment de la variabilité des performances due à d'autres phénomènes. Nous préférons alors ne pas tirer de conclusions hâtives quant aux observations effectuées et des expériences supplémentaires sont nécessaires pour attester de l'impact de la température de lentille sur la variation du facteur de forme pour les modules testés.

## 2.7 Conclusions

Pour conclure ce chapitre, résumons l'impact des principaux paramètres d'étude sur les grandeurs électriques suivantes: le courant normalisé  $I_{sc}/DNI$ , la tension de court-circuit  $V_{oc}$  et le facteur de forme  $FF$ . Sur un intervalle donné de variation des conditions d'opération étudiées, nous quantifions l'amplitude de variation de chaque grandeur électrique. La figure 2.32 illustre la variation des principaux facteurs d'étude sur la période Juin 2014 - Juin 2015 pour la technologie C. Cette technologie présente l'avantage d'avoir été mesurée en continu sur une année complète. Les distributions observées sont alors considérées représentatives et permettent de définir les intervalles d'étude considérés. Deux paramètres ne sont pas représentés: l'erreur de suivi du tracker solaire, soit l'angle de désalignement  $\varepsilon$ , et le rayonnement circumsolaire  $CSR$ . Pour l'angle  $\varepsilon$ , nous fixons un intervalle de variation de  $\pm 0,3^\circ$ , correspondant à une variation de  $\sim 10\%$  de la puissance du module B. Pour le  $CSR$ , nous nous baserons sur les travaux de la littérature et considérons un intervalle de 0% à 5% de contribution circumsolaire au rayonnement direct.

L'amplitude de variation pour les trois paramètres  $I_{sc}/DNI$ ,  $V_{oc}$  et  $FF$ , en rapport aux mesures effectuées dans des conditions CSTC en laboratoire, est représentée sur la figure

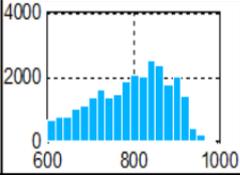
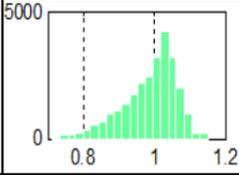
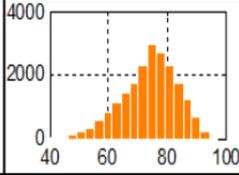
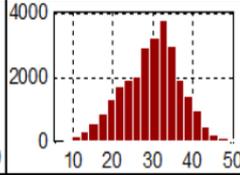
	DNI ( $W/m^2$ )	SMR <sub>top/mid</sub>	T <sub>cell</sub> (°C)	T <sub>lentille</sub> (°C)
Paramètres influents	Position du soleil, composition atmosphère	Position du soleil, composition atmosphère	↗ DNI, ↗ T <sub>amb</sub> ↘ V <sub>vent</sub>	↗ DNI, ↗ T <sub>amb</sub> ↘ V <sub>vent</sub>
Distribution sur la période Juin 2014-Juin 2015				
Intervalle considéré	600-950 $W/m^2$	0,8 – 1,1	45 – 90 °C	15 – 45 °C

Figure 2.32: Variations des principaux paramètres d'étude sur la période allant de Juin 2014 à Juin 2015.

2.33. Une flèche ↗ indique une corrélation positive entre les deux grandeurs. Au contraire, la flèche ↘ correspond à une sensibilité négative du paramètre. Enfin, une flèche ⇕ signifie que la grandeur électrique varie avec une tendance non-monotonique. Pour ce type de variation, nous observons typiquement un maximum (ou un minimum) à une valeur donnée des conditions d'opération, et la grandeur considérée chute (ou augmente) pour des conditions différentes. Pour les histogrammes de couleur grise, les valeurs de littérature ont été utilisés pour calculer les amplitudes de variations. Ainsi, le coefficient en courant corrélé à la température de cellule a été fixé à 0,07%/°C [78], et est conforme aux valeurs fournies par différents fabricants de cellule. Pour l'impact du rayonnement circumsolaire, nous avons considéré une variation de 1% pour un ratio circumsolaire CSR égal à 5% [74, 77].

Les résultats nous permettent de dresser plusieurs conclusions. Tout d'abord, la composition spectrale du rayonnement incident engendre des variations de la grandeur  $I_{sc}/DNI$  de l'ordre de 15 à 20% pour l'intervalle de valeurs  $SMR_{mid}^{top}$  considéré. C'est ainsi le facteur extérieur le plus impactant. Cette sensibilité s'explique par l'équilibre en courant entre les sous-cellules du module, variant en fonction de la composition spectrale de la lumière incidente. L'optimum spectral n'est pas le même selon les modules, et il est fort probable que les optiques utilisées modifient différemment le spectre incident. En conséquence, pour une même cellule, le spectre incident permettant d'obtenir un *current matching* varie selon le dispositif de concentration utilisé.

La deuxième conclusion que nous faisons concerne la température de lentille : celle-ci impacte de manière importante la génération de courant. En effet, son impact est supérieur à la température cellule et les variations observées oscillent entre 4 et 18% selon les modules. Ce point a des implications importantes à plusieurs égards : le module doit être conçu pour

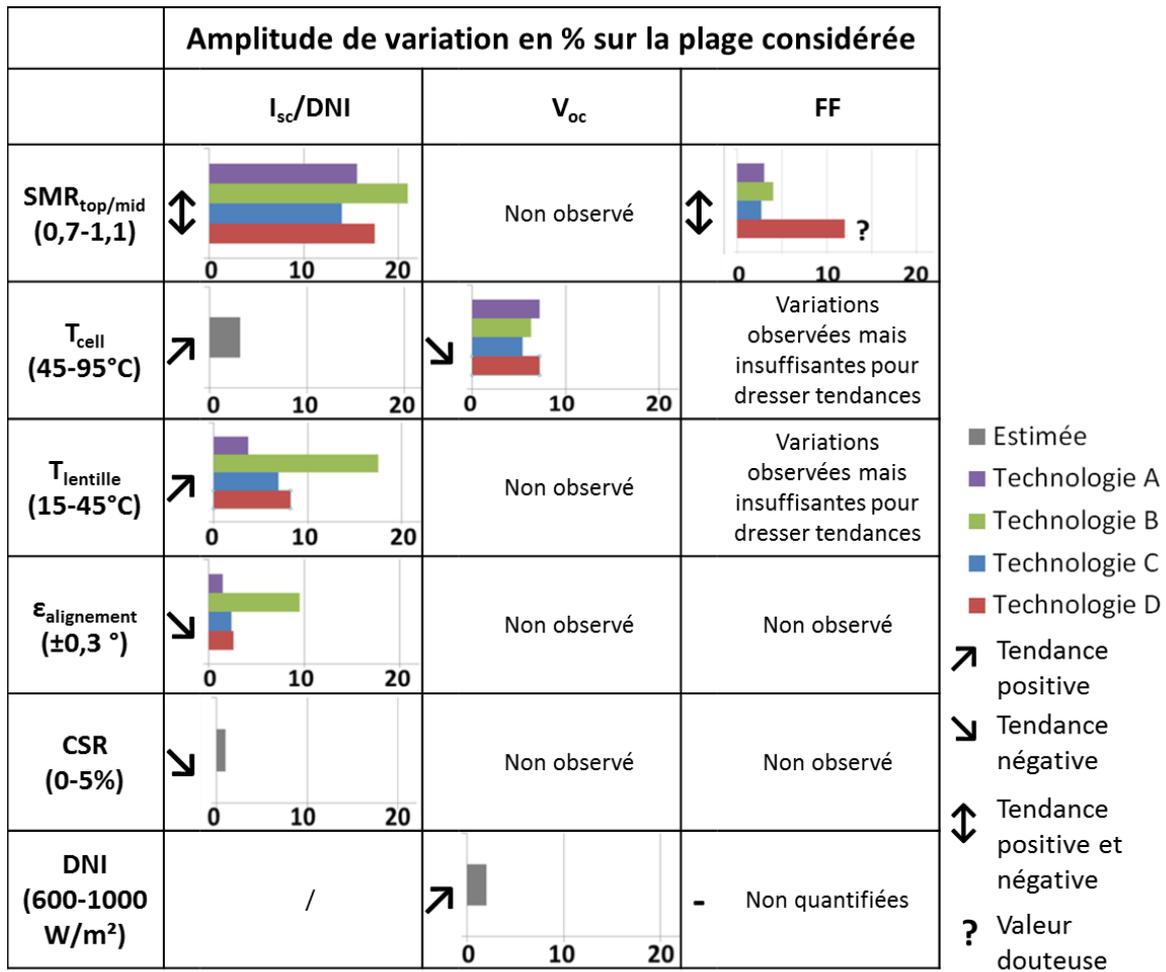


Figure 2.33: Amplitude de variations des grandeurs électriques  $I_{sc}/DNI$ ,  $V_{oc}$  et  $FF$  en fonction de différentes conditions d'opération. Les données sont exprimées en % de variation par rapport à des mesures en conditions CSTC.

fonctionner de manière optimale à une température de lentille représentative des conditions réelles de fonctionnement. Ensuite, au regard de ce paramètre, la production d'énergie du module sur l'année va alors dépendre de la corrélation entre amplitude des variations de température et sensibilité à ce même paramètre. Un module tolérant aux variations de température de lentille serait par exemple plus adapté à un climat aux fortes variations thermiques. Cette observation nous amène au point suivant.

La technologie B se montre plus sensible aux variations de la température  $T_{lentille}$  et au désalignement que les autres technologies. Ceci s'explique par l'absence d'optique secondaire comme il a été démontré dans des travaux existants, engendrant alors des pertes énergétiques sur l'année [43, 45]. Ces pertes dépendent de la précision du suiveur et des variations climatiques notamment. Cela signifie qu'une optique secondaire devient

intéressante lorsque le gain d'énergie produite est supérieur aux surcoûts engendrés lors du procédé de fabrication.

Une quatrième remarque concerne la technologie D : la variation importante du facteur de forme avec le  $SMR_{mid}^{op}$  n'est pas cohérente avec les variations de facteur de forme dues au seul fait de compositions spectrales différentes. Les autres technologies présentent en effet des variations plus faibles et proches des valeurs de la littérature. L'explication la plus plausible est la présence d'inhomogénéités spectrales et spatiales, impactant le comportement électrique de la cellule. La vérification de ces hypothèses nécessitent la mise en place d'outils d'imagerie permettant de corrélérer les mesures électriques à des distributions d'irradiance.

De manière plus générale, les résultats obtenus ont nécessité de longues période d'acquisition avec ses contraintes associées: maintenance nécessaire en extérieur, incertitudes liées aux mesures en extérieur, difficulté à décorrélérer certains paramètres, etc... Nous notons également que pour le facteur de forme  $FF$ , les variations sont généralement moindre que celles de la grandeur  $V_{oc}$  et  $I_{sc}/DNI$ . De ce fait, la mise en évidence de tendances n'a pas été réalisée pour la température de lentille. La mise en place de moyens de test en intérieur, où les conditions d'opération sont contrôlables, permet de mieux étudier ces phénomènes. Le chapitre suivant est consacré à la réalisation d'un tel outil.

# Chapitre 3

## Développement de METHOD: instrument de mesures optiques et électriques pour les technologies CPV

Dans ce chapitre, nous présentons le banc de mesures de distributions spectrales et spatiales d'irradiance pour les dispositifs CPV. Couplé à des mesures électriques *IV*, il permet de visualiser et caractériser les aberrations chromatiques, inhérentes aux systèmes réfractifs des concentrateurs CPV, ainsi que les distributions non-uniformes de flux sur la cellule. Nous avons vu dans le chapitre précédent que différents paramètres, telles que la température de la cellule et la température de la lentille, impactaient les performances du module mais qu'il n'était pas toujours évident de les décorréler en extérieur. Le banc de caractérisation, appelé METHOD (pour *Measurement of Electrical, Thermal and Optical Devices*) permet notamment le contrôle indépendant de ces différents paramètres. Dans un premier temps, nous reviendrons sur les non-uniformités spectrales et spatiales que nous avons brièvement introduites dans le chapitre 1. Ensuite, nous détaillerons les caractéristiques du banc de mesure et la procédure de calibration permettant d'obtenir des mesures du spot lumineux résolues spectralement. Enfin, nous corrélons la mesure d'imagerie à des mesures électriques et présenteront les principales limitations du banc.

### 3.1 Introduction sur les non-uniformités

#### 3.1.1 Les non-uniformités spatiales

Dans le cas d'un flux non-uniforme, certaines parties de la cellule sont éclairées avec une intensité lumineuse plus élevée. Ceci se traduit par une augmentation locale du courant, soit

un effet de résistance série local plus important et donc une diminution du facteur de forme. Une autre conséquence est le dépassement local du courant limite de la jonction tunnel, mince barrière permettant le passage du courant entre chaque jonction [85, 86]. Plusieurs approches ont été suivies pour étudier ces effets.

Tout d'abord, des approches basées sur la modélisation ont pour objectif de simuler le flux d'irradiance sur la cellule. James [87] a montré que des simulations par tracé de rayons (*ray-tracing*) permettent d'observer la tache lumineuse sur la cellule produite par une lentille de Fresnel avec et sans SOE. Dans une autre étude [88], la modélisation a permis de montrer comment les systèmes imageants causent des non-uniformités et comment l'utilisation d'optiques non-imageantes permette de lisser les profils de flux. Ensuite, les cartes d'irradiance obtenues peuvent par exemple alimenter des modèles électriques distribués de cellules solaires [89–92] afin d'analyser le comportement électrique des cellules. Une étude ayant recours à ce type de modèle distribué a été présentée dans [93]. L'auteur s'intéresse à l'optimisation de la grille de métallisation en fonction du profil d'illumination. Selon des profils plus ou moins uniformes, on observe qu'une grille optimisée permet de réduire les pertes par résistance série. Plus le flux est localisé, cas d'un profil gaussien centré la cellule par exemple, plus les doigts de la grille de métallisation doivent être proches pour limiter les pertes résistives. Ainsi, selon cette étude, il convient de concevoir la métallisation de la cellule selon l'optique utilisée.

Cependant, ces approches ont montré des inexactitudes dues à la non-idéalité des surfaces optiques et du matériau, engendrant des profils réels différents des résultats de simulation. Ce type de paramètre est difficile à quantifier, et dépend grandement du procédé de fabrication. Une approche plus expérimentale a été proposée [53], où des masques permettent d'obtenir différents profils sur la cellule. Une baisse de facteur de forme a été observée pour des profils hautement non-uniformes. Dans le cas de profils proches de concentrateurs réels, les pertes observées sur le rendement étaient plutôt faibles (de l'ordre de 1%). L'applicabilité de ces résultats à des optiques réelles est discutable, puisque les non-uniformités spectrales ne sont pas prises en compte avec les masques.

### 3.1.2 Les non-uniformités spectrales

Les non-uniformités spectrales correspondent à une variation locale du spectre incident sur la cellule. Elles sont causées par les aberrations chromatiques inhérentes aux optiques réfractives. Ces non-uniformités spectrales peuvent alors se traduire par des limitations locales de courant. Une région de la cellule recevra plus de lumière riche en bleu, créant un excès de courant de la jonction *top* et une limitation par la jonction *middle* pour cette zone. De manière analogue, une aire illuminée par une lumière riche en rouge correspond à une

limitation par la sous-cellule *top*. Dans ces cas-là, l'apparition de courants latéraux permet de redistribuer les excès de courant et modifie le comportement électrique de la cellule [44].

Certaines problématiques liées à ces aberrations ont été étudiées [94]. L'expérience menée consiste à éclairer la cellule avec une optique réfractive de Fresnel, et observer comment la position de la cellule sur l'axe optique modifie le courant généré. La limitation du courant par la jonction *top* ou *middle* en fonction de la position de la cellule provoque bien une modification du comportement électrique de la cellule avec le spectre incident. Quant à la circulation latérale de courant mentionnée dans le paragraphe précédent, elle a été modélisée dans un modèle distribué 3D [95]. Les résultats du modèle montrent que lorsque la jonction limitante de courant varie en fonction de la zone considérée, l'excès local de courant dans la jonction non-limitante va circuler latéralement pour s'extraire de la cellule. La capacité du courant à circuler latéralement dépend d'un paramètre intrinsèque de la cellule appelé résistance de couche du matériau (*sheet resistance* dans la littérature): plus cette valeur est faible, plus le courant circule facilement dans le matériau. Les pertes engendrées par circulation latérale du courant vont alors dépendre de la quantité de courant latéral qui circule (donc du degrés de non-uniformité spectrale) et de la valeur de cette résistance de couche.

Tout comme pour les non-uniformités spatiales, les approches par la modélisation mentionnées nécessitent souvent de supposer un comportement idéal des composants, ce qui n'est pas le cas dans la réalité. Également, elles tendent à décorrélérer les deux types de non-uniformités, alors que dans le cas de concentrateurs réels, les phénomènes sont simultanés. Une approche expérimentale basée sur l'imagerie du spot lumineux et le tracé des courbes *IV* est un moyen de répondre à cette problématique. Il est alors possible de corrélérer le comportement électrique avec les distributions spectrale et spatiale de l'irradiance.

### 3.1.3 Techniques de caractérisation des non-uniformités et de leurs impacts

La caractérisation de flux par imagerie pour le cas de concentrateurs solaires a été appliquée dans différentes études. Mentionnons d'abord les systèmes réfléchissants, où des études sur la caractérisation de la qualité de surface du concentrateur par caméra de type CCD (*Charge Coupled Device*) ont été menées. On citera par exemple la méthode VSHOT [96] où un balayage de la surface du miroir avec une source laser est utilisé. La réflexion des rayons sur un écran est enregistrée par une caméra, et permet d'analyser la surface du miroir. La méthode SSCAN [97] est un autre exemple de procédé utilisé dans le cas de tours solaires, où

l'imagerie d'une étoile lumineuse permet de caractériser la qualité de réflectivité du système optique.

Dans le cas d'optiques réfractives, l'utilisation d'un diffuseur de type lambertien combinée à une caméra s'avère être une technique pertinente pour mesurer la distribution lumineuse de la lumière transmise. Une telle méthode a été appliquée dans [98], où un diffuseur en opale est placé au point focal d'une lentille de Fresnel. Une caméra CCD est placée à l'arrière du diffuseur et prend des images de la lumière sur le diffuseur. Le dispositif est placé en extérieur, sur un suiveur solaire, et permet d'imager les performances en conditions réelles. Bien que le travail a permis de quantifier la taille du spot lumineux dans la région du visible, la variation de la taille du spot avec la longueur d'onde et la corrélation de ces mesures avec la génération de courant de cellules III-V n'ont pas été étudiées.

Une approche plus complète a été présentée [46]. A partir du principe de mesure précédemment mentionné, à savoir l'imagerie d'un diffuseur considéré lambertien placé au point focal de l'optique primaire, une dimension spectrale est ajoutée en utilisant des filtres optiques. Un filtre passe-bas permet d'imager le spot équivalent à la jonction *top*, et un filtre passe-haut sert pour la jonction *middle*. Ce dispositif est placé dans un simulateur solaire pour modules CPV helios3198, similaire à l'équipement disponible dans le laboratoire CPV du CEA. Il est ainsi possible de corréler les mesures optiques à des mesures électriques du simulateur solaire. Reprenant cette expérimentation, une analyse comparative entre trois dispositifs optiques de concentration est menée par le même groupe de travail [46] pour étudier la variation des performances avec la distance optique primaire-cellule. La problématique abordée dans ce travail s'approche beaucoup des problématiques auxquelles nous tentons de répondre. Les résultats de l'étude montrent notamment que l'ajout d'une optique secondaire permet de réduire les non-uniformités spectrales et spatiales. Cette meilleure uniformité se traduit en terme électrique par une meilleure tolérance aux variations de la distance lentille-cellule, et un gain en rendement global, conduisant logiquement à un gain de productible sur l'année. En outre, il a été montré que le positionnement de la cellule sur l'axe optique peut-être optimisé en analysant les mesures effectuées. Nous proposons d'utiliser une approche similaire pour caractériser les dispositifs optique-cellule, en approfondissant la dimension spectrale et en intégrant la température de lentille comme variable d'étude.

## 3.2 Développement du banc de caractérisation METHOD

Le banc de caractérisation a pour objectif de répondre à différentes problématiques. Comme nous l'avons évoqué, il se veut un moyen de caractériser la distribution d'irradiance, spec-

tralement et spatialement, et ce dans des conditions de test contrôlables. Ces non-uniformités dépendent logiquement des composants optiques utilisés, mais varient également avec la distance entre l'optique primaire et la cellule, avec la présence d'une optique secondaire [46] et avec la température de l'optique [42, 56]. Le banc doit alors permettre de découpler ces différents paramètres et d'analyser leurs effets respectifs sur la performance électrique du dispositif. Nous présentons dans un premier temps le banc permettant d'effectuer de telles études, ses caractéristiques et son fonctionnement. Ensuite, nous détaillons l'impact et la caractérisation de l'enceinte servant à contrôler la température de la lentille.

### 3.2.1 Description du banc de mesure METHODOD

Le banc de mesure METHODOD est intégré au simulateur solaire pour module CPV, que nous avons utilisé dans le chapitre 2 pour caractériser les modules en intérieur. La figure 3.1 schématise le principe de mesure du banc. Comme on peut le voir, l'instrumentation se décompose en deux parties: une première, appelée *module d'imagerie*, sert à acquérir des images de la tâche lumineuse sur le diffuseur. La deuxième partie, intitulée *module mesures électriques*, permet de tester électriquement la cellule multi-jonctions sous flux concentré. Il est possible de passer de l'une à l'autre de ces fonctions en translatant la chambre thermique contenant la lentille.

Le système d'éclairage pulsé du simulateur permet d'avoir une source de lumière collimatée, avec une composition spectrale et une distribution angulaire similaire à celle du soleil [99]. Ce faisceau est obtenu au moyen d'une lampe flash de type Xénon placée au point focal d'un miroir parabolique (Fig. 3.2). Le miroir renvoie la lumière divergente de la source en un faisceau d'ouverture angulaire de  $\pm 0,4^\circ$  (pour le soleil, cet angle est de  $\pm 0,27^\circ$ ), correspondant à la taille angulaire de la source lumineuse vis-à-vis du miroir. L'intensité de la lumière en sortie du miroir, varie au cours du flash entre des valeurs de *DNI* de 0 à plus de 1000 W/m<sup>2</sup>. Le contenu spectral de la lumière au cours du flash varie également, de sorte à ce que chaque niveau d'irradiance correspond à un certain spectre. Cette variation, en terme spectral, oscille autour du spectre AM1.5D, allant d'une lumière riche en bleu (première partie du flash où la température de la lampe est très élevée) à une lumière plutôt rouge (seconde partie où la température de la lampe est plus basse). Deux capteurs, nommés *mesures de référence* sur le schéma 3.1, permettent de monitorer le *DNI* et la composition spectrale de la lumière tout au long du flash. Le capteur spectral est un spectro-pyréliomètre, similaire à celui décrit dans le chapitre 2. Le capteur de *DNI* est typiquement un module CPV avec un seul élément optique-cellule (appelé *monomodule*), de technologie similaire à la technologie testée.

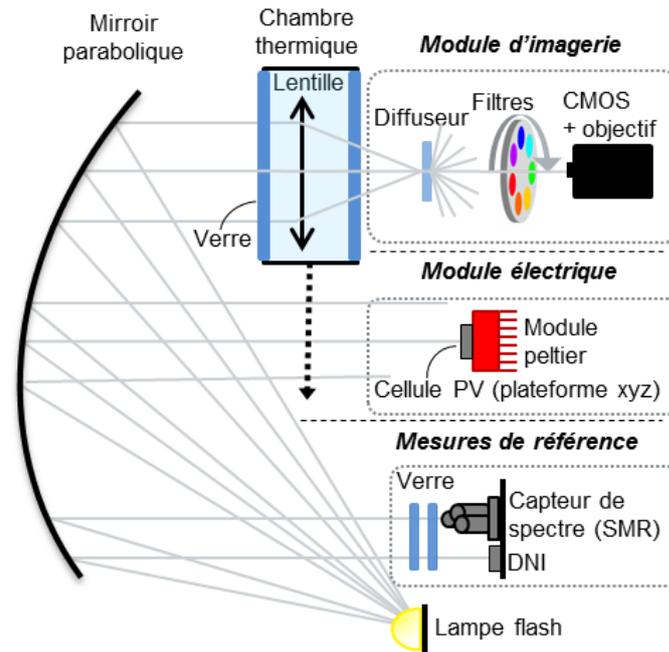


Figure 3.1: Schéma de principe du banc de caractérisation METHOD. Le module d'imagerie permet de mesurer la distribution de la lumière sur le diffuseur. Le module électrique permet d'effectuer des caractéristiques  $IV$  du dispositif optique-cellule. Enfin, les mesures de références servent à mesurer l'irradiance incidente sur le module et sa composante spectrale.

Pour contrôler le tout, différents équipements sont ajoutés: un générateur de flash, un boîtier courant-tension permettant de polariser le module à des tensions programmées et de mesurer le courant en sortie, et un PC équipé d'un logiciel pour enregistrer les données électriques mesurées. Enfin, le dispositif à mesurer est placé sur un support métallique qui fait face au miroir, ajustable angulairement selon deux axes avec une précision de  $0,01^\circ$  (Fig. 3.2).

Le module *mesures électriques* permet d'effectuer deux types de caractérisation électrique que nous avons évoqués:

- Le diagramme des sous-cellules (voir section 2.4.2): Rappelons simplement que le procédé consiste à normaliser le courant  $I_{sc}$  du dispositif testé par le  $DNI_i$  vu par chaque isotype  $i$ . Les courbes obtenues permettent d'observer le comportement spectral du dispositif.
- La courbe  $IV$  du dispositif: Le système suit un principe multi-flash, de sorte que pour chaque flash de lumière, un seul point  $(I, V)$  est mesuré. Le dispositif est polarisé à une tension différente pour chaque point, permettant ainsi de parcourir l'ensemble de la caractéristique  $IV$ . La variation d'irradiance au cours du flash lumineux permet

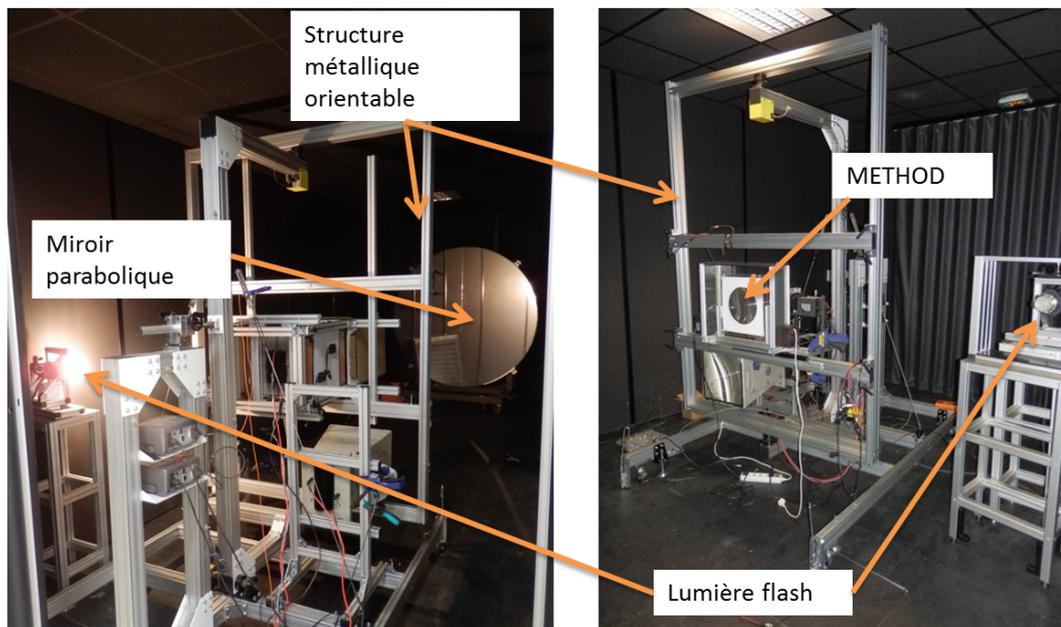


Figure 3.2: Photographies du simulateur solaire pour module CPV. Le banc METHODOD est monté sur la structure métallique orientable (droite).

d'obtenir des points  $IV$  pour plusieurs  $DNI$  simultanément. Chaque valeur de  $DNI$  est liée à un certain spectre. Les performances électriques du dispositif peuvent être correctement quantifiées, à condition de connaître précisément l'irradiance délivrée par le simulateur. Le capteur de  $DNI$  permet cette mesure, mais pour une mesure absolue, sa réponse aux variations d'irradiance, de spectre et sa transmission angulaire doivent être similaires au module testé [37]. Lorsqu'un tel capteur n'est pas disponible (ce qui sera le cas pour nos prochaines mesures), l'incertitude sur l'irradiance "vue" par le module est difficile à quantifier. Il faudrait pour cela connaître les réponses spectrale et angulaire du dispositif mesuré (optique et cellule et pas seulement cellule), du capteur de  $DNI$  et le spectre de la lumière incidente. Les valeurs de performance sont donc approximatives et peuvent toutefois être utilisées à titre indicatif et comparatif. Il est possible d'augmenter la précision de la mesure en exposant préalablement le dispositif en extérieur, et de recourir à la calibration croisée [11] (comme nous l'avons fait dans le chapitre 2).

### 3.2.2 Caractéristiques du module d'imagerie

Le module d'imagerie est constitué d'un diffuseur en opale, d'une roue à filtres pilotable et d'une caméra avec capteur CMOS. Les composants choisis doivent répondre à différents critères.

Pour la caméra, il est d'abord nécessaire que celle-ci réponde sur une plage spectrale correspondante aux longueurs d'onde de la jonction *top* et *middle*. Les capteurs Silicium, très répandus, remplissent ce critère. Cette limitation est à relativiser pour deux raisons: premièrement, la jonction *bottom* pour des cellules triple-jonctions GaInP/GaAs/Ge produit un excès de courant dans des conditions réalistes d'opération, raison pour laquelle nous nous concentrons sur la jonction *top* et *middle*. Et ensuite, la dispersion pour le type d'optiques considéré, est basse dans les hautes longueurs d'onde [53]. Ainsi, la distribution de lumière sur la jonction *bottom* est en théorie proche de celle de la jonction *middle*.

Ensuite, le temps de réponse de la caméra doit être suffisamment court, soit quelques dizaines de  $\mu s$ . En effet, la durée du pulse exploitable est de l'ordre de 1000  $\mu s$ . Pendant ce pulse, l'intensité et le spectre de la lumière varient et il est donc nécessaire de travailler sur une plage courte du flash pour limiter ces variations. Enfin, le nombre de pixels et la qualité du signal sont des critères à prendre en compte, ainsi que la compatibilité de la caméra avec des dispositifs optiques traditionnels (filtre, objectif, etc...).

Nous avons choisi d'utiliser une caméra monochromatique avec capteur CMOS, de modèle Thorlabs DCC3240N, qui possède un temps d'intégration minimal de 10  $\mu s$ . La réponse de la caméra en fonction de la longueur d'onde est représentée sur la figure 3.3. A titre comparatif, sont ajoutées les efficacités quantiques des sous-cellules d'une cellule triple-jonction *lattice-matched* mesurées au laboratoire. La caméra couvre bien les deux jonctions *top* et *middle* que nous cherchons à mesurer mais ne permet pas d'imager la jonction *bottom*. Comme nous le voyons, le capteur utilisé a une efficacité quantique supérieure à 10% pour les longueurs d'onde comprises entre 350 et 1000 nm, alors que la réponse de jonction *middle* s'arrête à 900 nm et que celle de la jonction *top* commence autour de 350 nm.

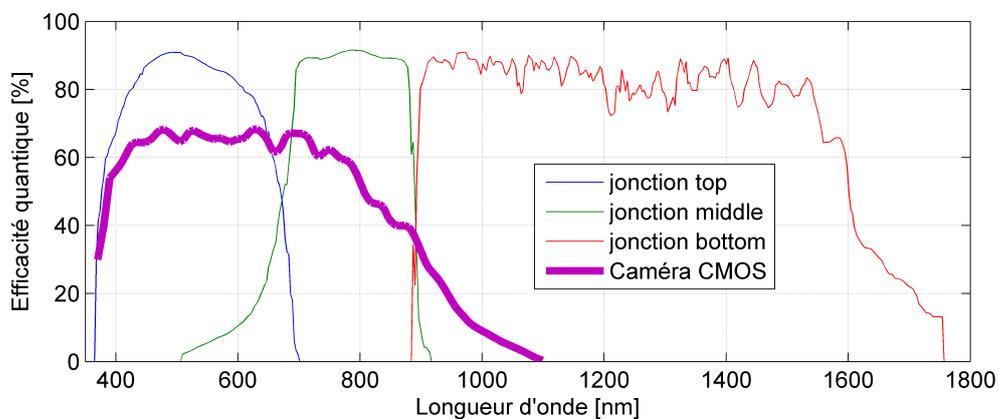


Figure 3.3: Efficacité quantique de la caméra CMOS et des trois jonctions d'une cellule *lattice-matched*. La réponse de la caméra couvre bien les jonctions *top* et *middle*.

Couplée à un objectif dimensionné pour mesurer une surface de  $1 \text{ cm}^2$  (taille de cellule maximale à mesurer), la caméra permet de capturer une surface de  $12,8 \times 10,2 \text{ mm}^2$  avec une résolution de  $1024 \times 1280$  pixels (1 pixel =  $10 \mu\text{m}^2$ ). Enfin, le signal pour chaque pixel est codé sur 8 bits, permettant de mesurer l'intensité de la lumière sur une plage de 256 valeurs. Le déclenchement de l'acquisition de la caméra au cours du flash se fait par un déclencheur externe délivrant un signal 0-5 V (*trigger*). Pour ce dispositif, nous utilisons deux cellules triple-jonctions placées face au miroir, et branchées en série sur l'entrée de la caméra. A l'allumage du flash, les deux cellules en circuit ouvert vont générer une tension totale d'environ 5 V, enclenchant la prise d'image par la caméra. L'ajout via le logiciel d'un délai supplémentaire pour le déclenchement permet de sélectionner la partie du flash sur laquelle se fait l'acquisition.

Les filtres sont sélectionnés de sorte à parcourir l'ensemble de la plage spectrale des jonctions *top* et *middle*, leur nombre étant limité à la capacité de la roue à filtres. La roue utilisée (modèle FW212C de chez Thorlabs) permet de loger douze filtres de  $1,25 \text{ cm}$  de diamètre. En conséquence, nous utilisons douze filtres de largeur spectrale  $50 \text{ nm}$ , caractérisée par la largeur à mi-hauteur de la transmission maximum *FWHM*, couvrant les longueurs d'onde de  $375$  à  $975 \text{ nm}$ . La transmission de ces filtres a été mesurée avec un spectrophotomètre (modèle: Perkin Elmer lambda 950). Les résultats de ces mesures sont visibles sur la figure 3.4. Se trouve également représenté à titre informatif, le spectre de la lampe Xénon utilisée dans le simulateur, équivalent au spectre de référence AM1.5D.

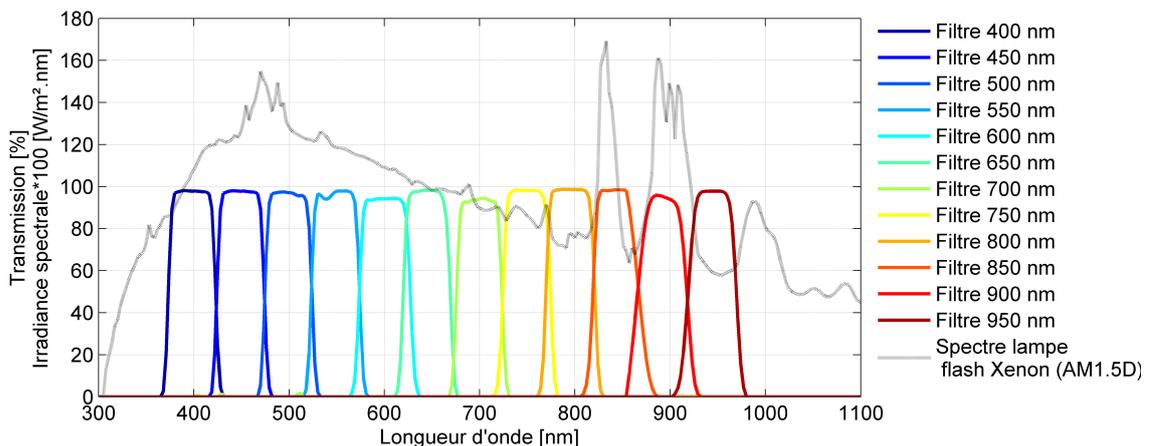


Figure 3.4: Transmittance des douze filtres passe-bande mesurées au spectrophotomètre sur la plage allant de 300 à 1100 nm. Le spectre de la lampe flash Xénon, équivalent au spectre solaire AM1.5D à  $1000 \text{ W/m}^2$ , est ajouté à titre indicatif.

Finalement un diffuseur en opale a été choisi, de par son aptitude à disperser la lumière de manière quasi-lambertienne. Ce critère est primordial compte-tenu des différents angles

d'incidence avec lesquels les rayons arrivent en sortie d'optique primaire. De plus, d'autres diffuseurs ont été testés, notamment du verre dépoli, mais la résolution de la caméra de  $10 \mu\text{m}^2/\text{pixel}$  fait apparaître un effet de grain sur l'image, diminuant grandement la qualité de la mesure sous éclairage. Il est possible que d'autres diffuseurs satisfassent les conditions requises, mais nous nous limiterons à l'utilisation de l'opale dans ce travail. La figure 3.5 montre la transmittance du diffuseur mesurée au spectrophotomètre.

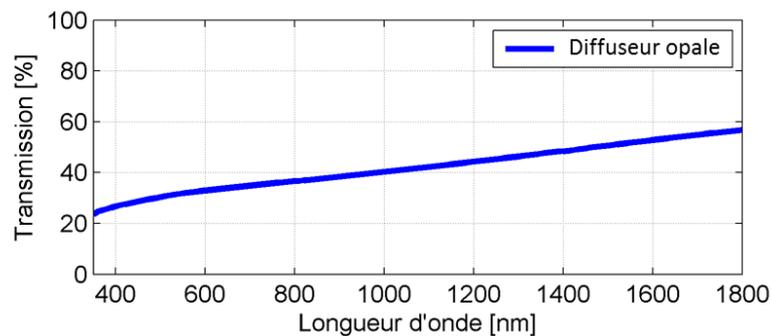


Figure 3.5: Transmittance du diffuseur en opale mesurée au spectrophotomètre sur la plage 350-1800 nm.

Un logiciel d'acquisition a été spécifiquement développé sous LabView pour paramétrer et piloter la roue à filtres, le générateur de flash, la caméra et la mesure des températures de la pièce et de la lentille. Il permet par exemple de déclencher une série de douze flashes et d'obtenir en sortie une série de douze images, soit une par filtre. C'est à partir de ces douze images "brutes" que nous cherchons à obtenir l'irradiance spectrale pour chaque pixel. L'ensemble des éléments optiques, filtre, caméra et diffuseur, permettent bien de travailler sur la plage 370-950 nm. Un résumé des caractéristiques optiques et électriques est représenté sur la figure 3.6.

### 3.2.3 Caractérisation de la chambre thermique

L'ajout de deux verres en amont et en aval de la lentille va inévitablement modifier l'intensité et le spectre de la lumière sur la cellule. Plusieurs méthodes permettent de s'affranchir de cet effet: une méthode par le calcul, où une correction est appliquée aux résultats, ou une méthode plus empirique où deux verres de même type sont ajoutés en amont des instruments de référence. Ce procédé permet aux deux instruments de 'voir' le même spectre et la même intensité de lumière que le dispositif testé. La méthode par le calcul nécessite de connaître plusieurs paramètres: la réponse spectrale des cellules, la transmittance du verre et le spectre lumineux incident. Ces exigences complexifient fortement le procédé de mesure, et favorisent ainsi une préférence pour la méthode dite empirique.

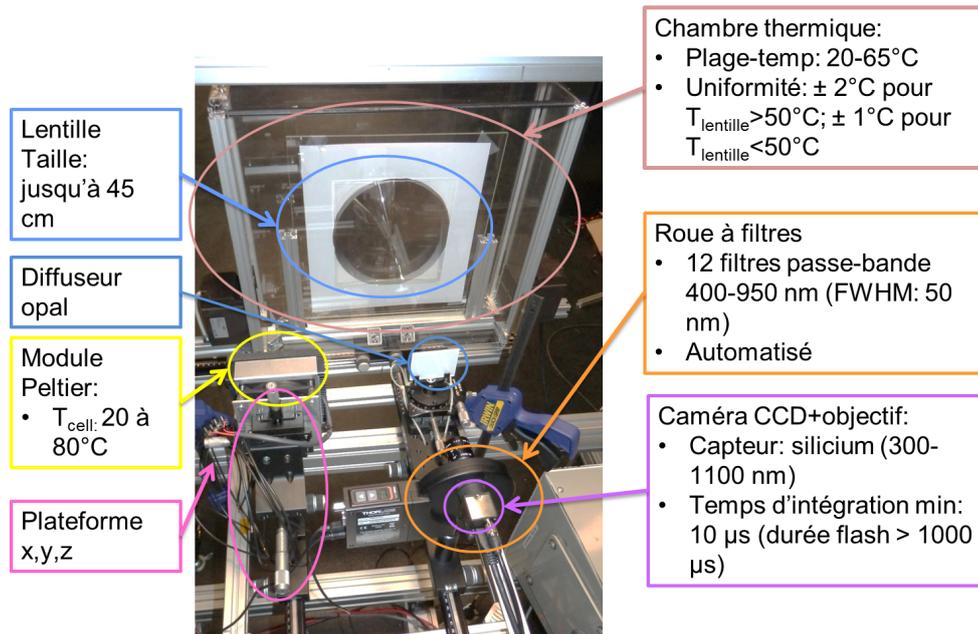


Figure 3.6: Photographie du banc d'expérimentation METHODOD avec les caractéristiques des différents composants.

Pour cette méthode, la configuration optique varie entre le dispositif et les instruments de référence. Dans le cas des instruments, la lumière arrive perpendiculairement aux deux verres. En revanche pour le dispositif testé, la lumière arrive bien perpendiculairement au premier verre, mais sort avec une certaine distribution angulaire en sortie du concentrateur et traverse le deuxième verre avec différents angles d'incidence. Voyons d'abord théoriquement comment cela affecte l'irradiance, et ensuite par la mesure si l'ajout de deux verres devant les instruments est effectivement un moyen valable de correction.

Les lois de Fresnel gouvernent la portion de lumière réfléchié lorsque la lumière entre dans un nouveau milieu optique [100]. Si l'on considère que le verre en amont de la lentille est illuminé avec un faisceau collimaté, normal à la surface, la réflexion  $Ref$  entre l'air et le verre peut s'écrire selon l'équation 3.1:

$$Ref = \frac{n_{\text{verre}} - n_{\text{air}}}{n_{\text{verre}} + n_{\text{air}}} \quad (3.1)$$

Avec  $n_{\text{verre}}$  et  $n_{\text{air}}$ , respectivement l'indice optique du verre et de l'air.

Pour un indice  $n_{\text{verre}}$  égal à 1,5, la réflexion obtenue pour chaque interface est approximativement de 4,2%, correspondant à une perte totale de flux transmis de 8,3% pour le premier verre. Pour le deuxième verre, la distribution angulaire de la lumière peut provoquer des pertes réfléchives supplémentaires. Il est possible de connaître l'angle d'incidence maximal

des rayons à partir d'une valeur appelée nombre-f (*f-number* dans la littérature). Cette valeur correspond au ratio entre le diamètre de la lentille et la focale de la lentille. L'angle maximale  $\delta_{max}$  d'incidence maximale peut alors se calculer selon l'équation 3.2:

$$\delta_{max} = \frac{1}{2f} \quad (3.2)$$

Les valeurs typiques de nombre-f oscillent entre 0,8 et 1,5 dans le cas de dispositifs commerciaux [101]. Partant de l'équation 3.2, nous obtenons la variation de l'angle maximum d'incidence avec le nombre f (Fig. 3.7).

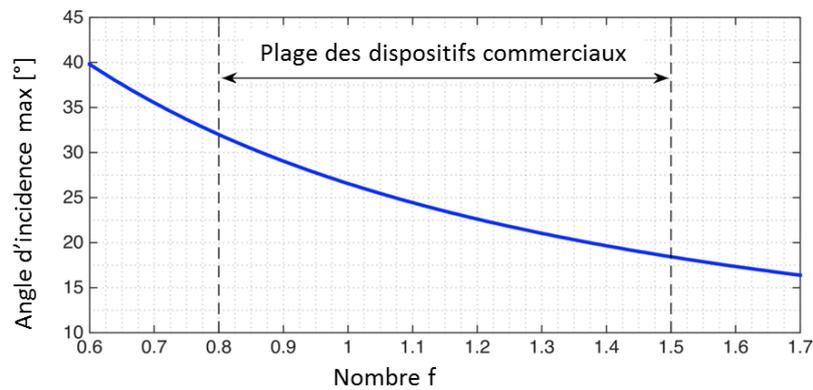


Figure 3.7: Angle maximal d'incidence des rayons sur le récepteur en fonction du nombre-f de l'optique primaire.

L'angle maximum obtenu est de 32° pour un dispositif à nombre-f égal à 0,8. Or, la réflectance pour un rayon lumineux passant de l'air au verre reste relativement constante jusqu'à 40° [100], et la part de rayons réfléchis est quasiment identique entre un faisceau collimaté et un faisceau convergent d'angle maximal inférieur à 40°. En conséquence, les pertes totales dues à la réflexion sont théoriquement de 15,8%. Pour adapter les mesures de référence du simulateur, il devrait donc être suffisant de placer deux verres devant les instruments de mesure.

Afin de vérifier expérimentalement ce procédé, nous regardons comment varie le courant de court-circuit  $I_{sc}$  de deux cellules isotypes *top* et *middle*, normalisé par le  $DNI_i$  correspondant, mesuré par le spectro-pyrhéliomètre. Les graphiques de la figure 3.8 illustrent les résultats obtenus. Pour cette expérience, la lumière est concentrée 400 fois sur les cellules isotypes de 1 cm<sup>2</sup>. Le nombre-f du dispositif est de 0,82, correspondant au cas limite des dispositifs commerciaux.

En référence à la figure 3.8, les points oranges représentent le cas où aucun verre n'est utilisé pour la mesure. Les points noirs correspondent au cas où seule la chambre thermique

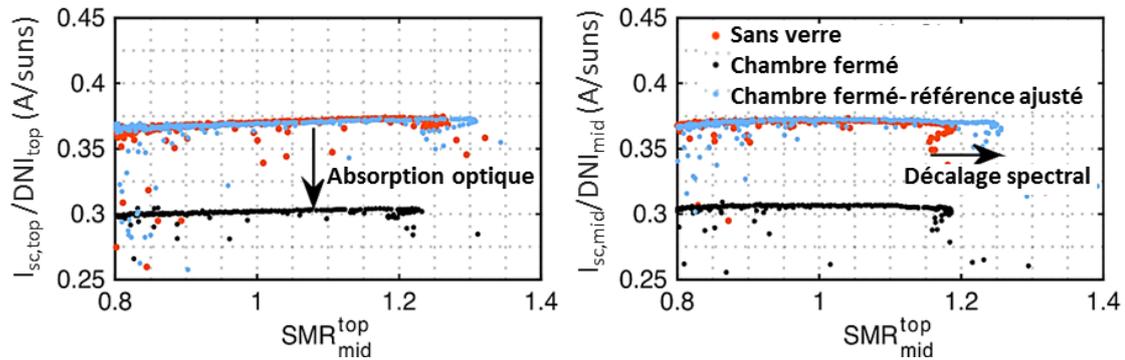


Figure 3.8: Evolution du courant  $I_{sc,i}$  pour des cellules isotypes *top* et *middle*, normalisé par la valeur de  $DNI_i$  correspondante. Les valeurs sont données pour trois cas: 1) aucun verre n'est utilisé, 2) seule la chambre est pourvue de deux plaques en verre, 3) la chambre et les instruments sont pourvus de plaques de verres pour ajuster la mesure de référence.

est dotée de deux couches de verre en amont et en aval à la lentille. Et enfin, pour le dernier cas, les points bleus, deux verres sont ajoutés devant les instruments de référence pour ajuster la mesure. Pour le cas "chambre fermée", les  $DNI_{top}$  et  $DNI_{mid}$  mesurés par le spectro-pyrhéliomètre seront supérieurs à ceux "vus" par le dispositif testé, provoquant la baisse des rapports  $I_{sc}/DNI$  pour chaque isotype. Cette baisse correspond à la réflexion de la lumière par les deux verres de la chambre et est de l'ordre de 17 à 18% pour les deux isotypes proches de la valeur théorique de 15,8%. Cette limitation entraîne une réduction de la gamme de  $DNI$  avec laquelle nous pouvons tester les dispositifs: celle-ci passe ainsi de 0-1000 W/m<sup>2</sup> à une gamme d'environ 0-800 W/m<sup>2</sup>. Si nous nous intéressons maintenant au cas "chambre fermée - référence ajustée", les valeurs coïncident au cas "sans verre". Ceci implique que l'ajout de verre devant le spectro-pyrhéliomètre a bien permis d'ajuster la mesure de  $DNI_{top}$  et  $DNI_{mid}$ . Nous observons en outre un autre phénomène sur le graphique: un décalage des points en abscisse entre les points bleus et orange. Ceci correspond à un décalage spectral qui correspond à une augmentation du  $SMR_{mid}^{top}$  de l'ordre de 5% lorsque du verre est ajouté. Cette augmentation est liée à la transmittance du verre utilisé. En effet, nous avons choisi du verre qualifié de "solaire", utilisé en face avant des panneaux photovoltaïques de type silicium. Ce type de matériau présente typiquement une meilleure transmission dans la région 400-600 nm que dans la région 600-800 nm. Ainsi la lumière obtenue après avoir traversé les deux verres, se trouvera plus riche en bleu qu'en entrée, d'où une augmentation du  $SMR_{mid}^{top}$ . Le décalage reste cependant acceptable et nous pouvons effectuer des mesures sur une gamme de  $SMR_{mid}^{top}$  de 0,8 à 1,2, autour de la valeur standard  $SMR_{mid}^{top}$  égale 1 du spectre AM1.5D.

Maintenant que nous avons validé l'utilisation de la chambre sur les aspects optique et électrique, voyons comment celle-ci se comporte thermiquement et si elle permet d'obtenir une bonne uniformité de la température sur la lentille. Pour augmenter la température, nous utilisons deux dispositifs de chauffage de 250 W chacun, placés sur les côtés de la chambre. Pour les mesures électrique et optique à différentes températures de lentille, nous montons la chambre à une température supérieure à la température désirée et éteignons alors le chauffage. La température dans la chambre descend peu à peu et nous travaillons sur la descente thermique. Après plusieurs tests, il a été montré qu'une chambre de grande taille (voir photo Fig.3.9) permet une meilleure uniformité de la température sur la lentille.

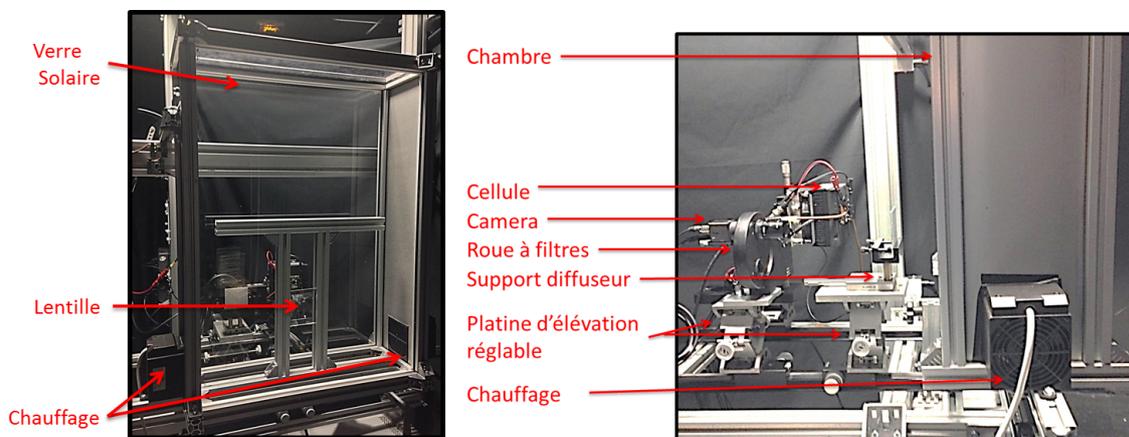


Figure 3.9: Photographies de la chambre thermique (gauche) et du dispositif de mesures électrique et optique situé à l'arrière de la chambre (droite).

Une expérience a été conduite pour s'assurer de la stabilité et l'uniformité de la température de la lentille. Dix thermocouples ont été installés à différentes positions en face avant et arrière d'une lentille placée dans la chambre. Nous procédons à une chauffe et mesurons la température lors de cette chauffe et de la descente en température. Les mesures sont visibles sur la figure 3.10.

Les résultats montrent que la température moyenne de la lentille passe de 25 à 62,4°C en 48 minutes. La descente en revanche est plus longue et prend environ 105 minutes. La dispersion des valeurs obtenue en fin de chauffe diminue grandement lors la descente, puisque la convection de l'air permet d'homogénéiser la température sur la plaque de verre. La dispersion des valeurs de  $\pm 2^\circ\text{C}$  en-dessous d'une température moyenne de 50°C est considérée satisfaisante. Nous ne travaillerons pas à des températures supérieures à cette valeur, compte-tenu des valeurs maximales observées en extérieur de 45°C. Passons maintenant à la calibration du dispositif d'imagerie.

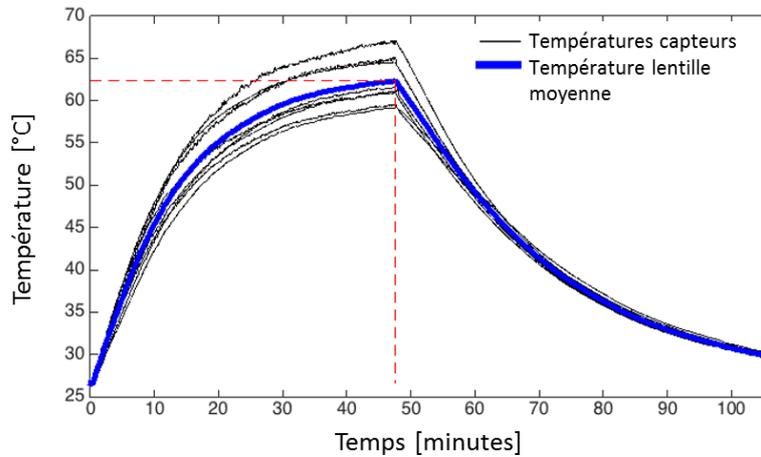


Figure 3.10: Variation de la température de la lentille en fonction du temps pour un cycle de chauffe-refroidissement. En bleu, la température moyenne donnée par les thermocouples et en noir les valeurs pour chaque thermocouple.

### 3.3 Caractérisation et validation du dispositif de mesure optique

Le principe de caractérisation optique de METHOD consiste à obtenir une relation entre les douze images acquises et l'irradiance spectrale de chaque pixel (Fig. 3.11). Il est nécessaire pour cela de définir une relation entre l'intensité du signal d'imagerie et la puissance lumineuse, et ce pour chaque région spectrale correspondante aux différents filtres.

Les fichiers de calibration mentionnés sur le schéma 3.11 font référence à deux types de calibration: 1) les corrections à appliquer à l'image relatives à la mesure avec caméra CMOS; 2) la calibration spectrale permettant de corrélérer la mesure d'intensité en valeur de pixel à une grandeur radiométrique ( $W/m^2.nm$ ). Nous allons d'abord voir comment calculer ces corrections. Ensuite, nous nous assurerons de bien maîtriser la mesure sous lumière pulsée et enfin nous comparerons les résultats obtenus par imagerie à des mesures électriques, afin de valider le protocole défini.

#### 3.3.1 Spécificités et corrections liées à la mesure par imagerie

Le rôle de la caméra CMOS est de transformer proportionnellement l'énergie lumineuse incidente en un signal électrique grâce à des pixels photosensibles. Cette transformation de signal s'opère via un objectif qui conjugue l'image sur une matrice de pixels, le détecteur, et un dispositif électronique qui amplifie le signal en sortie des pixels. Tous ces éléments introduisent des incertitudes et des erreurs inhérentes à la mesure, qu'on peut qualifier

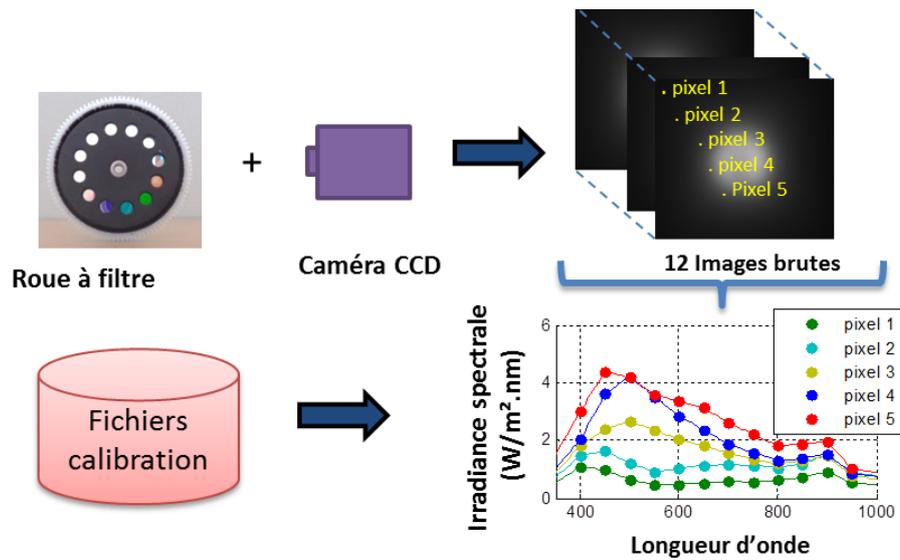


Figure 3.11: Principe de mesure du banc de caractérisation optique METHOD. Les images brutes sont converties en irradiances spectrales pour chaque pixel au moyen de facteurs de corrections et de calibrations.

d'erreurs systématiques. La connaissance de ces erreurs permet de corrélérer plus précisément la lumière incidente et le signal mesuré. L'image brute mesurée peut ainsi s'exprimer par la fonction suivante:

$$Signal_{brut}(x,y) = Signal_{zero}(x,y) + Signal_{thermique}(x,y) + Réponse(x,y) \times Signal_{pixel}(x,y) \tag{3.3}$$

Avec  $x,y$  faisant référence au pixel  $(x,y)$ ;  $Signal_{brut}$ , le signal brut mesuré en sortie de caméra;  $Signal_{zero}$  le signal lié au niveau zéro du capteur,  $Signal_{thermique}$  le signal dû aux charges thermiques accumulés pendant le temps d'acquisition,  $Réponse$ , la réponse de la caméra après transformation du signal par l'électronique, et  $Signal_{pixel}$  le signal "utile" émis par les électrons à partir des photons incidents.

Plusieurs méthodes de caractérisation, plus ou moins complexes, de ces différentes composantes du signal ont été présentées [102–105]. Bien que certaines de ces études ont été réalisées pour des caméras CCD, nous les considérons utilisables à l'acquisition avec caméra CMOS. A partir de ces différentes approches, nous proposons d'utiliser une approche "simplifiée" en caractérisant les éléments suivants: le signal lié au niveau zéro et au bruit thermique, l'uniformité de  $Réponse(x,y)$  en fonction du pixel  $(x,y)$ , et la linéarité de  $Réponse(x,y)$  en fonction de l'intensité de la lumière incidente.

### Signal d'offset et bruit thermique

La grandeur  $Signal_{zero}(x,y)$ , qu'on peut qualifier d'offset, est un signal issu du capteur CMOS et de l'électronique obtenue sous une intensité lumineuse nulle, avec un temps d'exposition quasi-nul. Cette valeur, qui ne dépend pas de la température est intrinsèque à la caméra et fixe dans le temps. A cette valeur obtenue sous obscurité, s'ajoute un autre signal variable avec la température et le temps d'exposition. Ce signal, identifié par la grandeur  $Signal_{thermique}(x,y)$ , correspond aux électrons libérés par des photons "thermiques", liés à la température du capteur. Pour un temps d'exposition fixe dans l'obscurité, il n'est pas possible de différencier ces deux types de signaux dans la mesure effectuée. Heureusement, cette mesure peut être considérée reproductible. Pour chaque acquisition sous illumination, une image dans l'obscurité est prise préalablement avec le même temps d'exposition. Le signal  $Signal_{noir}(x,y)$  est alors obtenu, avec:

$$Signal_{noir}(x,y) = Signal_{thermique}(x,y) + Signal_{zero}(x,y) \quad (3.4)$$

Pour obtenir le signal utile de l'image pour une mesure sous illumination, nous soustrayons à la mesure d'image brute la mesure sous obscurité  $Signal_{noir}(x,y)$ .

### Uniformité de la réponse

La deuxième correction à appliquer concerne la non-uniformité de la réponse de la caméra, correspondant à une variation de la grandeur  $Réponse(x,y)$  en fonction du pixel. Dans le cas d'une caméra idéale, l'image d'une surface illuminée de manière uniforme donne un signal de même valeur pour tous les pixels. Cependant, ce type de capteur est connue pour présenter des non-uniformités de la sensibilité des pixels à la lumière. D'autres facteurs peuvent également impacter l'uniformité de la réponse : la qualité de l'objectif, l'uniformité du revêtement du diffuseur, ou encore l'alignement imparfait de la caméra avec la surface mesurée. Il est difficile de décorréler ces paramètres, et mentionnons que la mesure d'uniformité permet de prendre en compte l'ensemble de ces facteurs. Pour la mesurer, nous plaçons une lampe calibrée à distance lointaine du diffuseur,  $\sim 4$  mètres dans notre cas pour une surface mesurée de  $10,2 \times 12,8$  mm<sup>2</sup>. Une attention particulière est prise pour éviter les rayons réfléchis, en plaçant des baffles optiques entre la lampe et la surface illuminée. Nous considérons ainsi la lumière uniforme sur le diffuseur. Nous observons alors la réponse de la caméra pour le

dispositif sans filtre, et calculons une correction  $Corr_{uniformité}(x,y)$  à appliquer à l'image pour uniformiser les valeurs (Eq. 3.5):

$$Corr_{uniformité}(x,y) = \frac{Signal(x,y)}{\overline{Signal}} \quad (3.5)$$

Avec  $Signal(x,y) = Signal_{brut}(x,y) - Signal_{noir}(x,y)$  et  $\overline{Signal}$ , le signal moyen de l'image corrigé du signal d'obscurité.

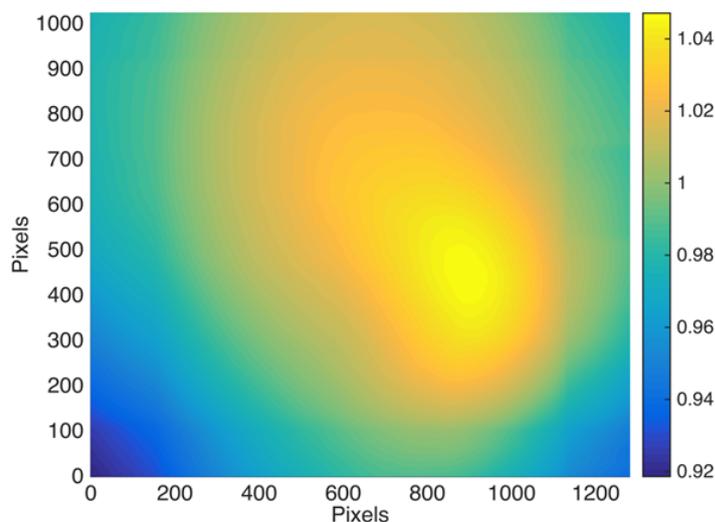


Figure 3.12: Signal normalisé par la valeur moyenne du signal de l'image pour un éclairage uniforme du diffuseur. La matrice obtenue correspond à la correction en uniformité  $Corr_{uniformité}(x,y)$ .

Dix images sont prises et permettent d'obtenir un facteur de correction moyenné illustré en figure 3.12. La variation de signal moyen est inférieure à  $\simeq 3\%$  pour 95% des valeurs.

### Linéarité

Un autre type de correction à appliquer à la mesure avec capteur CMOS est lié à la linéarité de la réponse. En effet, un capteur idéal produirait un signal directement proportionnel à l'intensité de la lumière incidente, de l'obscurité jusqu'à la saturation du capteur. Pour un capteur réel, l'électronique de mesure induit certaines non-linéarités, et plus spécifiquement aux conditions extrêmes de la plage de mesure. Nous avons cherché à caractériser cette linéarité en illuminant un diffuseur avec une lampe reliée à une alimentation stabilisée.

Afin de varier l'intensité du signal mesurée, nous ajustons le temps d'intégration de la caméra: en effet le signal correspond à une énergie incidente sur le capteur qui est proportionnelle au temps d'intégration. L'ensemble de la plage de réponse de la caméra (de

0 à 255 valeurs) est parcourue, en prenant garde de ne pas avoir de pixels saturés. La mesure est réalisée pour les différents filtres, afin d'observer la linéarité de la réponse à différentes longueurs d'onde. La non-linéarité observée correspond à une dispersion de la grandeur *Réponse* de l'ordre de 1% sur la plage de mesure. Nous considérons ces non-linéarités assez faibles pour les négliger et approximer un signal de l'image variant linéairement avec l'intensité de la lumière.

### 3.3.2 Calibration spectrale du dispositif de mesure

La calibration spectrale permet de corrélérer le signal mesuré par la caméra, auquel les corrections mentionnées dans la sous-section précédente ont été appliquées, à une valeur d'irradiance en  $\text{W/m}^2$ . En utilisant une source lumineuse de spectre connu, il est possible de calculer ce facteur de calibration. Une lampe Quartz Tungsten Hallogén de 1000 W (modèle newport QTH1000W), reliée à une alimentation stabilisée et placée à 50 cm du diffuseur, permet d'obtenir une puissance lumineuse de  $250 \text{ W/m}^2$  sur l'écran en opale. La figure 3.13 représente l'irradiance spectrale produite au niveau du diffuseur, ainsi que la puissance correspondante pour chaque filtre optique sur la plage 300-1100 nm.

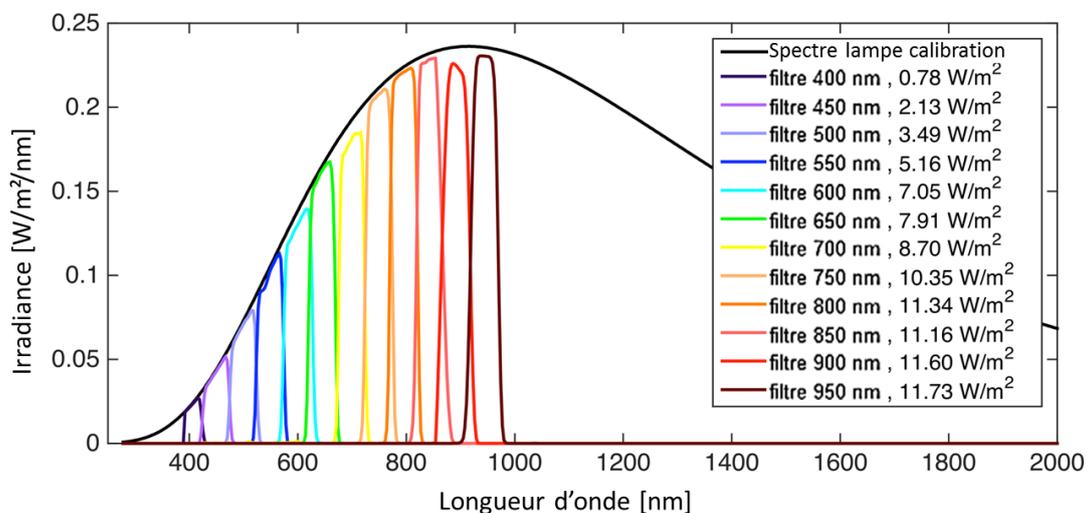


Figure 3.13: Irradiance spectrale de la source de calibration sans filtre, et pour chaque filtre passe-bande, à une distance de 50 cm de la lampe.

En connaissant la puissance lumineuse et le temps d'intégration paramétré pour la mesure, nous obtenons une relation entre l'énergie incidente sur le diffuseur et le signal mesuré par la caméra. Cette relation varie avec l'angle d'incidence des rayons, puisque la diffusion de l'opale n'est pas parfaitement lambertienne. Ce point est à prendre en compte car pour les

concentrateurs réels, la lumière arrive sur la cellule avec différents angles d'incidence. Le facteur de calibration, qui lie les deux grandeurs, peut alors s'écrire selon l'équation 3.6:

$$Calib_i(\alpha_{incident}) = \frac{\overline{Signal}(\alpha_{incident})}{P_{lumineuse,i} \cdot \Delta t} \quad (3.6)$$

Avec  $P_{lumineuse}(i)$ , la puissance lumineuse pour le filtre  $i$ ,  $\alpha_{incident}$ , l'angle d'incidence des rayons et  $\Delta t$  le temps d'intégration de la caméra.

La lampe de calibration est placée à différents angles d'incidence par rapport à l'axe optique tout en conservant la distance de calibration diffuseur-lampe de 50 cm. Des exemples d'images obtenues pour différents filtres et différents angles sont présentés en figure 3.14.

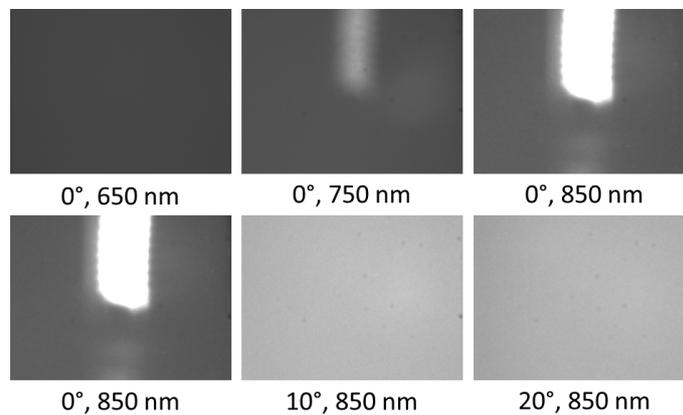


Figure 3.14: Images du diffuseur éclairé avec la lampe de calibration pour différentes longueurs d'onde et positions angulaires de la source de calibration.

Pour les filtres correspondant à une longueur d'onde supérieure à 700 nm, et pour un angle d'incidence égal à 0°, il est clair que l'image n'est pas uniforme. On devine une tâche lumineuse, dont l'intensité augmente avec la longueur d'onde du filtre, correspondant au filament de la lampe calibrée. Pour la longueur d'onde 850 nm, cette non-uniformité spatiale disparaît lorsque la lampe n'est plus sur l'axe optique, soit à un angle d'incidence différent de 0°. Ce phénomène s'explique par le comportement du diffuseur qui varie avec la longueur d'onde. En effet, pour ce type de diffuseur, on observe un comportement de moins en moins lambertien lorsque la longueur d'onde augmente: une composante spéculaire apparaît dans la lumière transmise. Ce comportement est bien schématisé par la figure 3.15, où l'on observe une direction préférentielle de la lumière transmise, identique à celle de la lumière incidente. Les diffuseurs fréquemment utilisés en optique [106] ont la propriété de diffuser de manière quasi lambertienne dans la région du visible. En revanche, pour les longueurs d'onde correspondant à l'infrarouge, il est difficile d'obtenir de telles performances pour ces matériaux [107, 108]. L'impact de l'utilisation de l'opale comme diffuseur sur la mesure est

à relativiser pour deux raisons. Tout d'abord, la gamme spectrale impactée ne concerne que les longueurs d'onde supérieures à 750 nm. Ensuite, la composante spéculaire sera "visible" par la caméra seulement pour des rayons arrivant sur le diffuseur avec un angle incident inférieur à une certaine valeur. Ainsi, pour la calibration, le filament de la lampe apparaîtra sur l'image lorsque celui-ci sera situé dans le champ de vision de la caméra. Plus l'ouverture angulaire de ce champ de vision est faible, plus l'angle d'incidence limite pour lequel le phénomène apparaît sera faible. Pour une distance entre la caméra et le diffuseur de 27,6 cm, nous obtenons un champ de vision d'ouverture angulaire de  $1,26^\circ$ . Ne pouvant s'affranchir de ce phénomène pour la mesure avec concentrateurs réels, nous observerons qualitativement et par la mesure électrique si cet artefact perturbe la mesure (voir section 3.4).

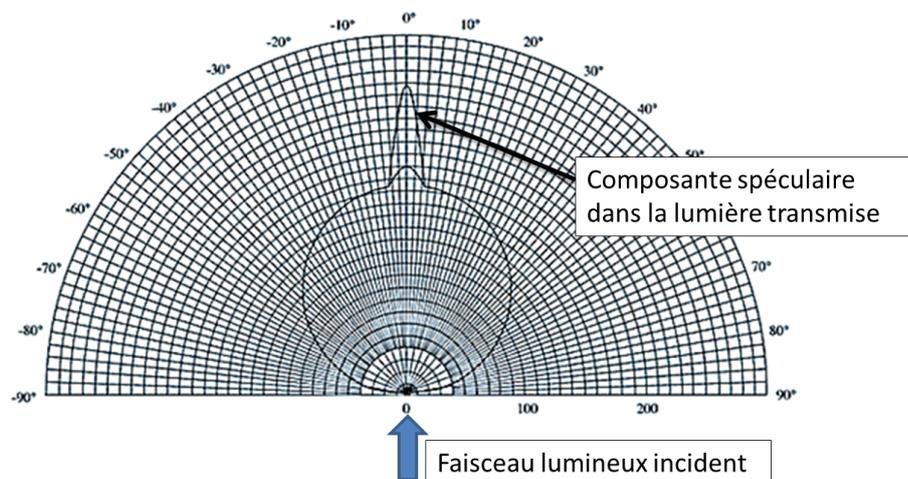


Figure 3.15: Schéma du comportement non-lambertien du diffuseur, et de la composante spéculaire du rayonnement dans la lumière transmise (©Newport).

Observons maintenant le comportement du diffuseur pour l'ensemble des filtres et des angles d'incidence variant de  $0^\circ$  à  $25^\circ$ . Les constantes de calibration ont été déterminées pour les différents cas à partir de l'équation 3.6, et sont présentées sur la figure 3.16. Tout d'abord, sur la figure de gauche, les constantes de calibrations en valeur absolue montrent des valeurs anormalement élevées pour un angle d'incidence de  $0^\circ$  et des longueurs d'onde supérieures à 700 nm. Ceci coïncide avec les observations précédentes où le comportement non-lambertien du filtre pour cette plage de longueur d'onde entraîne une augmentation du signal moyen de l'image et donc du facteur de calibration. Sur la figure de droite, les constantes ont été normalisées par leur valeur à  $5^\circ$ , et seuls les angles de  $5^\circ$  à  $25^\circ$  sont représentés. On observe que la constante diminue avec l'angle d'incidence, correspondant à une diminution du signal moyen de l'image. Ainsi une baisse de l'ordre de 10% à 13% est observée selon les filtres lorsque l'angle d'incidence varie de  $5^\circ$  à  $25^\circ$ .

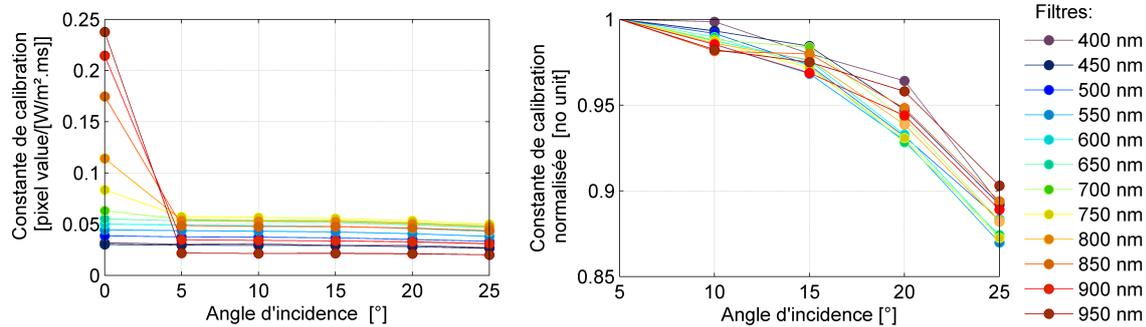


Figure 3.16: Variation de la constante spectrale de calibration en fonction de l'angle d'incidence des rayons sur le diffuseur. A gauche, les valeurs absolues sont représentées pour un angle d'incidence de de 0° à 30°. A droite, les valeurs ont été normalisées par leur valeur maximale pour un angle d'incidence de 5° à 25°.

Dans le cas de concentrateurs réels, l'angle d'incidence des rayons concentrés pour une région du diffuseur ne peut être connu. Il est en conséquence impossible de déterminer une calibration angulaire. Une valeur unique de calibration, représentative du fonctionnement du dispositif, doit être utilisée. Pour une optique primaire carrée de nombre- $f$  égal à 1,5, la distribution angulaire du faisceau focalisé de la figure 3.17 est obtenue numériquement (les aberrations chromatiques ne sont pas prises en compte). L'angle d'incidence de 15° est proche de l'angle médian de la distribution angulaire, et les constantes de calibration correspondantes à cet angle sont ainsi choisies pour corrélérer l'intensité du signal et la puissance lumineuse. Une étude menée dans [43] présente la distribution angulaire obtenue pour différents concentrateurs optiques (avec et sans optiques secondaires). La valeur de 15° se rapproche d'une valeur médiane pour les différents concentrateurs optiques, ce qui conforte notre choix.

Cette approximation causera inévitablement des sous-estimations ou des sur-estimations de puissance pour les rayons d'angle d'incidence différents de 15°. Cet impact est limité dans la mesure où la distribution angulaire est bornée. Ainsi  $\sim 80\%$  des rayons arrivent avec un angle compris entre 10° et 20° dans le cas évoqué précédemment. Sur la figure 3.16, on observe que pour ces deux valeurs, la valeur de calibration diffère de l'ordre de 5% par rapport à la valeur de calibration à un angle de 15°. De plus, l'erreur causée est sensiblement similaire quelle que soit la longueur d'onde considérée. La balance spectrale est ainsi respectée, bien que l'intensité du signal présente une incertitude. Pour les concentrateurs réels, les non-uniformités spectrales sont en conséquence bien observables.

Une dernière correction doit être apportée pour obtenir l'irradiance spectrale sur le diffuseur. En effet, le but de la calibration est de reproduire la puissance lumineuse pour

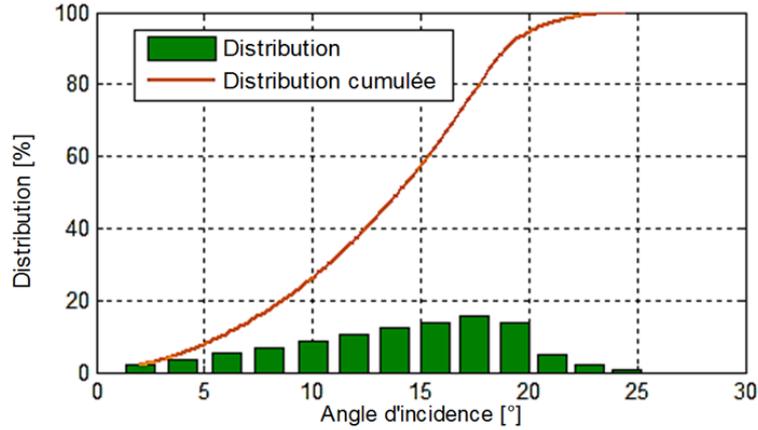


Figure 3.17: Distribution et distribution cumulée de l'angle d'incidence des rayons au point focal d'une lentille de nombre-f 1,5.

chaque pixel sur des bandes spectrales de 50 nm de large. Or les valeurs  $Calib_i(\alpha_{incident})$  ont été déterminées pour des filtres non-idéaux. Leur transmittance n'est pas égale à 100% sur leur gamme spectrale (voir figure 3.4), et il en résulte une transmission rectangulaire imparfaite, ainsi qu'un chevauchement des plages de transmission entre les filtres. En conséquence, une correction simple est appliquée pour palier à ce phénomène: pour le spectre de la lampe Xénon correspondant au spectre AM1.5D, le ratio de puissance transmise entre filtres idéaux et filtres réels est calculé. Cette valeur, que nous appelons  $Corr_{filtre,i}$ , est déterminée pour chaque filtre  $i$ . L'irradiance spectrale locale  $e(x, y, \lambda_i)$  finalement obtenue pour chaque pixel et la longueur d'onde  $\lambda_i$  correspondante au filtre  $i$ , peut s'exprimer selon l'équation:

$$e(x, y, \lambda_i) = \frac{Signal_{brut,x,y} - Signal_{noir,x,y}}{\Delta t \cdot Calib_{i,\alpha_{incident}=15^\circ} \cdot Corr_{filtre,i} \cdot Corr_{uniformité,x,y}} \quad (3.7)$$

Comme les valeurs d'irradiance sont déterminées aux longueurs d'onde  $\lambda_i$  des filtres, nous considérerons la valeur valable pour la longueur d'onde  $\lambda$  la plus proche selon l'équation:

$$e(x, y, \lambda) = e(x, y, \lambda_{eq}) \quad (3.8)$$

Avec  $\lambda_{eq}$  correspondant à la longueur d'onde  $\lambda_i$  du filtre  $i$  pour laquelle la valeur  $|\lambda - \lambda_i|$  est minimale.

### 3.3.3 Déclenchement sous lumière pulsée

La dernière étape de calibration consiste à observer le comportement de METHOD sous lumière pulsée. Tout d'abord, il convient de déterminer un temps d'intégration permettant d'obtenir un rapport signal sur bruit satisfaisant tout en limitant les variations spectrales et d'intensité lors de la mesure due à la nature du flash. Un temps d'intégration de 50  $\mu$ s donne un signal satisfaisant, et permet de travailler sur des périodes courtes du flash. Nous cherchons maintenant à connaître le moment du flash sur lequel est effectuée la mesure, afin de connaître les conditions spectrales de la lumière incidente et de pouvoir les corrélérer correctement à la mesure électrique.

L'acquisition de la caméra est déclenchée par le signal du photodétecteur, auquel il est possible d'ajouter un délai supplémentaire. Pour déterminer le délai à appliquer, permettant de contrôler le moment du flash sur lequel se fait l'acquisition, nous avons étudié le signal moyen de l'image à différents délais pour le filtre 500 nm. Nous comparons ce signal d'imagerie moyen à la mesure  $DNI_{top}$  mesurée par la cellule isotype *top* du spectro-pyrhéliomètre (réponse spectrale centrée sur la longueur d'onde 500 nm) : nous constatons un décalage entre les deux signaux. En d'autres termes, pour un délai du déclencheur équivalent à zéro, l'acquisition d'image ne se déclenche pas sur le temps  $t=0$  du flash. Le photodétecteur et l'électronique associée à la caméra ont un certain temps de réponse. Pour un décalage temporel du signal d'imagerie de 50  $\mu$ s, nous obtenons une bonne cohérence des deux signaux.

Différents délais sont alors déterminés afin d'acquérir des images pour une composition spectrale du flash correspondant à des  $SMR_{mid}^{top}$  de 0,9 à 1,2, conditions représentatives du fonctionnement en extérieur et pour lesquelles l'intensité du flash est suffisante pour la mesure d'image. Le délai à paramétrer peut alors s'exprimer par:

$$t_{délai}(SMR_{mid}^{top}) = t_{flash}(SMR_{mid}^{top}) - \Delta t_{intégration}/2 - t_{déclencheur} \quad (3.9)$$

Avec  $t_{délai}$  le délai à paramétrer,  $t_{flash}$  le moment du flash pour lequel s'effectue la mesure,  $\Delta t_{intégration}$  le temps d'intégration nécessaire à l'acquisition d'image et  $t_{déclencheur}$  le décalage entre le début du flash et l'activation du déclencheur.

La figure 3.18 et le tableau 3.1 permettent d'observer les périodes d'acquisition de l'image au cours du flash, et le temps de délai associé à paramétrer, pour différentes compositions spectrales.

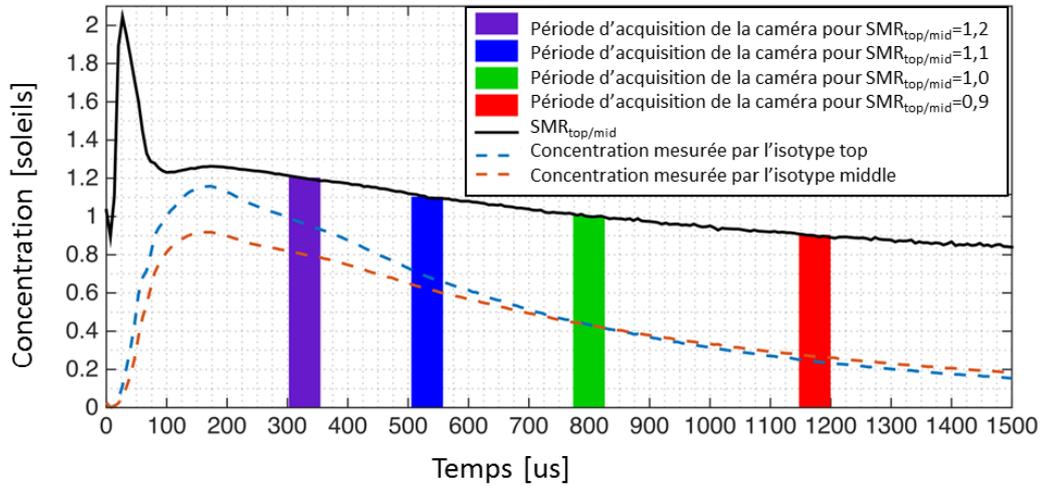


Figure 3.18: Périodes d'acquisition des images au cours du flash correspondantes à quatre compositions spectrales de la source lumineuse.

Tableau 3.1: Temps de délai à appliquer pour le déclenchement de l'acquisition d'image en fonction des conditions spectrales. La variation de la valeur minimale et maximale de  $SMR_{mid}^{top}$  par rapport à la moyenne pour un temps d'intégration de  $50 \mu s$  est également indiquée.

$SMR_{top/mid}$	$t_{flash} [\mu s]$	$t_{délai} [\mu s]$	Max SMR [%]	Min SMR [%]
1,20	328,71	253,71	+0,01	-0,01
1,10	531,48	456,48	+0,03	-0,03
1,00	799,57	724,57	+0,01	-0,01
0,90	1173,50	1098,50	+0,02	-0,03

### 3.4 Validation par la mesure électrique du banc d'imagerie

Dans cette section, nous allons d'abord appliquer les facteurs de correction et de calibration déterminés précédemment, afin de déterminer la distribution d'irradiance résolue spectralement sur le diffuseur pour un concentrateur de type lentille de Fresnel. A partir de cette donnée, nous allons voir comment calculer la densité de courant locale, et donc le courant  $I_{sc}$  généré pour une surface donnée. Nous comparerons alors les résultats obtenus à des mesures électriques effectuées sur des isotypes *top* et *middle* d'une cellule triple-jonction dite *lattice-matched*.

### 3.4.1 Application de la calibration à un concentrateur réel

L'optique primaire utilisée dans cette étude est une lentille de Fresnel de type SoG, de nombre-f égal à 1,5, conçue pour concentrer la lumière 500 fois sur une cellule de 3 mm de diamètre. La figure 3.19 montre les images obtenues pour 3 filtres : 400, 600 et 800 nm avec un temps d'intégration de 50  $\mu$ s. L'intensité lumineuse est normalisée par sa valeur maximale pour les trois longueurs d'onde. Le spot présente un profil de forme gaussienne variant légèrement d'une longueur d'onde à l'autre. Sur la figure 3.20, la cartographie d'intensité lumineuse est agrandie pour la longueur d'onde 600 nm. Le profil présente une légère asymétrie.

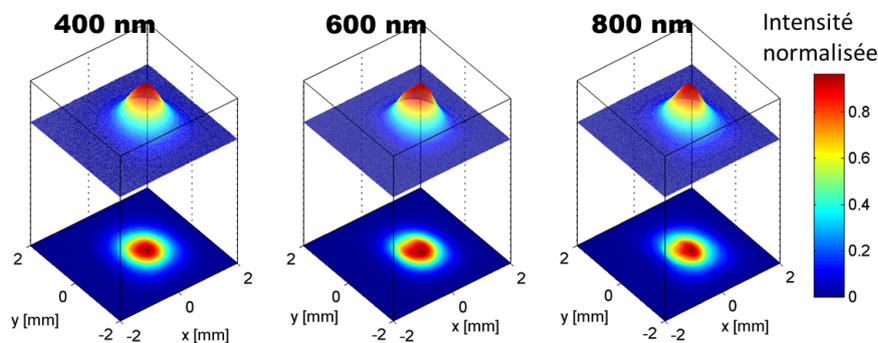


Figure 3.19: Profils 3D de l'intensité normalisée du signal de l'image pour une lentille sans SOE à trois longueurs d'onde.

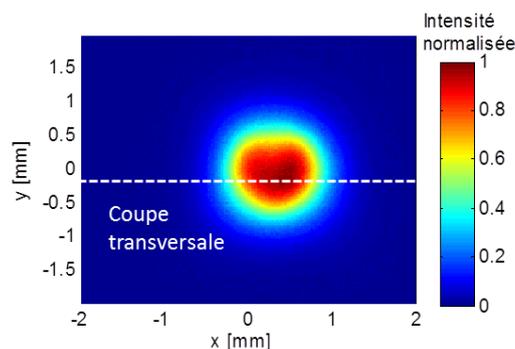


Figure 3.20: Profil 2D du signal normalisé pour le filtre passe-bande 600 nm.

L'asymétrie observée s'explique par la source de lumière utilisée. Pour des optiques imageantes, de type lentilles de Fresnel, la lumière concentrée forme au point focal une image de la source lumineuse. Pour des conditions externes, c'est le soleil qui est imagée sur la cellule. Pour le simulateur, c'est la lampe de Xénon qui est de forme thoroidale. La distribution d'irradiance sur la cellule est donc différente pour des tests sous simulateur

et en extérieur. Cette différence a été étudiée dans [109], et peut conduire à différentes caractéristiques *IV*. La distribution obtenue dépend notamment de paramètres comme la position de la cellule: lorsque l'on s'éloigne du point focal, propre à chaque longueur d'onde, la forme thoroïdale devient moins nette du fait de la défocalisation. La qualité de surface du miroir joue également un rôle: la diffusion créée par des imperfections aura pour effet d'élargir l'image obtenue, et ainsi de diminuer la netteté de l'image formée par la lentille. Cependant, nous n'aborderons pas cette problématique dans le cadre de ce travail pour les raisons suivantes: le dispositif d'imagerie n'est pas utilisable en extérieur dans sa version actuelle, et les mesures d'imagerie sont corrélées à des mesures *IV* effectuées dans le même simulateur. Les cellules testées voient donc bien la même irradiance que celle mesurée par la caméra, et il est donc possible de corrélérer les deux mesures. Sur la figure 3.20, une coupe transversale a été tracée. La distribution d'intensité pour cette coupe est représentée pour les différents filtres sur la figure 3.21. Le signal a cette fois été normalisé par la valeur maximale d'intensité mesurable par la caméra (soit 255), afin d'illustrer la capacité de la caméra à mesurer un signal suffisant sur la plage spectrale de mesure.

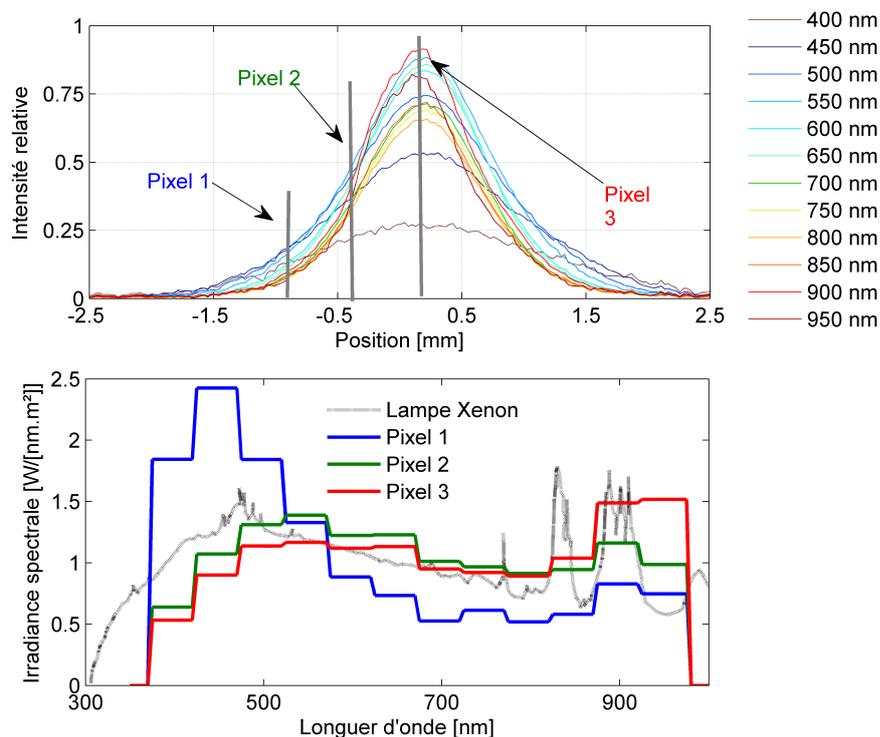


Figure 3.21: Haut: Signal normalisé pour une coupe transversale de l'image (voir figure 3.20). Bas: Irradiances spectrales calculées pour 3 pixels de la coupe transversale et spectre de la lampe Xénon. Les valeurs d'irradiance sont normalisées à une puissance de  $1000 \text{ W/m}^2$  pour permettre une meilleure comparaison entre les courbes.

Les différents profils illustrent le phénomène d’aberration chromatique inhérent aux lentilles de Fresnel. Dans ce cas, le spot apparaît plus focalisé pour les hautes longueurs d’onde. Pour illustrer ce phénomène, nous appliquons les facteurs de calibration et de correction aux images mesurées, et calculons l’irradiance spectrale pour trois pixels (graphe du bas de la figure 3.21). Les spectres ont été normalisés par le spectre de la lampe Xénon, également représenté, pour permettre une meilleure comparaison. Pour le pixel 1, localisé sur les bords de la tâche lumineuse, un spectre riche en bleu est obtenu. Pour le pixel 2, le spectre est plutôt équilibré alors que dans le cas du pixel 3, localisé au centre du spot, le spectre est plutôt riche en rouge. Une telle balance spectrale va induire des limitations locales de courant, comme expliqué dans la première partie de ce chapitre. Voyons maintenant comment déterminer la génération de courant en comparant les résultats obtenus avec des résultats électriques.

### 3.4.2 Extraction des courants par imagerie et comparaison à des mesures électriques

Dans un premier temps, nous allons voir comment calculer le courant  $I_{sc}$  à partir de la distribution d’irradiance déterminée par imagerie. Nous comparerons ensuite ce courant à des mesures électriques réalisés pour des cellules isotypes *top* et *middle* sous flux concentré.

A partir de l’irradiance spectrale calculée pour chaque pixel, le courant local  $J_{sc,i,brut}(x,y)$  pour chaque jonction peut être déterminé. Ainsi, pour chaque jonction  $i$ , nous sommes le produit de l’efficacité quantique externe  $EQE_i(\lambda)$  et l’irradiance locale  $e(x,y,\lambda)$  selon l’équation:

$$J_{sc,i,brut}(x,y) = \sum_{\lambda} \frac{q\lambda}{hc} \cdot e(x,y,\lambda) \cdot EQE_i(\lambda) \quad (3.10)$$

L’efficacité quantique externe  $EQE_i(\lambda)$  des cellules isotypes utilisées pour comparer les mesures électriques aux courants déterminés par imagerie est représentée en figure 3.22.

La densité de courant calculée est valable pour l’ensemble de l’image de taille 10,2x12,8 mm<sup>2</sup>. Or la cellule correspondante est généralement inférieure à cette taille et il convient de définir une zone de l’image sur laquelle travailler. Pour une cellule de dimension connue, nous déterminons une matrice  $M_{Aire}$  représentant de manière fictive l’aire de l’image correspondant à la cellule. Les éléments de cette matrice, de taille 1024x1280, prennent deux valeurs: soit 1 lorsque le pixel correspond à un point de la cellule, soit 0 lorsque le pixel se situe en dehors de la cellule fictive. La densité de courant  $J_{sc,i}$  pour la cellule considérée est alors le produit

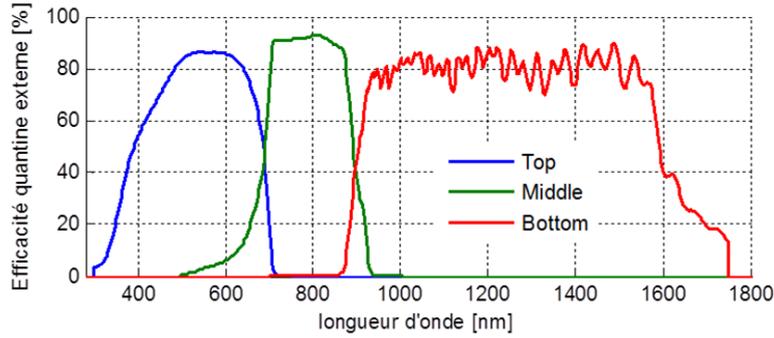


Figure 3.22: Efficacités quantiques externes des cellules isotypes *top*, *middle* et *bottom* mesurées au CEA. La cellule isotype *bottom* est représentée à titre indicatif.

élément par élément, suivant:

$$J_{sc,i}(x,y) = J_{sc,i,brut}(x,y) \odot M_{Aire} \quad (3.11)$$

Les isotypes utilisés dans le cadre de cette étude sont de tailles  $5,5 \times 5,5 \text{ mm}^2$ . Les densités de courant obtenues pour la jonction *top* et *middle* sont visibles sur la figure 3.23.

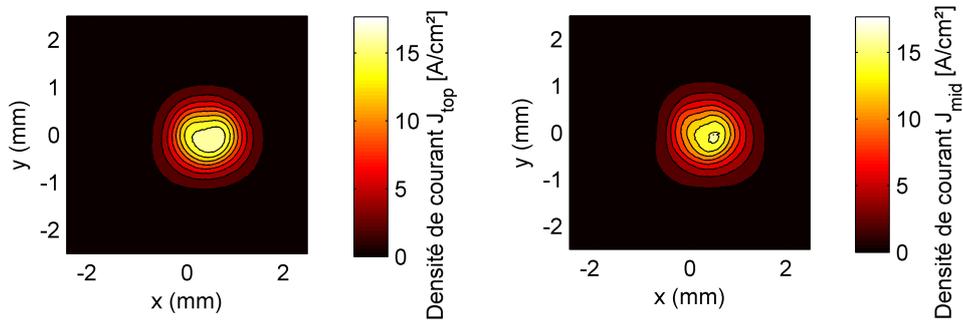


Figure 3.23: Densités de courant calculées par imagerie pour les isotypes *top* et *middle* étudiées. Les images sont prises pour un  $DNI$  de  $800 \text{ W/m}^2$ .

A partir de cette cartographie et de l'efficacité quantique  $EQE_i$  de chaque isotype, nous pouvons obtenir le courant  $I_{sc,i}$  de chaque isotype selon l'équation:

$$I_{sc,i} = \sum_{x,y} J_{sc,i}(x,y) \cdot A_{pixel} \quad (3.12)$$

Avec  $A_{pixel}$  équivalent à l'aire de chaque pixel.

En référence à la figure 3.24, les courants calculés sont comparés au courant mesuré lors du flash. Le temps d'intégration de la caméra est de  $50 \mu\text{s}$ , et différents délais de

déclenchement ont été paramétrés pour parcourir le flash. Sur la partie descendante du flash, nous observons une légère surestimation pour la jonction *top*, de l'ordre de 2% du courant par la méthode d'imagerie. Cette surestimation s'accroît pour la jonction *middle* pour atteindre jusqu'à 7%. Mentionnons-ici que l'imagerie ne tient pas compte des effets d'ombrage provoqués par la métallisation sur la cellule et qu'en conséquence elle surestime de facto le courant produit. Cette surestimation correspond au facteur d'ombrage qui se situe autour de 5% pour les isotypes testés, réduisant ainsi l'erreur absolue pour le cas de l'isotype *middle* à près de 2%, et pour le cas de l'isotype *top* à moins 3%.

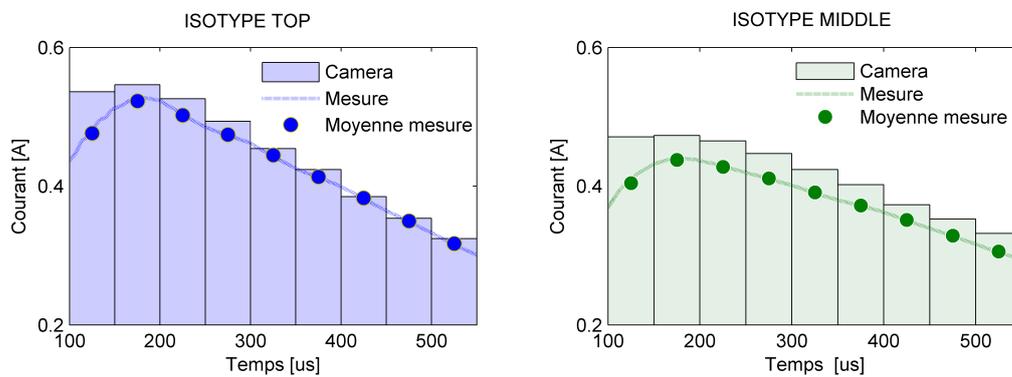


Figure 3.24: Comparaison entre le courant  $I_{sc}$  mesuré et le courant  $I_{sc}$  calculé par imagerie pour l'isotype *top* (gauche) et l'isotype *middle* (droite). Les points "moyenne mesure" correspondent à une moyenne du signal électrique sur une période de  $50 \mu s$  équivalente à l'acquisition d'image.

Compte-tenu des approximations faites (valeur de calibration spectrale prise pour un angle de  $15^\circ$ , transmission en partie spéculaire du filtre dans l'infrarouge notamment), les résultats sont satisfaisants. Cependant, il est fort probable que pour d'autres optiques de concentration, l'erreur commise diffère. La comparaison entre mesures électriques et résultats calculés est alors considérée comme une étape nécessaire pour l'analyse du comportement électrique de la cellule par l'imagerie. Le calcul peut être en effet corrigé du courant mesuré pour une meilleure cohérence entre les deux valeurs selon les équations suivantes:

$$Corr_{elec} = I_{sc,i,calcul} / I_{sc,i,mesure} \quad (3.13)$$

$$J_{sc,i,corrigé}(x,y) = J_{sc,i,calcul}(x,y) \cdot Corr_{elec} \quad (3.14)$$

Pour les cellules triple-jonctions, il n'est pas possible d'extraire directement le courant  $I_{sc,i,mesure}$  pour chaque jonction. La détermination du facteur de correction électrique requiert

une procédure supplémentaire, que nous allons détailler, pour corréler mesure électrique et calcul par imagerie.

### 3.4.3 Calibration de la mesure optique pour des cellules triple-jonctions

Une méthode présentée dans [33] permet d'extraire le courant théoriquement délivré par chaque sous-jonction  $i$  au cours du flash à partir du diagramme des sous-cellules, où les courants  $I_{N,top}$  et  $I_{N,mid}$  sont tracés en fonction du rapport spectral  $SMR_{top}^{mid}$ . Un tel diagramme, que nous avons introduit dans le chapitre 2, est illustré en figure 3.25.

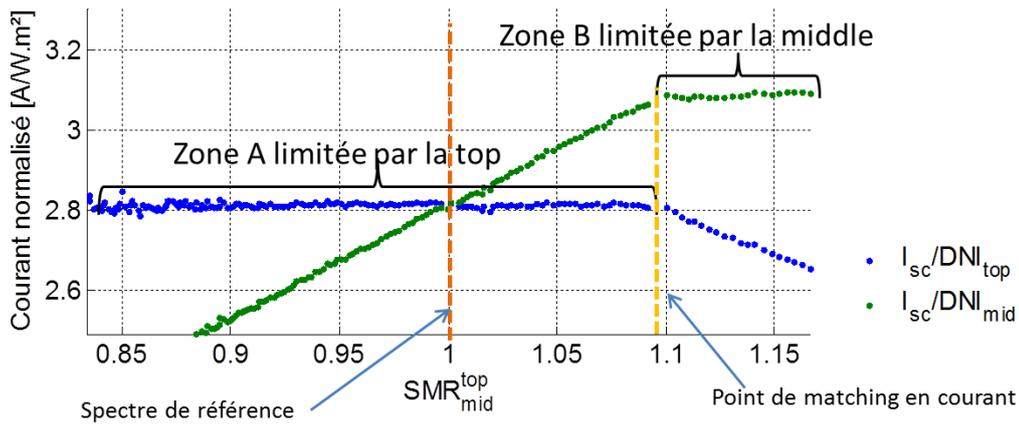


Figure 3.25: Diagramme des sous-cellules d'une cellule triple-jonctions mesuré au CEA. On observe une limitation franche des sous-cellules *top* et *middle* pour respectivement les zones A et B du diagramme.

Pour la zone spectrale A, où le courant  $I_{N,top}$  peut être considéré comme constant, le courant de la cellule triple-jonction est proportionnel au courant délivré par l'isotype *top* du spectro-pyrhéliomètre. La cellule est alors limitée en courant par la sous-cellule *top* et  $I_{sc,cell}$  est équivalent à  $I_{sc,top}$ . La zone B correspond à une limitation équivalente de la sous-cellule *middle*. Il est alors possible de déterminer un courant de calibration  $I_{N,i}^*$  reliant le  $DNI_i$  mesuré et la génération de courant de chaque sous-cellule:

$$I_{N,i}^* = \frac{I_{sc}}{DNI_i} \Big|_{I_{sc,cell} \approx I_{sc,i}} \quad (3.15)$$

Ce courant de calibration peut alors être utilisé pour estimer le courant délivré indépendamment par chacune des sous-jonctions pour n'importe quelles conditions d'irradiance du flash selon l'équation suivante:

$$I_{sc,i} = DNI_i \cdot I_{N,i}^* \quad (3.16)$$

De plus, il est possible d'obtenir le *matching* en courant  $CM_{mid}^{top}$  global de la cellule dans des conditions spectrales de référence AM1.5D ( $SMR_{mid}^{top} = 1$ ) selon l'équation 3.17 et pour d'autres conditions spectrales selon l'équation 3.18:

$$CM_{mid}^{top}(E_{AM1.5D}) = \frac{I_{N,top}^*}{I_{N,mid}^*} \quad (3.17)$$

$$CM_{mid}^{top}(SMR_{mid}^{top}) = SMR_{mid}^{top} \cdot \frac{I_{N,top}^*}{I_{N,mid}^*} \quad (3.18)$$

Pour certains dispositifs, la limitation du courant par une cellule est caractérisée par une tendance quasi monotonique de la sous-cellule correspondante, et non un plateau. Cela signifie qu'il existe un *mismatch* spectral significatif entre le capteur de référence et l'ensemble cellule-optique pour la sous-cellule considérée. Le courant de calibration  $I_{N,i}^*$  peut alors s'exprimer en fonction du  $SMR_{mid}^{top}$  par une fonction affine interpolée sur la zone de limitation:

$$I_{N,i}^*(SMR_{mid}^{top}) = a \cdot SMR_{mid}^{top} + b \quad |_{I_{sc,cell} \approx I_{sc,i}} \quad (3.19)$$

Ainsi, l'ensemble du procédé de mesure présenté, de la prise d'images à la correction des courants calculés, répond au besoin de corrélation entre comportement électrique et optique du dispositif de mesure. Dans le chapitre suivant, nous mettrons en application ces méthodes de caractérisation pour différents dispositifs.

### 3.5 Conclusions

Le travail effectué a permis de mettre en place un instrument de mesures optique et électrique capable de contrôler indépendamment différents paramètres, telles que la distance focale, la température de la lentille ou la température de la cellule. L'utilisation combinée de filtres optiques, d'une caméra CMOS et d'un diffuseur en opale sert à imager spectralement l'irradiance atteignant la cellule pour la région spectrale 350-100 nm.

A travers un procédé de calibration avancé, les images obtenues sont traitées pour obtenir l'irradiance spectrale en chaque pixel, correspondant à une position sur la cellule. Ce résultat,

corrélé à la réponse spectrale de la cellule, permet d'obtenir la distribution de densité de courant pour les jonctions *top* et *middle* de la cellule triple-jonction étudiée.

La comparaison des courants calculés par imagerie et de mesures électriques montrent des écarts inférieures à 7%, écarts réduits à 3% si la grille de métallisation est prise en compte. La cohérence de ces résultats prouve la validité du procédé de mesure. Cependant plusieurs approximations ont été faites lors du procédé de calibration : valeur de calibration spectrale ne dépendant pas de l'angle d'incidence des rayons, homogénéité de la transmission des diffuseurs en opale, ou encore composante spéculaire de la lumière transmise par le filtre dans les hautes longueurs d'onde négligée. La justesse d'une valeur absolue d'irradiance spectrale, et donc de densités de courant, pour différents concentrateurs ne peut-être prise pour acquise. Il est alors nécessaire de corrélérer les mesures optiques avec des mesures électriques pour analyser de manière plus pertinente le comportement électrique du dispositif en fonction de la distribution d'irradiance sur la cellule. Une méthode de calcul permettant de corriger le calcul de courant par imagerie à partir de la mesure électrique a été présentée.

Ainsi, l'instrument METHOD répond au besoin de caractériser finement les systèmes CPV. Les applications sont en effet nombreuses : quantification des effets de la température de lentille sur le dispositif, détermination des tolérances de montage, caractérisation des non-uniformités spectrales et spatiales d'un concentrateur et étude des effets électriques associés, ou encore optimisation d'un dispositif pour des conditions définies d'opération, plus proche de conditions réelles que les conditions de test en laboratoire. Nous allons voir au prochain chapitre certaines de ces applications.



# Chapitre 4

## Analyse des comportements optique et électrique de dispositifs CPV sous conditions contrôlées

Dans ce chapitre, nous allons utiliser les moyens de mesure mis en œuvre précédemment pour analyser le fonctionnement de trois dispositifs CPV. Nous allons d'abord présenter ces technologies, et réaliser les caractérisations nécessaires à l'étude proposée. Dans un deuxième temps, nous étudierons comment chaque dispositif se comporte lorsque la position de la cellule varie sur l'axe optique, en corrélant caractéristiques  $IV$  et distributions spatiale et spectrale de l'irradiance sur la cellule. De la même manière, l'impact de la température de l'optique primaire sur les performances sera analysée. Nous établirons également des cartographies de performances en fonction des paramètres "position de cellule" et "température de lentille". Finalement, nous appliquerons nos résultats à l'analyse des performances des dispositifs CPV sous des conditions extérieures de fonctionnement.

### 4.1 Présentation des dispositifs étudiés

Afin d'analyser la corrélation entre comportement optique et comportement électrique de dispositifs CPV, nous choisissons de tester trois technologies. Les dispositifs à concentration utilisés ont en commun une optique primaire de type Fresnel et une cellule triple-jonction *lattice-matched* de type GaInP/GaAs/Ge. Cependant, ils diffèrent par la taille de cellule, la concentration géométrique et le type d'optique secondaire utilisé. Deux des dispositifs correspondent à des modules testés en extérieur dans le chapitre 2 : le dispositif n°1 "lentille SoG , pas d'optique secondaire" (SoG sans SOE), équivalent au module B du chapitre 2 et le

dispositif n°2 "lentille en PMMA et optique secondaire de type pyramide réfractive inversé" (PMMA + RTP), équivalent au module D. Bien que les éléments unitaires fournis (lentille et cellule) possèdent les mêmes caractéristiques en matière de taille que ceux des modules B et D testés dans le chapitre 2, nous ne pouvons attester que les caractéristiques optiques et électriques soient équivalents (période de fabrication différente, évolution des produits), les fabricants ayant tenu à conserver ces informations pour des raisons de confidentialité.

Le dispositif n°3 est en revanche moins conventionnel et n'a pas fait l'objet d'intégration dans des modules commerciaux à ce jour. Il s'agit d'un concentrateur à deux étages optiques de type Fresnel-Köhler que l'on abrègera par PMMA+FK. Un schéma des trois dispositifs est présenté en figure 4.1. A noter que ce schéma n'est pas à l'échelle et que pour les dispositifs testés, la taille des lentilles et la distance focale varient de manière importante. Nous définissons ici la distance focale comme la distance lentille-cellule déterminée expérimentalement, correspondante à un optimum de fonctionnement autour d'une température de lentille égale à 25°C.

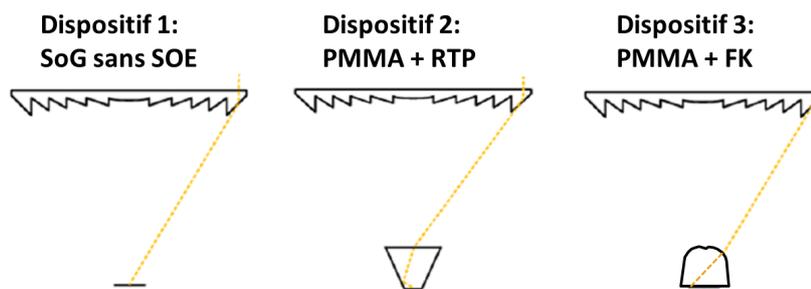


Figure 4.1: Représentations des trois architectures optiques testées.

### Le dispositif n°1: "SoG sans SOE"

Le dispositif n°1 utilise une lentille primaire de forme quadratique, de 5,7 cm de côté, concentrant la lumière 500 fois sur une cellule de 7 mm<sup>2</sup> de forme circulaire. La métallisation de la cellule a été optimisée pour un profil gaussien de la tâche lumineuse. En effet, les doigts de métallisation centraux sont plus rapprochés que ceux situés sur les côtés de la cellule, de sorte à limiter les pertes par résistance série dues à une densité de courant plus importante de courant au centre de la cellule. La distance lentille-cellule nominale est de 95 mm.

### Le dispositif n°2: "PMMA + RTP"

Le dispositif n°2 utilise une lentille de Fresnel en PMMA de 20 cm de côté. L'optique secondaire de type RTP est en verre et permet d'atteindre une concentration géométrique

totale de 820 fois sur une cellule carrée de 7 mm de côté. La pyramide inversée redirige la lumière en utilisant le principe de la réflexion totale interne (TIR), dont le rendement est proche de 1. Ainsi la lumière rebondit sur les parois de la pyramide, même lorsque celui-ci est aligné. Ce phénomène permet théoriquement d'homogénéiser le flux [110, 111] sur la cellule. La pyramide est couplée mécaniquement et optiquement à la cellule en utilisant du silicone, d'indice de réfraction similaire au verre utilisé afin de limiter les pertes optiques aux interfaces. La focale nominale correspond à une distance lentille-cellule de 149 mm.

### Le dispositif n°3: "PMMA + FK4"

Le dernier dispositif n°3 est un concentrateur de type Fresnel-Köhler, développé par la société LPI et présenté dans plusieurs articles [101, 112]. Il a été conçu selon les principes de l'optique non-imageante [52], qui visent à maximiser la transmission de lumière depuis la source jusqu'au récepteur en s'affranchissant des contraintes imageantes de l'optique géométrique. La figure 4.2 illustre le principe de fonctionnement de l'optique Fresnel-Köhler utilisée: l'optique primaire en PMMA divise la lumière en 4 faisceaux, dits de "Köhler", qui sont concentrés sur une optique secondaire à quatre lobes, chacun focalisant à son tour un faisceau lumineux sur la cellule. L'optique secondaire est fixée à la cellule avec du silicone, de manière analogue au dispositif n°2. Des études précédentes ont montré que ce type d'architecture optique permet d'obtenir des caractéristiques appropriées aux dispositifs CPV: rendement optique élevé, bonne tolérance au désalignement, et très haut niveau d'uniformité du flux sur la cellule [113]. Pour notre étude, la lentille primaire est de forme quadratique, de 16 cm de côté, et la cellule est également carrée avec une aire totale de 30,25 mm<sup>2</sup> (5,5 mm de côté). Pour ce dispositif, la cellule est placée à une distance de 261 mm de la lentille.

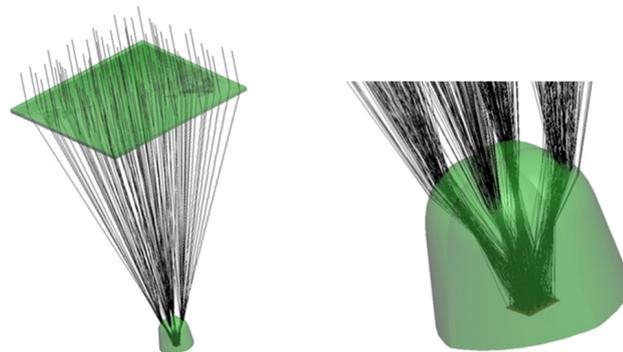


Figure 4.2: Principe de fonctionnement du dispositif Fresnel-Köhler. Le dispositif entier est représenté (gauche), ainsi qu'un zoom sur l'optique secondaire (droite) [101].

Pour l'étude proposée, plusieurs diffuseurs correspondant aux récepteurs des différentes technologies sont utilisés. Pour les technologies n°2 et n°3, nous disposons d'une optique secondaire que nous couplons au diffuseur avec du silicone équivalent à celui utilisé dans les dispositifs présentés. Le résultat est visible sur la figure 4.3, où des photographies de chaque diffuseur sont présentées.



Figure 4.3: Photographie des diffuseurs utilisés dans le cadre de l'étude. De droite à gauche: diffuseur sans SOE, diffuseur avec pyramide réfractive inversée, et diffuseur avec optique secondaire de Fresnel-Köhler.

### Détermination du facteur de correction électrique

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 3, la détermination des distributions de courant sur la cellule par imagerie nécessite de corrélérer les mesures électriques aux mesures optiques. Pour le calcul du facteur de correction  $Corr_{elec,i}$ , chaque dispositif est caractérisé électriquement et optiquement via le banc de mesure METHOD. Afin de limiter les incertitudes liées à la détermination du facteur  $Corr_{elec,i}$ , nous choisissons de déterminer le facteur de correction pour différents moments du flash. Les images sont alors prises à trois délais différents correspondant à des irradiances de 400, 600 et 800 W/m<sup>2</sup>, et des valeurs respectives de  $SMR_{mid}^{top}$  de 1,0 puis de 1,1 et de 1,2. Des valeurs d'irradiance inférieures sont jugées trop faibles pour l'acquisition d'un signal par la caméra (notamment dans les faibles longueurs d'onde). Pour chaque série de douze images, nous calculons le courant  $I_{sc,i,imagerie}$  délivré par chaque sous-cellule selon le procédé défini au chapitre 3, et nous le comparons au courant  $I_{sc,i,elec}$  déterminé pour les mêmes conditions d'irradiance par le diagramme des sous-cellules. Les efficacités quantiques externes des différentes cellules ont été préalablement mesurées pour permettre le calcul du courant par imagerie. Le rapport  $I_{sc,i,imagerie}/I_{sc,i,elec}$  pour les différentes mesures, équivalent du facteur de correction électrique, est présenté sur la figure 4.4.

Les résultats montrent tout d'abord que l'erreur varie en fonction du dispositif étudié: alors que pour les dispositifs n°s 1 et 2, la moyenne des valeurs par imagerie est de respectivement de 8,4% et 4,8% inférieur à la mesure électrique, pour le dispositif n°3, on observe une tendance inverse avec un courant calculé de 10% supérieur à la mesure. Comme nous l'avons

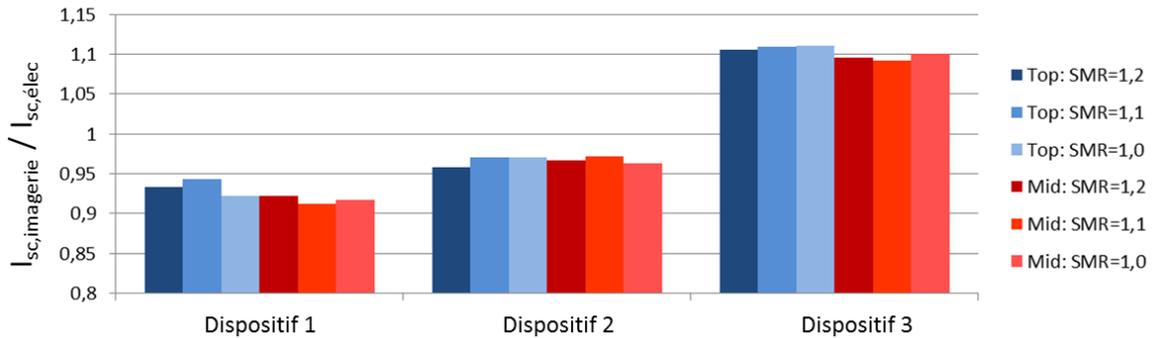


Figure 4.4: Valeurs du rapport  $I_{sc,imagerie} / I_{sc,elec}$  pour les sous-cellules *top* et *middle*, à différents  $SMR_{mid}^{top}$ , pour les trois dispositifs testés.

évoqué précédemment, les raisons de ces variations peuvent être diverses: une distribution angulaire sur le diffuseur propre à chaque dispositif, ou encore des variations de transmission entre les diffuseurs dues au procédé de fabrication (dépôt plus ou moins important d'opale). Il est difficile de décorrélérer ces phénomènes et nous nous contentons dans ce travail d'utiliser les facteurs de corrections pour palier à ces sources d'erreurs.

Le facteur de correction est propre à chaque jonction et chaque dispositif. Comme nous avons travaillé à trois moments du flash, nous obtenons trois valeurs représentées par des barres de couleur rouge dans le cas de la jonction *middle*, et des barres de couleur bleue pour la jonction *top*. Pour les trois dispositifs, chaque lot de trois valeurs présente une faible dispersion. Ceci atteste de la précision du procédé de mesure, malgré un manque de justesse. Pour corriger ce manque de justesse, nous prendrons comme valeur de  $Corr_{elec,i}$ , la moyenne des trois rapports  $I_{sc,i,imagerie} / I_{sc,i,elec}$  correspondants. Les valeurs obtenues pour la jonction *top* sont de 0,929 pour le dispositif n°1, de 0,957 pour le dispositif n°2 et de 1,104 pour le dispositif n°3. Pour la jonction *middle*, elles sont de 0,911 pour le dispositif n°1, de 0,956 pour le dispositif n°2 et de 1,097 pour le dispositif n°3.

## 4.2 Comportement des dispositifs pour différentes distances focales

Pour analyser le comportement des cellules triple-jonctions en fonction des distributions spatiale et spectrale de la lumière, nous mesurons la caractéristique  $IV$  de la cellule pour cinq différentes distances POE-cellule. Les cinq positions choisies correspondent à une variation de distance de 5 % autour de la distance focale optimale à 25°C. Les caractéristiques  $IV$  sont

mesurées au moyen du simulateur solaire Helios3198. Rappelons que pour cette méthode expérimentale, l'utilisation de la lumière pulsée implique que chaque niveau d'irradiance correspond à un certain rapport spectral  $SMR_{mid}^{top}$ . Comme le comportement électrique de la cellule est affectée par ces deux paramètres, il faut en tenir compte lors de l'interprétation des résultats. Dans un deuxième temps, au moyen de l'outil METHOD, la distribution d'irradiance résolue spectralement est calculée pour les mêmes distances POE-diffuseur. Les mesures optiques sont alors utilisées pour l'interprétation des courbes *IV*.

### 4.2.1 Dispositif n°1: lentille de Fresnel et cellule nue

Le premier dispositif que nous allons étudier est celui constitué d'une seule optique de Fresnel concentrant la lumière sur la cellule, avec une focale de 95 mm. Les paramètres électriques les plus représentatifs du dispositif, à savoir le courant de court-circuit, le rendement et le facteur de forme, sont représentés en figure 4.5 pour différentes irradiances et différentes positions de la cellule. Afin d'étudier l'impact de la distance POE-cellule et de faciliter la comparaison entre les différents dispositifs, les valeurs de courants de court-circuit  $I_{sc}$  et de rendements électriques ont été normalisées. Pour le courant, la normalisation se fait par la valeur maximale à chaque irradiance, alors que pour le rendement nous choisissons d'utiliser la valeur maximale mesurée afin d'observer l'effet du niveau d'irradiance sur les performances. Le facteur de forme  $FF$  étant par définition une grandeur relative, nous ne le normalisons pas.

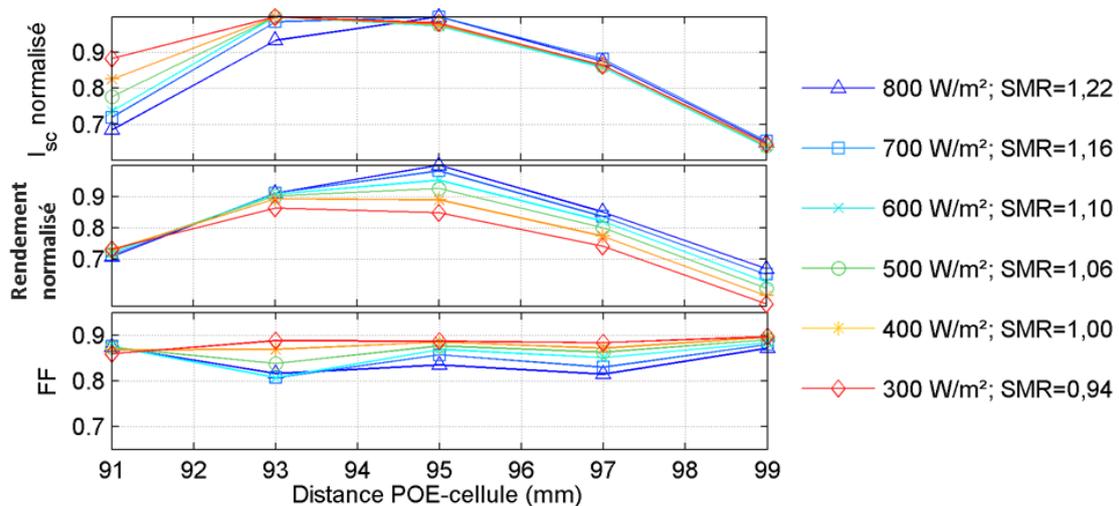


Figure 4.5:  $I_{sc}$  normalisé, rendement normalisé,  $FF$  pour le dispositif n°1 à différentes distances POE-cellule pour différentes irradiances.

Tout d'abord, observons la variation de courant en fonction de la distance entre la lentille et la cellule. Pour une distance de 91 mm, le courant normalisé est de 0,69 pour une irradiance 800 W/m<sup>2</sup> avec un  $SMR_{mid}^{top}$  de 1,22 et de 0,88 pour une irradiance de 300 W/m<sup>2</sup> avec un  $SMR_{mid}^{top}$  de 0,94. Pour 93 mm, un maximum est observé pour les irradiances comprises entre 300 et 600 W/m<sup>2</sup>. A 95 mm, les irradiances de 700 et 800 W/m<sup>2</sup> correspondent à un maximum. Pour les distances supérieures, le courant normalisé baisse de manière similaire pour toutes les irradiances jusqu'à atteindre une valeur de 0,65 pour une distance de 99 mm. Ainsi pour une variation de 5% de la position de la cellule par rapport à la lentille le long de l'axe optique, la chute de courant peut atteindre 30%.

Cette variation de courant implique des variations de rendement du même ordre de grandeur. On observe ainsi, que le rendement maximal est atteint à une distance POE-cellule de 95 mm pour une irradiance de 800 W/m<sup>2</sup> riche en bleu. Autour de cette position, la baisse de rendement est brutale : de l'ordre de 10% pour la même irradiance et un changement de position de 2 mm de la cellule. Le rendement est également impacté positivement par le niveau d'irradiance. Nous avons vu dans le chapitre 1 que les cellules multi-jonctions présentent un maximum de rendement pour une concentration donnée. Ce maximum est lié à deux tendances inverses avec la concentration : l'augmentation logarithmique de la tension  $V_{oc}$  qui améliore le rendement, et des pertes par résistances série plus importantes qui diminuent le rendement. Il est fort probable que le dispositif lentille-cellule ait été conçu pour des concentrations élevées liées à une utilisation en conditions réelles,  $DNI = 1000$  W/m<sup>2</sup> typiquement. Ceci implique que le rendement évolue positivement avec le niveau d'irradiance pour des valeurs de  $DNI$  inférieures à 1000 W/m<sup>2</sup>.

Ensuite, le facteur de forme présente des variations importantes, de l'ordre de 80% à 90%. Comme expliqué dans les chapitres précédents, celui-ci est impacté simultanément par plusieurs phénomènes : le niveau d'irradiance, les non-uniformités spectrales et spatiales et le *current matching* global entre les sous-cellules [114, 115]. La seule mesure électrique ne permet alors pas de décorrélérer ces différents effets. En témoigne la variation de facteur de forme entre les différentes irradiances: est-elle due à l'intensité de l'irradiance, ou à différents *current matching* dus à la variation du spectre incident? Une meilleure compréhension de ces phénomènes nécessite de connaître la génération spatiale de courant pour chaque jonction.

La figure 4.6 représente la distribution spatiale du courant photogénéré de la jonction *top* (première ligne d'images), et de la jonction *middle* (deuxième ligne d'images). Les densités de courants ont été calculées à partir d'images prises pour une irradiance de 600 W/m<sup>2</sup> et un  $SMR_{mid}^{top}$  de 1,10. Ces conditions ont été jugées intéressantes puisqu'elles correspondent à un bon compromis entre niveau d'irradiance et composition spectrale. Rappelons que la valeur de  $SMR_{mid}^{top}$  de 1,1 correspond à la composition spectrale dominante observée en extérieur

(voir chapitre 2). La troisième ligne d'images correspond au rapport entre ces deux densités de courant. Lorsque ce rapport est supérieur à 1, alors l'irradiance de la zone éclairée est riche en bleu et cette zone est limitée par la jonction *middle*. A l'inverse lorsque cette valeur est inférieure à 1 (zone rouge), cela correspond à une lumière riche en rouge limitée par la jonction *top*. Les zones blanches, où le rapport  $J_{top}/J_{mid}$  est proche de 1, sont associées à des conditions de *current matching*. Ce type de représentation permet de mettre en évidence les non-uniformités spectrales et spatiales sur la cellule.

Pour corrélérer ces distributions aux mesures électriques, nous avons ajouté trois graphes situés en haut de figure 4.6. De bas en haut, sont représentés: le courant  $I_{sc}$ , les courants  $I_{sc,top}$  et  $I_{sc,mid}$  déterminés par imagerie; le facteur de forme  $FF$ ; et enfin les rapports  $(I_{sc} - I_{mpp})/I_{mpp}$  et  $(V_{oc} - V_{mpp})/V_{mpp}$ . Ces deux dernières grandeurs permettent de mieux comprendre les variations de facteur de forme: une augmentation du rapport  $(V_{oc} - V_{mpp})/V_{mpp}$  peut s'interpréter par une augmentation de l'effet de résistance série, alors qu'une modification du rapport  $(I_{sc} - I_{mpp})/I_{mpp}$  est davantage liée aux phénomènes de recombinaison et de résistance shunt dans la cellule.

Lorsque la cellule se situe près de la lentille, à la distance 91 mm, nous observons un excès de lumière bleue, provoquant la limitation du courant par la sous-cellule *middle*. Ensuite lorsque la distance POE-cellule augmente, les longueurs d'onde rouge sont de plus en plus focalisées et les sous-cellules *top* et *middle* génèrent des courants plus proches. En témoignent les valeurs de courant  $I_{sc,top}$  et  $I_{sc,mid}$  observées aux distances 93 mm et 95 mm. Le courant de la cellule est alors maximisé pour ces deux distances. En référence à la figure 4.5, ceci explique pourquoi la baisse de courant aux distances 91 mm et 93 mm est moins importante pour les faibles intensités, riches en rouge. En effet, davantage de composante rouge permet de compenser le déséquilibre spectral observé et de réduire ainsi les pertes en courant qui en découlent.

Pour des positions encore plus éloignées, à 97 mm et 99 mm, les longueurs d'onde bleue deviennent de plus en plus défocalisées. La balance spectrale entre les deux sous-cellules est déséquilibrée, provoquant une limitation du courant par la sous-cellule *top* et une diminution globale de l' $I_{sc}$ . Notons qu'à ces positions, la forme thoroïdale de la source lumineuse devient très visible pour la distribution de courant  $J_{mid}$ . Nous sommes ici focalisés pour les hautes longueurs d'onde. C'est à ces longueurs d'onde que le filtre présente une composante spéculaire dans la lumière transmise, et il est alors probable que l'image de la source soit artificiellement exagérée pour cette configuration. La validité de cette hypothèse n'a pu être vérifiée dans ce travail et pourra faire l'objet d'études postérieures.

Pour les variations de facteur de forme, nous remarquons que celui-ci présente un profil en forme de W, également observable pour d'autres irradiances sur la figure 4.5. Ce type

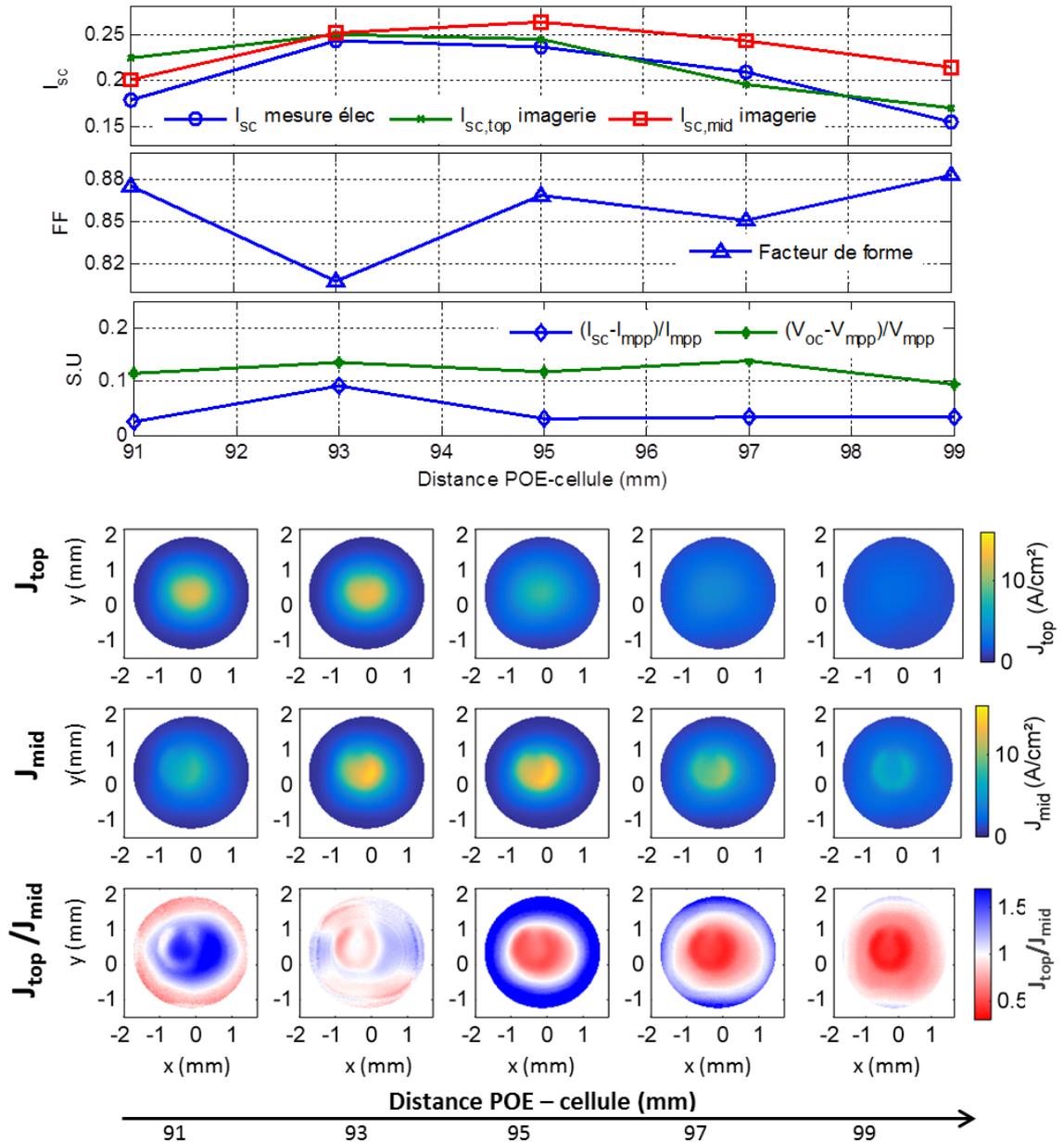


Figure 4.6: Grandeurs électriques d'intérêt pour l'étude des non-uniformités à différentes positions de cellule (trois graphiques du haut). Distributions spatiales des densités de courant  $J_{top}$  et  $J_{mid}$  et du rapport  $J_{top}/J_{mid}$  pour les mêmes positions (cartographies du bas). Les mesures sont réalisées pour le dispositif n°1 à 600 W/m<sup>2</sup>,  $SMR_{mid}^{top}=1,1$ .

d'évolution a été observé dans d'autres études [43, 116, 117], où il est suggéré que ce comportement est une combinaison des inhomogénéités spectrales et spatiales. Observons d'abord les deux positions extrêmes pour lesquelles le facteur de forme est maximisé. Elles

correspondent à un fort déséquilibre de courant entre les sous-cellules et un faible courant de court-circuit  $I_{sc}$ , deux conditions favorables à l'augmentation du facteur de forme. Pour la position 93 mm, la cellule présente un *current matching* très proche de 1, et un courant fort impliquant alors une baisse de fill factor. La distance POE-cellule de 95 mm, correspondante au centre de la forme du W, est particulièrement intéressante: le courant est élevé, le *current matching* est proche de 1 et les non-uniformités spectrales sont très fortes, soit des conditions théoriquement favorables à une baisse du facteur de forme. Or, la valeur du facteur de forme mesurée est plutôt élevée au regard des autres positions de la cellule. L'hypothèse que nous formulons est la suivante: les non-uniformités spectrales créent des circulations latérales de courant de la cellule [95]. Cette redistribution spatiale tend à homogénéiser la génération de courant sur la cellule. Ainsi, les inhomogénéités spatiales visibles sur les cartographies de distribution de courant  $J_{top}$  et  $J_{mid}$  sont atténuées et l'effet de résistance série qui en découle est lui aussi réduit. Ceci a alors pour conséquence une augmentation du facteur de forme. Le cas 97 mm, où la génération de courant présente à nouveau un profil gaussien, confirme cette observation puisque le facteur de forme diminue à nouveau, alors même que le *current matching* s'éloigne de 1, ce qui théoriquement implique une augmentation du facteur de forme. La grandeur  $(V_{oc} - V_{mpp})/V_{mpp}$ , représentative de l'effet de résistance série, qui augmente légèrement entre 95 mm et 97 mm, va dans le sens des hypothèses émises.

Pour appuyer nos observations faites par imagerie, nous traçons le diagramme des sous-cellules pour trois distances 91, 93 et 95 mm (Fig. 4.7). Les résultats illustrent bien le comportement spectral du dispositif: le point de *current matching* (rupture de pente) se décale des spectres riches en rouge, avec un  $SMR_{mid}^{top}$  optimal de 0,9 pour une distance de 91 mm, vers des spectres riches en bleu, avec un  $SMR_{mid}^{top}$  optimal de 1,1 et 1,2 pour respectivement des distances de 93 mm et 95 mm.

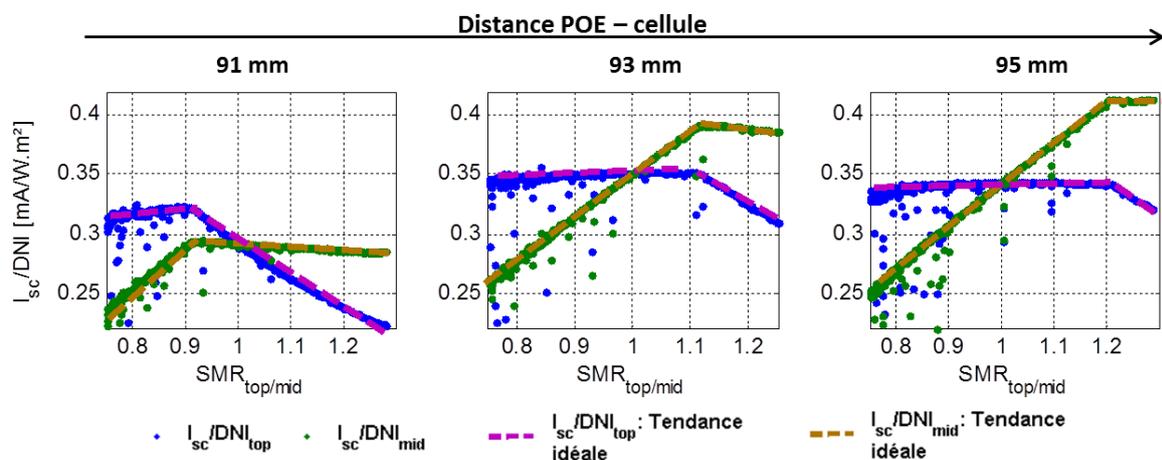


Figure 4.7: Diagramme des sous-cellules du dispositif n°1 pour trois distances POE-cellule.

Le deuxième point important est la forme du diagramme des sous-cellules. En effet, les tendances idéales de limitation correspondent bien aux points de mesure. Ceci signifie que la limitation en courant par une des jonctions est franche pour n'importe quelle valeur de  $SMR_{mid}^{top}$ . Ce phénomène n'est pas vrai pour tous les dispositifs présentant des non-uniformités spectrales, comme il a été démontré [33]. Dans cet article, l'étude de plusieurs diagrammes de sous-cellules pour une lentille de Fresnel avec cellule nue, montrent que la limitation spatiale hétérogène du courant par les jonctions *top* et *middle* peut engendrer une limitation imparfaite globale du courant. Cette limitation imparfaite affecte le diagramme des sous-cellules, comme nous le verrons pour le dispositif n°2.

En conclusion, pour le dispositif n°1, nous pouvons dire que celui-ci est très sensible aux variations de position de la cellule. Ces variations entraînent une modification de la balance spectrale sur la cellule liée aux effets de focalisation-défocalisation qui apparaissent pour des positions différentes selon la longueur d'onde considérée. Ainsi la position optimale de la cellule dépend de la composition spectrale du spectre incident. De plus, nous avons remarqué que les inhomogénéités spectrales résultantes des aberrations chromatiques n'entraînent pas une diminution significative des performances de la cellule. Au contraire, les hypothèses émises font état d'une redistribution de courant sur la cellule limitant les effets de résistance série. Ces effets affectent en revanche de manière significative la performance électrique de la cellule, lorsque la génération de courant est suffisamment élevée et inhomogène sur la cellule.

### 4.2.2 Dispositif n°2: lentille de Fresnel et pyramide réfractive

De manière analogue au dispositif n°1, nous analysons le comportement électrique et optique du dispositif n°2 pour cinq distances cellules-POE allant de 143 mm à 155 mm. Tout d'abord, les caractéristiques *IV* sont mesurées à différentes irradiances. Le courant de court-circuit normalisé, le rendement normalisé et le facteur de forme sont représentés sur la figure 4.8.

La variation de courant de court-circuit observé est du même ordre de grandeur que pour le dispositif n°1, puisque les valeurs observées augmentent lorsque la position de la cellule passe de 143 à 146 mm. le courant atteint ensuite un maximum et diminue pour les distances POE-cellule de 149 mm à 155 mm. La position correspondante au maximum de courant dépend de l'irradiance: pour les spectres riches en rouge, on observe une baisse plus rapide du courant lorsque la distance augmente.

Toutefois, les baisses de rendement apparaissent surtout aux deux positions extrêmes, avec une valeur du rendement normalisé de 72% pour 143 mm et de 71% à 87% selon l'irradiance à 155 mm. Pour des distances entre 146 mm et 149 mm, les variations de rendement sont réduites. Il en résulte que la tolérance de positionnement du récepteur est

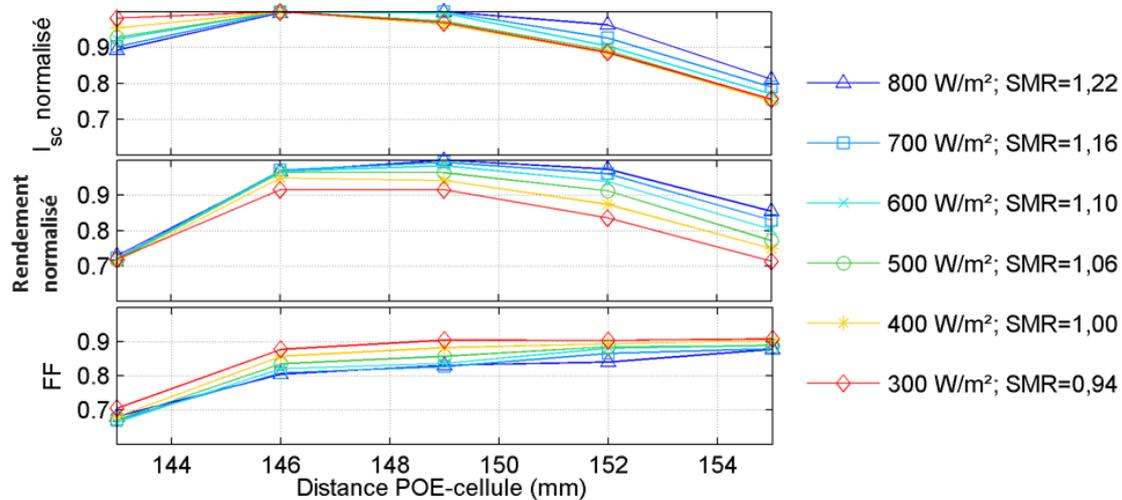


Figure 4.8:  $I_{sc}$  normalisé, rendement normalisé,  $FF$  pour le dispositif n°2 à différentes distances POE-cellule pour différentes irradiances.

plus large que pour le dispositif n°1. Rappelons que nous avons choisi d'effectuer ces tests pour une variation de 5% de la position POE-cellule. Ainsi l'intervalle de distances testé est plus large que dans le cas du dispositif n°1, et le système est d'autant plus tolérant que le dispositif n°1 pour un même décalage en absolu de la position de la cellule.

Enfin, pour le facteur de forme nous observons une chute importante de celui-ci pour la position 143 mm où il atteint près de 70 %. Cette baisse se répercute logiquement sur le rendement pour la même position. Le facteur de forme augmente aussi pour atteindre un maximum à la position 155 mm. Dans cette configuration, c'est la baisse de génération de courant qui engendre la diminution du rendement. Similairement au dispositif n°1, le facteur de forme augmente avec la baisse de l'irradiance, ce qui nécessite d'autres mesures pour comprendre ces évolutions. Nous nous appuyons sur les cartes de densités de courant calculées par imagerie (Fig. 4.9). De manière analogue à la figure 4.6, sont représentées : trois graphiques avec les grandeurs électriques d'intérêt, et trois séries d'image avec les densités de courant  $J_{top}$ ,  $J_{mid}$  et le rapport  $J_{top}/J_{mid}$ . Les mesures ont été réalisées dans les conditions suivantes: une irradiance de 600 W/m<sup>2</sup> et un rapport spectral  $SMR_{mid}^{top}$  de 1,1.

Tout d'abord, nous remarquons que l'effet d'homogénéisation du flux sur la cellule est clairement observable. Contrairement au profil gaussien du dispositif n°1, nous observons un profil du courant photogénéré plus "lissé" pour les deux jonctions. Pour les distances 152 mm et 155 mm, on observe une limitation franche de la jonction *top* sur l'ensemble de la cellule: le courant  $I_{sc,mid,imagerie}$  est supérieur au  $I_{sc,top,imagerie}$  et l'image du rapport  $J_{top}/J_{mid}$  illustre l'excès de lumière riche en rouge sur la cellule.

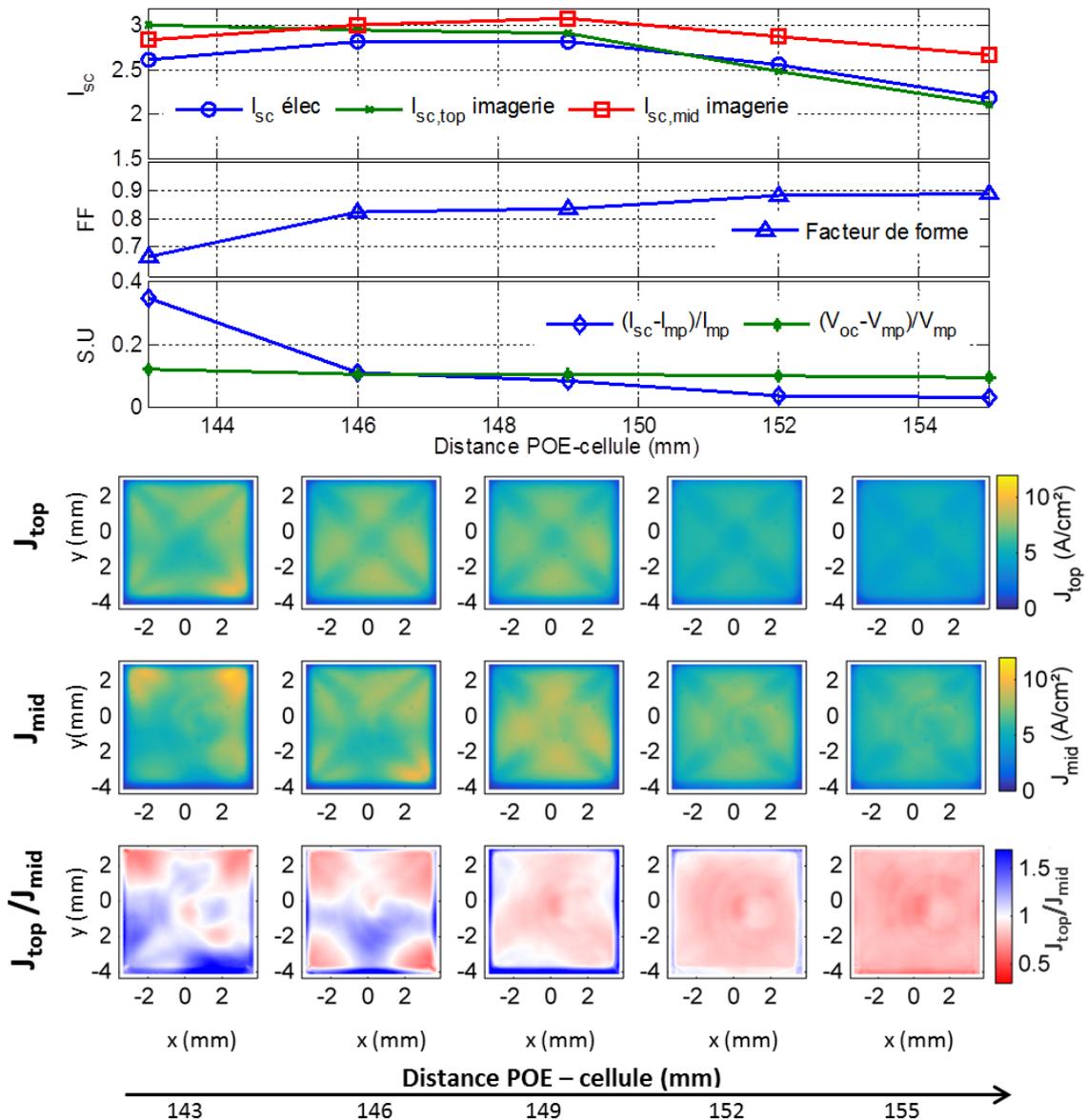


Figure 4.9: Grandeurs électriques d'intérêt pour l'étude des non-uniformités à différentes positions de cellule (trois graphiques du haut). Distribution spatiale des densités de courant  $J_{top}$  et  $J_{mid}$  et du rapport  $J_{top}/J_{mid}$  pour les mêmes positions (cartographies du bas). Les mesures sont réalisées pour le dispositif n°2 à 600 W/m<sup>2</sup>,  $SMR_{mid}^{top}=1,1$ .

Lorsque l'on rapproche le récepteur de la lentille aux positions 149 mm et 146 mm, les longueurs d'onde sont mieux focalisées et la balance spectrale devient plus équilibrée. Pour des positions encore plus proches de la cellule, la tendance s'inverse alors, et c'est la jonction *middle* qui limite globalement le courant avec un excès de longueurs d'onde bleue sur la cellule. L'uniformisation du flux sur la cellule est en revanche moins net, et des courants

locaux plus élevés apparaissent aux coins de la cellule. Il en résulte des limitations en courant moins franches spatialement que pour les positions éloignées et nous constatons des fortes non-uniformités spectrales aux positions 143 mm et 146 mm.

Lorsque l'on s'intéresse aux variations du facteur de forme, nous observons une diminution de celui-ci lorsque la cellule est rapprochée. Cette baisse s'observe pour des conditions d'irradiance différentes (Fig. 4.8), indépendamment donc des compositions spectrales testées. Ainsi la cause principale de la baisse du facteur de forme n'est ni la non-uniformité spatiale du flux, ni l'équilibre en courant global des sous-cellules. Les deux autres causes plausibles sont l'intensité du courant photogénéré et les non-uniformités spectrales. Pour le cas étudié, l'intensité maximale du courant observé correspond à la position 149 mm, où le facteur de forme reste élevé. De plus le rapport  $(V_{oc} - V_{mpp})/V_{mpp}$  ne varie pas de manière significative et l'effet de résistance série n'est ici pas la cause de la variation du facteur de forme.

Ce sont principalement les non-uniformités spectrales sur la cellule qui provoquent une limitation du courant qui varie spatialement. Le rapport  $(I_{sc} - I_{mpp})/I_{mpp}$  traduit bien ce phénomène: une augmentation significative de ce paramètre apparaît pour les positions 143 mm et 146 mm. Cette augmentation s'explique par la circulation latérale de courant dans la cellule permettant de redistribuer les excès locaux observés. Ce phénomène, étudié par simulation dans [95], implique une augmentation des effets de recombinaison à l'intérieur de la cellule, engendrant la baisse du courant  $I_{mpp}$ .

Lorsque l'on compare ce résultat aux observations effectuées sur le dispositif n°1, les non-uniformités spectrales affectent différemment la cellule. Dans le cas du dispositif n°1, nous avons conclu à l'absence d'impact négatif des non-uniformités spectrales sur les performances alors que pour le dispositif n°2, nous constatons une diminution du facteur de forme. Notons que les densités de courant générées par les deux dispositifs sont proches. Il est en conséquence plus probable que l'importance du phénomène dépende de la résistance de couche du matériau et de la distance que le courant parcourt dans la couche considérée. De manière générale, plus la résistance de couche est grande et plus le parcours du courant dans le matériau est important, plus les performances de la cellule seront affaiblies. La résistance de couche des matériaux testés n'a pas été caractérisée et nous ne pouvons alors dire si la taille de cellule (7 mm de côté pour le dispositif n°2 et 3 mm de diamètre pour le dispositif n°1) est plus impactante que ce paramètre.

L'étude du diagramme des sous-cellules pour les distances 143 mm, 146 mm et 149 mm (Fig. 4.10) permet d'appuyer notre analyse. Tout d'abord, nous voyons que la lumière rouge augmente sur la cellule avec la distance cellule-POE, puisque le courant généré par la jonction *middle* augmente et le *current matching* se déplace vers des valeurs hautes de  $SMR_{mid}^{top}$ .

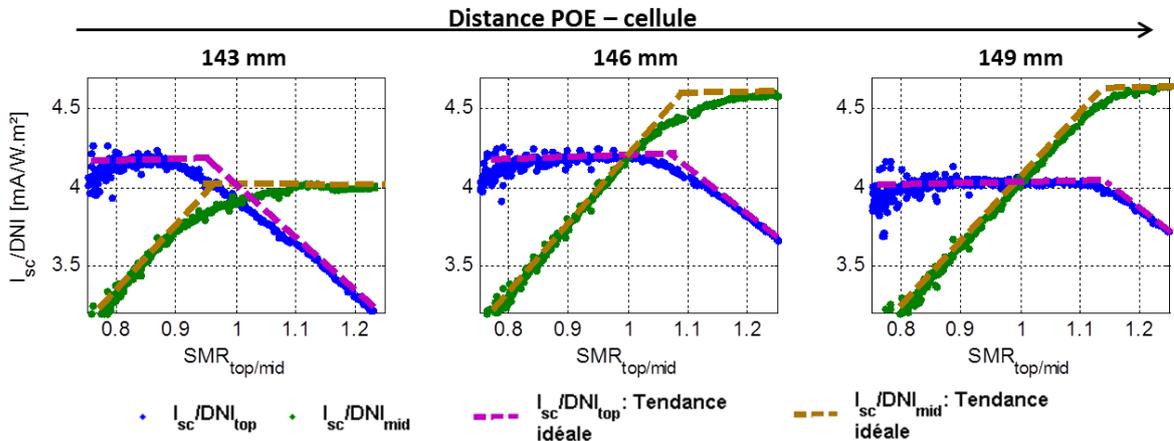


Figure 4.10: Diagramme des sous-cellules du dispositif n°2 pour trois distances POE-cellule.

Ensuite, contrairement au dispositif n°1, nous observons que pour certaines zones spectrales, les courants normalisés sont inférieurs aux tendances idéales de limitation. Pour ces zones, la limitation du courant par une des jonctions n'est pas franche, et le courant total de la cellule est inférieur aux courants théoriques des deux jonctions pris indépendamment. Ce phénomène est une résultante de la limitation locale du courant et montre que dans le cas du dispositif n°2, l'impact des non-uniformités spectrales s'observe aussi bien sur la génération de courant, avec le diagramme des sous-cellules, que sur le facteur de forme, avec les caractéristiques *IV*.

En résumé, le dispositif n°2 se montre sensible aux différentes positions de la cellule. Malgré une uniformisation spatiale du flux, nous observons de fortes variations du rendement et du facteur de forme. Plusieurs phénomènes vont affecter les performances: l'effet de focalisation-défocalisation et les non-uniformités spectrales. Ainsi, la position optimale du dispositif est un compromis entre maximisation du courant (positions rapprochées) et minimisation des baisses du facteur de forme (positions éloignées).

### 4.2.3 Dispositif n°3: lentille de Fresnel et optique Fresnel-Köhler

Pour le dernier dispositif, nous mesurons électriquement ses performances électriques pour des distances cellule-POE variant entre 251 mm et 271 mm, par pas de 5 mm. Les résultats pour les principaux paramètres des courbes *IV* sont visibles sur la figure 4.11.

Pour les mêmes conditions d'illumination, les variations de courant de court-circuit et de rendement n'excèdent pas 6,5% sur toute la gamme de distance et seulement 2,8% si l'on considère seulement les distances de 256 mm à 271 mm. Pour la distance 251 mm, la baisse en courant observée est plus importante pour les fortes irradiances, riches en bleu. Ensuite,

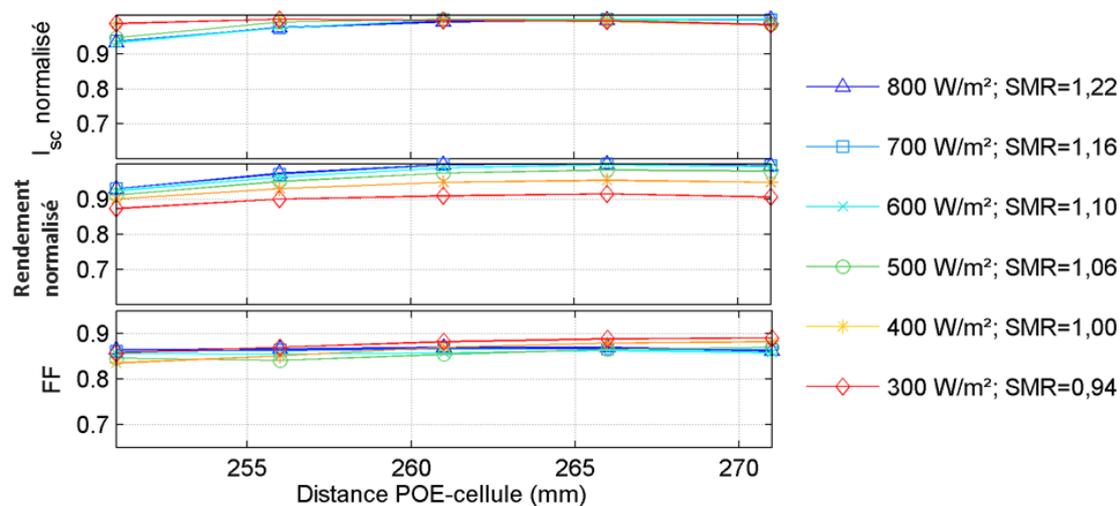


Figure 4.11:  $I_{sc}$  normalisé, rendement normalisé,  $FF$  pour le dispositif n°3 à différentes distances POE-cellule pour différentes irradiances..

nous observons que plus l'intensité du rayonnement augmente, avec un décalage spectral vers le bleu, meilleures sont les performances de la cellule. Finalement le facteur de forme varie faiblement, et plus spécifiquement pour les irradiances supérieures à 500 W/m². Ainsi, contrairement aux dispositifs n°s 1 et 2, le dispositif est moins affecté par un changement de position de la cellule. Cette tolérance au positionnement est illustrée par la figure 4.12, où les distributions de densité de courant, et les grandeurs électriques d'intérêt sont représentés.

Nous observons des distributions de densité de courant très homogènes, qui se traduisent par une génération de courant par la cellule uniforme spatialement. A la distance de 251 mm, la génération de courant est significativement plus faible, soit -6% par rapport à la position 261 mm : une partie de la lumière n'est pas concentrée sur la cellule par l'optique secondaire. Les courants calculés par imagerie montrent que la sous-cellule *top* délivre davantage de courant que la sous-cellule *middle*: la partie de la lumière riche en bleu est mieux focalisée, et en conséquence un spectre incident riche en rouge est nécessaire pour un *current matching* des sous-cellules. Ceci correspond à la baisse de courant de court-circuit observée sur la figure 4.11.

Lorsque la cellule est éloignée, la génération de courant augmente dans des proportions équivalentes pour les deux sous-cellules, résultant dans un équilibre en courant des sous-cellules relativement stable pour les distances testées. Ce comportement explique en partie la faible sensibilité du rendement avec les positions considérées. La capacité du dispositif de concentration à uniformiser le flux spatialement et spectralement est une autre raison.

En effet, nous observons que le rapport  $J_{top}/J_{mid}$  est très uniforme. La limitation du courant est en conséquence homogène spatialement. Cette caractéristique se traduit par

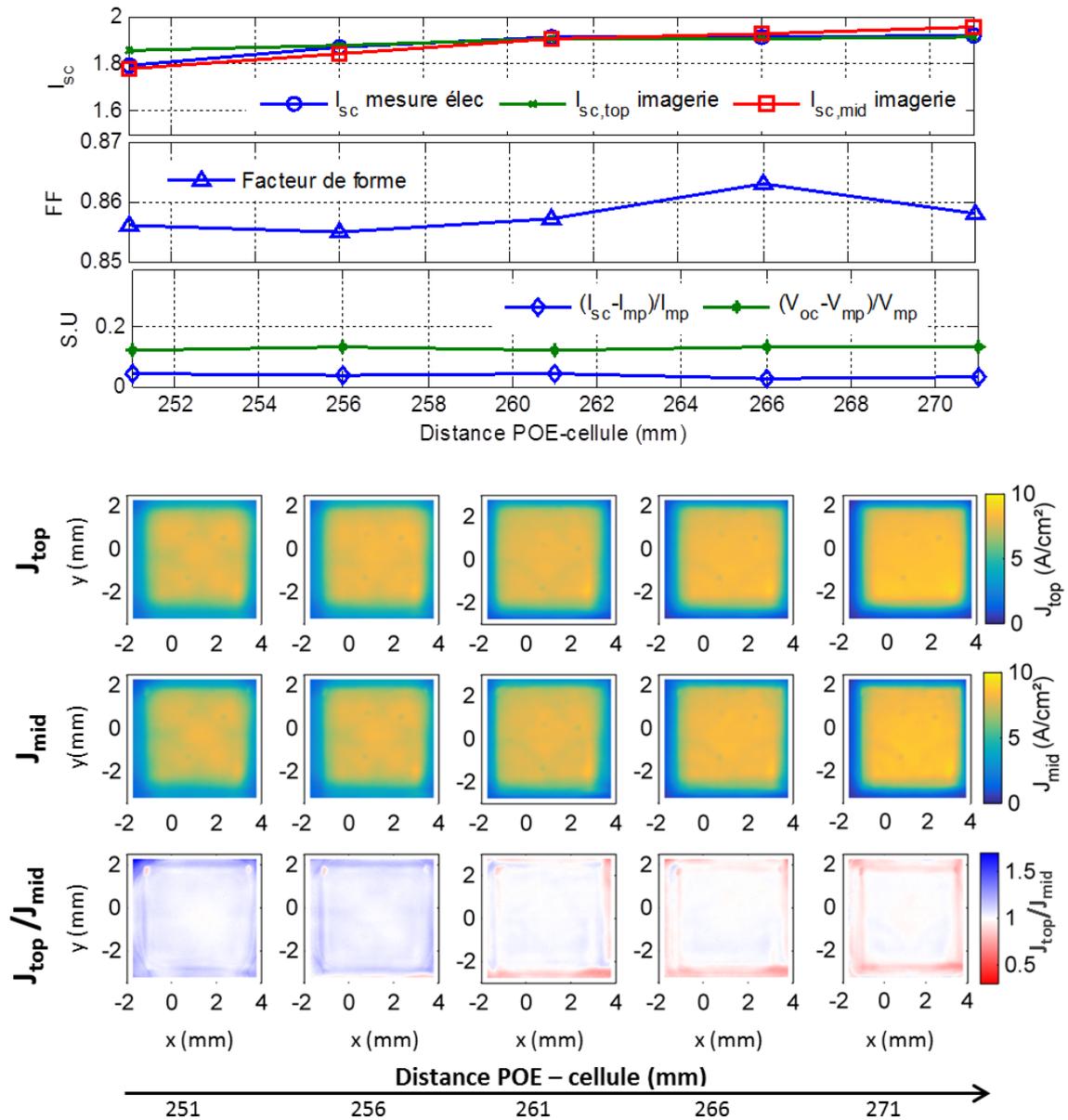


Figure 4.12: Grandeurs électriques d'intérêt pour l'étude des non-uniformités à différentes positions de cellule (trois graphiques du haut). Distribution spatiale des densités de courant  $J_{top}$  et  $J_{mid}$  et du rapport  $J_{top}/J_{mid}$  pour les mêmes positions (cartographies du bas). Les mesures sont réalisées pour le dispositif n°2 à 600 W/m<sup>2</sup>,  $SMR_{mid}^{top}=1,1$ .

des variations très faibles, de l'ordre de l'incertitude de mesure, du facteur de forme et des grandeurs  $(I_{sc} - I_{mpp})/I_{mpp}$  et  $(V_{oc} - V_{mpp})/V_{mpp}$ . Ainsi l'homogénéisation du flux sur la cellule apparaît clairement comme un facteur permettant de limiter les variations de performance de la cellule dans différentes conditions d'irradiance.

Nous traçons maintenant le diagramme des sous-cellules pour les distances 251 mm, 256 mm et 261 mm (Fig. 4.13). Tout d’abord, le *matching* courant a lieu dans des conditions spectrales proches pour les différents cas, puisque le  $SMR_{mid}^{top}$  optimal passe de 1,01 pour 251 mm à 1,06 pour 261 mm. Il y’a bien un décalage de l’optimum spectral vers une lumière riche en bleu lorsque l’on éloigne le dispositif, mais dans une mesure moindre que pour les dispositifs n°1 et n°2. Ensuite, les points suivent bien les tendances de limitation idéale. Conformément aux explications données pour les dispositifs précédents, ceci confirme l’absence d’effets liés à des non-uniformités spectrales sur la génération de courant  $I_{sc}$ .

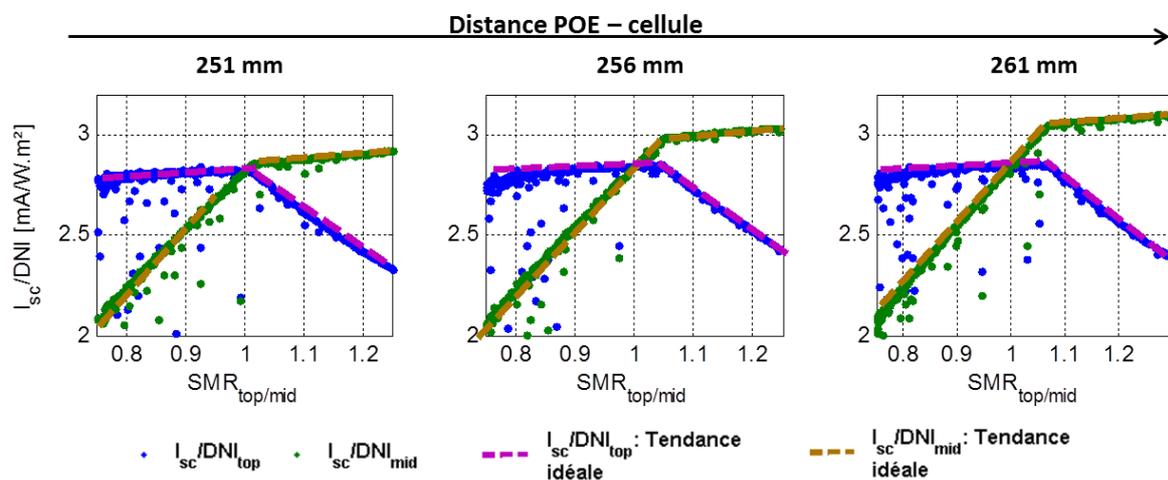


Figure 4.13: Diagramme des sous-cellules du dispositif n°3 pour trois distances POE-cellule.

Cette analyse sur le comportement de trois dispositifs à différentes distances POE-cellule a permis de mettre en évidence le rôle des non-uniformités spatiales et spectrales dans les performances de la cellule. Ainsi, il a été montré que pour un dispositif non imageant, uniformisant la distribution de lumière sur la cellule, nous observons une réponse électrique tolérante aux variations de distances POE-cellule testées. Pour les deux autres dispositifs, les non-uniformités spectrales mises en évidence par imagerie impactent différemment les performances selon la taille de cellule et des propriétés intrinsèques au semi-conducteur (non caractérisées dans notre étude). Dans le cas du dispositif n°2 nous avons un impact très significatif avec des facteurs de forme diminuant jusqu’à 0,7 alors que pour le dispositif n°1, le comportement ne se trouvait pas dégradé. Selon nos conclusions, celles-ci permettent même d’améliorer les performances de ce dispositif sans optique secondaire où la distribution spatiale de courant est fortement non-uniforme, en redistribuant les excès locaux de courant et réduisant ainsi l’effet de résistance série.

### 4.3 Impact de la température lentille

L'impact de la température de lentille sur les performances de systèmes CPV a été brièvement introduit dans le chapitre 1. Dans le deuxième chapitre, nous avons constaté expérimentalement que le comportement électrique du module variait avec le spectre incident et la température de lentille en fonction de l'optique de concentration utilisée. Pour mieux comprendre ces variations, nous utilisons METHOD pour tester les trois dispositifs à différentes températures d'optique primaire. Avant de voir expérimentalement ce qu'il se passe, nous introduisons cette section en revenant de manière plus détaillée sur les effets de température de lentille et les résultats reportés dans la littérature.

#### 4.3.1 Introduction sur les effets de température de lentille

Les effets de la température de lentille sur les dispositifs à lentille de Fresnel ont été étudiés par plusieurs auteurs dans la littérature. Tout d'abord, les effets thermiques sous-jacents aux variations du comportement optique ont été mis en évidence dans [55]. Le résultat montre une variation de la tâche focale avec la température de lentille. Des études similaires ont été réalisées par Hornung et al. [56], et Askins et al. [57], où des mesures par caméra ont permis d'imager la tâche focale à différentes températures. Les variations observées résultent de deux principaux phénomènes: la variation de l'indice de réfraction de l'optique utilisée et la déformation de la lentille sous l'effet de la température. Ces deux phénomènes sont illustrés sur la figure 4.14.

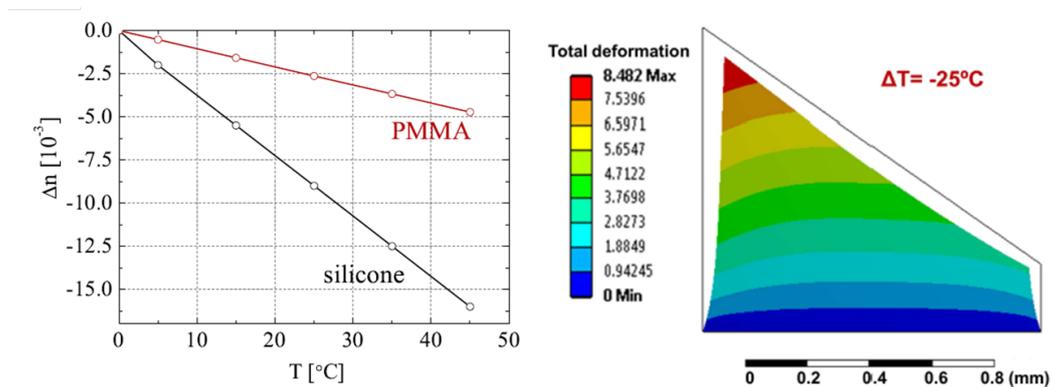


Figure 4.14: Variation relative de l'indice de réfraction avec la température pour le PMMA et le silicone (gauche) et déformation produite sur une dent d'une lentille de Fresnel SoG pour une variation de température de  $25^{\circ}\text{C}$  (droite) [118]. Les données pour la variation d'indice de réfraction proviennent de [119] pour le silicone et [120] pour le PMMA.

La diminution de l'indice de réfraction engendre un allongement de la distance focale avec la température. Ainsi pour une lentille avec cellule nue, sensible aux aberrations chromatiques, la focalisation/défocalisation d'une longueur d'onde varie avec la température de lentille. L'irradiance sur la cellule peut alors passer d'une lumière riche en rouge, à une lumière riche en bleu, et ainsi affecter les courants sur les jonctions *top* et *middle* [56]. L'ajout d'optiques secondaires peut accroître la tolérance à ces variations. Nous remarquons sur la figure 4.14 que le PMMA se montre moins sensible aux variations de température. Logiquement une modification moins importante de l'irradiance sur la cellule est attendue.

La modification de la structure de Fresnel a été étudiée par modélisation dans [43, 55]. Les résultats montrent la déformation des dents de Fresnel avec la température, et leur dépendance à la température de durcissement de l'optique. Pour une température de fonctionnement proche de cette température de durcissement, la forme de la lentille correspondra bien au moule de fabrication et donc aux spécifications de conception. La taille de la tâche lumineuse est alors généralement minimisée pour cette configuration. Là-aussi, le matériau de conception de la lentille influence l'importance du phénomène. Une expansion de la matière s'observe pour les lentilles en PMMA et SoG. A cette expansion s'ajoute, pour les lentilles SoG, un stress mécanique à absorber puisque le verre et le silicone ne présentent pas les mêmes coefficients thermiques d'expansion.

Ces phénomènes vont logiquement impacter le fonctionnement des systèmes CPV. En effet, en modifiant la distribution spatiale et spectrale de la lumière sur la cellule, la température de lentille affecte le comportement électrique du module. Peharz et al. [81] a par exemple mesuré la dépendance en courant  $I_{sc}$  de différents modules dans un simulateur solaire, où les modules sont chauffés au moyen de lampe infrarouge. Cette dépendance varie en fonction de la configuration optique du module testé. Mentionnons que pour cette étude, la température de lentille n'était pas modifiée indépendamment et c'est tout le module qui était alors chauffé.

### 4.3.2 Comportements optique et électrique des différents dispositifs

Dans un premier temps, observons comment la densité de courant déterminée par imagerie évolue avec l'augmentation de la température de lentille (Fig. 4.15). Similairement à l'étude précédente, des images sont prises pour une irradiance de 600 W/m<sup>2</sup> pour les différents filtres et les différents dispositifs. Nous testons ici deux températures de lentille: 25°C et 45°C. Notons que la température de 25°C correspond aux conditions de tests CSTC en intérieur et que la température 45°C est la température maximale observée en extérieur sur le site du Bourget-Du-Lac. Il n'est pas exclu que les lentilles soient amenés à fonctionner à des températures supérieures pour d'autres sites.

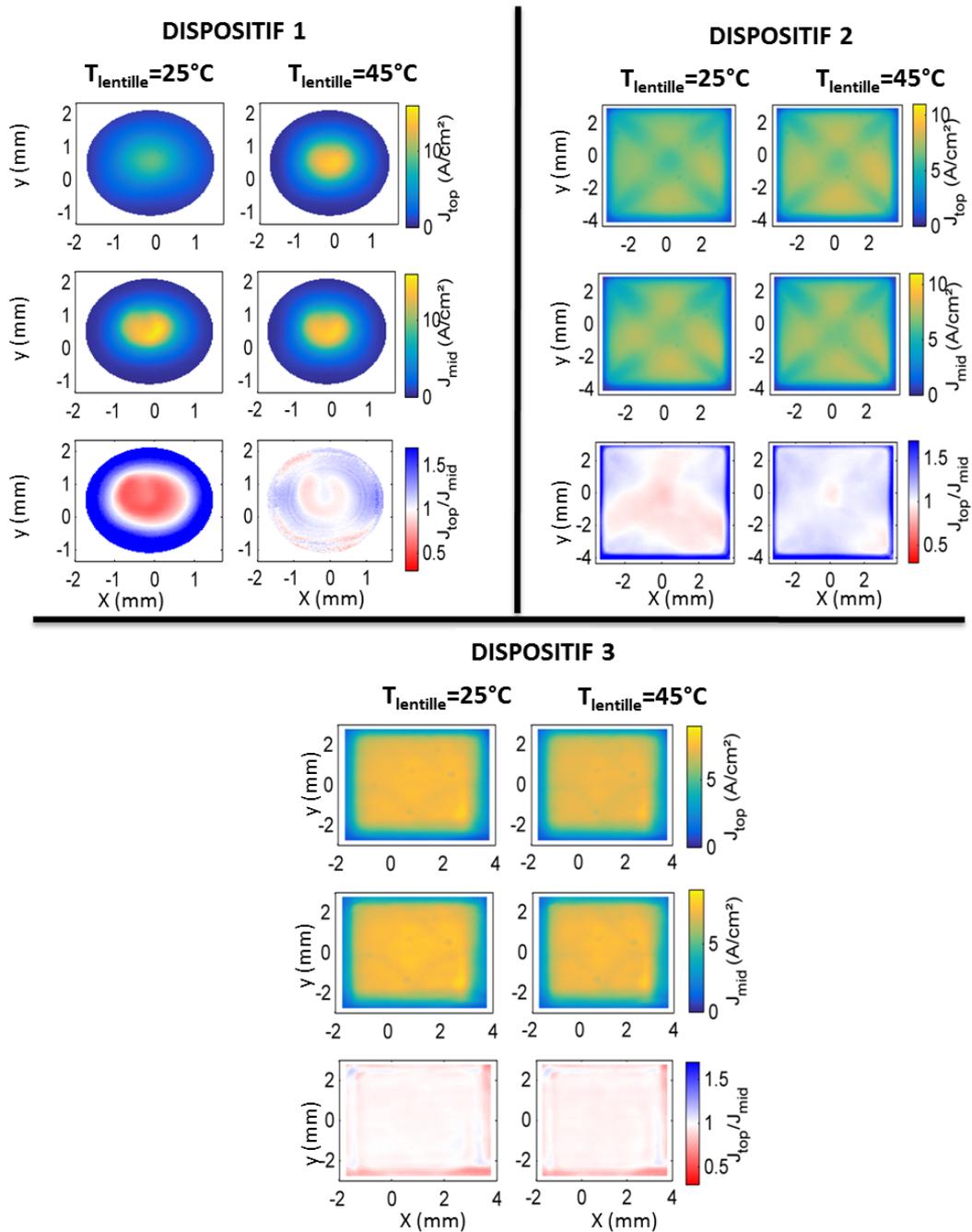


Figure 4.15: Distributions spatiales des densités de courant  $J_{top}$  et  $J_{mid}$  et du rapport  $J_{top}/J_{mid}$  pour les différents dispositifs à deux températures de lentille. Les mesures sont réalisées à  $600 \text{ W/m}^2$ ,  $SMR_{mid}^{top}=1,1$ .

Pour le dispositif n°1, une augmentation importante de la densité de courant au centre de la cellule est observée pour la jonction *top*. Nous observons donc une meilleure focalisation de la lumière riche en bleu, due à la modification de la distance focale avec la variation de

température de la lentille. En effet, nous avons vu que celle-ci s'allonge avec l'élévation de température. Le rapport  $J_{top}/J_{mid}$  est alors modifié en conséquence. Alors qu'à une température de lentille de 25 °C, les non-uniformités spectrales étaient très fortes, à 45 °C les non-uniformités spectrales sont moins fortes. Il est intéressant de faire un parallèle avec l'étude précédente sur la position de la cellule. Si l'on se réfère à la figure 4.6, nous nous rendons compte que les variations observées pour une élévation de température de 20 °C sont similaires à celles observées lorsque la distance POE-cellule varie entre 95 mm et 93 mm. Ainsi pour cette architecture optique, la sensibilité à la variation de distance paraît un bon indicateur de la sensibilité à la température de lentille.

Pour le dispositif n°2, la modification de la distribution est moins visible lorsque l'on regarde indépendamment les densités de courant  $J_{top}$  et  $J_{mid}$ . En revanche le rapport  $J_{top}/J_{mid}$  met en évidence l'augmentation de la part bleue de la lumière incidente, puisque l'on passe d'une distribution relativement équilibrée entre le rouge et le bleu à une image à dominante bleue. Toutefois, cet impact est plus faible que dans le cas du dispositif n°1.

Enfin le dispositif n°3 se montre très tolérant puisque les variations n'apparaissent pas significatives aussi bien pour les densités de courant que pour le rapport  $J_{top}/J_{mid}$ . Là-aussi, lorsque nous nous référons à l'étude précédente, nous notons que le dispositif n°3 était peu sensibles aux variations de position de la cellule. Pour les dispositifs n°s 2 et 3, l'impact de la température de la lentille se trouve alors limité pour deux raisons: tout d'abord, les lentilles PMMA présentent une variation de l'indice de réfraction plus faible. Ainsi la focalisation des différentes longueurs d'onde est moins affectée par une variation de température de l'optique. Ensuite l'ajout d'une optique secondaire permet d'uniformiser le flux et de contrebalancer les variations d'irradiance en entrée de l'optique secondaire.

Pour corrélérer ces images à des mesures électriques, nous analysons les courbes  $IV$  des dispositifs à différentes températures de lentille. Nous plaçons d'abord le récepteur dans une position optimisée pour une température  $T_{lentille}$  égale à 25 °C. Au regard de la section précédente, les distances choisies sont respectivement de 95 mm, 149 mm et 261 mm pour les dispositifs n°s 1, 2 et 3. Les caractéristiques  $IV$  sont alors mesurées pour plusieurs irradiances, qui correspondent, rappelons-le, à une certaine composition spectrale. Ensuite, la lentille est chauffée à une température d'environ 65 °C. Lors de la phase de refroidissement, où la température s'homogénéise dans la chambre thermique, les mesures sont prises pour des températures de 55°C à 30 °C par pas de 5 °C. Les principales grandeurs électriques sont présentées en figure 4.16.

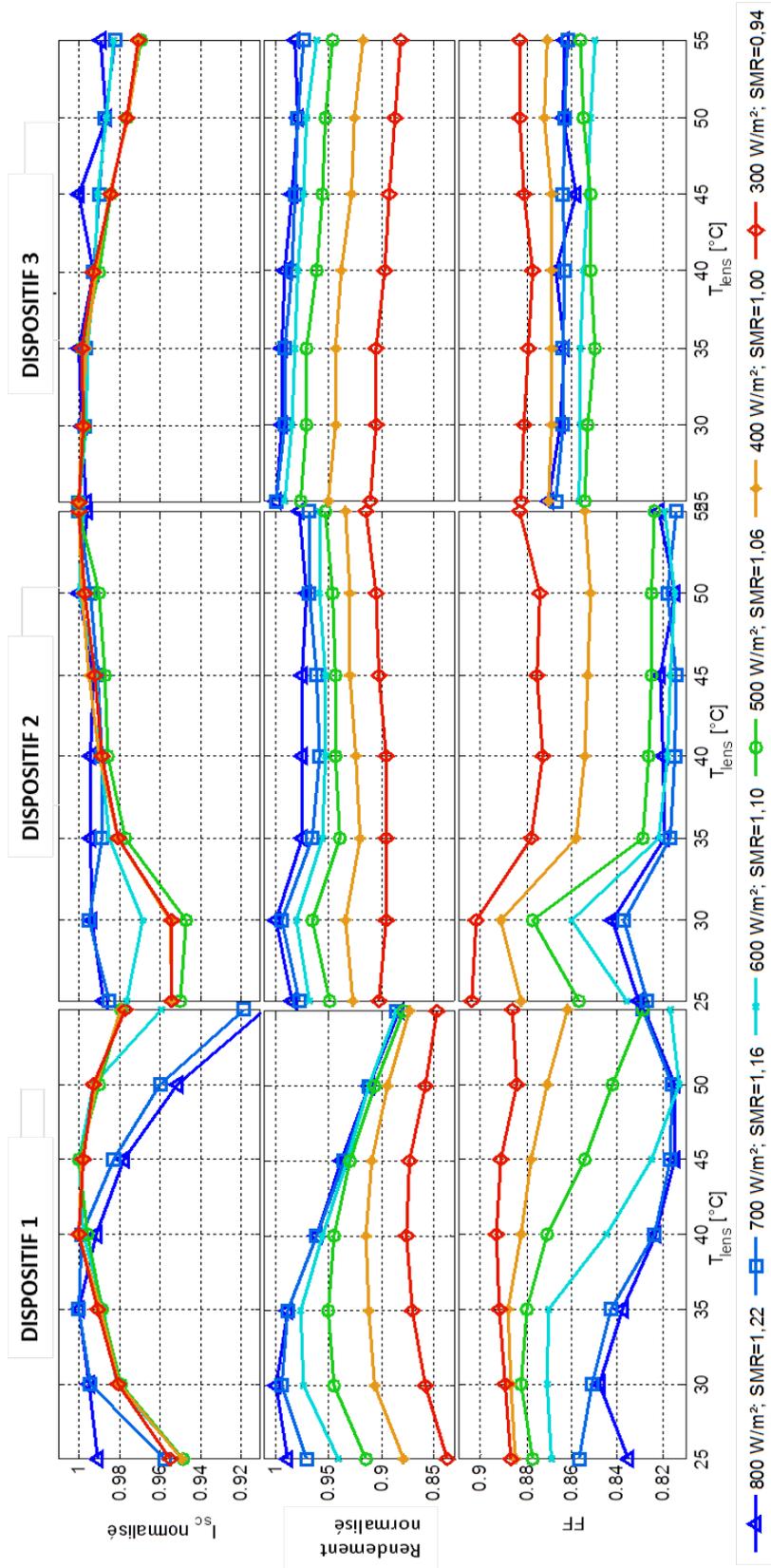


Figure 4.16:  $I_{sc}$  normalisé, rendement normalisé,  $FF$  pour les trois dispositifs à différentes températures de lentille pour différentes irradiances.

Pour le dispositif n°1, le courant de court-circuit  $I_{sc}$  augmente d'abord avec la température puis au-delà d'une certaine valeur diminue à nouveau. La valeur maximale de courant s'observe pour une température différente en fonction de la valeur de  $SMR_{mid}^{top}$  : un spectre riche en bleu présente un maximum pour une température de lentille plus faible qu'une irradiance incidente riche en rouge. En effet, pour une température  $T_{lentille}$  égale à 35 °C, le maximal de courant s'observe pour un  $SMR_{mid}^{top}$  de 1,2. Ceci signifie que la cellule se situe dans des conditions proches du *current matching* pour cette composition spectrale. Au fur et à mesure de l'augmentation de la température de lentille, la distance focale s'allonge : les longueurs d'onde rouge sur la cellule vont défocaliser, alors que les longueurs d'onde bleue focalisent. Ainsi la cellule est éclairée par une irradiance de plus en plus riche en bleu, et il est nécessaire que le spectre incident sur la lentille contre-balance ce phénomène pour se retrouver dans des conditions de *current matching*. Logiquement, les irradiances avec une valeur de  $SMR_{mid}^{top}$  inférieure à 1, soit à dominante rouge, présentent un maximum en courant pour des valeurs élevées de la température de lentille.

Pour le facteur de forme, nous observons une baisse allant jusqu'à 5% en valeur absolue pour les différentes irradiances. Cette variation est cohérente avec les observations faites par imagerie. En effet, nous avons vu que la densité de courant était plus homogène pour les deux jonctions, lissant les fortes non-uniformités spectrales observées à la température  $T_{lentille}$  égale à 25 °C. De manière analogue aux observations faites dans l'étude précédente, ceci implique une génération du courant moins homogène spatialement et un effet de résistance série plus fort, donc une baisse de l'indicateur  $FF$ . Ceci conforte alors nos hypothèses pour ce dispositif sur le rôle que jouent les non-uniformités spectrales dans la distribution de courant sur la cellule, et les impacts que cela a sur les performances.

Dans le cas du dispositif n°2, une baisse de courant photogénéré s'observe seulement pour des courtes distances lorsque le spectre incident est riche en rouge. En modifiant la composition spectrale de la lumière sur la cellule, l'augmentation de la température de la lentille permet d'obtenir de meilleures générations de courants pour des valeurs de  $SMR_{mid}^{top}$  inférieures à 1,1. Pour le facteur de forme, une baisse s'opère pour l'ensemble des irradiances avec la température de lentille. La baisse est de l'ordre de 1% à 3%, faible au regard des variations observées lors de l'étude sur la position de cellule. Ainsi, si l'on se réfère à l'imagerie, il y'a bien une modification des non-uniformités spectrales sur la cellule. Compte-tenu des faibles variations, il est alors difficile de corrélérer de manière quantitative ces deux observations.

Quant au dispositif n°3, il se montre plutôt tolérant avec une baisse de courant de l'ordre de 2% pour des températures supérieures à 45 °C. Cette baisse de courant impacte alors le rendement dans les mêmes proportions. Le facteur de forme n'est pas modifié de

manière significative. Les densités de courant et le rapport  $J_{top}/J_{mid}$  restent très homogènes spatialement quel que soit le courant, d'où un facteur de forme plutôt insensible aux variations de températures de lentille.

Les mesures électriques confirment les observations faites par imagerie. Le dispositif n°1 apparaît le plus sensible à la variation de la température  $T_{lentille}$ , alors que les dispositifs n°2 et 3 se montrent plus tolérants. Des variations de rendement supérieures à 10% pour une irradiance donnée s'observe pour le dispositif n°1, tandis que les écarts n'excèdent pas 3,5% pour le dispositif n°2 et 2,5% pour le dispositif n°3.

### 4.3.3 Cartographie de performances des optiques

Nous proposons de conclure cette section avec une représentation très parlante des performances des dispositifs. L'idée ici est de fournir un outil graphique pour le dimensionnement d'un système adapté à des conditions réelles de fonctionnement.

Nous réalisons des mesures électriques pour les températures de lentille testées aux cinq distances POE-cellule. Nous obtenons alors une cartographie en trois dimensions du fonctionnement du système. Nous nous intéressons aux deux paramètres électriques suivant: le courant de court-circuit  $I_{sc}$ , correspondant à l'efficacité optique du système pour l'irradiance considérée, et le facteur de forme  $FF$ . La variation du rendement est une résultante des comportements observés. Il est possible de tracer ces cartographies à plusieurs compositions spectrales, l'idéal étant de choisir des conditions représentatives du site extérieur visé. Les résultats pour les courants de court-circuit mesurés à  $600 \text{ W/m}^2$ , et  $SMR_{mid}^{top}$  égal à 1,1 sont visibles sur la figure 4.17. La figure 4.18 correspond aux variations de facteur de forme. La distance POE-cellule est normalisée par la focale nominale (voir section 4.1) afin de pouvoir comparer les dispositifs entre eux.

Les cartographies mettent en évidence les faiblesses et avantages des différents dispositifs expliqués dans les études précédentes. Pour le dispositif n°1, nous observons une génération de courant maximale pour différentes positions de la cellule en fonction de la température de lentille. Le facteur de forme présente cette forme typique de "W" précédemment mentionné, pour des températures basses de lentille. Rappelons que dans ce cas les non-uniformités spectrales entraînent une redistribution de la génération de courant sur la cellule, compensant ainsi les non-uniformités spatiales d'irradiance. La position optimale pour le spectre considéré correspond alors à une distance relative proche de 1 pour les températures considérées. Si le dispositif est amené à fonctionner à des températures plus basses, comme c'est le cas pour les mesures du chapitre 2, il faudrait alors sûrement rapprocher la cellule.

Le dispositif n°2 a un comportement plutôt stable avec la température de lentille et présente une génération de courant maximale autour de la position relative 0,98. En revanche

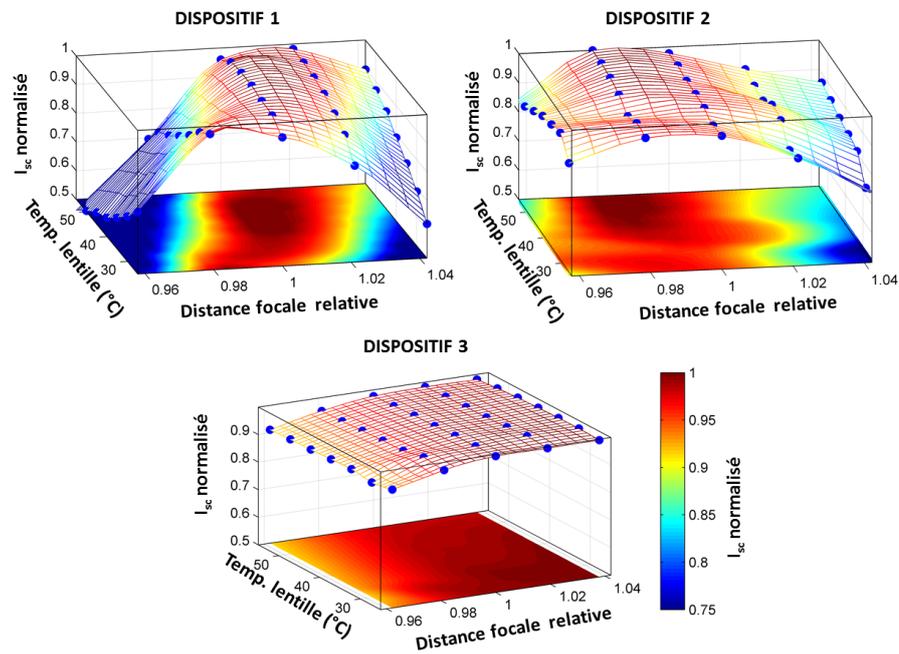


Figure 4.17: Cartographie "température  $T_{lentille}$ -distance focale relative" du courant de court-circuit  $I_{sc}$  pour les trois dispositifs.

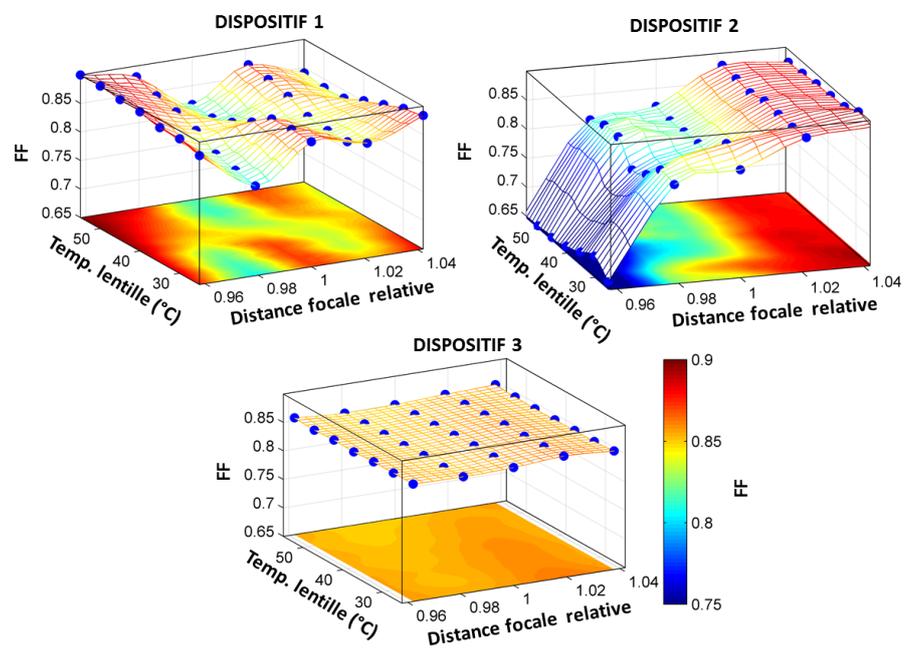


Figure 4.18: Cartographie "température  $T_{lentille}$ -distance focale relative" du facteur de forme  $FF$  pour les trois dispositifs.

à cette position, les non-uniformités spectrales induisent une baisse du facteur de forme, qui s'accroît lorsque l'on rapproche la cellule. La température de lentille n'influe pas dans le choix de la position optimale pour le spectre considéré. Il est ici dommageable d'avoir à effectuer un compromis entre facteur de forme et courant, ce qui engendre de facto une limitation des performances pour n'importe quelle position de cellule.

Enfin le dispositif n°3 se montre tolérant aux deux paramètres. Le facteur de forme est stable pour toutes les mesures effectuées et le courant augmente légèrement lorsque l'on passe d'une distance relative de 0,95 à 1 pour ensuite atteindre un plateau. Ainsi, le système fonctionnera de manière optimale pour différentes positions de cellule.

## 4.4 Corrélation des résultats avec des mesures extérieures

Nous avons démontré que le spectre incident, la distance cellule-POE et la température de la lentille vont impacter les distributions spatiale et spectrale de la lumière sur la cellule, affectant ainsi les performances du dispositif. Pour conclure ce travail, nous allons maintenant estimer l'impact des variations spectrales et de température de lentille sur la génération de courant dans des conditions réelles de fonctionnement. Plusieurs travaux de la littérature [28, 30, 43, 121, 122] visent à analyser l'impact des variations spectrales sur l'énergie produite par un système CPV. La plupart utilisent des données de spectre modélisé, et négligent l'impact de la variation de température de lentille sur les performances du module. Toutefois, d'autres travaux prennent en compte ce facteur, soit par modélisation par éléments finis et logiciels de tracé de rayons [42, 123], soit de manière expérimentale [43]. Nous privilégierons cette dernière approche dans cette thèse où nous nous focaliserons sur l'impact des variations spectrales et de température de l'optique sur la génération de courant de court-circuit.

Nous réalisons pour ce faire un comparatif entre deux des dispositifs testés: le dispositif n°1 et le dispositif n°3. Ce choix nous permet de confronter un système avec lentille SoG, sans SOE et en conséquence très sensible aux variations de température et de position de la cellule, et un dispositif non-imageant de type Fresnel-Köhler qui a montré sa tolérance aux deux paramètres. Dans un premier temps, nous allons revenir sur les mesures réalisées en extérieur et détailler le calcul des pertes énergétiques. Ensuite, nous appliquerons la méthodologie aux deux dispositifs.

#### 4.4.1 Extrapolation des mesures à des conditions réelles de fonctionnement

Afin de calculer les pertes en courant dans des conditions réelles de fonctionnement, nous utilisons comme données d'entrée les mesures réalisées en extérieur sur la période allant de Juin 2014 à Juin 2015 au site du Bourget-Du-Lac.

La distribution de  $DNI$  cumulé en fonction de la température de lentille  $T_{lentille}$  et de la composition spectrale de la lumière  $SMR_{mid}^{top}$  est représentée en figure 4.19. Seules les valeurs de  $DNI$  supérieures à  $600W/m^2$  sont retenues, irradiance jugée suffisante pour le fonctionnement du module. Pour chaque conditions d'opération  $(SMR_{mid}^{top}, T_{lentille})$ , les valeurs de  $DNI$  correspondantes sont sommées afin d'obtenir une valeur représentative de la ressource énergétique pour ces conditions. La température de lentille correspond aux données modélisées pour le module C du chapitre 1, pour lequel des mesures sont disponibles de manière continue sur une année.

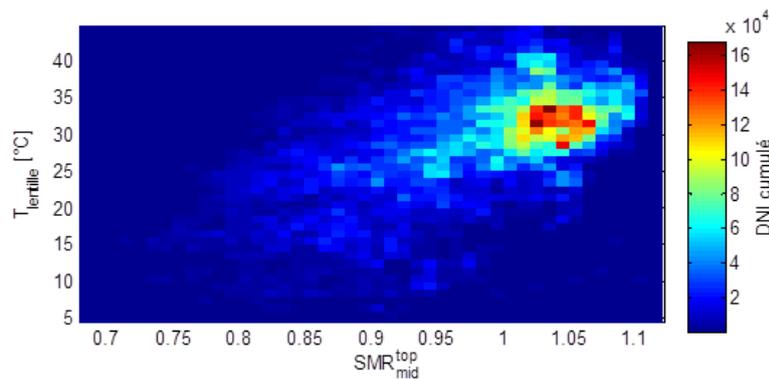


Figure 4.19:  $DNI$  cumulé sur le site du Bourget-Du-Lac pour la période allant de Juin 2014 à Juin 2015 en fonction des conditions spectrales et de la température de lentille.

Une certaine tendance peut être observée: les valeurs basses de température de lentille correspondent aux valeurs basses de  $SMR_{mid}^{top}$ , et de manière analogue pour les valeurs hautes de température de lentille et de  $SMR_{mid}^{top}$ . Comme observé dans le chapitre 2, cette tendance est logique puisque les mois d'été correspondent aux mois chauds, avec des spectres riches en bleu (positions hautes du soleil), alors que les mois hivernaux, plus froids, coïncident avec des spectres riches en rouge (positions plus basses du soleil). Le cumul de  $DNI_{cumul}$  le plus important s'observe pour une valeur de  $SMR_{mid}^{top}$  égale à 1,04 et une température de lentille égale à 34 °C. Malgré une certaine concentration des valeurs autour de ces conditions, on observe une gamme large de conditions spectrales et de températures de lentille.

La deuxième donnée nécessaire est la sensibilité spectrale des modules en fonction de la température de la lentille et de la position de la cellule. A partir du diagramme des

sous-cellules mesurées pour différentes conditions, nous déterminons la valeur de  $SMR_{MC}^*$ , équivalente à la valeur  $SMR_{mid}^{top}$  pour laquelle il y'a équilibre des courants des sous-cellules *top* et *middle*. Cette valeur est déterminée à partir des équations de la section 3.4, selon l'équation :

$$SMR_{MC}^* = \frac{I_{N,mid}^*}{I_{N,top}^*} \quad (4.1)$$

Les cartographies des valeurs de  $SMR_{MC}^*$  pour les deux dispositifs sont représentées en figure 4.20.

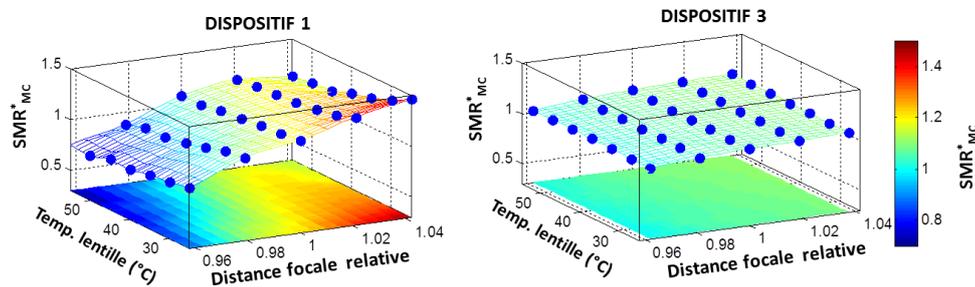


Figure 4.20: Rapport spectral  $SMR_{MC}^*$  pour lequel un *current matching* s'observe en fonction de différentes conditions de mesures en intérieur.

Pour le dispositif n°3, comme attendu, les valeurs de  $SMR_{MC}^*$  montrent une faible variabilité avec la distance POE-cellule et la température de lentille. En revanche, dans le cas du dispositif n°1, les valeurs oscillent entre 0,8 et 1,4 selon les conditions. Il est ainsi possible de prendre avantage des aberrations chromatiques pour ajuster l'équilibre en courant entre les sous-cellules en modifiant la position de la cellule. Nous notons également un inconvénient important à l'utilisation de ce dispositif pour le site d'étude du Bourget-Du-Lac: la valeur de  $SMR_{MC}^*$  diminue avec l'augmentation de la température de lentille. Or nous voyons sur la figure 4.19 que la température de lentille et la valeur de  $SMR_{mid}^{top}$  évoluent dans le même sens. Les tendances s'opposent donc, et la variation de  $SMR_{MC}^*$  avec la température de lentille du dispositif n°1 va accentuer le déséquilibre en courant des sous-cellules pour des conditions variables d'opération.

Les températures de lentille testées en intérieur ne couvrent pas la variabilité de conditions observées en extérieur. En effet, la température de lentille descend à des températures inférieures à 25°C. Pour estimer le comportement spectral dans de telles conditions, une régression multivariable d'ordre deux est réalisée sur les données intérieures. Les coefficients de régression  $R$  obtenus pour les dispositifs n°s 1 et 3, de respectivement 0,987 et 0,992, montrent une bonne correspondance entre le modèle et la mesure. A partir des coefficients

de régression, il est alors possible de simuler l'équilibre en courant des dispositifs pour les conditions extérieures. Les valeurs de  $SMR_{MC}^*$  obtenues avec le modèle sont représentées en figure 4.21 pour la plage de conditions réelles. Les échelles colorimétriques utilisées sont différentes pour les deux graphiques.

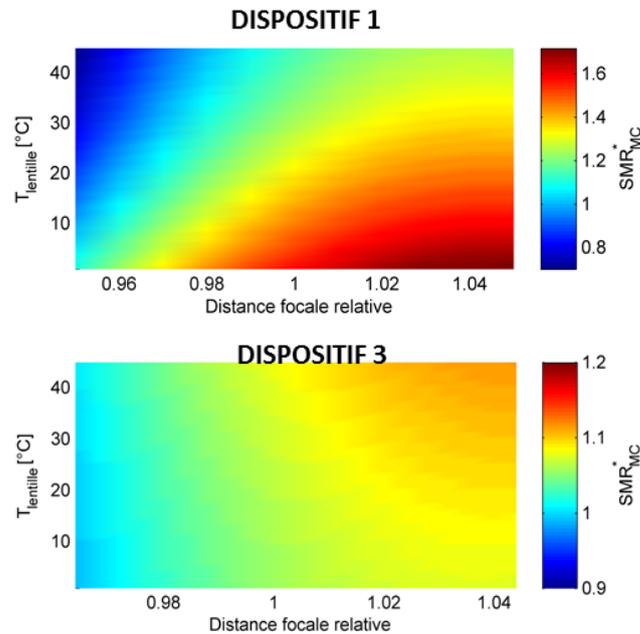


Figure 4.21: Rapport spectral  $SMR_{MC}^*$  modélisé à partir des mesures en intérieur pour les conditions extérieures d'opération.

#### 4.4.2 Calcul des pertes énergétiques sur l'année

A partir des deux données présentées précédemment, il est possible de déterminer les pertes dues au déséquilibre spectral pour l'ensemble de l'année. Ces pertes correspondent au décalage observée entre le spectre incident et la valeur de  $SMR_{MC}^*$  des conditions d'opération. Afin de calculer ces pertes pour une année, l'équation suivante est utilisée:

$$Pertes = 1 - \frac{\sum_{T_{lentille}, SMR_{mid}^{top}} (1 - |SMR_{mid}^{top} - SMR_{MC}^*|) \cdot DNI_{cumul}}{\sum_{T_{lentille}, SMR_{mid}^{top}} DNI_{cumul}} \quad (4.2)$$

Cette équation correspond à la perte en génération de courant de court-circuit  $I_{sc}$ , et se répercute logiquement sur la production d'énergie. D'autres pertes liées à la variation du facteur de forme existent également, mais n'ont pas été calculées ici. En effet, le facteur de forme dépend principalement de trois facteurs: l'intensité du rayonnement, l'uniformité

spectral et spatial de l'irradiance sur la cellule et le *current matching* des sous-cellules. Les mesures en intérieur n'ont pas permis de déterminer un modèle prenant en compte tous ces paramètres et nous n'étudierons pas les variations du facteur de forme en conditions réelles.

A partir du modèle de pertes présenté, il est possible de déterminer la valeur  $SMR_{MC}^*$  optimale sans prendre en compte l'impact de la température de lentille. Pour la figure 4.22, les pertes ont été calculées pour différentes conditions spectrales  $SMR_{MC}^*$  d'optimisation du dispositif. L'énergie produite sera maximisée sur l'année pour un  $SMR_{MC}^*$  de 0,99. Cette configuration correspond à un compromis entre conversion efficace des valeurs hautes de  $SMR_{mid}^{top}$ , où le maximum de  $DNI_{cumul}$  est observé, et limitation des pertes pour les spectres fortement riches en rouge (valeurs basses de  $SMR_{mid}^{top}$ ).

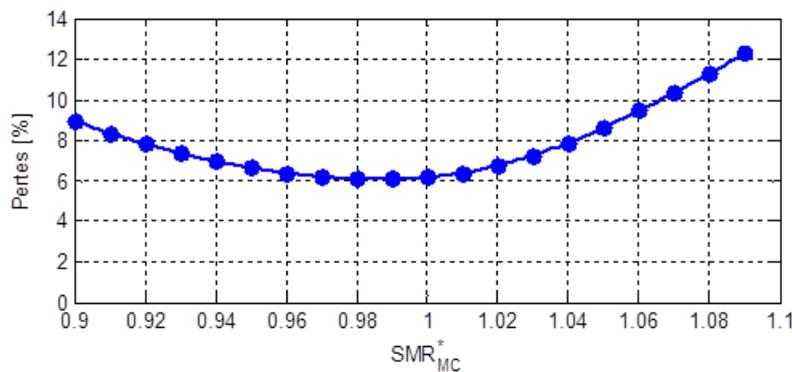


Figure 4.22: Pertes en courant de court-circuit pour une année en fonction du  $SMR_{MC}^*$  d'optimisation.

Les dispositifs étudiés présentent cependant une dépendance à la température de lentille. A partir des modélisations de comportements spectraux décrites précédemment, il est possible d'obtenir les pertes en courant pour les deux dispositifs à différentes positions de la cellule (figure 4.23). Le dispositif n°1 présente des pertes minimales de 10% pour une position relative de la distance de 0,973. Cette position correspond à une valeur  $SMR_{MC}^*$  de 1,01 pour une température de lentille de 25°C. Pour d'autres positions, les pertes en courant augmentent rapidement. La principale raison de ces pertes importantes est une gamme large de valeur de conditions spectrales, combinée à une évolution contraire de l'évolution de la valeur  $SMR_{MC}^*$  et  $SMR_{mid}^{top}$  avec la température de lentille.

Le dispositif n°2 se comporte mieux face aux variations spectrales et de température de lentille. Les pertes atteignent 6,9% pour une distance relative de 0,95, et à la distance de 1,04, celles-ci atteignent 12%. D'une part, le comportement spectral stable du dispositif avec la variation de température de lentille est alors synonyme de meilleures performances énergétiques. D'autre part, la position optimale de 0,95 correspond à une valeur de  $SMR_{MC}^*$

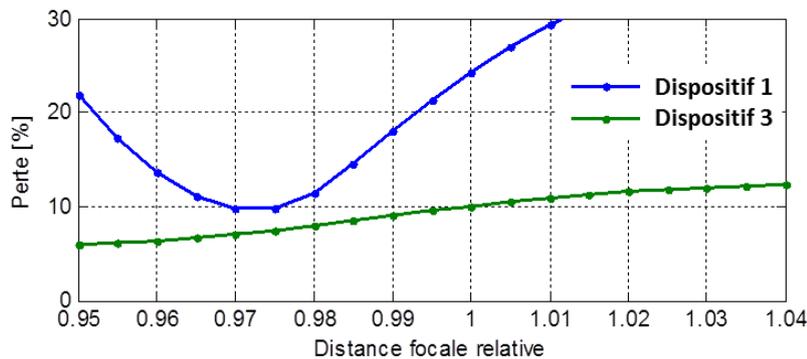


Figure 4.23: Pertes en courant de court-circuit sur une année pour différentes distances focales relatives pour les dispositifs n°1 et n°3.

de 0,99 pour une température de lentille de 25°C, cohérente avec l’optimum théorique calculé précédemment.

A partir de ces différentes expériences et des résultats, nous concluons sur la nécessité de bien connaître les conditions dans lesquelles le dispositif est amené à fonctionner. La modification de la distance cellule-POE est un moyen de minimiser les pertes face aux variations spectrales et de température du site. Mais n’oublions pas que d’autres critères sont à considérer pour cette optimisation, les variations du facteur de forme et l’angle d’acceptance  $AA_{90}$  notamment.

## 4.5 Conclusions

A travers ce chapitre, nous avons mis en application les outils de caractérisation et d’imagerie développés dans cette thèse. Trois dispositifs, représentant différentes architectures optiques, ont été étudiés. Des mesures électriques et optiques ont été effectuées pour une variété de distances POE-cellule et de températures de lentille.

L’ajout d’une optique secondaire, pour deux des dispositifs, permet indéniablement d’uniformiser spatialement le flux sur la cellule. Le dispositif sans optique secondaire présente en effet un profil gaussien qui implique davantage de pertes par résistance série. Mais ceci ne signifie pas forcément un facteur de forme plus élevé pour les autres dispositifs : les non-uniformités spectrales impactent également le comportement électrique. Les aberrations chromatiques causent en effet des limitation inhomogènes du courant sur la cellule. Ces phénomènes sont très présents en l’absence d’optiques secondaires, et vont logiquement affecter le *current matching* de la cellule en fonction de sa position pour un

spectre donné. Seul le dispositif optique Fresnel-Köhler, de type non imageant, permet d'obtenir un flux uniforme spectralement.

Pour les deux autres dispositifs, les non-uniformités spectrales créent une circulation latérale de courant afin de redistribuer les excès locaux. Les résultats expérimentaux montrent que ce phénomène impacte différemment la cellule, en fonction de sa taille et de sa résistance de couche (non caractérisée dans cette étude). Dans le cas du dispositif n°1, l'impact peut se révéler positif, et le facteur de forme amélioré, lorsque la redistribution de courant limite les effets de résistance série en homogénéisant la génération de courant sur la cellule. Pour le dispositif n°2, l'impact est en revanche négatif, et le facteur de forme s'est vu diminué de près de 15% en valeur absolue. Ainsi, si l'architecture optique produit des non-uniformités spectrales, la cellule doit être conçue de sorte à tolérer ces phénomènes.

La température de lentille peut modifier les distributions spectrale et spatiale de lumière sur la cellule. Ce phénomène est principalement dû à la modification de l'indice de réfraction. L'impact est ainsi important pour le dispositif sans optique secondaire, avec lentille primaire de type SoG. La distance lentille-cellule optimale varie alors en fonction du spectre incident et de la température de l'optique. Pour des configurations avec optique secondaire et optique primaire en PMMA, cette sensibilité à la température est fortement diminuée.

Les effets combinés de la température de lentille et des variations spectrales dans des conditions réelles de fonctionnement conduit à des pertes significatives de courant photogénéré. Les pertes ont été calculées pour deux dispositifs, l'un sans optique secondaire très sensible aux variations et l'autre très tolérant avec une fonction non-imageante du dispositif optique. Pour le système sensible, les pertes varient entre 10% et plus de 25% selon la position de la cellule. Pour le système tolérant, les pertes sont réduites à moins de 7%, avec une variation beaucoup plus faible de ces pertes avec la distance POE-cellule. Une bonne connaissance des variations spectrales et des températures de lentille sur l'année permet d'adapter spectralement le dispositif, limitant ainsi ces pertes. Ceci est d'autant plus vrai pour un système peu tolérant. Les cartographies de performance en fonction de la distance lentille-cellule et de la température de lentille peuvent constituer un outil d'aide au dimensionnement d'un système.



# Chapitre 5

## Conclusions

Dans ce travail de thèse, les comportements optiques et électriques de différentes technologies CPV ont été étudiées en conditions réelles et en laboratoire. Des procédés de traitement de données et de caractérisation par imagerie ont permis de collecter plusieurs résultats significatifs. Parmi ceux-ci, le développement d'un outil de mesure des non-uniformités spectrales et spatiales dans des conditions d'opération contrôlables se révèle un moyen innovant et performant d'analyse du comportement électrique d'un dispositif. Nous allons maintenant détailler les principaux résultats obtenus. Ensuite, des pistes et des recommandations pour de futures recherches seront présentées. Enfin, les contributions scientifiques et participations à conférences effectuées au cours de ces trois années seront listées.

### 5.1 Résumé des principaux résultats

Quatre technologies commerciales, représentatives de l'état de l'art de la technologie CPV, ont été exposées en extérieur pour une analyse en conditions réelles des performances. A travers le développement d'outils de traitements de données et de procédés de filtrage, l'impact des conditions d'opérations sur le comportement électrique des modules a été mis en évidence. Les résultats montrent le rôle prépondérant que jouent les variations spectrales pour le site étudié.

A l'aide d'un outil de traitement de données adapté et spécifiquement développé pour décorrélérer l'impact des facteurs environnementaux, le rôle de différents concentrateurs optiques sur le comportement électrique a été quantifié. L'optique de concentration impacte le comportement du module pour différents spectres incidents, et il est essentiel de considérer l'ensemble "optique-cellule" quant à l'optimisation d'un module pour des conditions extérieures. De plus, les résultats ont montré que la variation de tension  $V_{oc}$  avec la température de cellule est à considérer au niveau module.

Les études effectuées sur ces mesures extérieures ont également mis en évidence le rôle de la température de lentille sur la génération de courant. La sensibilité à ce paramètre varie en fonction de l'architecture du module : l'absence d'optique secondaire augmente considérablement la modification du courant avec la température. Les autres paramètres, tels la température de cellule ou le rayonnement circumsolaire, affectent dans une mesure moindre la génération de courant.

La difficulté à établir certaines relations entre les paramètres électriques et les facteurs environnementaux, compte-tenu de la variation simultanée des paramètres en extérieur, a mis en évidence la nécessité de développer des outils de laboratoire permettant une compréhension des phénomènes en jeu dans la variation des performances. Dans ce cadre-là, un banc de mesure de l'irradiance sur la cellule a été conçu et mis en place. Cet outil, incorporé dans un simulateur solaire pour module CPV, permet d'acquérir des images de la lumière sur la cellule à différentes bandes spectrales, pour un moment défini du flash lumineux.

Un travail conséquent a été réalisé sur la caractérisation et la calibration de l'outil METHOD, afin que celui-ci permette d'imager spectralement et spatialement l'irradiance sur la cellule. Plusieurs limites de ce banc d'expérimentation ont toutefois été soulignées : notamment l'impossibilité de travailler sur la jonction *bottom*, la nécessité d'hypothèses simplificatrices pour le traitement des données, ou encore les problématiques liées à l'utilisation du diffuseur en opale. Toutefois, un protocole de corrélation avec des mesures électriques de cellules triple-jonctions a été présenté et l'analyse de corrélations entre comportement électrique et optique est rendue possible.

Nous avons alors étudié trois dispositifs optiques-cellule: un dispositif avec lentille de Fresnel de type SoG sans optique secondaire, un dispositif lentille de Fresnel en PMMA avec pyramide réfractive inversée, et enfin un dispositif de type Fresnel-Köhler avec lentille en PMMA et optique secondaire. Le banc METHOD est utilisé pour caractériser électriquement et optiquement les dispositifs. Plusieurs résultats clés émergent de l'analyse des mesures : premièrement, nous avons été capable d'observer les non-uniformités sur les différents dispositifs et de quantifier leurs impacts sur le facteur de forme, le rendement et la génération de courant. Ensuite, il a été montré que l'impact des non-uniformités spectrales diffèrait selon les caractéristiques de la cellule. La redistribution des excès locaux de courant peut en effet causer une diminution significative du facteur de forme, ou au contraire améliorer les performances de la cellule en homogénéisant la génération de courant sur la cellule.

Un autre résultat important concerne les effets liés à la variation de la température de la lentille. L'étude des dispositifs à plusieurs températures et pour plusieurs positions de la cellule a mis en évidence les faiblesses et atouts de chaque architecture optique. L'absence d'optique secondaire, combinée à l'utilisation de lentille de Fresnel de type SoG, montre une

variation importante des performances avec les paramètres testés : le *current matching* et les non-uniformités dépendent grandement de la position de la cellule, et de la température de lentille. L'ajout d'optique secondaire et l'utilisation de lentille en PMMA contribuent à limiter ces impacts. Seul le dispositif de type Fresnel-Köhler, non-imageant, fournit une irradiance spectralement et spatialement uniforme sur la cellule pour les différentes conditions.

Finalement, à la lumière des résultats observés en extérieur et des analyses effectuées sur les dispositifs en laboratoire, il est impératif de caractériser de manière exhaustive un concentrateur pour une utilisation dans des conditions réelles, où la composition spectrale et la température de lentille présente de fortes variations. Le calcul de pertes du courant photogénéré sur une année de fonctionnement a montré combien la position de la cellule comptait dans un fonctionnement optimal du dispositif, et plus spécifiquement en l'absence d'optique secondaire.

Outre les avancées scientifiques et les résultats obtenus, le travail effectué a permis au laboratoire de mettre en place des outils de traitement de données et de caractérisations avancées. Les compétences acquises ainsi que les efforts menés conjointement avec toute l'équipe du laboratoire ont contribué à développer une expertise reconnue au niveau national et international.

## 5.2 Pistes de réflexion pour de futures recherches

Pour conclure ce travail, nous tenons à proposer des pistes d'étude afin d'approfondir les questions abordées dans cette thèse. En effet, par manque de temps ou de moyens de mesure, il n'a pas été possible de répondre complètement à certaines problématiques soulevées dans ce travail. L'expérience acquise permet de donner quelques suggestions et éléments de réflexion pour de futurs travaux de recherche.

Tout d'abord, la poursuite d'études en extérieur sur de longues périodes de temps permet de s'assurer de la véracité des conclusions tirées. De nouveaux capteurs météorologiques, tels qu'un capteur de rayonnement circumsolaire ou un capteur de spectre, permettraient de compléter les études effectuées. La mesure de spectres notamment constitue une donnée intéressante pour l'analyse de performances de modules équipés de cellules innovantes, telles les cellules quatre-jonctions par exemple. Suite aux résultats obtenus, de tels capteurs ont été récemment installés sur le site du Bourget-Du-Lac.

Les questions relatives au vieillissement et à la salissure en conditions réelles sont également des points intéressants qui méritent d'être étudiés. La compréhension de ces effets est aujourd'hui un enjeu clé du développement à plus grand échelle de la technologie CPV.

Les axes d'analyse développés dans le chapitre 2 et les outils de traitement et de filtrage mis en place pourraient être utilisés pour mettre en évidence les variations de performances dues à ces phénomènes. Il serait par exemple intéressant de comparer la variation de l'efficacité optique de différentes technologies de lentilles de Fresnel dans le temps. Ces sujets connaissent un intérêt grandissant de la part du laboratoire CPV du CEA et font l'objet de projets de recherche.

L'idée de développer un outil d'imagerie plus versatile, permettant de caractériser une part plus large du spectre incident est un sujet à approfondir. Au regard des résultats obtenus, il nous paraît important de se concentrer sur l'utilisation de diffuseurs optiques performants sur une large gamme spectrale.

De futures recherches sur le rôle des non-uniformités spectrales dans les performances de la cellule constituent également un sujet intéressant. Plus particulièrement, il conviendrait de mieux comprendre quels sont les paramètres de la cellule à optimiser afin de limiter les effets des limitations locales de courant. La corrélation entre intensité des courants latéraux, résistance de couche et taille de cellule est à étudier et fournirait des critères d'optimisation pour les concepteurs de cellule.

Finalement, la création d'un modèle empirique basé sur des caractérisations en laboratoire et des données extérieures de mesure nous paraît être un outil clé de dimensionnement et d'optimisation d'un module CPV pour un site donné. Plus particulièrement, nous tenons à souligner l'importance de mieux évaluer une configuration à des conditions définies d'opération, et la modélisation se révèle un outil indispensable d'aide à la conception.

## 5.3 Contributions scientifiques

### Publications dans des journaux à comité de révision

- P. Besson, P.M. White, C. Dominguez, P. Voarino, P. Garcia-Linares, M. Lemiti, H. Schriemer, K. Hinzer, et M. Baudrit, "Spectrally-resolved measurement of concentrated light distributions for Fresnel lens concentrators", dans *Optics Express*, Vol. 24(2), pp. A397-A407 (2016).

### Contributions à des conférences internationales

- P. Besson, C. Dominguez, P. Voarino, P. Garcia-Linares, C. Weick, M. Lemiti et M. Baudrit, "METHOD: A tool for Mechanical, Electrical, Thermal, and Optical characterization of single lens module Design", dans *AIP Conference Proceedings* pour la conférence CPV11 (Aix-Les-Bains-France), vol. 1679, 2015.

- P. Besson, C. Dominguez et M. Baudrit, "Contributions to reproducible CPV outdoor power ratings", dans *AIP Conference Proceedings* pour la conférence CPV10 (Albuquerque-USA), vol. 1616, pp. 321-325, 2014.
- P. Besson, C. Dominguez, M. Baudrit et M. Lemiti "Quantification of energy losses in HCPV modules: outdoors measurement", présentation orale à *International education forum for energy and environment science (ACEEES)* (Los Angeles-USA), 2013.
- C. Dominguez et P. Besson, "On the sensitivity of 4 CPV module technologies to relevant ambient and operation conditions", dans *AIP Conference Proceedings* pour la conférence CPV10 (Albuquerque-USA), vol. 1616, pp. 308-312, 2014.
- M. Baudrit, P. Besson et E. Ménard, "How high precision tracking accuracy sensors can unlock a tracker's design potential", présentation orale à la conférence CPV10 (Albuquerque-USA), 2014.
- P. Garcia-Linares, C. Dominguez, P. Voarino, P. Besson, Pierre et M. Baudrit, "Advances On Multijunction Solar Cell Characterization Aimed At The Optimization Of Real Concentrator Performance", dans *AIP Conference Proceedings* pour la conférence CPV10 (Albuquerque-USA), vol. 1616, pp.110-113, 2014.
- P. García-Linares, C. Domínguez, P. Voarino, P. Besson, et M. Baudrit, "Effect of the encapsulant temperature on the angular and spectral response of multi-junction solar cells", dans *Proceedings of the 14th IEEE PVSC* pour la conférence PVSC (Denver-USA), pp.3298-3303, 2014.
- C. Domínguez, P. Voarino, B. Lazpita, A. Bier, P. Besson et M. Baudrit, "CPV-specific test procedures for evaluating on-grid inverters", dans *AIP Conference Proceedings* pour la conférence CPV10 (Albuquerque-USA), vol. 1616, pp.302-307, 2014.
- P. García-Linares, P. Voarino, C. Dominguez, O. Dellea, P. Besson, P. Fugier et M. Baudrit, "Reduction of front-metallization grid shading in concentrator cells through laser micro-grooved cover glass", dans *AIP Conference Proceedings* pour la conférence CPV11 (Aix-Les-Bains-France), vol. 1679, 2015.
- P. García-Linares, P. Voarino, C. Dominguez, O. Dellea, P. Besson, P. Fugier et M. Baudrit, "Reduction of front-metallization grid shading in concentrator cells through laser micro-grooved cover glass", dans *AIP Conference Proceedings* pour la conférence CPV11 (Aix-Les-Bains-France), vol. 1679, 2015.

- C. Dominguez et P. Besson, "Simple lens temperature estimation for improving CPV power rating procedures and energy yield estimations ", présentation orale à la conférence CPV11 (Aix-Les-Bains-France), 2015.
- P.M. White, P. Sharma, P. Besson, M. Baudrit, S. Fafard, H. Schriemer et K. Hinzer, "Effects of nonuniform illumination on triple junction solar cells under concentration" poster à la conférence CPV11 (Aix-Les-Bains-France), 2015.

### Récompense

- Best collaboration award, *International education forum for energy and environment science (ACEEES)* (Los Angeles-USA), 2013.

# Références

- [1] R. P. Core Writing Team and L. M. (eds.), “Ipcc, 2014: Climate change 2014: Synthesis report. contribution of working groups i, ii and iii to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change,” tech. rep., GIEC, 2014.
- [2] J. R. Porter, “Summary for Policymakers,” tech. rep., GIEC, 2014.
- [3] G. Masson, S. Orlandl, and M. Reklinger, “Global market outlook for photovoltaics 2014-2018,” tech. rep., European Photovoltaic Industry association, 2014.
- [4] NREL, “Reported timeline of solar cell energy conversion efficiencies since 1976,” July 2015.
- [5] J. E. Haysom, O. Jafarieh, H. Anis, K. Hinzer, and D. Wright, “Learning curve analysis of concentrated photovoltaic systems,” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, pp. n/a–n/a, Nov. 2014.
- [6] W. hockley and H. Queisser, “Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells,” *Journal of Applied Physics*, vol. 32, pp. 510–519, 1961.
- [7] R. Sinton, Y. Kwark, J. Gan, and R. Swanson, “27.5-percent silicon concentrator solar cells,” *IEEE Electron Device Letters*, vol. 7(10), pp. 567–569, 1986.
- [8] I. L. Heredia, *Control de seguimiento solar de alta precision*. PhD thesis, Universidad politecnica de Madrid, 2010.
- [9] Simon P. Philipps, A. Bett, K. Horowitz, and S. Kurtz, “Current status of concentrator photovoltaic cpv technology,” tech. rep., Fraunhofer ISE, Jan. 2015.
- [10] C.-L. Fraunhofer ISE, Soitec, “Four-junction solar cell developed using soitec’s expertise in semiconductor materials sets new efficiency record of 38.9 percent for cpv module,” July 2015.

- [11] “Norm iec 62670: Final draft international standard,” tech. rep., International electrotechnical commission, Feb. 2014.
- [12] C.-L. Fraunhofer ISE, Soitec, “Press release: New world record for solar cell efficiency at 46 percent: French-german cooperation confirms competitive advantage of european photovoltaic industry,” July 2014.
- [13] I. E. Agency, “Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy,” tech. rep., 2014.
- [14] “Norm iso 9060: Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation,” tech. rep., International Organization for Standardization.
- [15] C. Gueymard, “Parameterized transmittance model for direct beam and circumsolar spectral irradiance,” *Solar Energy*, vol. 71(5), pp. 325–346, 2001.
- [16] C. Gueymard, “Smarts, a simple model of the atmospheric radiative transfer of sunshine: Algorithms and performance assessment,” tech. rep., Florida Solar Energy Center, report FSEC-PF-270-95, 1995.
- [17] ASTM, “Standard tables for reference solar spectral irradiances: Direct normal and hemispherical on 37° tilted surface,” tech. rep., <http://www.astm.org>, 2003.
- [18] P. Würfel, *Physics of Solar Cells: From Basic Principles to Advanced Concepts*. Wiley editions, 2009.
- [19] A. Marti and G. Araujo, “Limiting efficiencies for photovoltaic energy conversion in multigap systems,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 43(2), pp. 203–222, 1996.
- [20] J. Roman, “State-of-the-art of iii-v solar cell fabrication technologies, device designs and applications,” *Advanced Photovoltaic Cell Design*, 2004.
- [21] W. Guter and J. Schone, “Current-matched triple-junction solar cell reaching 41.1 percent conversion efficiency under concentrated sunlight,” *Applied Physics Letters*, vol. 94, p. 223504, 2009.
- [22] R. R. King and A. Boca, “Band-gap-engineered architectures for high-efficiency multijunction concentrator solar cells,” in *Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 2009.

- [23] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, and E. D. Dunlop, "Solar cell efficiency tables (version 44): Solar cell efficiency tables," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 22, pp. 701–710, July 2014.
- [24] F. Dimroth, M. Grave, P. Beutel, U. Fiedeler, C. Karcher, T. Tibbits, E. Oliva, G. Siefert, M. Schachtner, A. Wekkeli, A. Bett, R. Krause, M. Piccin, N. Blanc, C. Drazek, E. Guiot, B. Ghyselen, T. Salvetat, A. Tauzin, T. Signamarcheix, A. Dobrich, T. Han-nappel, and K. Schwarzburg, "Wafer bonded four-junction gainp/gaas/gainasp/gainas concentrator solar cells with 44.7 percent efficiency," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 22(3), pp. 277–282, 2014.
- [25] K. Emery, *Measurement and Characterization of Solar Cells and Modules. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. A. Luque, and S. Hegedus, Editions Chichester, John Wiley and Sons, P.701-752, 2004.
- [26] J. F. Geisz, D. J. Friedman, J. S. Ward, A. Duda, W. J. Olavarria, T. E. Moriarty, J. T. Kiehl, M. J. Romero, A. G. Norman, and K. M. Jones, "40.8 percent efficient inverted triple-junction solar cell with two independently metamorphic junctions," *Applied Physics Letters*, vol. 93(12), p. 123505, 2008.
- [27] R. R. King, D. C. Law, K. M. Edmondson, C. M. Fetzer, G. S. Kinsey, H. Yoon, R. A. Sherif, and N. H. Karam, "40 percent efficient metamorphic gainp/gainas/ge multijunction solar cells," *Applied Physics Letters*, vol. 90(18), p. 183516, 2007.
- [28] P. Faine, S. R. Kurtz, C. Riordan, and J. Olson, "The influence of spectral solar irradiance variations on the performance of selected single-junction and multijunction solar cells," *Solar Cells*, vol. 31, no. 3, pp. 259–278, 1991.
- [29] K. Nishioka, T. Takamoto, T. Agui, M. Kaneiwa, Y. Uraoka, and T. Fuyuki, "Annual output estimation of concentrator photovoltaic systems using high-efficiency InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cells based on experimental solar cell's characteristics and field-test meteorological data," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 90, pp. 57–67, Jan. 2006.
- [30] G. S. Kinsey and K. M. Edmondson, "Spectral response and energy output of concentrator multijunction solar cells," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 17, pp. 279–288, Aug. 2009.
- [31] A. W. Bett, F. Dimroth, and G. Siefert, "Multijunction concentrator solar cells," *Concentrator Photovoltaics (Springer Series in Optical Sciences Volume 130)*, vol. 130, pp. 67–87, 2007.

- [32] G. Peharz, G. Siefert, and A. Bett, "A simple method for quantifying spectral impacts on multi-junction solar cells," *Solar Energy*, vol. 83, pp. 1588–1598, Sept. 2009.
- [33] C. Domínguez, I. Antón, G. Sala, and S. Askins, "Current-matching estimation for multijunction cells within a CPV module by means of component cells: Current-matching estimation for MJ cells within a concentrator," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 21, pp. 1478–1488, Nov. 2013.
- [34] Y. Varshni, "Temperature dependence of the energy gap in semiconductors," *Physica*, vol. 34(1), pp. 149–154, 1967.
- [35] G. Siefert and A. W. Bett, "Analysis of temperature coefficients for III–V multi-junction concentrator cells," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 22, no. 5, pp. 515–524, 2014.
- [36] E. F. Fernandez, G. Siefert, M. Schachtner, A. J. Garcia Loureiro, and P. Perez-Higueras, "Temperature coefficients of monolithic III-V triple-junction solar cells under different spectra and irradiance levels," in *AIP Conference Proceedings*, vol. 1477, pp. 189–193, 2012.
- [37] C. D. Dominguez, *Caracterizacion optica y electrica de sistemas fotovoltaicos de alta concentracion*. PhD thesis, Universidad politecnica de Madrid, 2012.
- [38] E. Lorenzo and G. Sala, "Hybrid silicone-glass fresnel lens as concentrator for photovoltaic applications," in *Proceeding 2nd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 1979.
- [39] T. Luce and J. Cohen, "The path to volume production for cpv optics," in *Proceedings of the 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2010.
- [40] J.-T. Mäkinen and R. de Schipper, "How can plastics injection molding help driving down the cost of photovoltaic concentrators?," *International Workshop on Concentrating Photovoltaic Power Plants*, 2007.
- [41] D. Miller, L. Gedvilas, B. To, C. Kennedy, and S. Kurtz, "Durability of poly(methyl methacrylate) lenses used in concentrating photovoltaic modules," in *Proceedings of the SPIE 2010 Optics and Photonics Conference*, 2010.
- [42] T. Hornung, M. Steiner, and P. Nitz, "Estimation of the influence of Fresnel lens temperature on energy generation of a concentrator photovoltaic system," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 99, no. 0, pp. 333–338, 2012.

- [43] M. Victoria, *New concepts and techniques for the development of high-efficiency concentrating photovoltaic modules*. PhD thesis, Universidad politecnica de Madrid, 2014.
- [44] S. Kurtz and M. O'Neill, "Estimating and controlling chromatic aberration losses for two-junction, two-terminal devices in refractive concentrator systems," in *Conference Record of the Twenty Fifth IEEE PVSC*, pp. 361–364, 1996.
- [45] M. Victoria, C. Domínguez, I. Antón, and G. Sala, "Comparative analysis of different secondary optical elements for aspheric primary lenses," *Optics Express*, vol. 17, no. 8, pp. 6487–6492, 2009.
- [46] M. Victoria, R. Herrero, C. Domínguez, I. Antón, S. Askins, and G. Sala, "Characterization of the spatial distribution of irradiance and spectrum in concentrating photovoltaic systems and their effect on multi-junction solar cells," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 21, pp. 308–318, May 2013.
- [47] J. Jaus, A. Bett, H. Reinecke, and E. Weber, "Reflective secondary optical elements for fresnel lens based concentrator modules," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 19(5), pp. 580–590, 2011.
- [48] K. Araki, R. Leutz, M. Kondo, A. Akisawa, T. Kashiwagi, and M. Yamaguchi, "Development of a metal homogenizer for concentrator monolithic multi-junction-cells," in *Proceedings of the 29th Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 1572–1575, 2002.
- [49] K. Araki, M. Kondo, H. Uozumi, and M. Yamaguchi, "Experimental proof and theoretical analysis on effectiveness of passive homogenizers to 3j concentrator solar cells," in *Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, pp. 53–856, 2003.
- [50] L. W. James, "Use of imaging refractive secondaries in photovoltaic concentrators," tech. rep., NASA, 1989.
- [51] X. Ning, R. Winston, and J. O'Gallagher, "Dielectric totally internally reflecting concentrators," *Applied Optics*, vol. 19(5), pp. 300–305, 1987.
- [52] R. Winston, J. Minano, and P. Benitez, *Nonimaging Optics*. Elsevier-Academic Press, 2005.
- [53] R. Herrero, M. Victoria, S. Askins, C. Dominguez, I. Anton, G. Sala, J. Berrios, A. W. Bett, R. D. McConnell, G. Sala, and F. Dimroth, "Indoor Characterization of

- Multi-Junction Solar Cells Under Non Uniform Light Patterns,” in *AIP Conference Proceedings*, vol. 1277, pp. 36–38, 2010.
- [54] R. Schultz, F. Vorster, and E. van Dyk, “Performance of multi-junction cells due to illumination distribution across the cell surface,” *Physica B: Condensed Matter*, vol. 407, no. 10, pp. 1649–1652, 2012.
- [55] V. Rumyantsev, N. Davidyuk, E. Ionova, P. Pokrovskiy, N. Sadchikov, and V. Andreev, “Thermal regimes of fresnel lenses and cells in hcpv modules,” in *AIP Proceedings of CPV6 conference*, pp. 89–92(1277), 2010.
- [56] T. Hornung, A. Bachmaier, P. Nitz, A. Gombert, A. W. Bett, R. D. McConnell, G. Sala, and F. Dimroth, “Temperature Dependent Measurement And Simulation Of Fresnel Lenses For Concentrating Photovoltaics,” in *AIP Conference Proceedings*, vol. 1277, pp. 85–88, 2010.
- [57] S. Askins, M. Victoria, R. Herrero, C. Dominguez, I. Anton, G. Sala, F. Dimroth, S. Kurtz, G. Sala, and A. W. Bett, “Effects of Temperature on Hybrid Lens Performance,” in *AIP Conference Proceedings*, vol. 1407, pp. 57–60, 2011.
- [58] “Norm iec 62108: Concentrator photovoltaic (cpv) modules and assemblies – design qualification and type approval,” tech. rep., International electrotechnical commission, Dec. 2007.
- [59] C. Domínguez and P. Besson, “On the sensitivity of 4 different CPV module technologies to relevant ambient and operation conditions,” in *AIP Conference Proceedings*, vol. 1626, pp. 308–312, 2014.
- [60] K. Araki and M. Yamaguchi, “Influences of spectrum change to 3-junction concentrator cells,” *Japan Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 75, pp. 707–714, 2003.
- [61] M. Victoria, S. Askins, R. Nuñez, C. Dominguez, R. Herrero, I. Anton, G. Sala, and J. M. Ruíz, “Tuning the current ratio of a CPV system to maximize the energy harvesting in a particular location,” in *AIP Conference Proceedings*, vol. 1556, pp. 156–161, 2013.
- [62] S. Askins, M. V. Pérez, R. Herrero, C. Domínguez, I. Anton, G. Sala, A. Coutinho, and J. C. Amador, “Optimizing CPV systems for thermal and spectral tolerance,” in *Proc. 27th European Photovoltaic Solar Energy Conf., Frankfurt, Germany*, pp. 194–198, 2012.

- [63] J. Leloux, D. Pachon, G. Sala, A. W. Bett, R. D. McConnell, G. Sala, and F. Dimroth, "Spectral Solar Radiation Measurements and Models for CPV Module Production Estimation," in *AIP Conference Proceedings*, vol. 1277, pp. 329–332, 2010.
- [64] C. Domínguez, S. Askins, I. Antón, and G. Sala, "Characterization of five CPV module technologies with the Helios 3198 solar simulator," in *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2009 34th IEEE*, pp. 001004–001008, IEEE, 2009.
- [65] M. Yandt, J. Cook, and K. Hinzer, "Shutter technique for noninvasive individual cell characterization in sealed cpv modules," *IEEE Journal of photovoltaics*, vol. 5, pp. 691–698, 2015.
- [66] M. Muller, C. Deline, B. Marion, S. Kurtz, and N. Bosco, "Determining Outdoor CPV Cell Temperature," in *AIP Conference Proceedings*, vol. 1407, pp. 331–335, 2011.
- [67] S. R. T. Freitas, "Energy yield of CPV modules with different cell technologies," 2013.
- [68] C. Dominguez, I. Anton, , and G. Sala, "Solar simulator for concentrator photovoltaic systems," *Optics Express*, vol. 16, pp. 14894–14901, 2008.
- [69] M. Muller, S. Kurtz, and J. Rodriguez, "Procedural considerations for CPV outdoor power ratings per IEC 62670," in *AIP Conference Proceedings*, vol. 1556, pp. 125–128, 2013.
- [70] M. Muller, B. Marion, J. Rodriguez, S. Kurtz, F. Dimroth, S. Kurtz, G. Sala, and A. W. Bett, "Minimizing variation in outdoor CPV power ratings," in *AIP Conference Proceedings-American Institute of Physics*, vol. 1407, p. 336, 2011.
- [71] P. Besson, C. Dominguez, and M. Baudrit, "Contributions to reproducible cpv outdoor power ratings," in *AIP Conference Proceedings*, vol. 1616, pp. 321–327, 2014.
- [72] S. Fafard, C. E. Valdivia, and S. G. Wallace, "The "fill-factor bias measurement" for advanced triple-junction solar cell characterization and quality control," in *AIP Conference Proceedings*, vol. 1477, pp. 118–121, 2012.
- [73] P. Espinet-Gonzalez, R. Mohedano, I. Garcia, P. Zamora, I. Rey-Stolle, P. Benitez, C. Algora, A. Cvetkovic, M. Hernandez, J. Chaves, J. C. Minano, and Y. Li, "Triple-junction solar cell performance under Fresnel-based concentrators taking into account chromatic aberration and off-axis operation," in *AIP Conference Proceedings*, vol. 1477, pp. 81–84, 2012.

- [74] G. Peharz, J. Ferrer-Rodríguez, and A. W. Bett, “Shaping the angular divergence at sun simulators for concentrator modules,” pp. 823–826, 2009.
- [75] C. Gueymard, “Spectral circumsolar radiation contribution to cpv,” *AIP Conference Proceedings*, vol. 1277, pp. 316–319, 2010.
- [76] P. Blanc and et al., “Direct normal irradiance related definitions and applications: The circumsolar issue,” *Solar Energy*, vol. 110, pp. 561–577., 2014.
- [77] *Spectral Circumsolar Radiation Contribution To CPV*, 2010.
- [78] A. Luque and S. Hegedus, eds., *Handbook of photovoltaic science and engineering*. Hoboken, NJ: Wiley, 2003.
- [79] D. King, W. Boyson, and J. Kratochvil, “Photovoltaic array performance model,” tech. rep., Sandia National Laboratories, Aug. 2004.
- [80] W. Bagiński, G. S. Kinsey, M. Liu, A. Nayak, and V. Garboushian, “Open circuit voltage temperature coefficients vs. concentration: Theory, indoor measurements, and outdoor measurements,” in *AIP Conference Proceedings*, vol. 1477, pp. 148–151, AIP Publishing, Oct. 2012.
- [81] G. Peharz, J. P. Ferrer Rodríguez, G. Siefert, and A. W. Bett, “Investigations on the temperature dependence of CPV modules equipped with triple-junction solar cells,” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 19, pp. 54–60, Jan. 2011.
- [82] C. Dominguez and P. Besson, “Simple lens temperature estimation for improving cpv power rating performance procedures and energy yield estimations,” in *AIP Conference Proceedings*, vol. 1679, pp. 321–327, 2015.
- [83] C. Dominguez and P. Besson, “Simple lens temperature estimation for improving cpv power rating procedures and energy yield estimations,” in *Oral presentation at CPV11 conference*, 2015.
- [84] W. Nusselt and W. Jürges, “Die kühlung einer ebenen wand durch einen luftstrom (the cooling of a plane wall by an air flow),” *Gesundheits Ingenieur*, vol. 52, p. 641–642, 1922.
- [85] W. Guter and A. Bett, “Characterization of tunnel diodes and multi-junction solar cell,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 53(9), pp. 2216–2222, 2006.

- [86] P. Espinet, I. García, I. Rey-Stolle, C. Algora, and M. Baudrit, “Distributed simulation of real tunnel junction effects in multi-junction solar cells,” in *AIP Proceedings of CPV6 conference*, pp. 54–58(1277), 2010.
- [87] L. James, “Effects of concentrator chromatic aberration on multi-junction cells,” *Proceedings of the 24th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, vol. 2, pp. 1799 – 1802, 1994.
- [88] R. Winston, J. Miñano, and P. Benitez, *Nonimaging Optics*. Elsevier Academic Press, 2005.
- [89] B. Galiana, C. Algora, S. Member, I. Rey-stolle, and I. G. Vara, “A 3-D Model for Concentrator Solar Cells Based on Distributed Circuit Units,” no. December, pp. 2552–2558, 2005.
- [90] K. Nishioka, T. Takamoto, T. Agui, M. Kaneiwa, Y. Uraoka, and T. Fuyuki, “Evaluation of InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cell and optimization of solar cell’s structure focusing on series resistance for high-efficiency concentrator photovoltaic systems,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 90, pp. 1308–1321, May 2006.
- [91] K. Nishioka, T. Takamoto, W. Nakajima, T. Agui, M. Kaneiwa, Y. Uraoka, and T. Fuyuki, “Analysis of triple-junction solar cell under concentration by SPICE,” in *Photovoltaic Energy Conversion, 2003. Proceedings of 3rd World Conference on*, vol. 1, pp. 869–872, IEEE, 2003.
- [92] Y. Ota and K. Nishioka, “Two-Dimensional Mapping of Power Consumption Due to Series Resistance Evaluated by Simulator for Concentrator Photovoltaic Module,” *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 51, p. 02BP03, Feb. 2012.
- [93] P. Sharma, A. W. Walker, J. F. Wheeldon, K. Hinzer, and H. Schriemer, “Enhanced Efficiencies for High-Concentration, Multijunction PV Systems by Optimizing Grid Spacing under Nonuniform Illumination,” *International Journal of Photoenergy*, vol. 2014, pp. 1–7, 2014.
- [94] H. Cotal and R. Sherif, “The effects of chromatic aberration on the performance of gainp/gaas/ge concentrator solar cells from fresnel optics,” in *Conference Record of the Thirty-first IEEE PVSC*, pp. 747–750, 2005.
- [95] I. Garcia, P. Espinet-Gonzalez, I. Rey-Stolle, E. Barrigon, C. Algora, F. Dimroth, S. Kurtz, G. Sala, and A. W. Bett, “Extended Triple-Junction Solar Cell 3d Distributed

- Model: Application to Chromatic Aberration-Related Losses,” in *AIP Conference Proceedings*, vol. 1407, pp. 13–16, 2011.
- [96] S. Jones, J. Gruetzner, R. Houser, R. Edgar, and T. Wendelin, “Vshot measurement uncertainty and experimental sensitivity study,” in *Proceedings of the 32nd IECE conference*, pp. 1877–1882 vol.3, 1997.
- [97] F. Arqueros, A. Jimenez, and A. Valverde, “A novel procedure for the optical characterization of solar concentrators,” *Solar Energy*, vol. 75, pp. 135–142, 2003.
- [98] D. Chemisana, A. Vossier, L. Pujol, A. Perona, and A. Dollet, “Characterization of Fresnel lens optical performances using an opal diffuser,” *Energy Conversion and Management*, vol. 52, pp. 658–663, Jan. 2011.
- [99] I. Antón, C. Domínguez, M. Victoria, R. Herrero, S. Askins, and G. Sala, “Characterization Capabilities of Solar Simulators for Concentrator Photovoltaic Modules,” *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 51, p. 10ND12, Oct. 2012.
- [100] W. Smith, *Modern Optical Engineering; The Design of Optical Systems, 3rd Edition*. SPIE Press, 2000.
- [101] P. Benítez, J. C. Miñano, P. Zamora, R. Mohedano, A. Cvetkovic, M. Buljan, J. Chaves, and M. Hernández, “High performance Fresnel-based photovoltaic concentrator,” *Optics express*, vol. 18, no. 101, pp. A25–A40, 2010.
- [102] J. Klein, “Multispectral imaging and image processing,” in *IS&T/SPIE Electronic Imaging*, pp. 90190Q–90190Q, International Society for Optics and Photonics, 2014.
- [103] A. Mansouri, F. S. Marzani, and P. Gouton, “Development of a protocol for CCD calibration: application to a multispectral imaging system,” *International Journal of Robotics and Automation*, vol. 20, no. 2, pp. 94–100, 2005.
- [104] G. Healey and R. Kondepudy, “Radiometric ccd camera calibration and noise estimation,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 16(3), pp. 267–276, 1994.
- [105] J. Mullikin, L. Van Vliet, and H. Netten, “Methods for ccd camera characterization,” in *SPIE proceedings*, vol. 16(3), pp. 73–84, vol. 2173, 1994.
- [106] J. Stover, *Optical scattering*. SPIE Press, 1995.

- [107] A. Maradudin, “Multiple scattering effects in rough surface scattering: Designer surfaces,” tech. rep., Winter school, Ioffe Institute, 2004.
- [108] H. Baltes, *Inverse scattering problems in optics*. ed. H. P. Baltes, 1980.
- [109] C. Rapp, V. Straub, D. van Rooyen, W. Thor, G. Siefer, and A. Bett, “Optical investigation of a sun simulator for concentrator pv applications,” *Optic express*, vol. 23(19), pp. 1270–1279, 2015.
- [110] H. Ries, J. Gordon, and M. Lasken, “High-flux photovoltaic solar concentrators with kaleidoscope-based optical designs,” *Solar Energy*, vol. 60(1), pp. 11–16, 1997.
- [111] K. Araki, M. Kondo, H. Uozumi, and M. Yamaguchi, “Experimental proof and theoretical analysis on effectiveness of passive homogenizers to 3j concentrator solar cells,” in *Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, pp. 853–856, 2003.
- [112] P. Benitez, J. C. Minano, P. Zamora, M. Hernandez, and A. Cvetkovic, “Köhler concentrator,” 08 2011.
- [113] P. Zamora, P. Benitez, R. Mohedano, A. Cvetkovic, J. Vilaplana, Y. Li, M. Hernández, J. Chaves, and J. Minano, “Experimental characterization of fresnel-köhler concentrators,” *Journal of Photonics for Energy*, vol. 021806-1(2), pp. 11–16, 2012.
- [114] G. Siefer, C. Baur, M. Meusel, F. Dimroth, A. Bett, and W. Warta, “Influence of the simulator spectrum on the calibration of multi junction solar cells under concentration,” in *Proceedings of the 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 836–839, 2002.
- [115] W. E. McMahon, K. E. Emery, D. J. Friedman, L. Ottoson, M. S. Young, and J. S. Ward, “Fill factor as a probe of current-matching for gainp2/gaas tandem cells in a concentrator system during outdoor operation,” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 16(3), pp. 213–224, 2008.
- [116] V. M. Andreev, V. Grilikhes, A. Soluyanov, N. Timoshina, E. Vlasova, and M. Shvarts, “Weakening of the chromatic aberration negative effect on the performance of concentrator and multi-junction solar cells,” in *Proceedings of 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, pp. 123–131, 2008.
- [117] H. Cotal and R. Sherif, “The effects of chromatic aberration on the performance of gainp/gaas/ge concentrator solar cells from fresnel optics,” in *Proceedings of the 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 747–750, 2005.

- [118] R. Herrero Martin, S. Askins, M. Victoria, C. Dominguez, I. Anton, and G. Sala, “Thermal effects and other interesting issues with cpv lenses,” 2012.
- [119] T. Schult, M. Neubauer, Y. Bassler, P. Nitz, and A. Gombert., “Temperature dependence of fresnel lenses for concentrating photovoltaics,” in *2nd International Workshop on Concentrating Photovoltaic Optics and Power*, 2009.
- [120] J. M. Cariou, J. Dugas, L. Martin, and P. Michel, “Refractive-index variations with temperature of pmma and polycarbonate,” *Applied Optics*, vol. 25(3), pp. 334–336, 1986.
- [121] S. Philipps, G. Peharz, R. Hoheisel, T. Hornung, N. Al-Abbadi, F. Dimroth, and A. Bett, “Energy harvesting efficiency of III–V triple-junction concentrator solar cells under realistic spectral conditions,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 94, no. 5, pp. 869–877, 2010.
- [122] W. E. McMahon, S. Kurtz, K. Emery, and M. Young, “Criteria for the design of GaInP/GaAs/Ge triple-junction cells to optimize their performance outdoors,” in *Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2002, pp. 931–934, May 2002.
- [123] M. Steiner, G. Siefer, A. Bösch, T. Hornung, and A. W. Bett, “Realistic power output modeling of CPV modules,” vol. 1477, pp. 309–312, Oct. 2012.

FOLIO ADMINISTRATIFTHÈSE SOUTENUE DEVANT L'INSTITUT NATIONAL  
DES SCIENCES APPLIQUÉES DE LYON

NOM : BESSON

DATE de SOUTENANCE : 04/02/2016

(avec précision du nom de jeune fille, le cas échéant)

Prénoms : Pierre

**TITRE : Compréhension des comportements électrique et optique des modules photovoltaïques à haute concentration, et développement d'outils de caractérisations adaptés**

NATURE : Doctorat

Numéro d'ordre : 2016LYSEI013

Ecole doctorale : Electronique, Electrotechnique et AutomatiqueSpécialité : Electronique, micro et nano-électronique, optique et laserRESUME :

Le travail de thèse effectué a pour objectif d'amener vers une meilleure compréhension des comportements électrique et optique des modules CPV, dans des conditions environnantes variables.

La première partie est consacrée à l'étude de la performance des modules en conditions réelles de fonctionnement. Quatre technologies de module, toutes équipées de cellules triple-jonction, mais de concentrateurs optiques différents, ont été testées en extérieur sur des périodes de un mois à deux ans. Le banc d'acquisition du CEA-INES a permis de suivre les performances électriques (courbes IV) et les paramètres ambiants (ensoleillement, température, indicateur de spectre) sur cette période. Les résultats montrent que la sensibilité à la température de lentille, la température de cellule et au spectre incident varie selon le type d'architecture optique. La sensibilité la plus importante à la température de lentille a été obtenue pour un dispositif sans optique secondaire. Le coefficient en température de la tension Voc a également été calculé et varie entre les technologies. Enfin, les variations importantes de facteur de forme avec le spectre incident observées pour une technologie, mettent en évidence la nécessité d'étudier les phénomènes de non-uniformités d'irradiance sur la cellule.

Dans une deuxième partie, le développement d'un banc de test en intérieur permettant de mesurer les performances électriques et optiques est présenté. Ce banc a pour objectif de permettre la reproduction des conditions réelles de fonctionnement des modules de façon contrôlée en intérieur, afin d'analyser leur comportement. Un système d'imagerie, couplé à un jeu de filtres optiques, est utilisé pour déterminer la distribution spatiale et spectrale d'irradiance sur la cellule. Associé à un traceur de courbes IV, il vise à caractériser les effets de flux non-uniformes sur la cellule. Le banc de mesure a pour avantage de découpler les paramètres d'études, telles que la température de la lentille et la température de la cellule, et permet ainsi de décorréler leurs effets respectifs sur l'ensemble optique-cellule, ce qui n'est que difficilement possible sur des mesures en extérieur. Le procédé de calibration et la validation du dispositif sont détaillés dans le manuscrit.

Enfin, dans une dernière partie, le banc développé est utilisé pour caractériser trois différents dispositifs CPV : un sans optique secondaire, et deux avec des optiques secondaires différentes. Les impacts de la distance lentille-cellule et de la température de lentille sur les performances de la cellule sont quantifiés optiquement et électriquement. Les résultats montrent comment ces paramètres modifient la distribution de densités de courant des sous-cellules, et donc le comportement électrique du dispositif. Ils soulignent plus spécifiquement comment les non-uniformités spectrales et spatiales affectent les performances de la cellule pour les différents concentrateurs. Le dispositif sans optique secondaire montre une sensibilité importante à la température de la lentille et la distance optique primaire-cellule, qui se traduit par une perte de production d'énergie dans des conditions réelles.

MOTS-CLÉS : Energie solaire, photovoltaïque, concentrateurs, CPV, cellule multi-jonctions, instrumentation, mesure et métrologie

Laboratoire (s) de recherche :

Institut des Nanotechnologies de Lyon

Laboratoire du Photovoltaïque à Concentration, CEA-INES

Directeur de thèse: Mustapha LEMITI, Professeur INSA LyonPrésident de jury :Composition du jury :

A. DOLLET	Directeur de recherche CNRS-PROMES	Rapporteur
A. KAMINSKI	Professeur IMEP-LAHC, Grenoble-INP	Rapporteur
C. DOMINGUEZ	Maître de conférences Madrid-UPM	Examineur
Y. JOURLIN	Professeur LHC-Univ. St-Etienne	Examineur
A. VOSSIER	Chargé de recherche CNRS-PROMES	Examineur
M. LEMITI	Professeur INL-INSA Lyon	Directeur
M. BAUDRIT	Directeur de laboratoire CEA-INES	Encadrant / jury invité