

Analyse des performances d'un système de concentrateurs photovoltaïques prototypes en utilisant deux sites de tests différents

par

Frederick Carle

Thèse soumise à la
Faculté des études supérieures et postdoctorales
dans le cadre des exigences
du programme de Maîtrise en génie électrique et génie informatique

Institut de génie électrique et informatique d'Ottawa-Carleton
Faculté de génie
Université d'Ottawa

© Frederick Carle, Ottawa, Canada, 2014

Résumé

Les concentrateurs photovoltaïques sont parmi les technologies d'énergies solaires les plus prometteuses. Ils ont une efficacité allant jusqu'à deux fois celle des panneaux photovoltaïques conventionnels. Malgré les avancements en recherche et développement, les concentrateurs photovoltaïques demeurent des systèmes relativement complexes. Cette même complexité laisse place à l'innovation et à la possibilité de réduire considérablement les coûts de fabrication.

Dans le cadre de cette thèse, deux sites de tests sont développés et déployés pour faire l'analyse des performances des concentrateurs photovoltaïques plats. Quatre designs de cellules solaires sont caractérisés en laboratoire et incorporés dans les panneaux prototypes pour ensuite être individuellement étudiés. Les quatre designs sont ensuite comparés l'un à l'autre, et selon leurs emplacements, pour comprendre comment le design de la cellule affecte la performance des panneaux.

Déclaration d'originalité

Sauf sur indication contraire, les résultats présentés dans cette thèse ont été obtenus par l'auteur durant la complétion d'une maîtrise en génie électrique sous la supervision du Dr. Karin Hinzer. Ils sont, au meilleur de ses connaissances, originaux.

De plus, l'auteur a participé activement au développement et au déploiement des sites de tests à l'œuvre dans cet ouvrage.

Remerciements

Je tiens à remercier Karin Hinzer, ma directrice de thèse pour sa motivation, son dévouement et son appui pendant mon séjour au Sunlab et pendant le développement de cette thèse.

J'aimerais aussi remercier Joan Haysom pour avoir fait un travail formidable avec la gestion de ce géant projet qui englobait mon travail de thèse.

Un gros merci aussi à tous mes collègues du Sunlab pour leur support à tous les niveaux et pour avoir fait de mon expérience dans l'équipe, une expérience mémorable.

J'aimerais remercier mes parents sans qui je ne serais pas la personne que je suis devenue. Vous m'avez toujours supporté, motivé et poussé à ne jamais lâcher et j'en serai éternellement reconnaissant!

J'aimerais remercier ma copine Émilie Carter pour avoir été à mes côtés (parfois physiquement, parfois virtuellement) malgré les hauts et les bas, malgré les longues soirées occupées à travailler et malgré toutes les émotions.

Я хотел бы дать особую благодарность моему хорошему другу Viktor Tatsiankou ибо без него я бы не завершил этот тезис. Спасибо за то, что слушать мои жалобы и за то, что вернули меня к земле, когда я нуждался в нем. Спасибо за помощь, и я всегда буду благодарен за все, что вы сделали.

Finalement, j'aimerais remercier *Morgan Solar Inc.* de m'avoir permis d'utiliser leur technologie et d'avoir répondu aux demandes tout au long de cette thèse.

Table des matières

Liste des tableaux	viii
Liste des figures	ix
1 Introduction	1
1.1 Survol	1
1.2 Problématique	2
1.3 Objectifs	3
1.4 Plan de la thèse	3
2 Théorie	5
2.1 La ressource solaire	5
2.1.1 Le spectre lumière	6
2.1.2 La masse d'air	8
2.1.3 L'orbite de la terre	12
2.2 Système concentrateur	17

2.2.1	Les systèmes optiques	17
2.3	Théorie des cellules photovoltaïques	19
2.3.1	Physique des semi-conducteurs	21
2.3.2	La bande interdite	24
2.3.3	L'impact de la bande interdite sur l'efficacité des photovoltaïques	25
2.3.4	La jonction $p-n$	29
2.3.5	L'efficacité quantique	31
2.3.6	Le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale	32
2.3.7	Le circuit équivalent d'une cellule solaire non-idéale	34
2.3.8	Le point maximum de puissance	35
2.3.9	Cellule multi-jonctions	37
3	Montage de l'expérience	38
3.1	Laboratoire intérieur	39
3.1.1	Mesure d'efficacité quantique	39
3.2	Site de tests extérieur	40
3.2.1	Enregistreur de données	41
3.2.2	Pyrhéliomètre	42
3.2.3	Spectroradiomètre	43
3.2.4	Suiveurs solaires	45
3.2.5	Panneau prototype	46

3.2.6	Unité multiplexeur	48
3.2.7	Unité de source et mesures	49
4	Simulations et analyse de données	51
4.1	Mesures de courbes $I-V$	51
4.2	Simulations	53
4.2.1	Simulation du spectre solaire à l'aide du modèle SMARTS	53
4.2.2	Simulation du courant de court-circuit	56
4.3	Analyse de données	62
4.3.1	Courbes $I-V$	62
4.3.2	Courant de courts-circuits	65
4.3.3	Comparaison des courants de courts-circuits simulés et mesurés	66
5	Conclusions et recommandations	73
5.1	Conclusion	73
5.2	Travaux subséquents	74
	References	75

Liste des tableaux

- 2.1 Une portion du tableau périodique est présenté ici avec, en caractère gras, les éléments les plus importants pour la fabrication de cellules solaires [2]. . 21

Table des figures

2.1	Distribution du rayonnement d'un corps noir parfait à trois différentes températures.	7
2.2	La quantité d'atmosphère (masse d'air) dont les rayons du soleil doivent traverser pour atteindre la surface de la terre est fonction de la position du soleil par rapport à la location terrestre sous investigation.	9
2.3	Comparaison du spectre de rayonnement d'un corps noir à 5800K (au même diamètre que le soleil lorsque celui-ci est vu de la terre), de la photosphère du soleil telle qu'observée juste à l'extérieur de l'atmosphère terrestre (AM0) et de la photosphère du soleil après avoir passé à travers 1.5 fois l'épaisseur de l'atmosphère terrestre (AM1.5D).	10
2.4	Géométrie à utiliser pour calculer l'épaisseur de la masse d'air en utilisant l'ombrage d'un objet auquel on connaît la hauteur.	11
2.5	On démontre ici les régions où différents composants atmosphériques absorbent certaines parties du spectre lumière. Ceci explique en partie les différences d'amplitude du rayonnement aux différentes longueurs d'ondes entre le spectre lumière AM0 à l'extérieur de l'atmosphère et AM1.5D à la surface de la terre.	13

2.6	L'inclinaison de l'axe de rotation de la terre par rapport au plan de l'écliptique est la cause des différentes saisons que nous connaissons. On remarque également qu'au solstice d'hiver, malgré les températures beaucoup plus froides dans l'hémisphère nord, la terre y est plus près du soleil.	15
2.7	L'angle d'altitude du soleil au midi solaire.	16
2.8	L'optique guide de lumière <i>Sun Simba</i> du partenaire industriel en comparaison avec les technologies compétitives de concentrateurs photovoltaïques. On voit ici le profil beaucoup plus mince du <i>Sun Simba</i> ce qui lui permet d'avoir un angle d'acceptance plus grande ainsi qu'un besoin réduit de matériel pour la construction du produit [12].	18
2.9	Graphique des efficacités de cellules de recherche pour différentes technologies photovoltaïques à travers les années. On remarque que les cellules multi-jonctions en concentration atteignent des efficacités près de 2 fois celle des cellules Silicium cristallin [14].	20
2.10	Shéma représentant les liaisons covalente dans un réseau cristallin de silicium. Les lignes rouges représentent les électrons étant partagé par les différents atomes de silicium représenté par les boule bleu.	22
2.11	Les bandes d'énergies pour (a) un conducteur et (b) un semi-conducteur. On voit que les conducteurs ont la bande de conduction partiellement rempli ce qui leur permet de conduire facilement du courant électrique. Les semi-conducteurs on pour leur part une bande de conduction vide à température de zéro Kelvin et sont donc dans cette état des isolateurs [2].	24

2.12	Les impacts de la bande interdite du silicium sont ici démontrés pour un spectre solaire AM1.5D. Les photons ayant une longueur d’onde plus longue que $1.11 \mu m$ n’ont pas assez d’énergie pour exciter les électrons ce qui engendre une perte de 20.2% et ceux ayant une longueur d’onde plus courte ne peuvent utiliser la totalité de leur énergie, ce qui résulte en 30.2% de perte additionnelle.	27
2.13	Illustration de la séparation de charge dans une jonction p-n sans polarisation externe, ce qui engendre un champs électrique interne.	29
2.14	On démontre ici l’effet de l’intensité du rayonnement du soleil sur la courbe $I-V$ d’une cellule photovoltaïque. On remarque que le photocourant augmente proportionnellement avec l’intensité du rayonnement tandis que la tension de court-circuit augmente de façon logarithmique.	31
2.15	Un circuit équivalent d’une cellule photovoltaïque qui est constitué d’une source de courant idéale et d’une diode en parallèle [2].	33
2.16	Un circuit équivalent plus complexe d’une cellule photovoltaïque incluant les résistances série et parallèle.	34
2.17	La courbe $I-V$ et la courbe de puissance pour une cellule photovoltaïque. Si la courbe de puissance est définie dans les conditions standard d’opération, le point maximum de puissance identifie la tension, le courant et la puissance nominale pour la cellule.	36
2.18	Circuit équivalent d’une cellule triple-jonction ainsi que le schéma simplifié de la structure de celle-ci.	37

3.1	Appareil de mesure d'efficacité quantique <i>Oriel IQE200</i> assemblé par l'étudiant au doctorat, Olivier Thériault.	39
3.2	Diagramme bloc démontrant les différentes composantes du système.	40
3.3	L'enregistreur de données par CR1000 par <i>Campbell Scientific</i> au site de tests de l'Université d'Ottawa. La photo démontre que plusieurs des ports d'entrées et sorties digitales et analogues de l'appareil sont utilisés.	41
3.4	On voit ici le pyréliomètre pointant vers le soleil un matin ensoleillé au site de tests de l'université d'Ottawa.	42
3.5	Le tube de collimation du spectroradiomètre du site de tests de l'Université d'Ottawa permet à seulement la lumière perpendiculaire directe du soleil d'être mesurée par l'instrument.	44
3.6	Le suiveur solaire <i>Golden Sun GS3500</i> du site de tests de l'Université d'Ottawa est ici présenté. On remarque la grande surface disponible pour l'installation de panneaux solaires.	45
3.7	Le suiveur solaire <i>Savanna</i> du partenaire industriel au site de tests de Mojave. On remarque que chacune des quatre sections du cadre supporte un seul panneau. On voit aussi, du côté gauche de la photo, le panneau prototype à l'étude.	46
3.8	Panneau prototype : photo 1 (à gauche) - vue de derrière et photo 2 (à droite) - vue de devant. On voit chacune des 30 cellules connectées individuellement par des câbles PV, qui eux vont se connecter dans la boîte grise présentée (la boîte contenant l'unité multiplexeur) dans la photo de droite. Ce panneau est installé au site de tests de l'Université d'Ottawa	47

3.9	Répartition des différents types de cellules photovoltaïques pour les panneaux prototypes des sites de tests d'Ottawa et de Mojave. Les couleurs utilisées pour représenter les types de cellules sur les panneaux seront aussi utilisées pour représenter les types de cellules dans les figures du chapitre 4	47
3.10	Le multiplexeur du site de tests de Mojave connecté par 60 câbles PV aux 30 cellules correspondante du panneau prototype. On remarque aussi les 2 modules <i>SuperLogics 8043</i> qui sont connectés à l'unité multiplexeur pour le contrôle des relais qui serviront à isoler une cellule du panneau prototype pour y mesurer sa courbe <i>I-V</i> .	48
3.11	L'unité de source et mesures du site de tests de Mojave au cours de l'installation du système en mai 2013. L'instrument mesure la courbe <i>I-V</i> des cellules photovoltaïques du panneau prototype [13].	50
4.1	Courbe <i>I-V</i> pour une cellule photovoltaïque mesurée en laboratoire avec une source de 1x l'intensité du soleil avec un spectre de rayonnement AM1.5G à 25°C. On remarque l'effet d'une résistance parasitique en parallèle.	52
4.2	Courbe <i>I-V</i> pour une cellule photovoltaïque mesurée en laboratoire avec une source de 1x l'intensité du soleil avec un spectre de rayonnement AM1.5G à 25°C. Cette courbe ne comporte un minimum de résistance parasitique série et parallèle.	52
4.3	Spectre de rayonnement perpendiculaire direct simulé pour Ottawa le 2 avril 2014 à 15h40 en utilisant le modèle SMARTS. La puissance totale pour ce spectre est d'environ 950 W/m ² /nm.	55

4.4	Simulation du spectre de rayonnement pour Ottawa le 23 mars 2014. Cette figure démontre le changement du spectre en intervalles de 15 minutes allant de 8h20 (AM 4.34) en matinée (courbe rouge) jusqu'à 13h15 (AM 1.40) ce qui correspond approximativement au midi solaire (courbe violette).	55
4.5	Courbe d'efficacité quantique pour une des cellules photovoltaïques à triple-jonction. On remarque trois différentes courbes. Celle le plus à gauche représente la sous-cellule supérieure, celle du milieu représente la sous-cellule intermédiaire et celle de droite représente la sous-cellule inférieure.	57
4.6	Courbe d'efficacité quantique pour les quatre types de cellules à l'étude. Les courbes vertes et bleues représentent les types 3 et 4 respectivement. On remarque que ces dernières ont la courbe d'efficacité quantique de leurs sous-cellules inférieures déplacée vers la gauche. Cette caractéristique fait en sorte que la sous-cellule inférieure des types 3 et 4 produira un courant plus élevé que celle des types 1 et 2.	57
4.7	Densité de courant pour une cellule de type 1 à l'étude. Chacune des sous-cellules est représentée par une couleur différente. La courbe bleue représente la sous-cellule supérieure, la courbe verte représente la sous-cellule intermédiaire et la courbe rouge représente la sous-cellule inférieure. On remarque en arrière-plan une représentation de la courbe du spectre de rayonnement utilisée pour produire la courbe de densité de courant de la cellule.	58

4.8	Densité de courant pour deux temps différents de la journée du 23 mars 2014. Les courbes de couleurs vives représentent 13h10 (AM 1.40) et les courbes de couleurs pâles représentent 8h20 (AM 4.34). On remarque en arrière-plan les courbes du spectre de rayonnement correspondantes. Il est intéressant de remarquer la grandeur de variation des courbes bleues par rapport aux courbes vertes et rouges.	59
4.9	Cellule de type 1 - Courbes de courants de chacune des sous-cellules pour Ottawa et Mojave.	60
4.10	Cellule de type 2 - Courbes de courants de chacune des sous-cellules pour Ottawa et Mojave.	60
4.11	Cellule de type 3 - Courbes de courants de chacune des sous-cellules pour Ottawa et Mojave.	61
4.12	Cellule de type 4 - Courbes de courants de chacune des sous-cellules pour Ottawa et Mojave.	61
4.13	Production de courant de court-circuit pour chacun des quatre type de cellules photovoltaïques. L'attribution des couleurs des courbes est telle qu'à la figure 3.9. On peut observer le meilleur rendement des cellules de type 1 et 2.	62
4.14	Ottawa - Courbes $I-V$ des cellules photovoltaïques du panneau prototype au midi solaire. On remarque une variation d'environ 20% dans les courants de court-circuits.	63

4.15 Mojave - Courbes I - V des cellules photovoltaïques du panneau prototype au midi solaire. On remarque une variation d'environ 15% dans les courants de court-circuits.	64
4.16 Courbe de courants de courts-circuits pour une cellule représentative de la moyenne pour chacun des quatre types de cellules solaires à Ottawa et dans le désert de Mojave en fonction de l'heure de la journée.	66
4.17 Mojave, Type 1 - Courbes de courant de court-circuit simulées de chacune des sous-cellules en comparaison avec une courbe de courant de court-circuit mesurée en fonction de l'heure de la journée.	68
4.18 Ottawa, Type 1 - Courbes de courant de court-circuit simulées de chacune des sous-cellules en comparaison avec une courbe de courant de court-circuit mesurée en fonction de l'heure de la journée.	69
4.19 Mojave, Type 2 - Courbes de courant de court-circuit simulées de chacune des sous-cellules en comparaison avec une courbe de courant de court-circuit mesurée en fonction de l'heure de la journée.	69
4.20 Ottawa, Type 2 - Courbes de courant de court-circuit simulées de chacune des sous-cellules en comparaison avec une courbe de courant de court-circuit mesurée en fonction de l'heure de la journée.	70
4.21 Mojave, Type 3 - Courbes de courant de court-circuit simulées de chacune des sous-cellules en comparaison avec une courbe de courant de court-circuit mesurée en fonction de l'heure de la journée.	70

4.22	Ottawa, Type 3 - Courbes de courant de court-circuit simulées de chacune des sous-cellules en comparaison avec une courbe de courant de court-circuit mesurée en fonction de l'heure de la journée.	71
4.23	Mojave, Type 4 - Courbes de courant de court-circuit simulées de chacune des sous-cellules en comparaison avec une courbe de courant de court-circuit mesurée en fonction de l'heure de la journée.	71
4.24	Ottawa, Type 4 - Courbes de courant de court-circuit simulées de chacune des sous-cellules en comparaison avec une courbe de courant de court-circuit mesurée en fonction de l'heure de la journée.	72
4.25	Comparaison des courants de court-circuits mesurés et simulés pour Ottawa et le désert du Mojave en fonction de l'heure de la journée. Chacun des types de cellules est représenté.	72

Chapitre 1

Introduction

1.1 Survol

Dans le cadre de cette thèse, un système d'analyse de performance de concentrateur photovoltaïque (CPV) est déployé et utilisé dans le but de comparer et de quantifier les performances de panneaux prototypes avec différents designs de cellules photovoltaïques à triple-jonctions. Le système est principalement conçu d'un multiplexeur pour individuellement sélectionner la cellule à analyser, d'une unité de source et mesure, d'un enregistreur de données relié à une base de données ainsi que d'appareils périphériques mesurant différents paramètres environnementaux.

Depuis 2010, le groupe du Sunlab travaille sur le développement d'un tel système dans le but d'opérer un site de test. Le laboratoire est basé à l'université d'Ottawa et se spécialise dans l'analyse et la caractérisation de technologies CPV. Le site à été construit en collaboration Morgan Solar Inc. (MSI), un partenaire industriel. C'est une compagnie de Toronto qui développe des panneaux concentrateurs photovoltaïques avant-gardistes. Depuis son

inauguration en 2011, le site a fait l'objet de plusieurs améliorations et expansions. Ce sont les différentes évolutions de la technologie de MSI qui sont utilisées comme spécimens à l'étude et plus précisément la troisième génération qui sera analysée dans ce document. Ce sont mes prédécesseurs qui ont eu la chance de travailler avec les premières générations. À travers les différentes évolutions, beaucoup d'améliorations ont pu être observées au niveau de la robustesse des matériaux utilisés et de la qualité de fabrication générale des prototypes. Avec la plus récente génération, MSI cherche à démontrer la fiabilité du produit ainsi qu'à évaluer les performances de leurs systèmes sous différents environnements et positions géographiques. Ils utilisent, pour ce faire, différents designs de cellules à triple-jonctions.

1.2 Problématique

Les concentrateurs photovoltaïques sont bien connus pour récolter seulement la portion perpendiculaire directe de la ressource solaire. L'environnement dans lequel ils opèrent dicte la qualité et la quantité de la ressource solaire, qui elle, varie avec le temps et la position géographique [1]. Une étude préliminaire conduite par le personnel du partenaire industriel a déterminé qu'en changeant le design de la cellule triple-jonction, notamment les plages d'absorptions des jonctions, il serait possible d'optimiser les performances d'un système concentrateur photovoltaïque pour son emplacement. Quatre designs de cellules triple-jonctions ont donc été sélectionnés dans le but de démontrer empiriquement les variations au niveau de la performance des prototypes de troisième génération du partenaire industriel. Comme plusieurs pays à travers le monde ont des programmes pour accélérer la venue des énergies renouvelables, il est possible que le système soit appelé à opérer partout sur la planète. Il est donc primordial de comprendre et d'analyser correctement les

différents facteurs qui entrent en jeu. Les principaux enjeux de recherche et développement concernent le design et l'implémentation de sites de tests qui permettraient d'exposer les systèmes CPV à un maximum de facteurs environnementaux différents. Le but est d'acquérir le plus de données possible, de les enregistrer et d'en faire l'analyse détaillée.

1.3 Objectifs

Le principal objectif de cette thèse de recherche est l'observation et l'analyse de données acquises par les multiples sites de tests, ainsi qu'une description de ces sites de tests et des différentes étapes de leur développement et déploiement. Une analyse des quatre designs de cellules photovoltaïques triples-jonctions sera aussi démontrée à partir d'une analyse en laboratoire utilisant des outils hautement sophistiqués. Cette analyse sera ensuite approfondie par une simulation des performances en utilisant une combinaison de modèles mathématiques. Les résultats obtenus pourront permettre de bien caractériser et modéliser les systèmes CPV de MSI pour non seulement en faire l'optimisation, mais aussi comprendre le comportement de ceux-ci dans des conditions variables.

1.4 Plan de la thèse

Cette thèse comporte cinq chapitres, et est divisée comme suit :

Le premier chapitre comporte un survol du projet de recherche ayant mené à cette thèse, la problématique associée à celle-ci ainsi que les objectifs en découlant.

Le deuxième chapitre est consacré à la théorie. On y trouvera une explication détaillée de la ressource solaire passant par la compréhension du spectre lumière jusqu'aux méthodes de

mesure de celui-ci. De plus, les cellules triple-jonctions seront étudiées et une présentation des facteurs économiques sera également incluse.

Le troisième chapitre portera sur les méthodes expérimentales utilisées pour l'achèvement de cette thèse. On passera à travers les études en laboratoire utilisant des outils hautement sophistiqués. Une présentation détaillée des systèmes d'acquisition de données et de toutes les composantes reliées. De plus on y trouvera une explication des étapes de développement et du déploiement de ces systèmes.

Le quatrième chapitre présente les méthodes de simulation et les modèles mathématiques associés ainsi que l'analyse des performances d'un système concentrateur photovoltaïque.

Le cinquième et dernier chapitre fait conclusion à cette thèse et propose des recommandations sur l'extension de la recherche.

Chapitre 2

Théorie

2.1 La ressource solaire

Bien que tous les éloges dans les médias soient données aux technologies utilisées pour convertir l'énergie solaire en électricité, il est crucial de ne pas sous-estimer le travail effectué par la communauté scientifique pour comprendre cette ressource qui nous vient du soleil. C'est cette compréhension qui a permis aux inventeurs et ingénieurs de développer des systèmes à la fine pointe de la technologie que nous utilisons aujourd'hui pour alimenter nos maison avec de l'énergie verte et renouvelable. En fait, le soleil convertit depuis environ 5 milliards d'années plus de 4 milliards de kilogrammes de masse par seconde. C'est ce que décrit la fameuse relation $E = mc^2$ de Einstein et on devrait voir le même résultat pour encore 4 ou 5 milliards d'années [2]. Non seulement est-il important de comprendre la complexité de la ressource solaire pour le développement des systèmes, il en est tout aussi important d'en faire une compréhension pour pouvoir réaliser une bonne analyse des performances de ceux-ci.

2.1.1 Le spectre lumière

Tout objet émet de l'énergie rayonnante dans une quantité qui est fonction de sa température. De façon usuelle, on décrit la quantité de rayonnement qu'un objet émet en le comparant à l'abstraction théorique appelée *corps noir*. Un *corps noir* est défini comme étant un émetteur et absorbeur parfait. Comme absorbeur parfait, il absorbe tout le rayonnement qui y est incident ce qui veut dire que rien est réfléchi et rien est transmis à travers celui-ci. Comme émetteur parfait, il rayonne plus d'énergie par unité de surface que tout autre objet réel à la même température. La longueur d'onde émise par un *corps noir* dépend de sa température tel que décrit par *la loi de Planck* [2] :

$$E_\lambda = \frac{3.74 \times 10^8}{\lambda^5 [\exp(\frac{14400}{\lambda T}) - 1]} \quad (2.1)$$

où E_λ est la puissance d'émission par unité de surface d'un corps noir ($W/m^2/\mu m$), T est la température du corps (K), et λ est la longueur d'onde (μm).

On peut déduire la puissance totale rayonnée en calculant l'air sous la courbe décrite par l'équation de *la loi de Planck* lorsque celle-ci est évaluée sur la plage de longueurs d'ondes sélectionnées. Ce total peut être exprimé convenablement en utilisant *la loi de radiation de Stefan-Boltzmann* :

$$E = \sigma AT^4 \quad (2.2)$$

où E est le taux global d'émission du corps noir (W), σ est la constante de *Stefan-Boltzmann* ($5.67 \times 10^{-8} W/m^2/K$), T est la température absolue du corps noir (K) et A est l'air de surface du corps noir (m^2).

Une autre fonction pratique de la courbe de rayonnement du corps noir est donnée par

la règle de déplacement de Wien qui nous dicte la longueur d'onde à laquelle le spectre atteint son point maximum :

$$\lambda_{max}(\mu m) = \frac{2898}{T(K)} \quad (2.3)$$

où la longueur d'onde est en microns (μm) et la température est en kelvins (K).

Il est estimé que la température à l'intérieur du soleil atteint des températures supérieures à 15 millions de degrés kelvins. Par contre, le rayonnement provenant de la surface de celui-ci a plutôt une distribution spectrale qui ressemble beaucoup plus à celle décrite par la loi de Planck pour un corps noir à 5800 K. Ce phénomène peut être expliqué par l'absorption du rayonnement provenant du cœur du soleil par une couche d'ions d'hydrogène plus près de la surface du soleil. L'énergie est transmise par convection à travers cette barrière optique et est ré émise par la surface extérieure du soleil appelée *photosphère* [3].

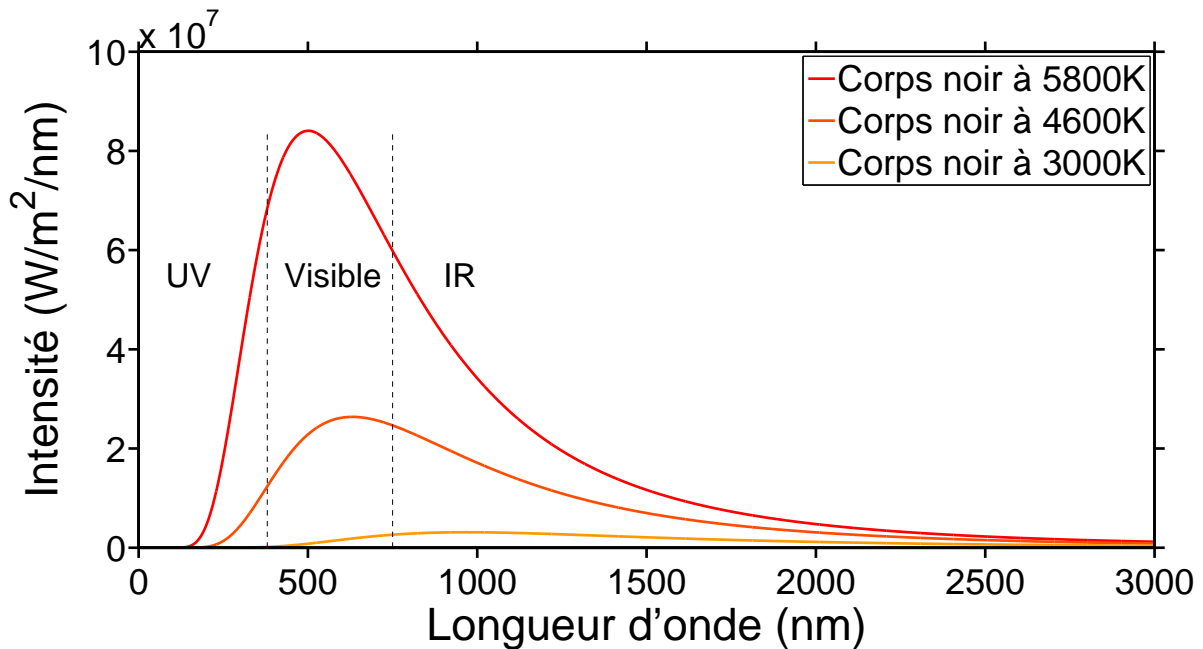


FIGURE 2.1 – Distribution du rayonnement d'un corps noir parfait à trois différentes températures.

La figure 2.1 illustre la distribution du rayonnement pour différentes températures observées à la surface d'un corps noir. On peut constater que plus la température d'un corps augmente, plus les longueurs d'ondes émises seront courtes. On peut observer ce phénomène en chauffant un métal. On verra le matériel devenir rouge, puis jaune, et éventuellement si on continue à le chauffer, le métal deviendra blanc au fur et à mesure que la température augmente. La courbe au bas de la figure représente celle pour un corps chauffé à 3000K qui est la température approximative d'un filament de tungstène dans une lampe incandescente. On constate que seulement une petite quantité d'énergie est émise dans la plage visible du spectre lumière ($0.4 - 0.8\mu m$) ce qui explique pourquoi ces lampes sont aussi inefficaces.

2.1.2 La masse d'air

Malgré le fait que le rayonnement provenant de la surface du soleil est raisonnablement constant [4, 5], il est très variable lorsqu'observé à la surface de la terre en raison de l'absorption et de la diffusion dans l'atmosphère terrestre.

La quantité d'atmosphère dont la lumière doit traverser pour atteindre la surface de la terre affecte la quantité de rayonnement qui atteindra une certaine location géographique. Cette quantité d'atmosphère est mesurée en terme de *masse d'air* (AM). Par exemple, lorsque que le soleil est directement par dessus tête, la lumière du soleil devra traverser l'équivalent d'une atmosphère. On dit alors que la valeur de masse d'air est de AM1. Plus le soleil se déplace vers l'horizon, plus la quantité d'atmosphère à traverser augmente. Donc la valeur de masse d'air augmente aussi. On conclut alors que la valeur de masse d'air dépend

de l'élévation du soleil [2,3,6]. Cette valeur peut être calculée en utilisant la formule :

$$AM = \frac{1}{\cos \phi} \quad (2.4)$$

où ϕ est l'angle entre le soleil et le point directement par-dessus tête tel que démontré dans la figure 2.2.

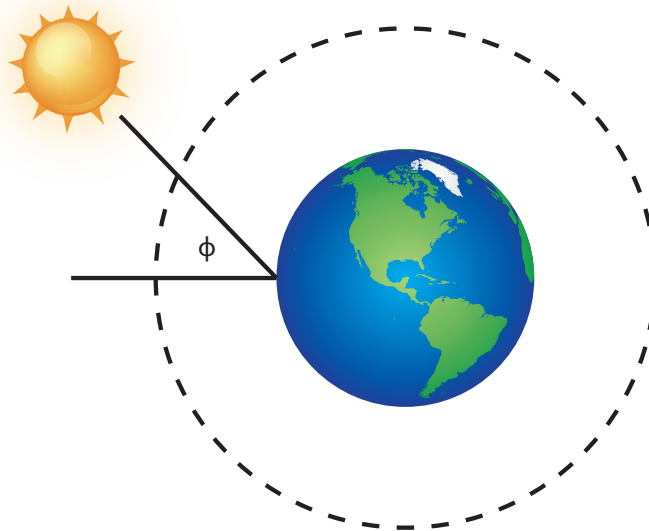


FIGURE 2.2 – La quantité d’atmosphère (masse d’air) dont les rayons du soleil doivent traverser pour atteindre la surface de la terre est fonction de la position du soleil par rapport à la location terrestre sous investigation.

La densité de l’atmosphère varie selon l’élévation du soleil et donc l’équation (2.4) est basé sur l’hypothèse d’une atmosphère homogène, non-réfringente. On retrouvera donc une erreur d’approximativement 10% lorsque le soleil approche l’horizon [7]. C’est néanmoins cette équation qui est communément utilisée dans l’industrie pour décrire les conditions de tests et de mesures. AM1.5 est le standard de l’industrie photovoltaïque pour les mesures de performances. Par contre, l’industrie des concentrateurs photovoltaïques préfère utiliser le standard AM1.5D où D indique que le spectre inclura seulement la partie directe de

la lumière du soleil [8]. On dit que le spectre lumière qui atteint la surface externe de l'atmosphère terrestre se nomme AM0. On peut voir à la figure 2.3 que le spectre AM0 ressemble à peu de choses près au spectre d'un corps noir à 5800K.

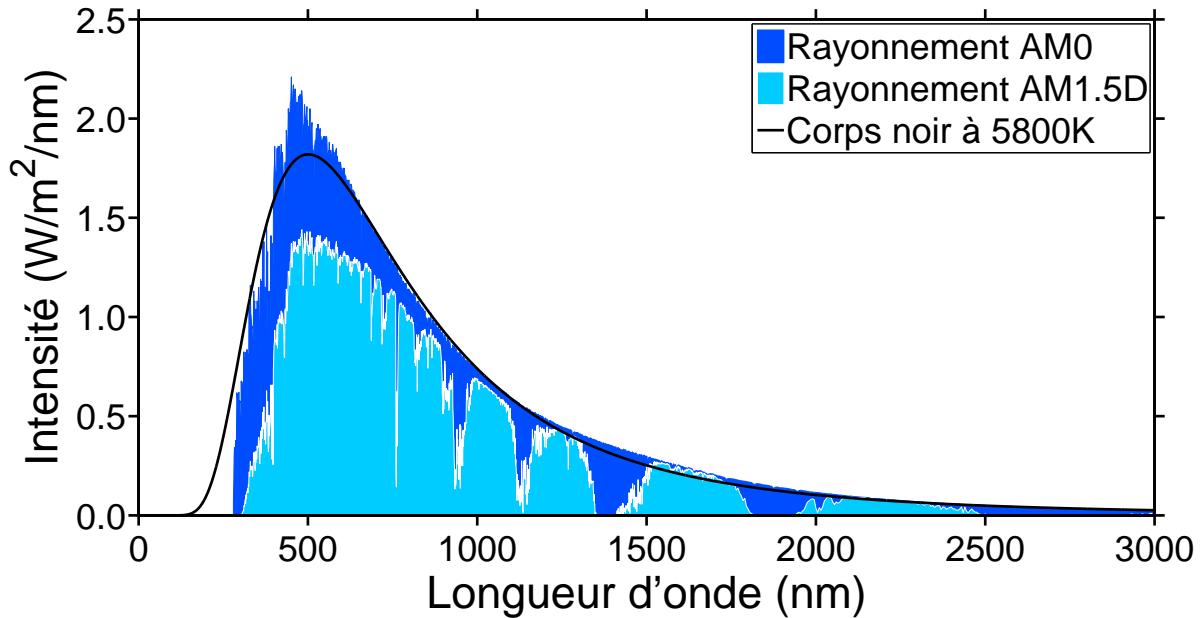


FIGURE 2.3 – Comparaison du spectre de rayonnement d'un corps noir à 5800K (au même diamètre que le soleil lorsque celui-ci est vu de la terre), de la photosphère du soleil telle qu'observée juste à l'extérieur de l'atmosphère terrestre (AM0) et de la photosphère du soleil après avoir passé à travers 1.5 fois l'épaisseur de l'atmosphère terrestre (AM1.5D).

La masse d'air (AM) peut aussi être estimée pour toutes positions géographiques en utilisant la formule suivante :

$$AM = \sqrt{1 + (s/h)^2} \quad (2.5)$$

où s est la longueur de l'ombrage causée par un poteau de hauteur h tel que démontré par la figure 2.4.

L'atmosphère a plusieurs effets sur le rayonnement du soleil qui la traverse. Les effets majeurs pour les applications photovoltaïques sont [6] :

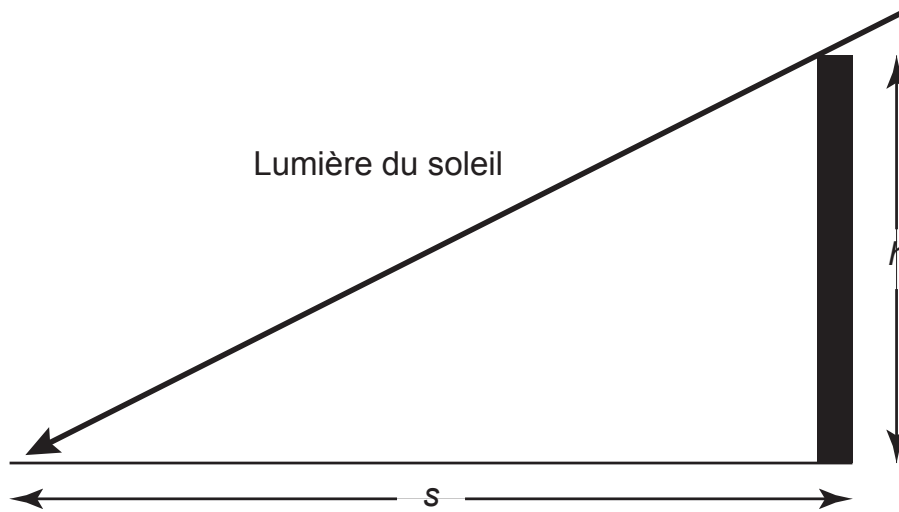


FIGURE 2.4 – Géométrie à utiliser pour calculer l'épaisseur de la masse d'air en utilisant l'ombrage d'un objet auquel on connaît la hauteur.

1. La réduction de la puissance de la radiation solaire due à l'absorption, la diffusion et la réflexion dans l'atmosphère.
2. Un changement dans le contenu spectral du rayonnement solaire étant donné que certaines longueurs d'ondes sont plus sensible aux absorptions et diffusions.
3. L'introduction de la portion diffuse/indirecte du rayonnement solaire
4. Des variation locales dans l'atmosphère telles que des vapeurs d'eau, des nuages et de la pollution qui ont tous des effets sur la puissances, le spectre et la direction du rayonnement solaire.

Les absorptions dans l'atmosphère sont surtout dues à certains gaz, plus précisément l'ozone (O_3), le dioxyde de carbone (CO_2) et les vapeurs d'eau (H_2O). Ils ont un taux d'absorption très élevé en ce qui a trait au photons qui ont une énergie près de leur énergie de liaison. C'est pourquoi la majeure partie de l'infrarouge au-delà de $2\mu m$ est absorbée par

les vapeurs d'eau et le dioxyde de carbone. À l'autre extrémité du spectre solaire, la majeure partie du l'ultraviolet sous $0.3\mu m$ est absorbé par l'ozone. Par contre, il en reste assez pour causer des coups de soleil à ceux et celles qui ne sauront pas prendre de précautions.

Tel que démontré à la figure 2.5, on voit clairement les différents endroits où les gaz ont un effets sur le spectre solaire. Par contre, ils ne sont pas les joueurs principaux dans la réduction de la puissance du rayonnement. Ce sont plutôt les molécules d'air et les particules de poussières en suspension qui absorbent et diffusent la majeure partie de la lumière en relation avec l'angle d'incidence de celle-ci. Quand le soleil est directement au-dessus de nous, ces éléments atmosphériques affectent de façon uniforme le spectre et donc, la lumière incidente semble blanche. Cependant, plus l'angle d'incidence est grand, plus les vapeurs d'eau et les molécules d'air ont un effet important particulièrement sur les plus courtes longueurs d'ondes du spectre lumière. C'est pourquoi le soleil a une allure plus rouge et moins intense en matinée et en soirée par rapport au milieu de la journée. Les spectres AM0 et AM1.5D de la figure 2.5 ont été simulés avec le modèle *SMARTS* (Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine) [9].

2.1.3 L'orbite de la terre

Les concentrateurs photovoltaïques utilisent des cellules solaires à haute efficacité en combinaison avec des lentilles (communément des lentilles de Fresnel) qui concentrent les faisceaux lumineux sur la cellule. Pour ce faire, les concentrateurs photovoltaïques doivent être orientés de façon perpendiculaire au rayonnement solaire. C'est pourquoi il est important de comprendre comment la terre se déplace autour du soleil ainsi que connaître la trajectoire du soleil à travers le ciel et ce, peu importe la position géographique.

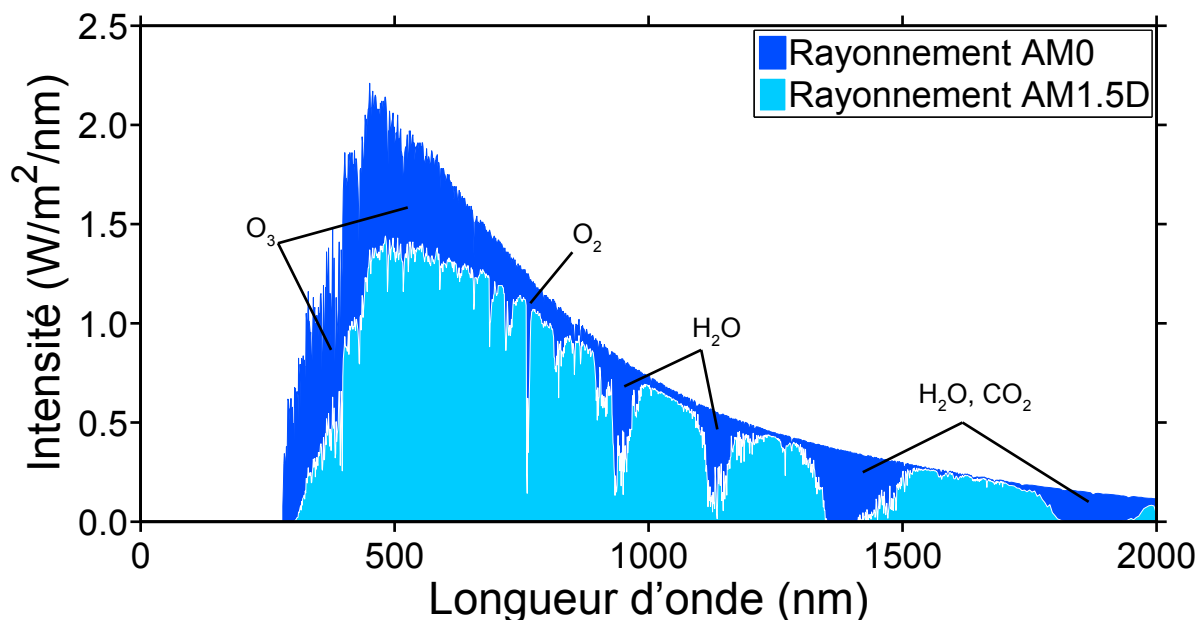


FIGURE 2.5 – On démontre ici les régions où différents composants atmosphériques absorbent certaines parties du spectre lumière. Ceci explique en partie les différences d’amplitude du rayonnement aux différentes longueurs d’ondes entre le spectre lumière AM0 à l’extérieur de l’atmosphère et AM1.5D à la surface de la terre.

La terre se déplace autour du soleil sur une orbite elliptique et complète le trajet une fois à tous les 365.25 jours. L’orbite de la terre est quasi circulaire. En fait, on dit qu’elle est excentrique mais l’excentricité de son ellipse est petite. Le périhélie, qui est le point le plus rapproché du soleil, a lieu le 2 janvier de chaque année. En ce point, la terre est à environ 147 millions de kilomètres du soleil. Le point opposé, ou le point où la terre est le plus éloigné du soleil, a lieu tous les ans le 3 juillet à une distance d’environ 152 millions kilomètres du soleil. Il est possible de décrire cette ellipse excentrique à l’aide de la formule suivante [10] :

$$d = 1.5 \times 10^8 \left\{ 1 + 0.017 \sin \left[\frac{360(n - 93)}{365} \right] \right\} \text{ km} \quad (2.6)$$

où n est le numéro de la journée considérant que le premier janvier est le premier jour de l’année et le 31 décembre est le jour 365. À toutes les 24 heures, la terre fait un tour complet

sur elle-même. Mais si la terre tournait exactement 360° sur elle-même, après six mois, nos horloges seraient en retard de 12 heures. En fait, pour rester synchronisée, la terre tourne 360.99° sur cette même période de 24 heures. La figure 2.6 démontre l'orbite de la terre et la trajectoire qu'elle prend. Le plan sur lequel notre planète bleue se déplace se nomme le plan écliptique. L'axe de rotation de la terre est présentement incliné de 23.45° par rapport au plan écliptique. C'est cette inclinaison qui cause les saisons que nous connaissons. Le 21 mars et le 21 septembre, si nous traçons une ligne partant du centre du soleil, on pourrait faire passer cette ligne d'un côté à l'autre de la terre en passant par le centre de l'équateur de chaque côté de la planète. On compte exactement 12 heures d'ensoleillement et 12 heures de noirceur en ces deux journées et c'est pourquoi on les nomme équinoxe (journée et nuit égale). Dans l'hémisphère nord, l'inclinaison du pôle nord atteint son maximum d'inclinaison en direction du soleil, soit 23.45° , le 21 juin. L'inverse, soit 23.45° d'inclinaison opposée au soleil, se produit le 21 décembre. La communauté internationale utilise le 21^{ème} jour du mois pour les équinoxes et les solstices pour fin de commodité bien que les journées exactes varient légèrement d'une année à l'autre.

L'orbite de la terre est considérée comme étant invariable au fil des années quand il en vient aux applications d'énergie solaire. Par contre, lorsque les scientifiques étudient les changements climatiques sur des périodes couvrant des milliers d'années, les variations orbitales ont un effet important et ne peuvent donc pas être négligées. Les changements dans l'orbite affectent la quantité d'ensoleillement sur la terre tant de façon géographique que saisonnière. Ce sont ces mêmes variations qui semblent contrôler les cycles d'ères glaciaires.

Il est connu que le soleil se lève à l'est pour finir par se coucher à l'ouest tout en passant par son plus haut point au milieu de la journée. Étant donné que les systèmes d'énergie

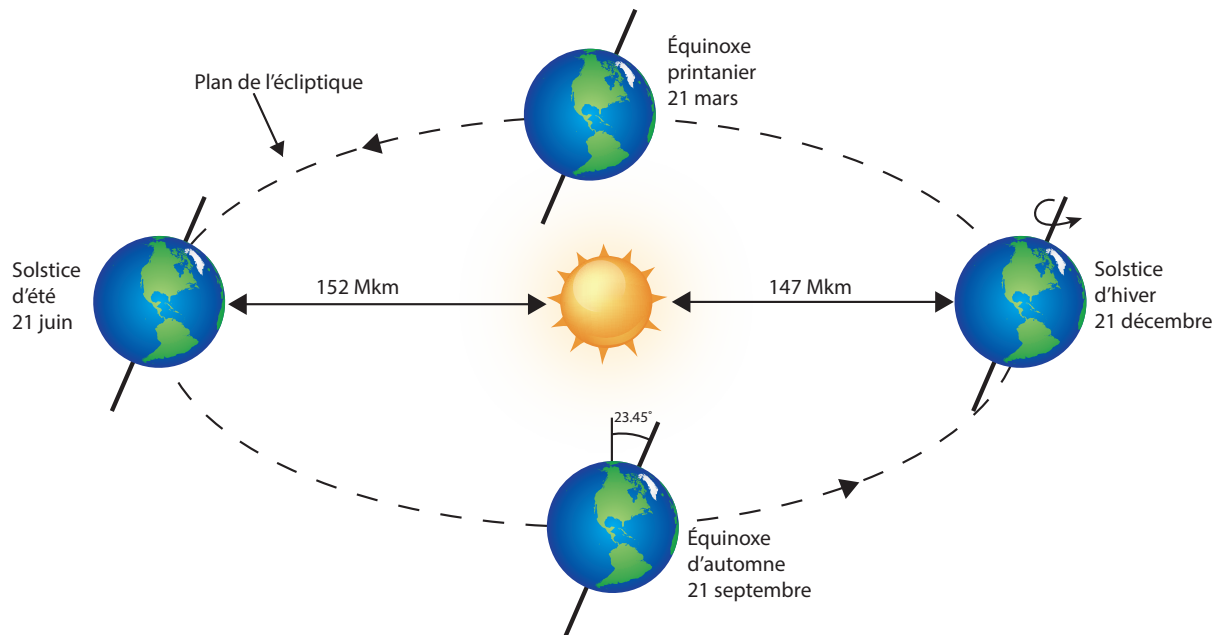


FIGURE 2.6 – L’inclinaison de l’axe de rotation de la terre par rapport au plan de l’écliptique est la cause des différentes saisons que nous connaissons. On remarque également qu’au solstice d’hiver, malgré les températures beaucoup plus froides dans l’hémisphère nord, la terre y est plus près du soleil.

solaire utilisant des concentrateurs photovoltaïques doivent suivre le soleil tout au long de la journée à l’aide de suiveurs solaires pour produire de l’électricité, il est important de pouvoir prédire où se situera le soleil. Les suiveurs solaires sont majoritairement dotés d’un capteur solaire qui permet de suivre le soleil avec précision. Par contre, pour dire au suiveur où sera le soleil le matin ou pour qu’il continue de suivre le soleil malgré un couvert nuageux, des calculs géométriques doivent être pris en charge par un contrôleur.

L’angle de déclinaison du soleil est calculé en fonction de la position du soleil par rapport à l’équateur. On dit que lorsque le soleil est directement au dessus de l’équateur, son angle de déclinaison est 0° . Cette angle varie d’un maximum de 23.45° au solstice d’été lorsque le soleil est directement au-dessus du tropique du Cancer jusqu’à un angle minimum de

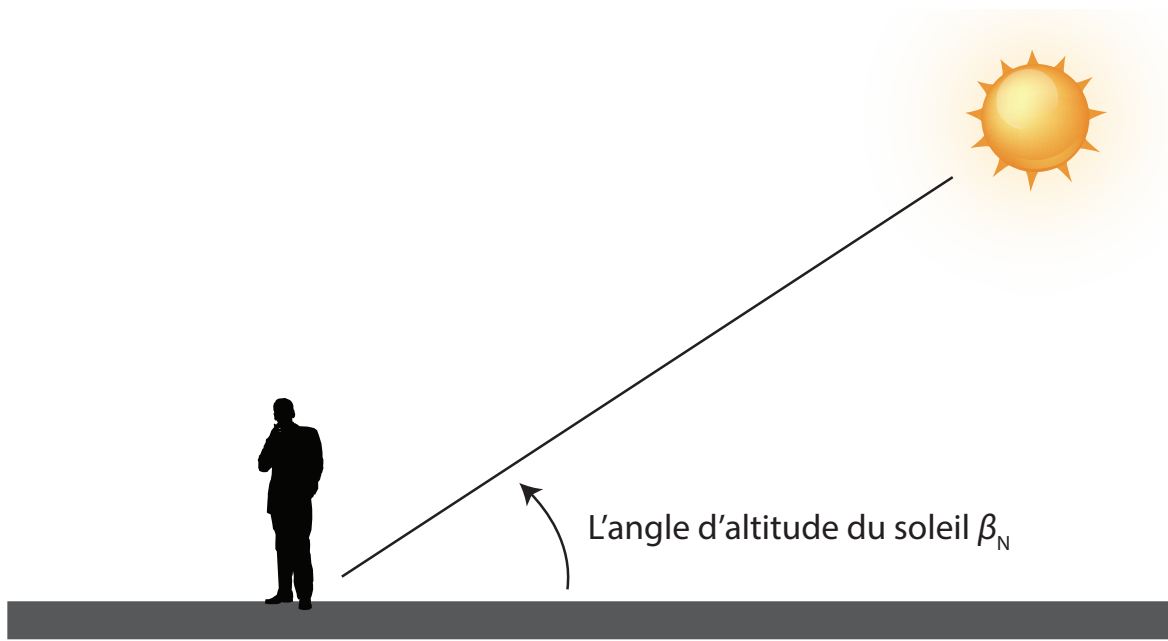


FIGURE 2.7 – L’angle d’altitude du soleil au midi solaire.

-23.45° au solstice d’hiver lorsque le soleil se retrouve directement au-dessus du tropique de Capricorne. La déclinaison solaire, δ , varie donc de $\pm 23.45^\circ$ de façon sinusoïdale sur une période de 365 jours ce qui donne une approximation de l’équinoxe de printemps se produisant au jour $n = 81$ [2].

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (n - 81) \right] \quad (2.7)$$

Une autre variable importante de la localisation du soleil dans le ciel est l’altitude de celui-ci par rapport à n’importe quel point géographique au midi solaire. Le midi solaire est le moment où le soleil atteint son plus haut point dans le ciel. On peut ici utiliser l’angle de déclinaison du soleil pour calculer l’altitude du soleil.

$$\beta_N = 90^\circ - L + \delta \quad (2.8)$$

Dans cette équation, β_N est l'altitude du soleil au midi solaire, L est la latitude du point géographique à l'étude et δ est l'angle de déclinaison du soleil.

2.2 Système concentrateur

À la section précédente, nous avons étudié la ressource solaire ainsi que le déplacement de la terre autour du soleil afin de comprendre le trajet et pouvoir prédire la position du soleil dans le ciel. Étant donné que nous examinons ici les systèmes concentrateurs photovoltaïques, nous allons maintenant lier théorie et application en étudiant les systèmes optiques et les suiveurs solaires.

2.2.1 Les systèmes optiques

Toutes les technologies de concentrateurs photovoltaïques utilisent une composante optique pour concentrer la lumière du soleil sur une cellule photovoltaïque. Les cellules utilisées ici sont de type multi-jonctions et ont une efficacité presque deux fois plus élevée que les cellules photovoltaïques standards (Silicium). Malgré le coût beaucoup plus élevé des cellules multi-jonctions, celles-ci sont utilisées en concentration et donc requièrent une moins grande surface de matériel photovoltaïque. La majorité de la surface active du système est donc occupée par une lentille faite d'un polymère. Il y a donc un potentiel de fabriquer un système relativement peu coûteux.

Dépendant du design de la composante optique, il est possible d'atteindre différents niveaux de concentration. Les systèmes à basse concentration opèrent à des niveaux en dessous de 100x et utilisent des technologies à base de miroirs réflecteurs et de cellules

au silicium mono-cristallin [11]. De plus, les systèmes à basse concentration ne font pas toujours utilisation de suiveurs solaires. Pour cette thèse, un système à haute concentration sera utilisé. Ces systèmes opèrent généralement à des niveaux de concentration de 300x et plus [11].

Plus le niveau de concentration augmente, plus l'angle d'acceptation de la composante optique diminue. Par conséquent, un niveau de concentration élevé nécessitera une plus grande précision du suiveur solaire. Pour mitiger un peu ce phénomène, les concentrateurs photovoltaïques peuvent faire l'usage d'une composante optique secondaire. Celle-ci per-

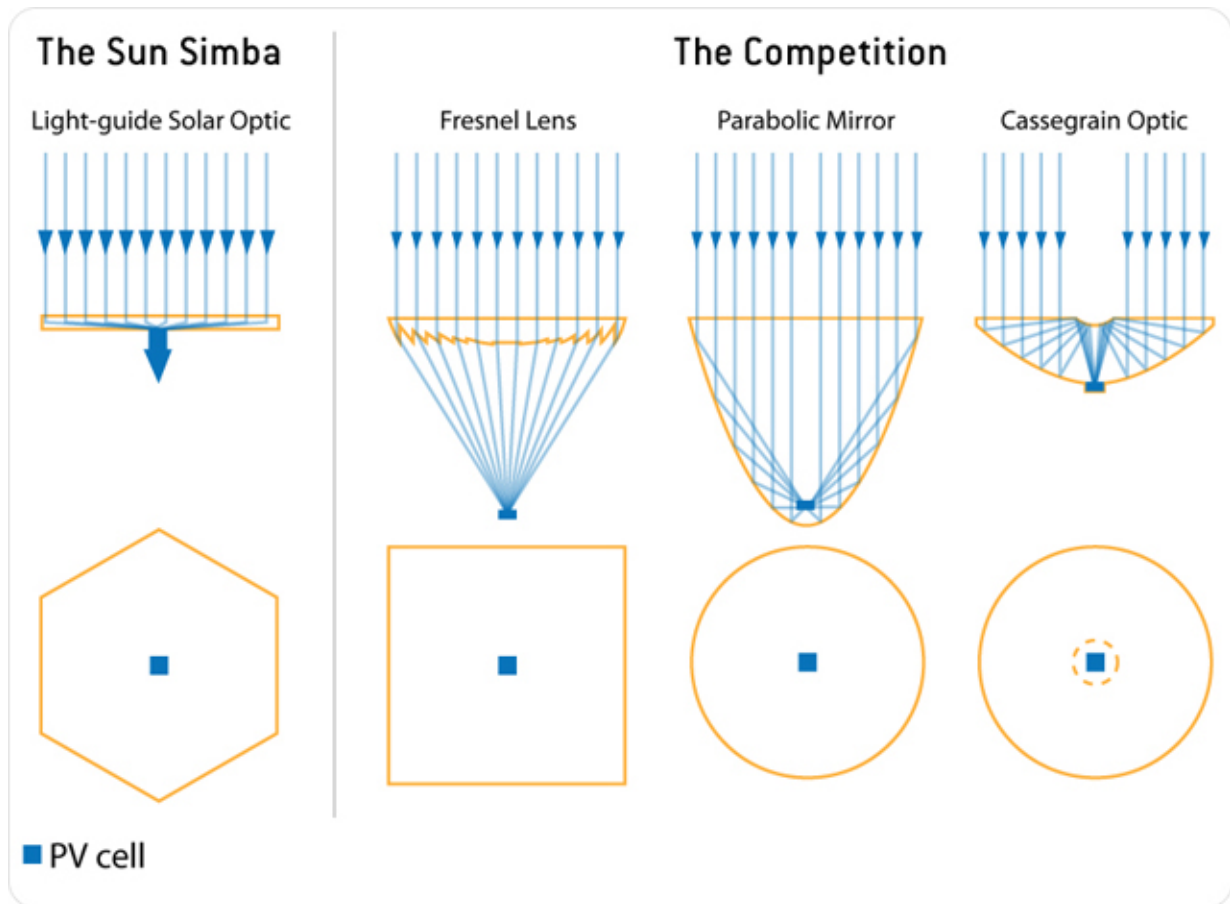


FIGURE 2.8 – L'optique guide de lumière *Sun Simba* du partenaire industriel en comparaison avec les technologies compétitives de concentrateurs photovoltaïques. On voit ici le profil beaucoup plus mince du *Sun Simba* ce qui lui permet d'avoir un angle d'acceptance plus grande ainsi qu'un besoin réduit de matériel pour la construction du produit [12].

met de réduire les aberrations chromatiques et ainsi augmenter l'angle d'acceptation en distribuant de façon plus égale le flux de photons sur la cellules [13].

Généralement, les systèmes à base de lentilles font l'usage de lentille de Fresnel. Celles-ci sont relativement légères et minces ce qui limite le poids et le volume des systèmes. *Suncore*, une compagnie basée à Albuquerque au Nouveau Mexique, exploite ce type de lentille dans leurs systèmes concentrateurs. Une autre technologie plus récemment adoptée par le partenaire industriel fait l'usage d'une composante optique unique qui guide la lumière à travers le matériel vers le centre de celle-ci pour ensuite aller frapper la cellule solaire. Cette approche permet de réduire considérablement le volume et le poids du produit final. Des matériaux moins coûteux pourraient aussi être utilisée pour réduire d'avantage le coût total [12]. Une comparaison de différentes technologies concentrateurs est présentée à la figure 2.8.

2.3 Théorie des cellules photovoltaïques

On définit comme étant photovoltaïque, un matériel ou dispositif capable de convertir l'énergie détenue dans des photons de lumière en une tension électrique et un courant [2]. Sur terre, nous avons une abondance de photons de lumière qui nous provient du soleil et c'est pour cette raison qu'une grande motivation existe dans la communauté scientifique, de trouver et d'optimiser les technologies photovoltaïques. En fait, le rythme auquel la surface de la terre reçoit de l'énergie du soleil est environ 6000 fois la demande totale internationale [2].

Au début de l'histoire des photovoltaïques, autour des années 1880, les cellules étaient fabriquées de sélénium et avaient une efficacité de conversion de la lumière d'environ 1 à

2%. Lorsqu'un photon a une longueur d'onde assez courte et une énergie assez élevée, celui-ci provoque, dans un matériel photovoltaïque, la libération d'un électron de l'atome. Si un champ électrique existe, ces électrons peuvent être dirigés vers un contact métallique où en résultera un courant électrique. La propriété du sélénium est telle que seulement 1 à 2% des photons incidents ont l'énergie nécessaire pour créer un courant. Avec le temps, d'autres compositions matérielles sont apparues et ont permis d'atteindre des efficacités allant au delà de 40%. Par exemple, tel que démontré à la figure 2.9, les cellules triple-jonctions de Sharp avec concentration de 302 soleil ont atteint 44.4% d'efficacité. Pour comprendre un peu le phénomène de conversion d'énergie et d'efficacité des cellules, nous allons à travers ce chapitre étudier la théorie des semi-conducteurs.

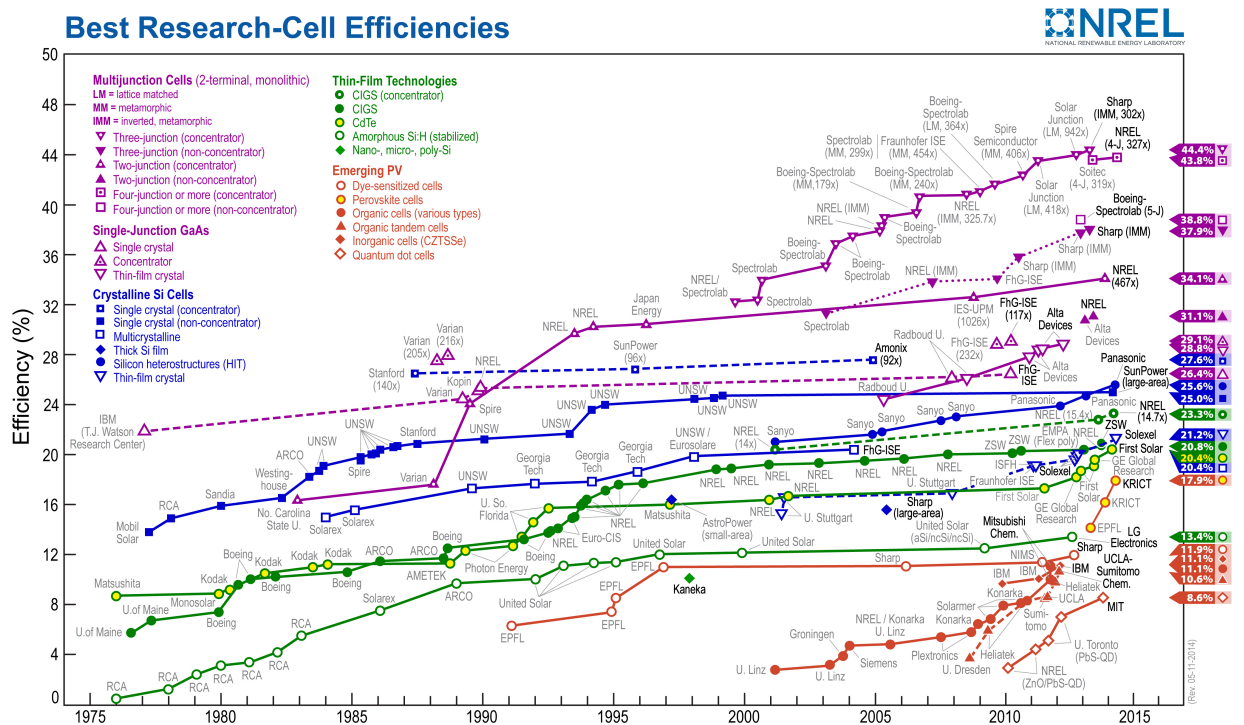


FIGURE 2.9 – Graphique des efficacités de cellules de recherche pour différentes technologies photovoltaïques à travers les années. On remarque que les cellules multi-jonctions en concentration atteignent des efficacités près de 2 fois celle des cellules Silicium cristallin [14].

2.3.1 Physique des semi-conducteurs

Les cellules photovoltaïques sont basées sur le même type de technologie et utilisent les matériaux semi-conducteurs pour transformer la lumière du soleil en électricité. En fait, la majorité des technologies photovoltaïques ainsi que presque tous les semi-conducteurs ont comme base le silicium cristallin pur. Le silicium se retrouve dans la quatrième colonne du tableau périodique qui est appelé le groupe IV. On peut retrouver d'autres matériaux utilisés pour la fabrication de cellules solaires dans les groupes I à VI tel que le germanium, aussi dans le groupe IV, le gallium dans le groupe III et l'arsenic dans le groupe V. Le bore et le phosphore du groupe III et V respectivement, sont souvent ajoutés au silicium pour fabriquer la grande partie des dispositifs semi-conducteurs. En général, les atomes retrouvés dans les semi-conducteurs proviennent de matériaux soit du groupe IV, soit d'une combinaison des groupes III et V que l'on appelle les semi-conducteurs III-V, ou encore d'une combinaison des groupes II et VI aussi appelée semi-conducteurs II-VI.

Les semi-conducteurs tel le silicium (Si) sont constitués d'atomes individuels liés ensemble dans une structure périodique et régulière qui forme un arrangement où chaque atome est entouré de 8 électrons. Un atome individuel est composé d'un noyau constitué de protons (particules à charges positives) et de neutrons (particules à charges négatives)

I	II	III	IV	V	VI
		5 B	6 C	7 N	8 O
		13 Al	14 Si	15 P	16 S
29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se
47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te

TABLE 2.1 – Une portion du tableau périodique est présentée ici avec, en caractère gras, les éléments les plus importants pour la fabrication de cellules solaires [2].

et est entouré d'électrons. L'électron est électriquement neutre puisqu'on y retrouve autant d'électrons que de protons. Les électrons qui entourent chaque atome dans un semi-conducteur font partie d'une liaison covalente qui consiste en 2 atomes qui partagent un seul électron. Donc, chaque atome forme quatre liaisons covalentes avec quatre atomes qui l'entourent. On peut en déduire que 8 électrons sont donc partagés entre chaque atome et les quatre autres qui l'entourent.

C'est la structure de liaison d'un semi-conducteur qui détermine la propriété matérielle de celui-ci. Une de ces propriétés est le niveau d'énergie qu'un électron peut occuper et comment il se déplace dans le réseau cristallin. Les électrons dans les liaisons covalentes, formés entre chaque atome du réseau, sont pris en place par ces liaisons et sont donc localisés dans la région qui entoure l'atome. Ces électrons ne peuvent bouger ou changer d'énergie et

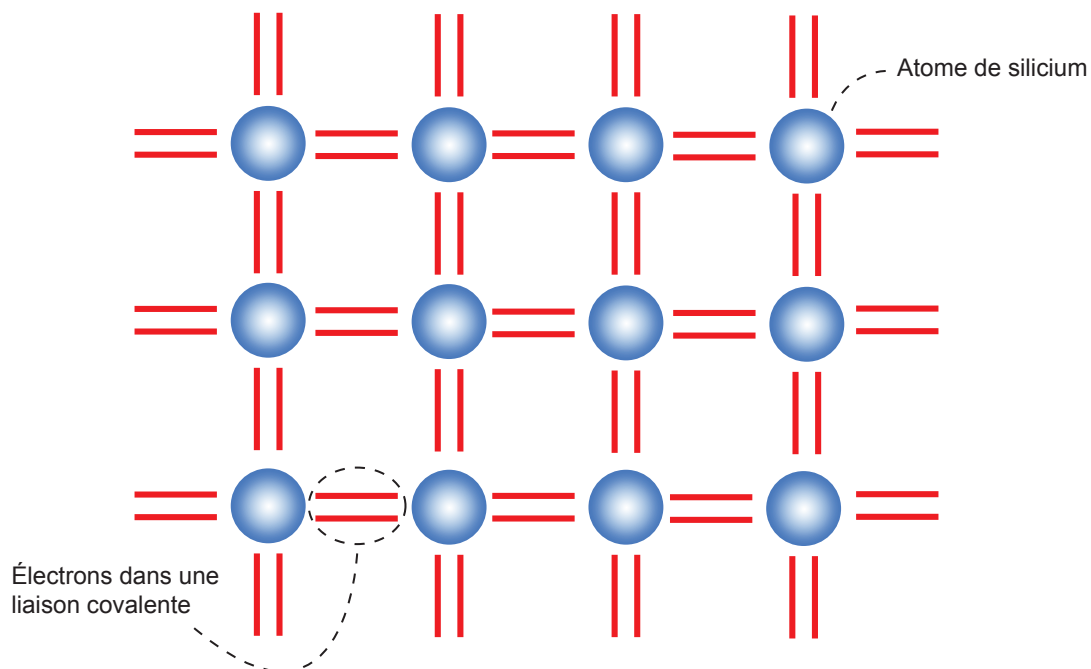


FIGURE 2.10 – Schéma représentant les liaisons covalente dans un réseau cristallin de silicium. Les lignes rouges représentent les électrons étant partagé par les différents atomes de silicium représenté par les boule bleu.

ne peuvent donc pas participer au flux de courant. Cependant, il est important de préciser que c'est seulement lorsque la température est au zéro absolu que les électrons sont pris dans cette structure. Lorsque la température de la cellule grimpe, telle que dans des conditions normales d'opération de cellules solaires, les électrons peuvent obtenir assez d'énergie pour sortir de leur liaison et ainsi participer à la conduction d'électricité en bougeant librement dans le réseau cristallin. Lorsqu'un électron a assez d'énergie pour participer à la conduction d'électricité, on dit que celui-ci est dans un état de haute énergie. Inversement, quand l'électron est lié, il ne peut participer à la conduction et est donc dans un état de basse énergie. La présence du lien entre deux atomes crée donc deux états d'énergies distincts pour les électrons et ceux-ci ne peuvent atteindre un état intermédiaire entre ces deux niveaux d'énergie. Alors, les électrons sont soit dans un état de basse énergie ou dans un état de haute énergie. Pour atteindre l'état de haute énergie, les électrons doivent gagner un minimum d'énergie que l'on appelle la bande interdite du semi-conducteur. Une fois au niveau supérieur de la bande interdite, les électrons se libèrent de la liaison et sont donc libres. Le nombre et l'énergie de ces électrons libres qui participent à la conduction est fondamental pour le fonctionnement de dispositifs électroniques. L'espace créée par un électron permet à la liaison covalente de se déplacer d'un électron à un autre, apparaissant ainsi comme une charge positive se déplaçant à travers le réseau cristallin. En résumé, les paramètres les plus importants d'un matériel semi-conducteur pour l'opération d'une cellule solaire sont : la bande interdite, le nombre d'électrons ou trous d'électrons libres pour la conduction d'électricité, et la génération et recombinaison des électrons et trous d'électrons lorsque de la lumière rayonne sur le matériel [6].

2.3.2 La bande interdite

La théorie quantique décrit la différence entre un conducteur et un semi-conducteur en utilisant le diagramme de bande d'énergie tel que démontré dans la figure 2.11. Comme mentionné précédemment, les électrons doivent avoir un état d'énergie qui est soit bas, soit haut, mais pas entre les deux. La bande d'énergie où l'électron est à son état de haute énergie est appelée la bande de conduction. Ce sont les électrons dans cette bande qui contribuent au flux de courant. Pour un métal, la bande de conduction est déjà partiellement remplie, contrairement à celle d'un semi-conducteur qui est vide lorsque la température est au zéro absolu. Pour le silicium par exemple, lorsqu'à température ambiante, on retrouve seulement un électron sur 10^{10} dans la bande de conduction.

Les écarts entre les bandes d'énergie permises sont appelés bandes interdites. La plus importante de ces bandes interdites est celle qui sépare la bande de conduction de la prochaine bande remplie sous celle-ci. L'énergie qu'un électron doit gagner pour passer

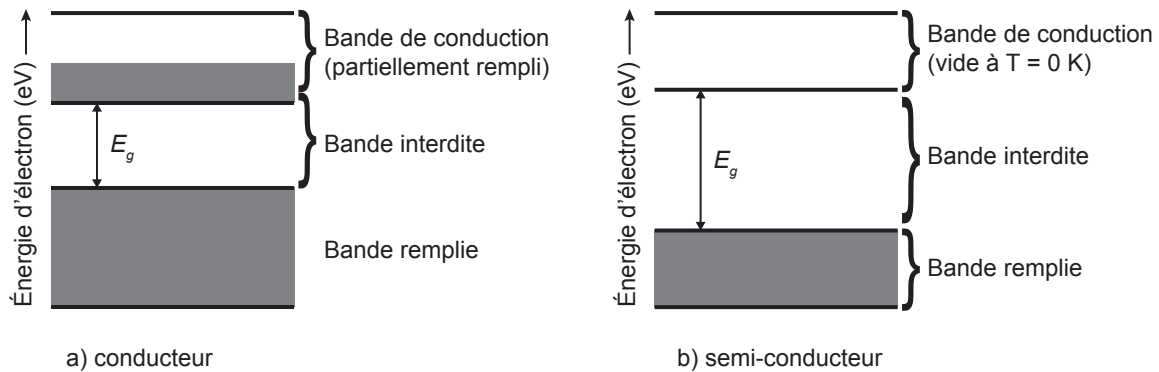


FIGURE 2.11 – Les bandes d'énergies pour (a) un conducteur et (b) un semi-conducteur. On voit que les conducteurs ont la bande de conduction partiellement remplie ce qui leur permet de conduire facilement du courant électrique. Les semi-conducteurs ont pour leur part une bande de conduction vide à température de zéro Kelvin et sont donc dans cet état des isolateurs [2].

la bande interdite et se rendre dans la bande de conduction est tout simplement appelée l'énergie de bande interdite que l'on représente par le symbole E_g et où l'unité de mesure généralement utilisée est l'électron-volt (eV). Un électron-volt est l'énergie qu'un électron à besoin de gagner pour que sa tension augmente d'un volt. Un électron-volt équivaut à 1.6×10^{-19} joules. L'énergie qui est gagnés par les électrons dans une cellule solaire provient des multiples photons (lumière) qui entrent en contact avec celle-ci. Les photons peuvent être caractérisés par leur longueur d'onde, leur fréquence ou bien encore leur énergie. Les trois peuvent être reliées par les équations suivantes :

$$c = \lambda\nu \tag{2.9}$$

où c est la vitesse de la lumière ($3 \times 10^8 m/s$), ν est la fréquence (hertz) et λ est la longueur d'onde (m) du photon et

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \tag{2.10}$$

où E est l'énergie d'un photon (J) et h est la constante de Planck ($6.626 \times 10^{-34} J \cdot s$).

2.3.3 L'impact de la bande interdite sur l'efficacité des photovoltaïques

La bande interdite est le facteur principale qui influe sur le maximum d'efficacité théorique d'une cellule solaire. Pour comprendre ce phénomène, nous allons utiliser le spectre solaire tel que présenté dans la section 2.1.1. Pour récapituler, la surface du soleil émet de l'énergie rayonnante avec des caractéristiques spectrales qui sont très similaires à un corps noir à une température de 5800 K. Le rayonnement à l'extérieur de l'atmosphère terrestre est

d'environ 1.37 kW/m^2 . On appelle aussi cette quantité de rayonnement la *constante solaire*. Quand la radiation passe dans l'atmosphère, une certaine quantité est absorbée par des constituants de celle-ci de telle façon que le spectre est beaucoup changé une fois rendu sur la surface de la terre. La quantité d'énergie solaire qui frappe la surface de la terre ainsi que sa distribution spectral dépend de la quantité d'atmosphère que la lumière doit traverser. On se rappelle que la longueur du trajet parcouru par le rayonnement solaire à travers l'atmosphère pour atteindre un certain endroit au sol divisé par la longueur du trajet qui correspond au soleil étant directement par dessus tête est appelé le ratio de masse d'air. Le standard dans l'industrie du photovoltaïque est d'utiliser un ratio de masse d'air de 1.5, ce qui correspond au soleil ayant un angle d'incidence d'environ 42° au-dessus de l'horizon. Pour AM1.5, l'énergie du spectre incident est composé de 2% d'ultraviolet (UV), 54% de lumière visible et de 44% d'infrarouge (IR).

En utilisant l'équation 2.10 et sachant que le silicium a une énergie de bande interdite de 1.12 eV, on déduit que les photons de longueur d'onde de $1.11 \mu\text{m}$ et moins auront assez d'énergie pour faire passer des électrons vers la bande de conductance. De plus, l'énergie du spectre solaire, avec des longueurs d'ondes supérieures à $1.11 \mu\text{m}$, sera gaspillée. On peut en dire autant de l'excès d'énergie des photons de longueur d'onde inférieure à $1.11 \mu\text{m}$. Il est possible de calculer l'énergie perdue par cause de ces contraintes si on connaît le spectre solaire. Ce phénomène est démontré dans la figure 2.12. Prenant en considération un spectre AM1.5, 20.2% de l'énergie est perdue par les photons qui ont moins d'énergie que celle de la bande interdite du silicium ($h\nu < E_g$) et un autre 30.2% est perdue par les photons ayant une énergie plus grande que celle de la bande passante ($h\nu > E_g$). Le 49.6% restant représente la fraction maximum de l'énergie solaire pouvant être absorbée par la cellule photovoltaïque au silicium. On peut donc dire que dans le cas du silicium,

la bande interdite restreint la limite d'efficacité sous la barre des 50%. Les pertes dues au rayonnement d'un corps noir et la recombinaison sont d'autres contraintes qui affectent l'efficacité des photovoltaïques. Lorsqu'exposées au soleil, les cellules deviennent chaudes. Cela signifie que leur surface rayonne de l'énergie proportionnelle à la quatrième puissance de leur température et correspond à environ 7% de perte additionnelle. La contrainte de recombinaison est liée au mouvement lent des trous-d'électrons qui se regroupent dans la cellule et compliquent le passage des électrons les faisant parfois retomber dans un trou. Cette effet peut compter pour un autre 10% de perte.

Choisir entre un matériel ayant une petite bande interdite et un autre ayant une grande bande interdite fait partie des compromis du design de cellule solaire. Avec une petite

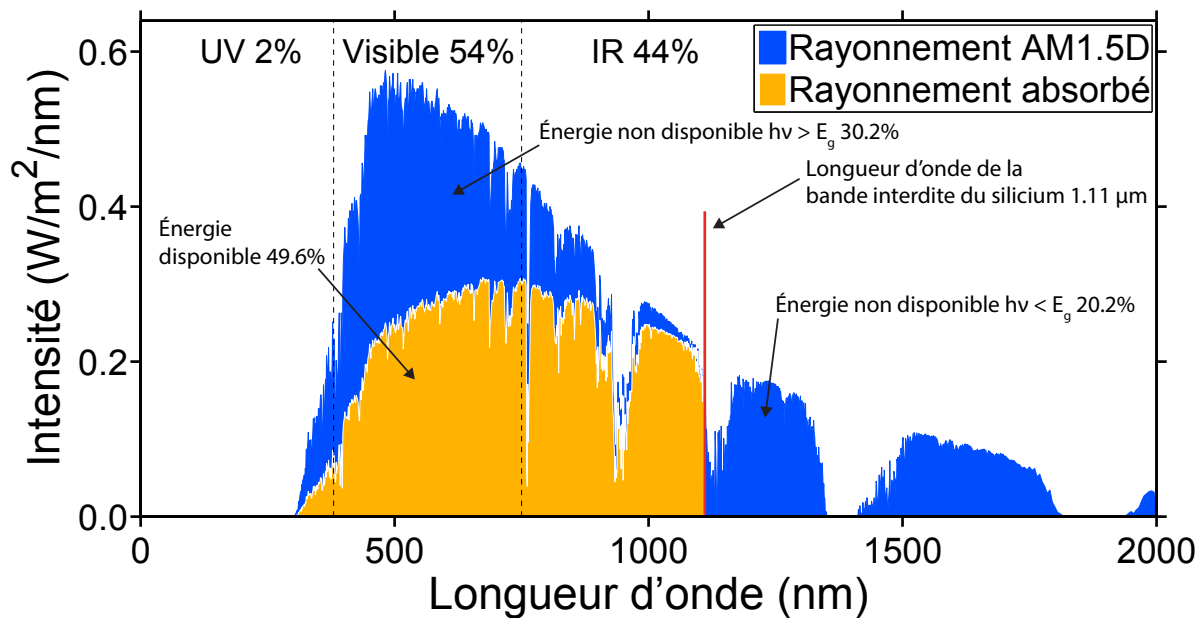


FIGURE 2.12 – Les impacts de la bande interdite du silicium sont ici démontrés pour un spectre solaire AM1.5D. Les photons ayant une longueur d'onde plus longue que 1.11 μm n'ont pas assez d'énergie pour exciter les électrons ce qui engendre une perte de 20.2% et ceux ayant une longueur d'onde plus courte ne peuvent utiliser la totalité de leur énergie, ce qui résulte en 30.2% de perte additionnelle.

bande interdite, il y aura une plus grande quantité de photons provenant du soleil qui auront l'énergie nécessaire pour exciter les électrons et les faire passer dans la bande de conductance et ainsi créer un courant. Par contre, il y aura une grande quantité de photons qui auront un surplus d'énergie et une perte de leur potentiel en résultera. L'inverse est aussi vrai pour une grande bande interdite. Dans ce cas, seulement une petite quantité de photons auront l'énergie nécessaire pour exciter les électrons et créer un courant ; un courant qui sera limité par une plus petite quantité d'électrons dans la bande de conductance. L'effet d'avoir une plus grande bande interdite permet aussi de limiter les pertes des au surplus d'énergie des photons.

La bande interdite est une mesure d'énergie donnée à une unité de charge qui est en d'autres mots une tension électrique. On peut donc conclure que plus la bande interdite est grande, plus la tension sera élevée dans la cellule photovoltaïque lorsque celle-ci est exposée à la lumière du soleil. Toute fois, moins d'électrons auront assez d'énergie pour passer dans la bande de conductance et moins de courant sera créé par la cellule. La puissance électrique est le produit de la tension et du courant. Si on choisit un seul matériel semi-conducteur, il est préférable d'optimiser la grandeur de la bande interdite pour obtenir un maximum d'efficacité. Il est estimé que cette plage d'optimisation est située entre 1.2 et 1.6 eV.

La bande interdite d'un semi-conducteur dépend aussi de la température dans laquelle la cellule solaire opère. Quand la température augmente, les électrons en état de basse énergie gagnent graduellement de l'énergie cinétique et il en résulte que les photons ont besoin de moins d'énergie pour faire passer les électrons dans la bande de conduction. Cela a pour effet de réduire la grandeur de la bande interdite, et donc diminue la tension et augmente le courant créé par la cellule solaire.

2.3.4 La jonction $p-n$

On considère maintenant la formation d'une jonction $p-n$ en combinant un matériel de type p et un de type n tel que démontré dans la figure 2.13. En formant cette jonction, les trous d'électrons en excès dans le matériel de type p se déplacent par diffusion vers le matériel de type n laissant derrière eux des charges négatives immobiles dans la région de type p . En même temps, les électrons se déplacent par diffusion du matériel de type n vers le matériel de type p laissant derrière eux des charges positives immobiles dans la région de type n . Il en résulte la création d'un champ électrique qui grandit jusqu'à ce que le flux d'électrons et de trous d'électrons cesse. Les charges immobiles exposées qui forment le champ électrique sont situées près de la jonction et forment ce qu'on appelle la région d'appauvrissement puisqu'elle est dépourvue de transporteurs de charges. Si on applique une tension aux bornes de la jonction $p-n$ en polarisation directe, un champ électrique qui s'oppose au

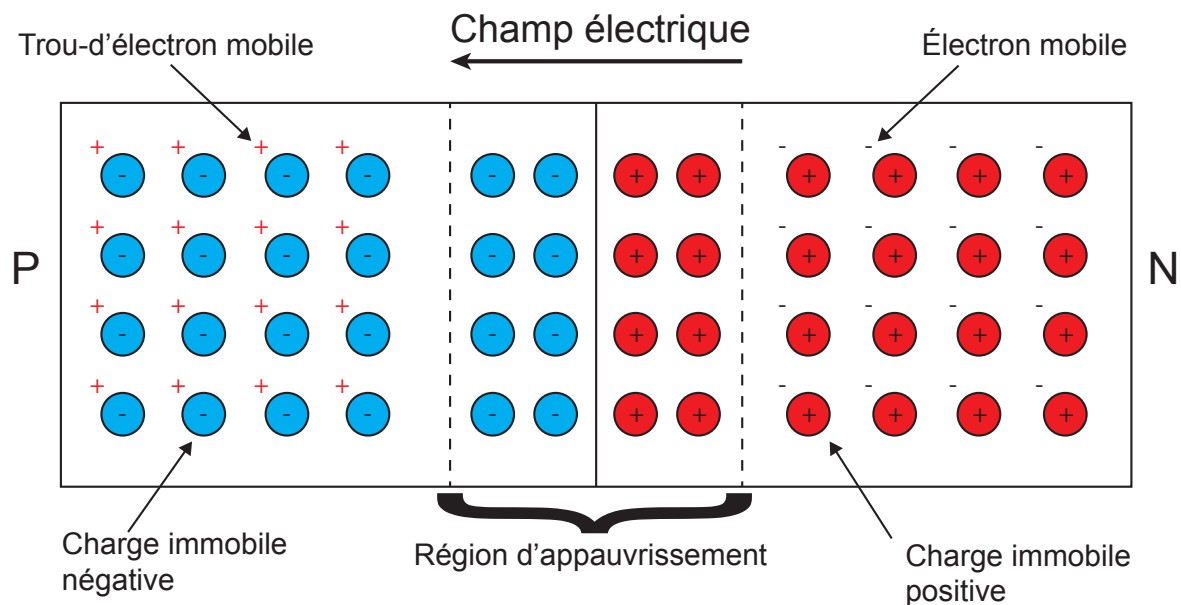


FIGURE 2.13 – Illustration de la séparation de charge dans une jonction $p-n$ sans polarisation externe, ce qui engendre un champ électrique interne.

champ interne est créé. Une fois que la tension appliquée devient plus grande que la tension interne, les transporteurs de charges peuvent à nouveau se déplacer et un courant peut ainsi circuler dans le dispositif. Si par contre on applique une tension aux bornes de la jonction p-n en polarisation inverse, on renforce alors le champ électrique interne et hélas le seul courant qui peut circuler dans la jonction est causé par des transporteurs de charges qui seront générés de façon thermique. Ce courant est nommé le *courant inverse de saturation* I_0 . Si on fait varier la tension aux bornes de la jonction $p-n$, on peut y mesurer la courbe de courant-tension ($I-V$) qui est décrite par l'équation de diode Shockley :

$$I = I_0(e^{qV/nkT} - 1) \quad (2.11)$$

où I est le courant, I_0 le courant inverse de saturation, V est la tension appliquée aux bornes de la jonction, q est la charge d'un électron, k est la constante de Boltzmann, T est la température et n est le facteur d'idéalité (un nombre entre 1 et 2). Ceci décrit une diode conventionnelle ou une jonction $p-n$ sans lumière incidente. Sous cette forme, le courant est nommé le *courant d'obscurité* ($I_{\text{obscurité}}$).

Si une diode absorbe des photons tel que lorsqu'exposée à la lumière du soleil, ceux-ci créeront des paires d'électrons et trous d'électrons dans la diode. Si les paires sont créées assez près de la jonction, ceci poussera les trous du côté p et les électrons du côté n. Cela créera ainsi une tension qui pourra être utilisée pour transporter un courant à une charge. L'équation de diode de Shockley est ainsi modifiée pour inclure l'effet du photocourant (I_L) :

$$I = I_L - I_0(e^{qV/nkT} - 1) \quad (2.12)$$

La figure 2.14 démontre bien la relation entre le rayonnement incident et le photocourant créé par celui-ci. Le photocourant est directement proportionnel à l'intensité du rayonnement. La tension de court-circuit tant qu'à elle augmente de façon logarithmique avec le rayonnement.

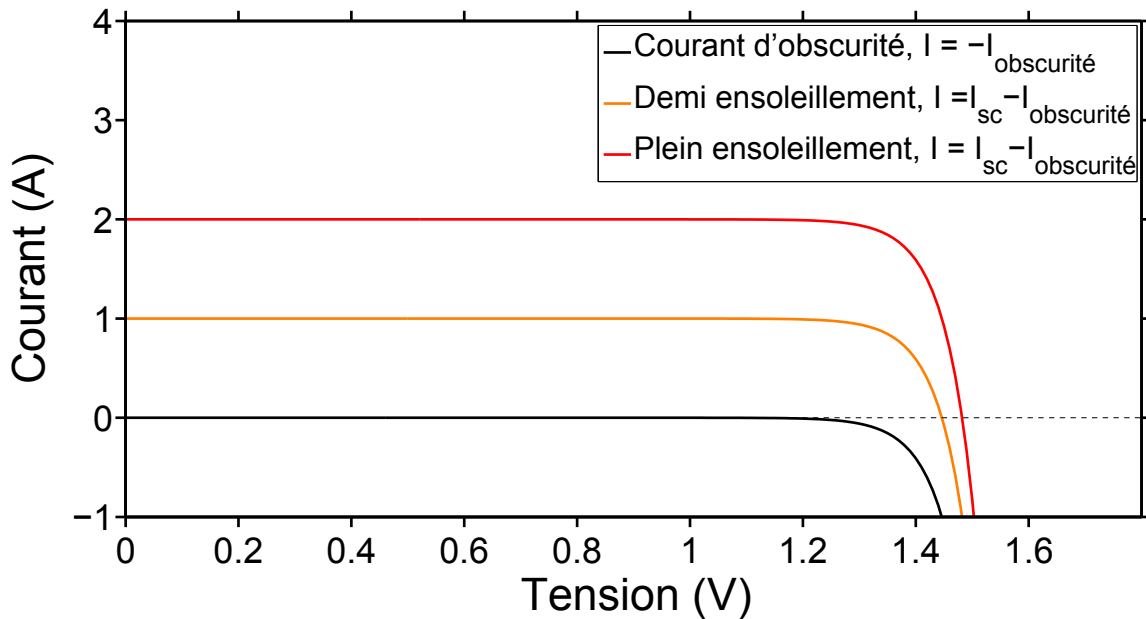


FIGURE 2.14 – On démontre ici l'effet de l'intensité du rayonnement du soleil sur la courbe I - V d'une cellule photovoltaïque. On remarque que le photocourant augmente proportionnellement avec l'intensité du rayonnement tandis que la tension de court-circuit augmente de façon logarithmique.

2.3.5 L'efficacité quantique

L'efficacité quantique est décrite comme étant la probabilité qu'une paire trou électron soit créée lorsqu'une certaine quantité d'énergie est incidente sur la cellule solaire. L'efficacité quantique d'une cellule dépend de la séparation de charge, de l'efficacité de collection de charge et des propriétés d'absorption de celle-ci. C'est un paramètre très important qui permet de caractériser les performances d'une cellule photovoltaïque sous différentes

conditions spectrales. Il permet aussi de déterminer le photocourant qui sera produit par la cellule. Une formule existe pour calculer le photocourant selon l'efficacité quantique et le spectre incident [15] :

$$I_L = q \int b_s(\lambda)QE(\lambda)d\lambda \quad (2.13)$$

où b_s est la densité de flux des photons, QE est l'efficacité quantique et q est la charge d'un électron.

2.3.6 Le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale

Le modèle de circuit équivalent le plus simple pour une cellule solaire est constitué d'une diode en parallèle avec une source de courant idéale tel que démontré dans la figure 2.15. La source de courant idéale délivre un courant (le photocourant) de façon proportionnelle au rayonnement incident. Deux conditions sont particulières en ce qui a trait à la cellule photovoltaïque. De un, la condition où l'on court-circuite les bornes de la cellule (courant de court-circuit, I_{SC}) et de deux, la condition où l'on laisse les bornes de la cellule ouvertes (tension de circuit-ouvert V_{OC}). Si on court-circuite la cellule, aucun courant ne traversera la diode étant donné que la tension aux bornes de celle-ci sera de $V_d = 0$ et tout le courant traversera les bornes court-circuitées de la cellule. En fait, le courant de court-circuit doit être égal à I_{SC} et donc, l'amplitude de la source de courant idéal doit elle aussi être égale à I_{SC} . On peut maintenant écrire une équation de courant et tension pour le circuit équivalent de la cellule solaire en commençant par :

$$I = I_{SC} - I_d \quad (2.14)$$

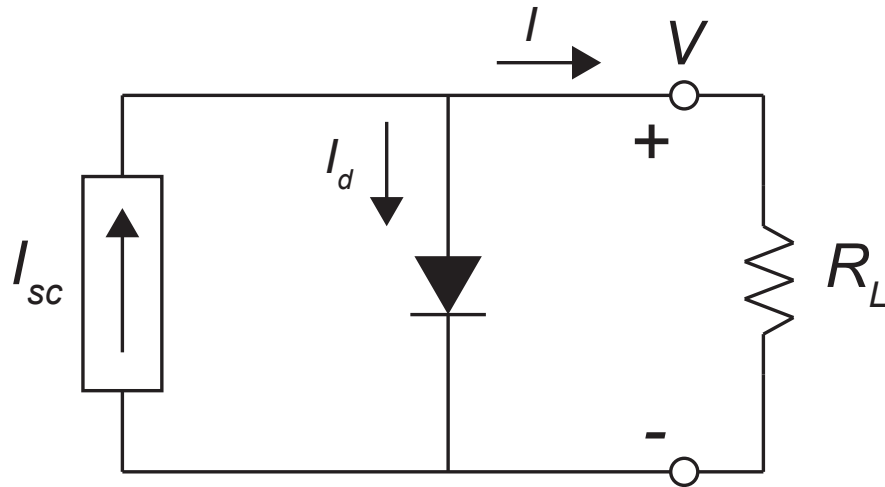


FIGURE 2.15 – Un circuit équivalent d’une cellule photovoltaïque qui est constitué d’une source de courant idéale et d’une diode en parallèle [2].

et on peut ensuite substituer l’équation 2.11 dans l’équation 2.14 :

$$I = I_{SC} - I_0(e^{qV/nkT} - 1) \quad (2.15)$$

On remarque ici que le deuxième terme de l’équation 2.15 est simplement l’équation de la diode de Shockley avec un signe négatif. On peut ainsi mieux comprendre les courbes I - V de la figure 2.14.

Lorsque les bornes de la cellule solaire sont laissées ouvertes, le courant $I = 0$ et on peut résoudre l’équation 2.15 pour la tension de circuit ouvert V_{OC} :

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{SC}}{I_0} + 1 \right) \quad (2.16)$$

2.3.7 Le circuit équivalent d'une cellule solaire non-idéale

Il est bien entendu qu'une cellule solaire, en pratique, n'est pas un dispositif idéal et on y retrouve des pertes shunts et séries. Les pertes shunts sont dues à un courant de fuite et les pertes séries sont quand à elles dues à la résistance interne de la cellule [2, 10]. Il est possible de changer le modèle idéal pour tenir compte des pertes du dispositif non-idéal tel que démontré à la figure 2.16. La résistance shunt (R_P) représente les pertes au niveau du courant de fuite et la résistance en série (R_S) représente les pertes au niveau de la résistance interne de la cellule. On peut maintenant inclure ces composantes à l'équation 2.15 et nous obtiendrons :

$$I = I_{SC} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q}{nkT} (V_d + IR_S) \right] - 1 \right\} - \left(\frac{V + IR_S}{R_P} \right) \quad (2.17)$$

Ces pertes résistives peuvent avoir un impact important sur les courbes $I-V$ et le facteur de remplissage que nous étudierons à la section suivante. Afin d'optimiser le design d'une

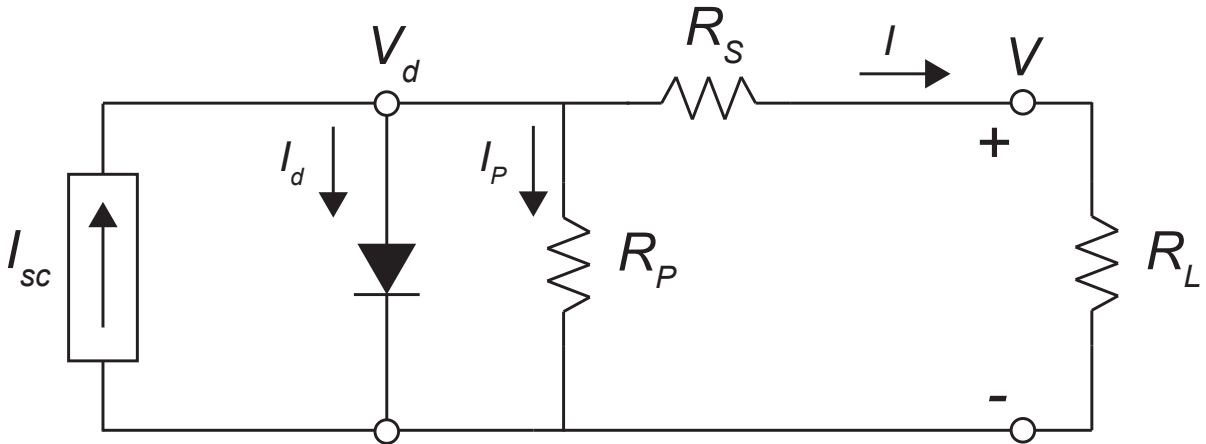


FIGURE 2.16 – Un circuit équivalent plus complexe d'une cellule photovoltaïque incluant les résistances série et parallèle.

cellule photovoltaïque, il est préférable d'avoir une résistance shunt le plus près possible de $R_P = \infty$ et une résistance série le plus près possible de $R_S = 0$.

2.3.8 Le point maximum de puissance

Le courant de court-circuit (I_{SC}) et la tension de circuit ouvert (V_{OC}) sont respectivement le courant maximum et la tension maximum d'une cellule solaire. Il est important de comprendre par contre que la puissance disponible en ces deux points est zéro. Dans le monde des photovoltaïques, on utilise le facteur de remplissage (abréviation FF pour Fill Factor en anglais) conjointement avec V_{OC} et I_{SC} pour déterminer le point maximum de puissance (P_{MPP}) de la cellule. Le facteur de remplissage est défini comme étant le ratio du point maximum de puissance de la cellule solaire au produit de V_{OC} et I_{SC} . Au point maximum, le courant et la tension sont respectivement nommés le courant au point maximum de puissance I_{PMP} et la tension au point maximum de puissance V_{PMP} . La charge optimale pour la cellule est donc :

$$R_{PMP} = \frac{V_{PMP}}{I_{PMP}} \quad (2.18)$$

De plus, on peut définir le facteur de remplissage selon l'équation suivante :

$$FF = \frac{V_{PMP}I_{PMP}}{V_{OC}I_{SC}} \quad (2.19)$$

À l'aide du point maximum de puissance, on peut aussi déterminer l'efficacité de la cellule

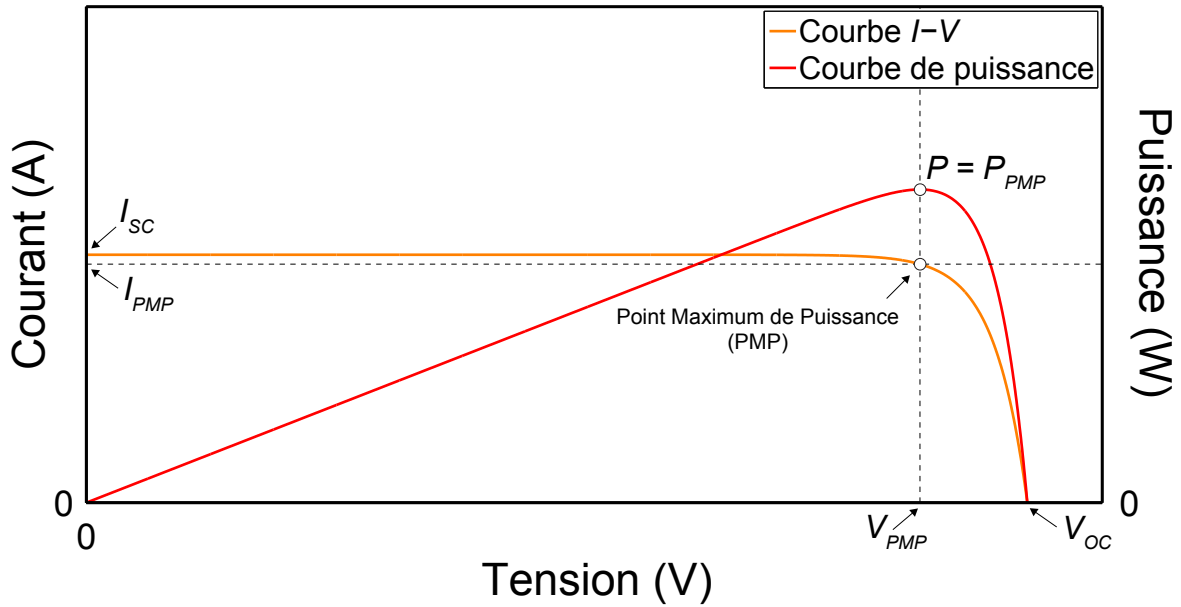


FIGURE 2.17 – La courbe $I-V$ et la courbe de puissance pour une cellule photovoltaïque. Si la courbe de puissance est définie dans les conditions standard d’opération, le point maximum de puissance identifie la tension, le courant et la puissance nominale pour la cellule.

solaire. Si on définit le point maximum de puissance comme étant :

$$P_{PMP} = V_{PMP}I_{PMP} \quad (2.20)$$

et que l’on connaît l’intensité du rayonnement sur la surface de la cellule (P_{inc}), il est possible de connaître l’efficacité de la cellule sous tout un éventail de conditions d’opération.

$$\eta = \frac{P_{PMP}}{P_{inc}} = \frac{V_{PMP}I_{PMP}}{P_{inc}} = \frac{V_{OC}I_{SC}FF}{P_{inc}} \quad (2.21)$$

Bien sûr, la condition standard d’opération est celle qui est d’intérêt principal.

2.3.9 Cellule multi-jonctions

Tel que démontré dans la figure 2.9, les cellules multi-jonctions sont présentement les plus performantes et ce, surtout lorsqu'elles sont en concentration. Nous avons précédemment mentionné que les matériaux semi-conducteurs absorbent de façon optimale les photons de lumière qui ont une énergie près de leur énergie de bande interdite. En ayant plusieurs jonctions de matériaux semi-conducteurs différents qui chacun ont une énergie de bande interdite différente, les cellules multi-jonctions réussissent à absorber plus efficacement un plus grand nombre de photons à travers le spectre solaire. Celui-ci résulte en une efficacité total beaucoup plus grande que, par exemple, les cellules au silicium. Le circuit équivalent d'une cellule multi-jonctions devient simplement une série de circuits équivalents de cellules à jonction unique tel que démontré à la figure 2.18.

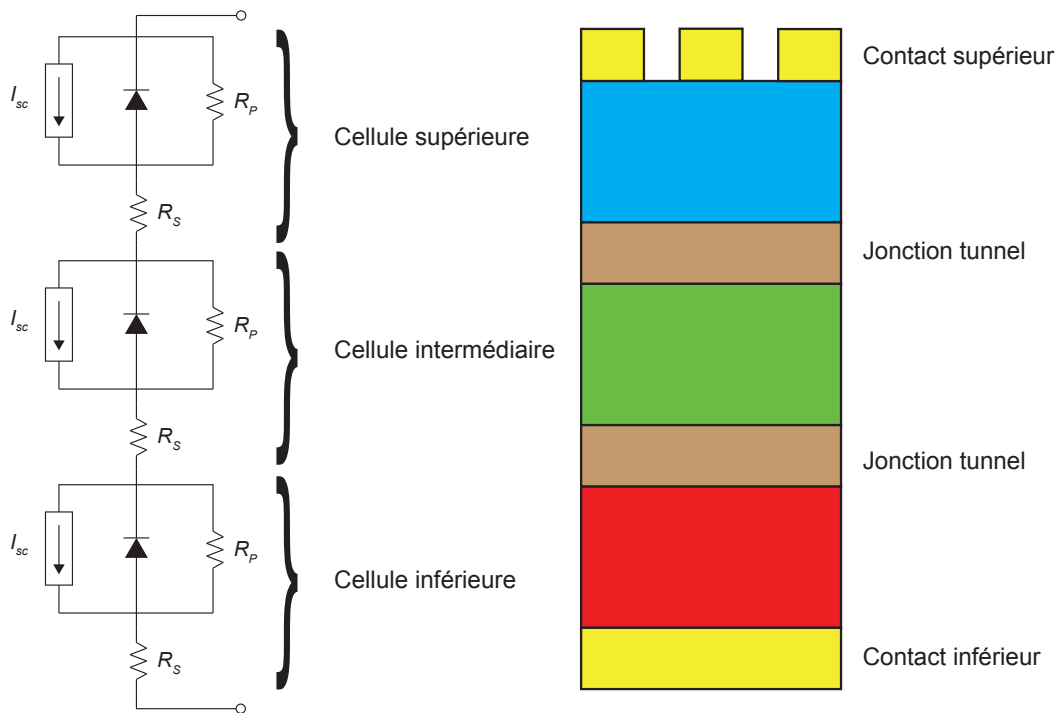


FIGURE 2.18 – Circuit équivalent d'une cellule triple-jonction ainsi que le schéma simplifié de la structure de celle-ci.

Chapitre 3

Montage de l'expérience

Pour démontrer les performances d'un système concentrateur photovoltaïque, il va de soi qu'un site de tests extérieur soit déployé. Pour cette thèse, j'ai eu la chance de déployer deux sites de tests à des emplacements différents. Un à l'Université d'Ottawa et l'autre dans le désert de Mojave. Les deux sites sont identiques à l'exception de leurs emplacements et du suiveur solaire en opération. Pour cette raison, la description du site extérieur sera fait de façon générale pour les deux sites.

Il est intéressant d'acquérir un large éventail de données pour démontrer les performances d'un système. Cependant, sans des tests préalablement faits en laboratoires dans des conditions contrôlées pour bien définir les composantes du système, il serait difficile de bien comprendre le comportement du système sous test.

3.1 Laboratoire intérieur

Avant même d’entreprendre la fabrication des panneaux prototypes, chacune des cellules photovoltaïques a été testée en laboratoire pour assurer la qualité de celles-ci. Des photos en haute résolution de chacune des cellules ont été prises pour analyser leur qualité de fabrication. Des mesures de courbe $I-V$ ont aussi été faites pour toutes les cellules afin de certifier qu’elles correspondent aux attentes du manufacturier.

Après avoir sélectionné les cellules les plus représentatives de chacun des quatre types de cellules à l’étude, des mesures d’efficacité quantique ont été faites sur ceux-ci.

3.1.1 Mesure d’efficacité quantique

Pour bien caractériser une cellule photovoltaïque en terme de son efficacité à absorber les photons de lumière, il est possible d’utiliser un appareil hautement sophistiqué que

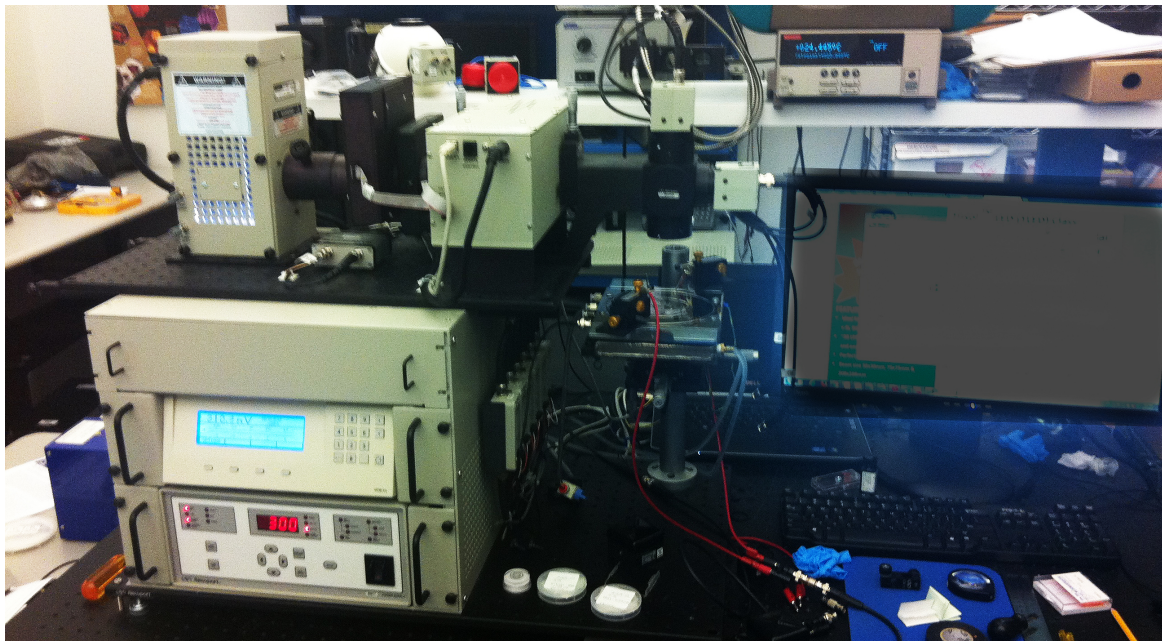


FIGURE 3.1 – Appareil de mesure d’efficacité quantique *Oriel IQE200* assemblé par l’étudiant au doctorat, Olivier Thériault.

l'on appelle *EQE* en terme anglophone. *EQE* signifie *External Quantum Efficiency* ou en français, *efficacité quantique externe*. Comme démontré dans la figure 3.1, le modèle utilisé est le *IQE200* de *Oriel* [16]. Le principe de la méthode est de compter la proportion de transporteurs, tels que les électrons, extraits de la cellule par rapport au nombre de photons incidents sur la surface de la cellule. L'appareil réussit cette tâche en illuminant la cellule sous test avec une source de lumière monochromatique à laquelle on peut contrôler la longueur d'onde. En mesurant le courant produit par la cellule, ainsi que la puissance de la lumière incidente, il est possible de calculer la proportion entre les photons et les électrons en terme de pourcentage.

Il est important pour un concepteur de cellule solaire de pouvoir démontrer physiquement l'efficacité de son design. C'est pourquoi l'appareil de mesure d'efficacité quantique est un instrument clé dans l'analyse des performances d'un système concentrateur photovoltaïque.

3.2 Site de tests extérieur

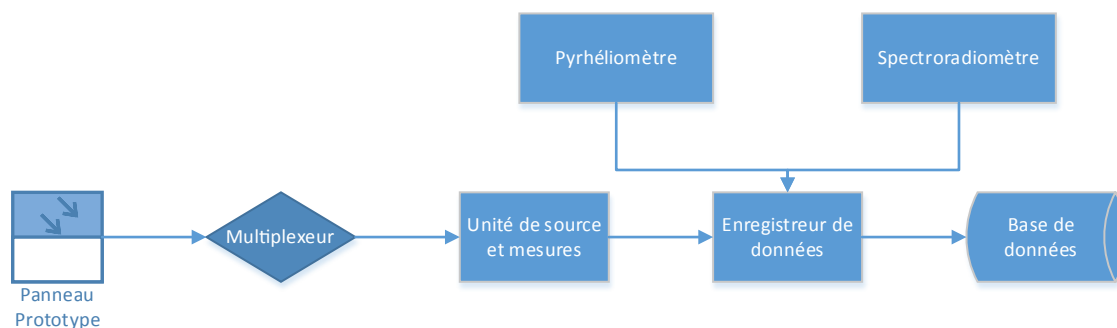


FIGURE 3.2 – Diagramme bloc démontrant les différentes composantes du système.

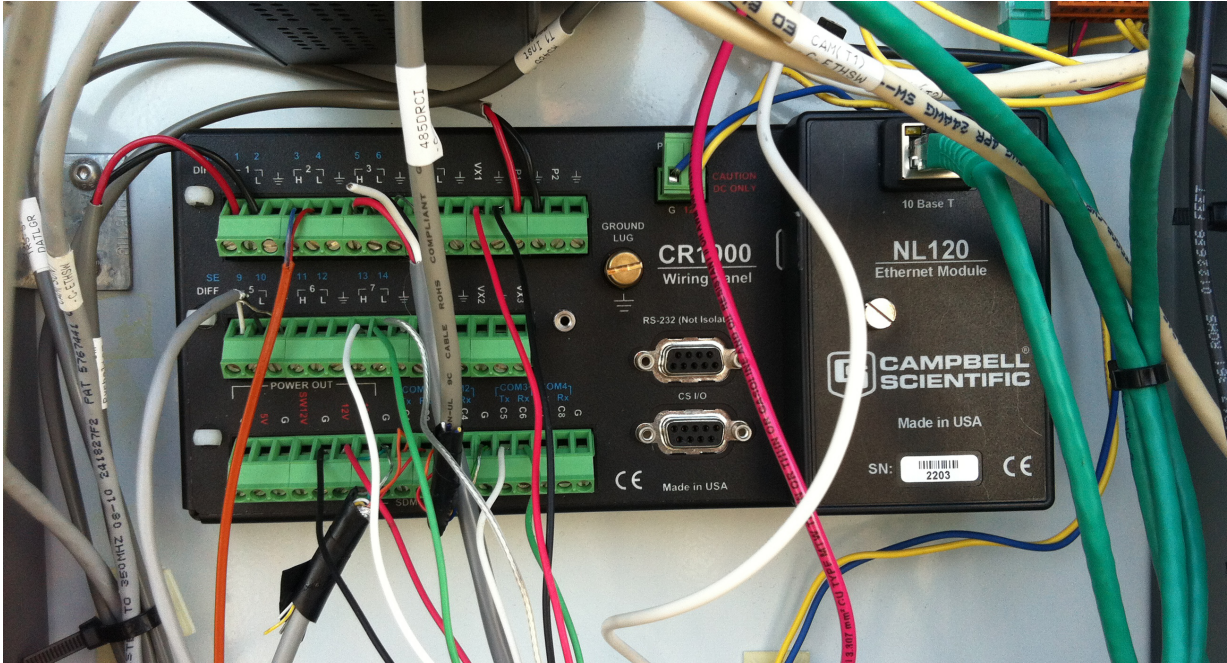


FIGURE 3.3 – L’enregistreur de données par CR1000 par *Campbell Scientific* au site de tests de l’Université d’Ottawa. La photo démontre que plusieurs des ports d’entrées et sorties digitales et analogues de l’appareil sont utilisés.

3.2.1 Enregistreur de données

Au cœur des deux sites de tests, l’enregistreur de données CR1000 de *Campbell Scientific* à été utilisé pour faire la majorité des tâches de contrôles ainsi que certaines mesures. Le CR1000 est équipé de ports d’entrées analogues ayant un résolution de $0.33 \mu\text{V}$, quatre ports de communications RS-232 et plusieurs ports d’entrées/sortie digitaux. Le pyréliomètre, par exemple, utilisait un des ports analogues en lui envoyant un signal de mesure en millivolts. Un des ports RS-232 était utilisé pour la communication entre l’unité de source et mesure et l’enregistreur de données. L’autre, utilisait un adaptateur RS-232/RS-485 pour contrôler les relais du multiplexeur. Le CR1000 communique par ethernet avec le serveur de Sunlab pour lui envoyer les données qui sont collectées. Le processus de transfert se produit sur un intervalle de dix minutes, ce qui requiert un enregistrement intermédiaire.

L'enregistreur de données est équipé d'une carte mémoire flash qui permet justement cet enregistrement. Les données des instruments sont échantillonnées sur une base de deux minutes. La programmation du CR1000 se fait à partir du logiciel de *Campbell Scientific* et le langage de programmation est une version de BASIC propre au manufacturier.

3.2.2 Pyrhéliomètre

Pour mesurer le rayonnement perpendiculaire direct aux deux emplacements des sites de tests, un pyrhéliomètre de la compagnie *Eppley* a été installé sur les suiveurs solaires. Le pyrhéliomètre est fabriqué d'un tube peint noir à l'intérieur avec une fenêtre de quartz qui couvre l'ouverture circulaire. L'appareil a un angle d'acceptation de 5.7° . L'élément de mesure est une thermopile (environ 50 à 100 thermocouples connectés en série) qui converti un gradient de température en un signal électrique. La thermopile est contenue

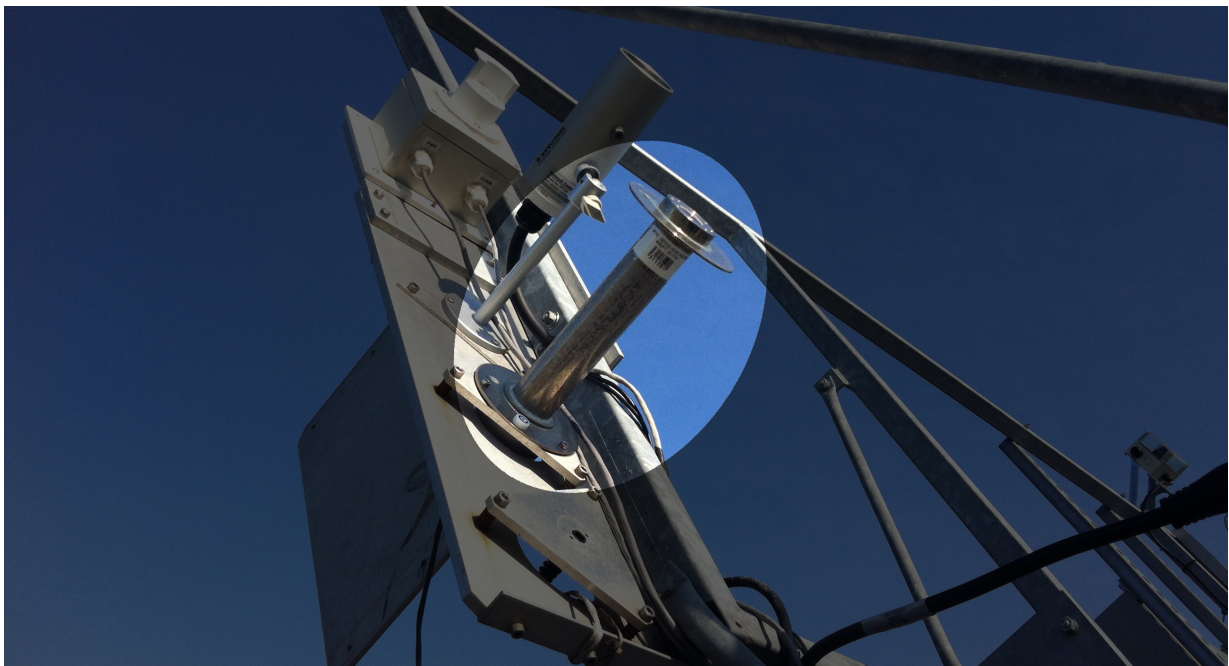


FIGURE 3.4 – On voit ici le pyrhéliomètre pointant vers le soleil un matin ensoleillé au site de tests de l'université d'Ottawa.

dans un disque noir qui a pour but d'absorber le spectre lumière de façon constante à travers l'éventail de longueurs d'ondes. Le détecteur a une réponse linéaire avec l'intensité de rayonnement.

La sensibilité de celui-ci est de l'ordre de $8.57 \mu\text{V} \cdot \text{W}/\text{m}^2$ et le signal de sortie est donc dans la plage des μV . On connecte la sortie du pyréliomètre avec une paire de câbles torsadés à une entrée analogue de l'enregistreur de donnée. L'enregistreur conditionne ensuite le signal pour être utilisable. La température et les dépôts sur la fenêtre sont les deux principales sources d'erreurs de l'appareil avec une erreur de mesure de $\pm 1\%$ sur une plage de -20°C à 40°C et allant jusqu'à environ 2.2% pour les dépôts sur la fenêtre [13]. Il est donc critique d'établir un programme de nettoyage régulier.

3.2.3 Spectroradiomètre

Pour mesurer le contenu spectral du rayonnement du soleil, un spectroradiomètre fut installé aux deux sites de tests. L'appareil provient de *ASDi* et est combiné à un tube de collimation permettant seulement à la lumière perpendiculaire directe de pénétrer et d'atteindre la fibre optique du spectroradiomètre. Bien qu'il ait été installé à l'extérieur, cette appareil a été conçu pour une utilisation intérieure seulement. C'est pourquoi il a été installé dans une boîte étanche avec un radiateur électrique pour le garder dans la plage d'opération suggérée. Cet appareil mesure la puissance du rayonnement perpendiculaire direct du spectre. Plus spécifiquement, il mesure au total la même chose que le pyréliomètre mais a pour avantage de caractériser la mesure sur la majorité de la plage spectrale du rayonnement. Le spectre solaire varie en fonction de la position géographique, de la masse d'air, de la profondeur optique des aérosols et du couvert nuageux. Par exemple, selon

l'angle du soleil, les nuages auront un impact différent sur le spectre et ce, suivant une tendance qui varie au cours d'une année. Il est donc important de quantifier ces différents phénomènes afin de pouvoir potentiellement optimiser le design des concentrateurs photovoltaïques pour un emplacement spécifique. Le spectroradiomètre est connecté par ethernet au serveur du Sunlab.

Malheureusement, les deux spectroradiomètres du Sunlab ont été envoyés pour maintenance lors du développement de cette thèse. C'est pourquoi les spectres solaires utilisés auront été estimés à l'aide du modèle *SMARTS*. Ceci résultera en une marge d'erreur légèrement supérieure ($\pm 5\%$) lors des simulations.



FIGURE 3.5 – Le tube de collimation du spectroradiomètre du site de tests de l'Université d'Ottawa permet à seulement la lumière perpendiculaire directe du soleil d'être mesurée par l'instrument.

3.2.4 Suiveurs solaires

La différence principale entre le site de test de Mojave et celui de l'Université d'Ottawa est le choix de suiveurs solaires. Le site de l'Université est équipé de suiveurs *Golden Sun GS3500*. Ceux-ci poursuivent le soleil sur deux axes, sont de type anneau et faits d'acier galvanisé. Ils ont une grande surface permettant d'installer des panneaux solaires et peuvent supporter jusqu'à 450kg de charge.



FIGURE 3.6 – Le suiveur solaire *Golden Sun GS3500* du site de tests de l'Université d'Ottawa est ici présenté. On remarque la grande surface disponible pour l'installation de panneaux solaires.

Pour sa part, le site de Mojave, étant préalablement occupé par le partenaire industriel, était déjà équipé de plusieurs suiveurs solaires *Savanna* commercialisés par le partenaire industriel. Les *Savanna* offrent une plus grande fiabilité par rapport au *Golden Sun* et sont pour cette raison un excellent choix de suiveurs pour fin de recherche ; d'autant plus qu'ils se trouvent à plusieurs milliers de kilomètres. Les suiveurs du partenaire industriel

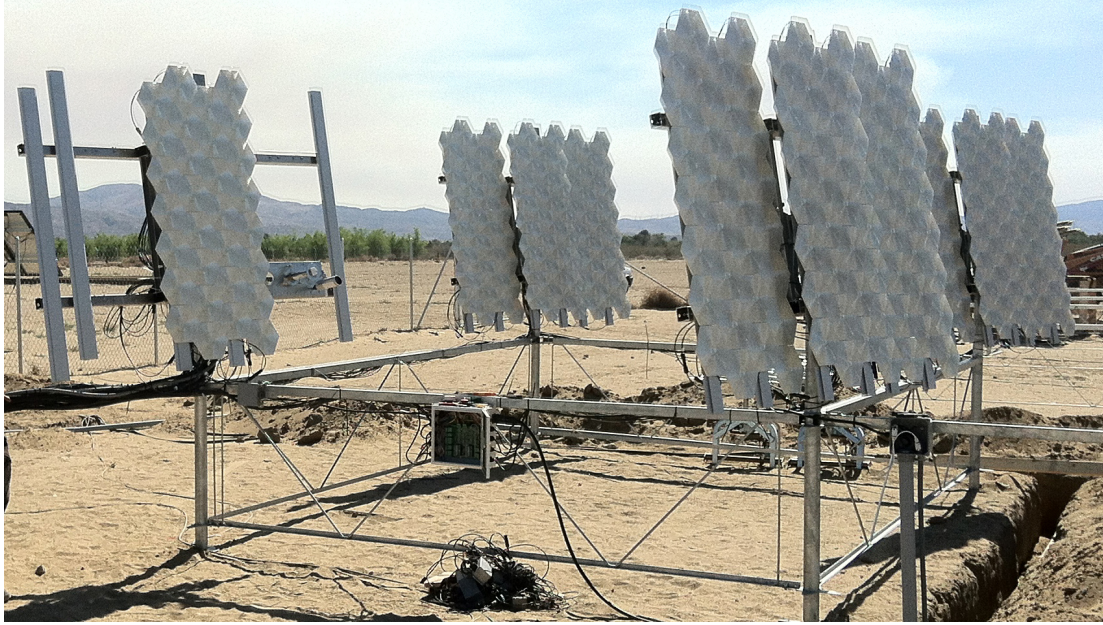


FIGURE 3.7 – Le suiveur solaire *Savanna* du partenaire industriel au site de tests de Mojave. On remarque que chacune des quatre sections du cadre supporte un seul panneau. On voit aussi, du côté gauche de la photo, le panneau prototype à l'étude.

poursuivent le soleil sur deux axes et sont formés d'un cadre à auto-lestage avec quatre têtes suiveuses à chacun des quatre coins du cadre. Chacune des têtes est opérée par un moteur différent et peut supporter qu'un seul panneau.

3.2.5 Panneau prototype

Un panneau de concentrateurs photovoltaïques à été fabriqué par le partenaire industriel dans le but de comparer la performance de quatre différents designs de cellules photovoltaïques triple-jonctions avec le même design de la composante optique. Le panneau compte trente optiques et les quatre designs de cellules sont répartis à travers ceux-ci. La composante optique a été préalablement caractérisée par le partenaire industriel et les cellules ont été individuellement caractérisées dans le laboratoire du Sunlab à l'aide de la machine d'efficacité quantique et des mesures de courbes $I-V$. Le panneau est un prototype



FIGURE 3.8 – Panneau prototype : photo 1 (à gauche) - vue de derrière et photo 2 (à droite) - vue de devant. On voit chacune des 30 cellules connectées individuellement par des câbles PV, qui eux vont se connecter dans la boîte grise présentée (la boîte contenant l'unité multiplexeur) dans la photo de droite. Ce panneau est installé au site de tests de l'Université d'Ottawa

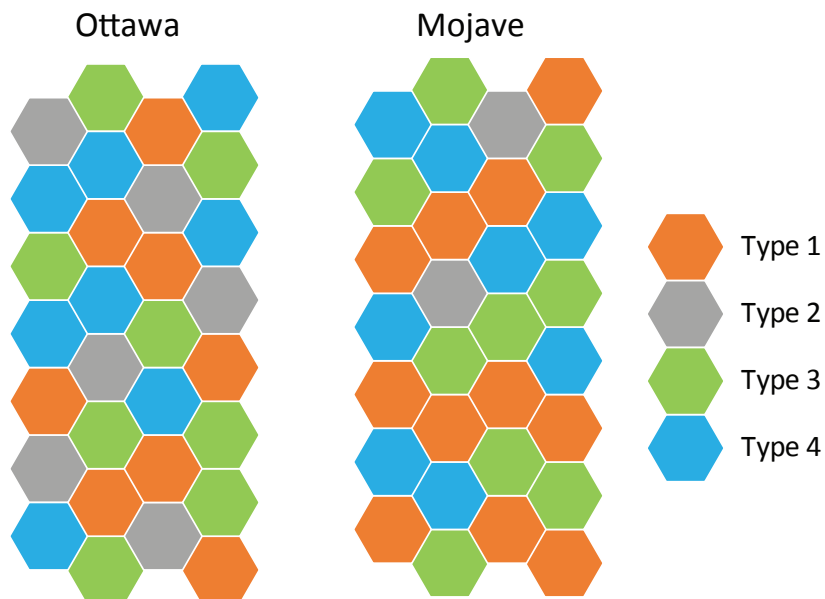


FIGURE 3.9 – Répartition des différents types de cellules photovoltaïques pour les panneaux prototypes des sites de tests d'Ottawa et de Mojave. Les couleurs utilisées pour représenter les types de cellules sur les panneaux seront aussi utilisées pour représenter les types de cellules dans les figures du chapitre 4

de troisième génération et est unique en son genre. La figure 3.9 démontre la répartition des différents types de cellules sur les panneaux des sites de tests d'Ottawa et de Mojave.

3.2.6 Unité multiplexeur

Une des composantes clés de l'expérience est l'unité multiplexeur. Cette composante a été dessinée et fabriquée par l'étudiant gradué *Matthew Wilkins* [17]. Chacune des cellules solaires vient s'y connecter de façon individuelle. En opération standard, le multiplexeur

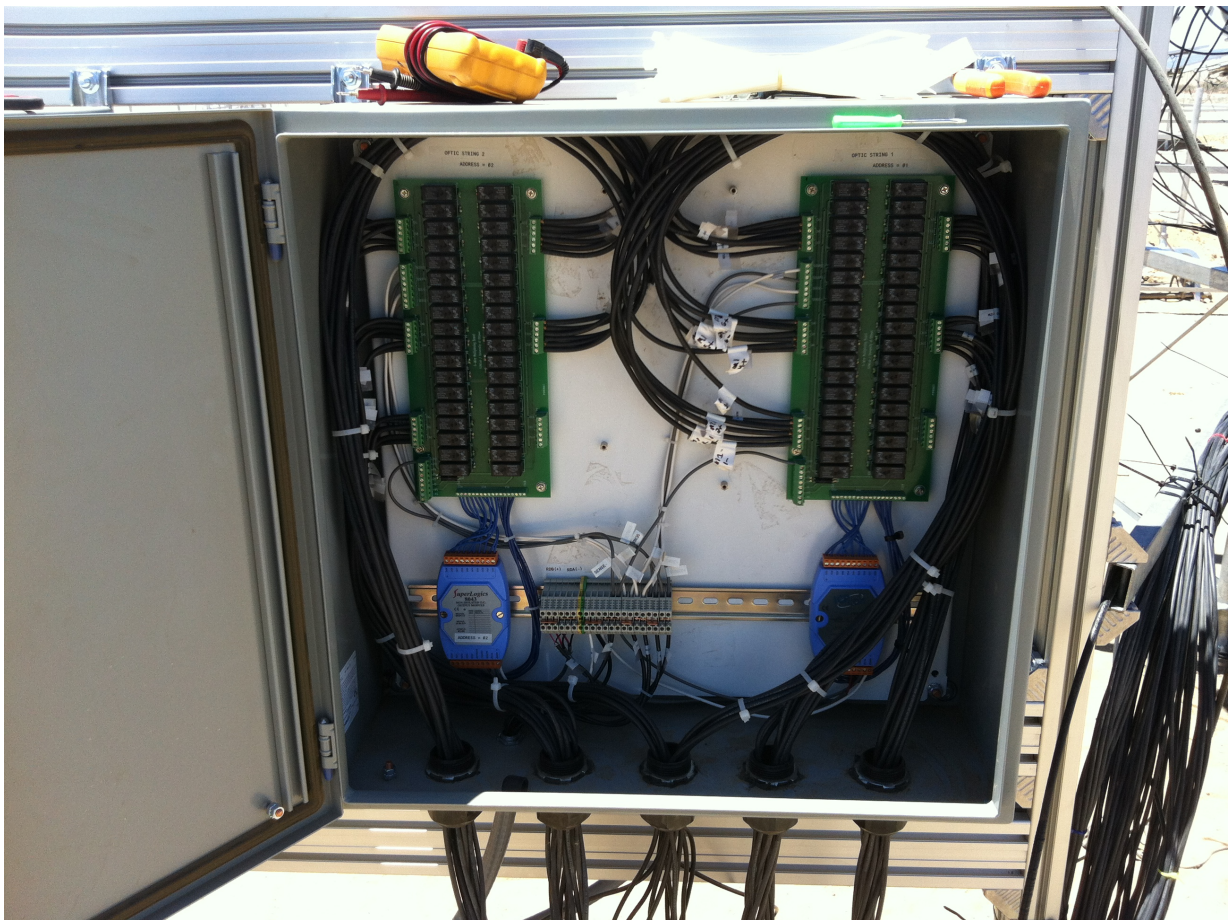


FIGURE 3.10 – Le multiplexeur du site de tests de Mojave connecté par 60 câbles PV aux 30 cellules correspondante du panneau prototype. On remarque aussi les 2 modules *SuperLogics 8043* qui sont connectés à l'unité multiplexeur pour le contrôle des relais qui serviront à isoler une cellule du panneau prototype pour y mesurer sa courbe $I-V$.

connecte les cellules en série, et sur instruction, isole une des cellules pour exécution d'une mesure $I-V$. Chacune des cellules est connectée à un relai du multiplexeur qui est activé ou désactivé par une module *SuperLogics 8043*. Un *SuperLogics 8043* compte 16 canaux/interrupteurs et peut donc contrôler 16 différents relais. Une tension de 24V est utilisée pour activer les relais qui, une fois fermés, connectent la cellule correspondante à l'unité de source et mesure. Ce processus, qui isolera toutes les cellules du panneau une à la suite de l'autre, est en fait orchestré par l'enregistreur de données CR1000 à tous les deux minutes.

Le but de garder les cellules connectées en série entre chaque cycle de mesure est de les laisser dans un mode d'opération standard afin d'obtenir des courbes $I-V$ représentatives.

3.2.7 Unité de source et mesures

Pour faire la mesure de courbe $I-V$, une unité de source et mesures *Keithley 2440* est employée. Lorsque l'unité multiplexeur sélectionne une cellule pour mesure, c'est au *Keithley 2440* que celle-ci est connectée. Lorsque l'instruction est envoyée par l'enregistreur de données via RS-485, l'unité de source et mesure impose une tension aux bornes de la cellule isolée et y mesure un courant. Une série de 81 mesures sont exécutées sur une plage de 0 à 3.4V. La valeur de chacune des 81 mesures et de la tension correspondante est communiquée à l'enregistreur de données et est ensuite envoyée au serveur du Sunlab.



FIGURE 3.11 – L'unité de source et mesures du site de tests de Mojave au cours de l'installation du système en mai 2013. L'instrument mesure la courbe I - V des cellules photovoltaïques du panneau prototype [13].

Chapitre 4

Simulations et analyse de données

4.1 Mesures de courbes $I-V$

Un des aspects importants du travail de recherche pour cette thèse est de bien s'assurer que les cellules photovoltaïques qui seront à l'étude soient en bon état. La meilleure façon de tester les cellules est de mesurer leurs courbes $I-V$. Tel que mentionné dans le chapitre de théorie, en regardant la courbe $I-V$ d'une cellule, il est possible de savoir si celle-ci contient des résistances parasitiques séries ou parallèles. La figure 4.1 démontre une courbe $I-V$ pour une cellule ayant une résistance parasitique en parallèle. Lorsqu'une telle courbe fut mesurée en laboratoire, la cellule en question fut mise de côté et éliminée de la sélection.

À l'inverse, la figure 4.2 démontre la courbe $I-V$ d'une cellule fonctionnant très bien. On ne détecte aucune résistance parasitique série ou parallèle. Les cellules démontrant une telle courbe $I-V$ ont été sélectionnées pour intégration dans les panneaux prototypes à l'étude.

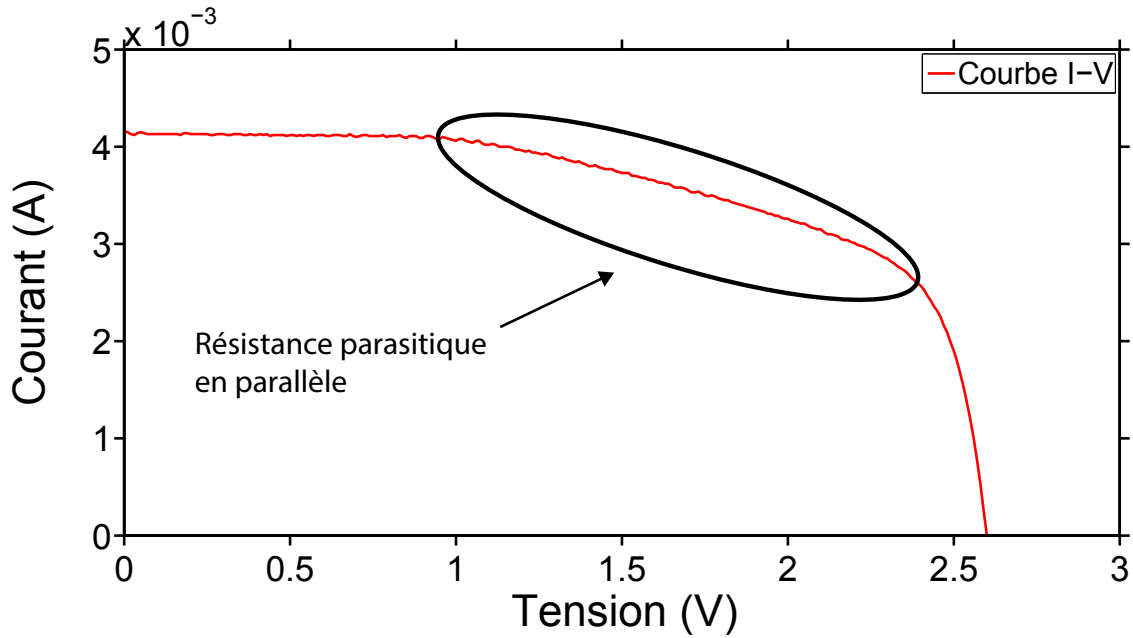


FIGURE 4.1 – Courbe $I-V$ pour une cellule photovoltaïque mesurée en laboratoire avec une source de 1x l'intensité du soleil avec un spectre de rayonnement AM1.5G à 25°C. On remarque l'effet d'une résistance parasitique en parallèle.

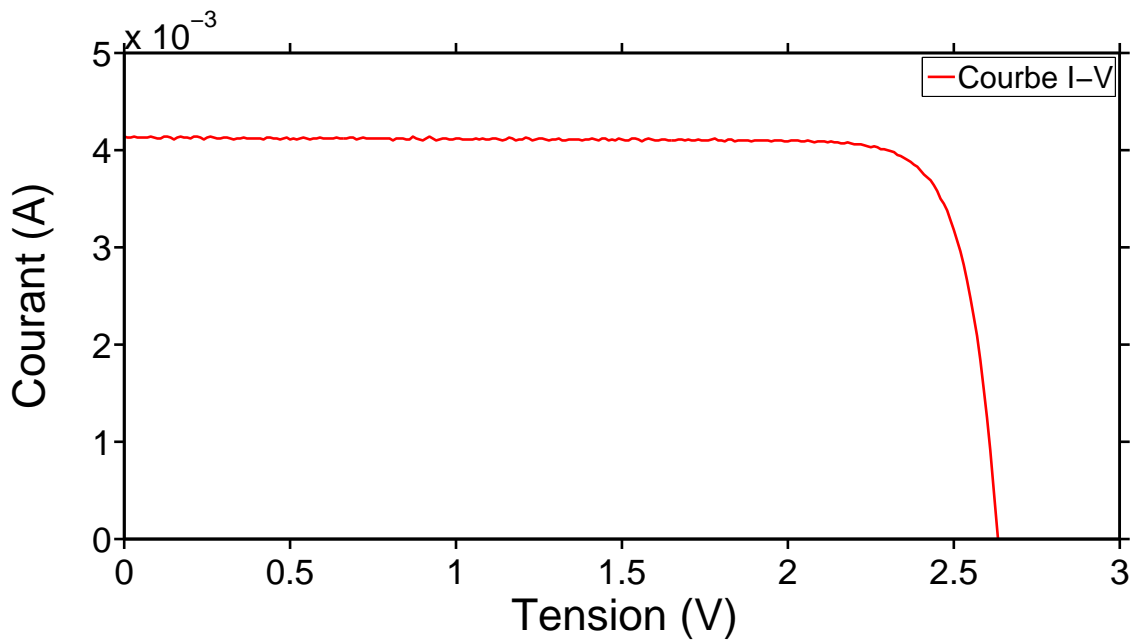


FIGURE 4.2 – Courbe $I-V$ pour une cellule photovoltaïque mesurée en laboratoire avec une source de 1x l'intensité du soleil avec un spectre de rayonnement AM1.5G à 25°C. Cette courbe ne comporte un minimum de résistance parasitique série et parallèle.

4.2 Simulations

L'analyse d'un système concentrateur photovoltaïque ne va pas sans avoir préalablement fait une simulation des performances en laboratoire. Ceci nous permet de comprendre le comportement du système et de pouvoir détecter les erreurs possibles lors des tests extérieurs.

L'étape de simulation se fait en deux parties. En premier lieu, on simule le spectre solaire. Puis, on fait l'usage du modèle mathématique de la production de courant d'une cellule solaire (équation 2.13). Le spectre solaire simulé ainsi que l'efficacité quantique de la cellule à l'étude sont ensuite insérés dans le modèle mathématique. L'efficacité de la cellule aura préalablement été mesurée en laboratoire à l'aide de la machine d'efficacité quantique. Malheureusement, le spectre de rayonnement du soleil n'était pas physiquement mesurable puisque le spectroradiomètre était en calibration chez le fabricant.

4.2.1 Simulation du spectre solaire à l'aide du modèle SMARTS

Le laboratoire de recherche américain *NREL* et Dr. Christian Gueymard ont développé un modèle mathématique complexe qui permet la simulation du spectre de rayonnement sur la surface de la terre [18]. *The Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine* connu sous l'abréviation *SMARTS*, ou parfois *SMARTS2* étant donnée la deuxième génération, calcule le rayonnement spectral pour des conditions atmosphériques précises [9]. Le code du modèle est compilé en FORTRAN. L'étudiant gradué Viktor Tantsiankou du Sunlab a fait la création d'un logiciel Labview qui combine le code FORTRAN avec un interface usagé [19]. C'est ce logiciel qui a été utilisé pour faire la simulation des spectres pour cette thèse.

Pour faire la simulation, 9 différents paramètres doivent être entrés pour que le modèle *SMARTS* puisse calculer le spectre de rayonnement.

1. La pression atmosphérique - Mesurée aux sites.
2. La quantité d'atmosphère - Calculée à partir de la température, de l'humidité relative, la saison et le temps de la journée
3. La vapeur d'eau - Calculée à partir de la température de l'air et de l'humidité relative.
4. La quantité d'ozone.
5. La quantité de polluant - Considérée comme négligeable pour cette thèse.
6. La quantité de dioxyde de carbone - Fixée à 370 ppmv.
7. Le modèle de calcul d'aérosol - Le modèle rural a été sélectionné.
8. La profondeur optique d'aérosol à 500nm - Fixée à 0.084.
9. La plage spectrale - 285nm à 1700nm.

Une station météorologique installée au site de tests du Sunlab permet de mesurer les différentes conditions atmosphériques nécessaires pour la simulation telles que la pression, l'humidité et la température. Une fois la simulation effectuée, il en sort un spectre avec une résolution de 1 nm pour 285-1700 nm et de 5 nm pour 1700-2800 nm, tel que démontré à la figure 4.3. Si on fait la somme cumulative de l'intensité pour chacune des longueurs d'ondes du spectre simulé à cette figure, on obtient une puissance totale de $948.74 \text{ W/m}^2/\text{nm}$.

Pour cette thèse, il est intéressant de faire la simulation du spectre de rayonnement à travers la journée pour ensuite pouvoir simuler la production de courant des cellules

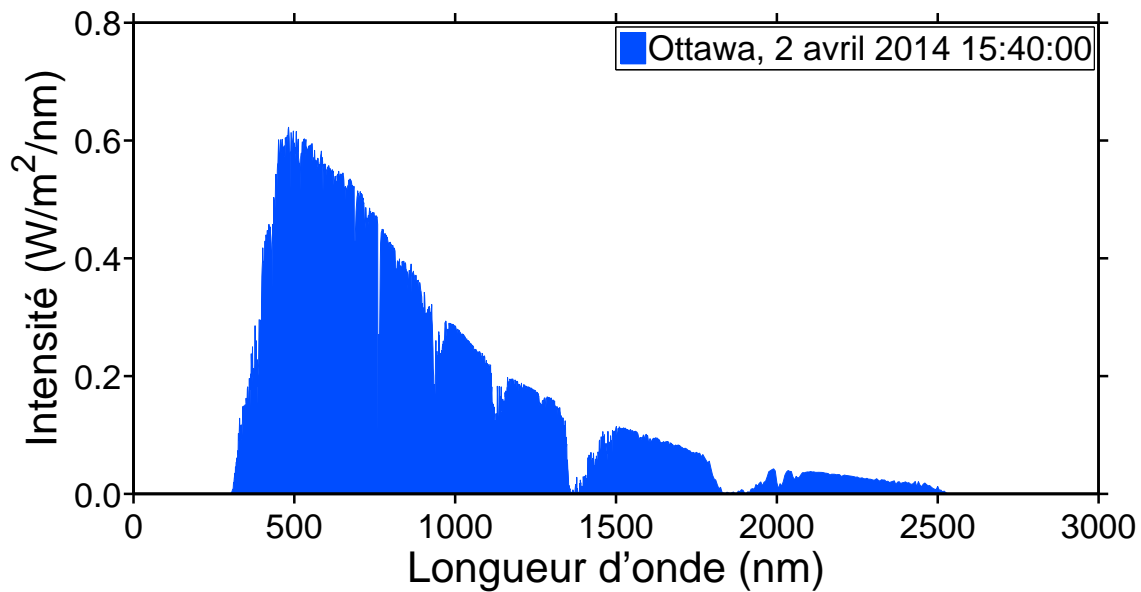


FIGURE 4.3 – Spectre de rayonnement perpendiculaire direct simulé pour Ottawa le 2 avril 2014 à 15h40 en utilisant le modèle SMARTS. La puissance totale pour ce spectre est d'environ $950 \text{ W/m}^2/\text{nm}$.

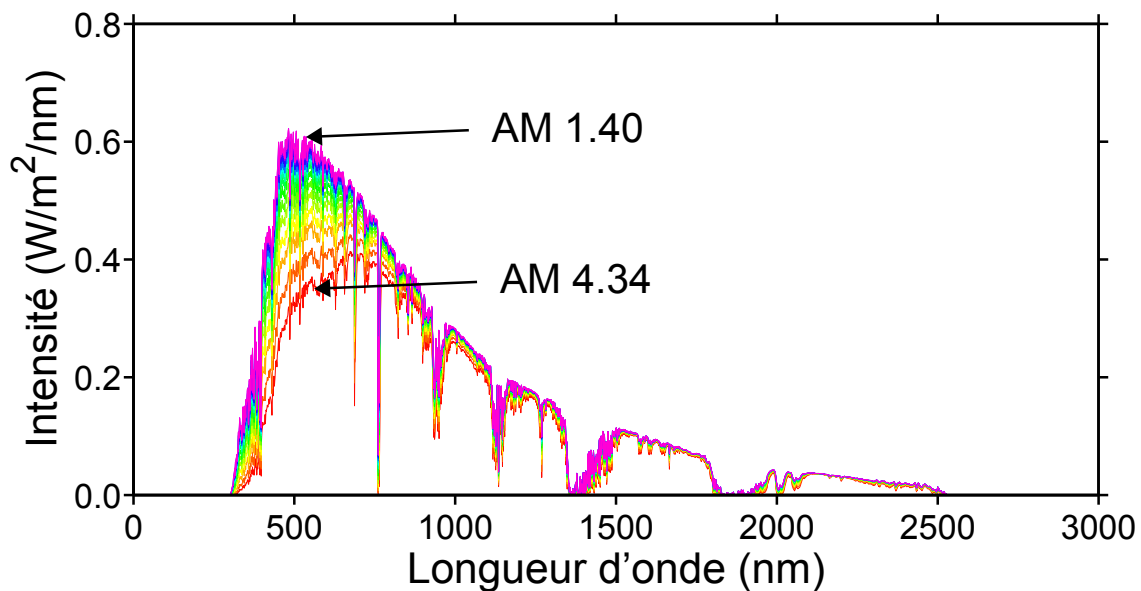


FIGURE 4.4 – Simulation du spectre de rayonnement pour Ottawa le 23 mars 2014. Cette figure démontre le changement du spectre en intervalles de 15 minutes allant de 8h20 (AM 4.34) en matinée (courbe rouge) jusqu'à 13h15 (AM 1.40) ce qui correspond approximativement au midi solaire (courbe violette).

photovoltaïques à l'étude. On peut voir à la figure 4.4 que la forme du spectre varie en fonction du temps de la journée. Puisque chacune des sous-cellules des cellules triple-jonctions utilisées dans notre panneau prototype absorbent différentes sections du spectre de rayonnement, le changement de la forme du spectre aura un impact important sur la production de courant de chacune des sous-cellules.

4.2.2 Simulation du courant de court-circuit

Le courant de court-circuit d'une cellule photovoltaïque permet d'évaluer rapidement les performances de celle-ci. Tel que mentionné au chapitre de théorie, le courant de court-circuit est proportionnel à l'intensité du rayonnement sur la surface de la cellule. Pour faire la simulation du courant de court-circuit (I_{SC}), il est nécessaire de connaître l'efficacité quantique de la cellule à l'étude. Puisque nous étudions des cellules solaires à triple-jonctions, la mesure d'efficacité quantique sera en trois parties. La figure 4.5 représente l'efficacité quantique d'une des cellules de type 1 à l'étude dans cette thèse. On y voit la différence de plages de longueurs d'ondes couvertes par chacune des sous-cellules.

Quatre designs de cellules sont à l'étude pour cette thèse. Les types 1 et 2 sont des cellules commerciales standards fabriquées par deux manufacturiers différents. Les types 3 et 4 sont des cellules fabriquées sur mesure dans le but d'optimiser les performances des concentrateurs photovoltaïques de *Morgan Solar Inc.* Le désert de Mojave est l'emplacement pour lequel les cellules de type 3 et 4 ont été optimisées.

Le but de cette optimisation est de faire en sorte que la sous-cellule inférieure produise plus de courant afin que celle-ci ne soit pas la raison d'une limitation du courant total. On se rappelle que le courant produit par une cellule solaire est égal et limité par la sous-

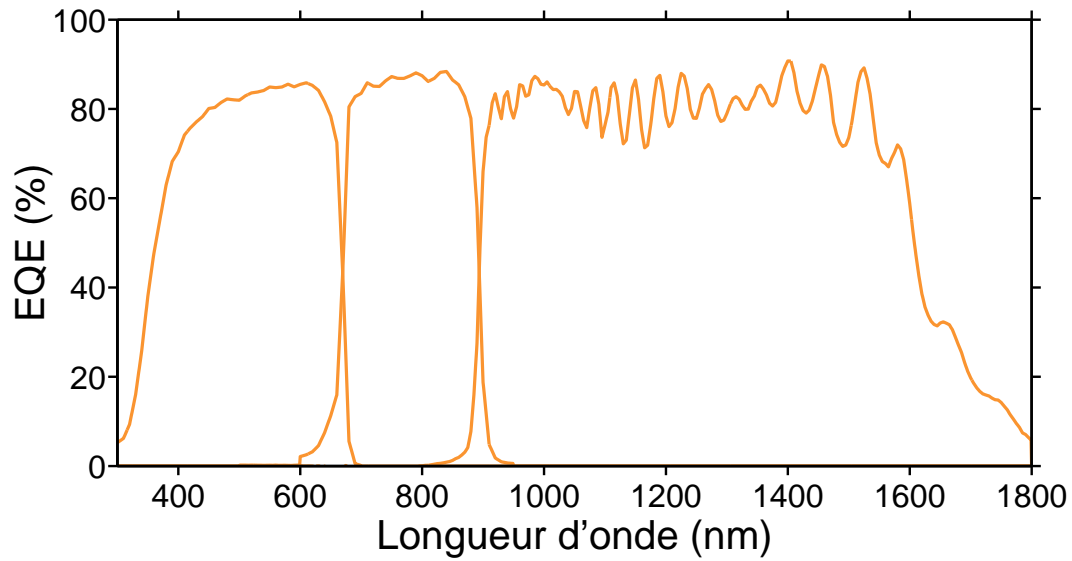


FIGURE 4.5 – Courbe d'efficacité quantique pour une des cellules photovoltaïques à triple-jonction. On remarque trois différentes courbes. Celle le plus à gauche représente la sous-cellule supérieure, celle du milieu représente la sous-cellule intermédiaire et celle de droite représente la sous-cellule inférieure.

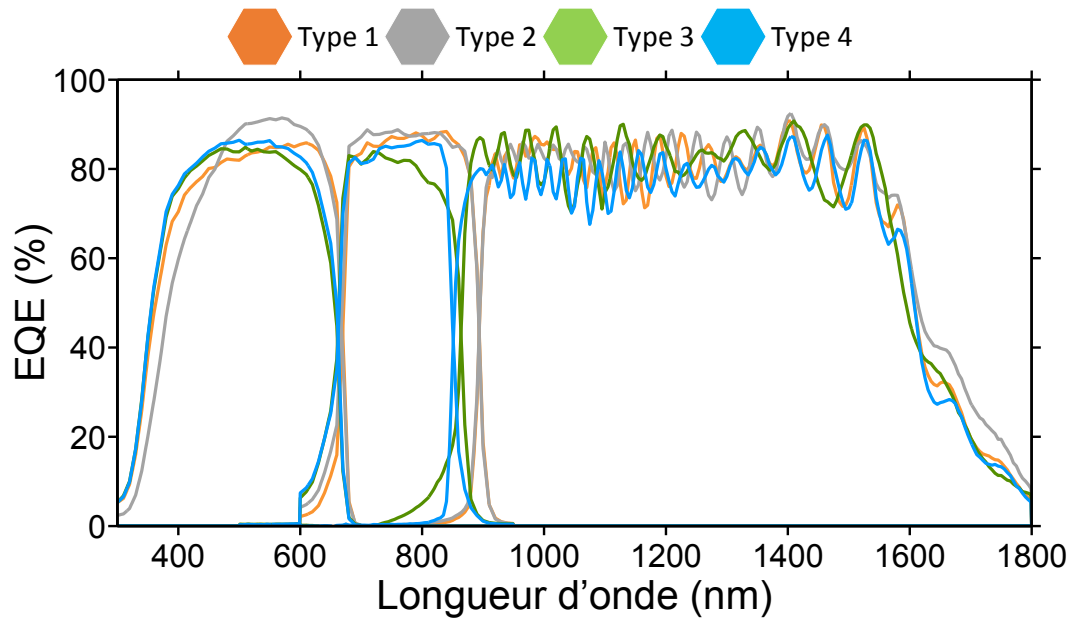


FIGURE 4.6 – Courbe d'efficacité quantique pour les quatre types de cellules à l'étude. Les courbes vertes et bleues représentent les types 3 et 4 respectivement. On remarque que ces dernières ont la courbe d'efficacité quantique de leurs sous-cellules inférieures déplacée vers la gauche. Cette caractéristique fait en sorte que la sous-cellule inférieure des types 3 et 4 produira un courant plus élevé que celle des types 1 et 2.

cellule produisant le moins de courant. La figure 4.6 démontre le changement dans la courbe d'efficacité quantique de la sous-cellule inférieure des cellules de type 3 (courbe verte) et 4 (courbe bleue).

Une fois que l'efficacité quantique de chacune des sous-cellules est mesurée, on utilise l'équation 2.13 pour calculer la production de courant de celles-ci. En omettant d'appliquer l'intégrale, on peut calculer la densité de courant produite pour chacune des longueurs d'ondes du spectre de rayonnement incident sur la cellule. Ceci est démontré aux figures 4.7 et 4.8. À la figure 4.8, il est important de remarquer la différence entre les deux densités de courant produites. Les courbes de couleurs vives représentent 13h30 et les courbes pâles 8h20. Le principal facteur d'influence dans ce cas est l'épaisseur de la masse d'air. La courbe grise pâle qui représente le spectre de rayonnement de 8h20, démontre une

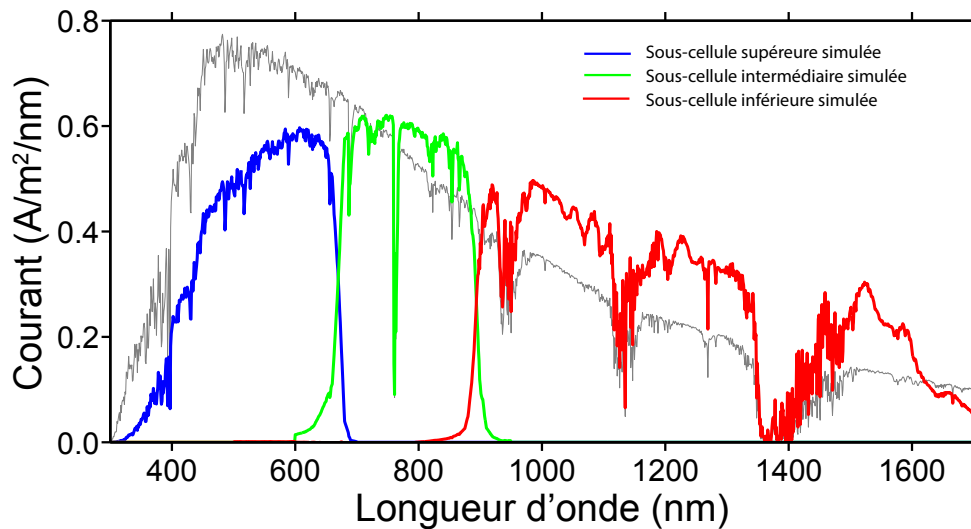


FIGURE 4.7 – Densité de courant pour une cellule de type 1 à l'étude. Chacune des sous-cellules est représentée par une couleur différente. La courbe bleue représente la sous-cellule supérieure, la courbe verte représente la sous-cellule intermédiaire et la courbe rouge représente la sous-cellule inférieure. On remarque en arrière-plan une représentation de la courbe du spectre de rayonnement utilisée pour produire la courbe de densité de courant de la cellule.

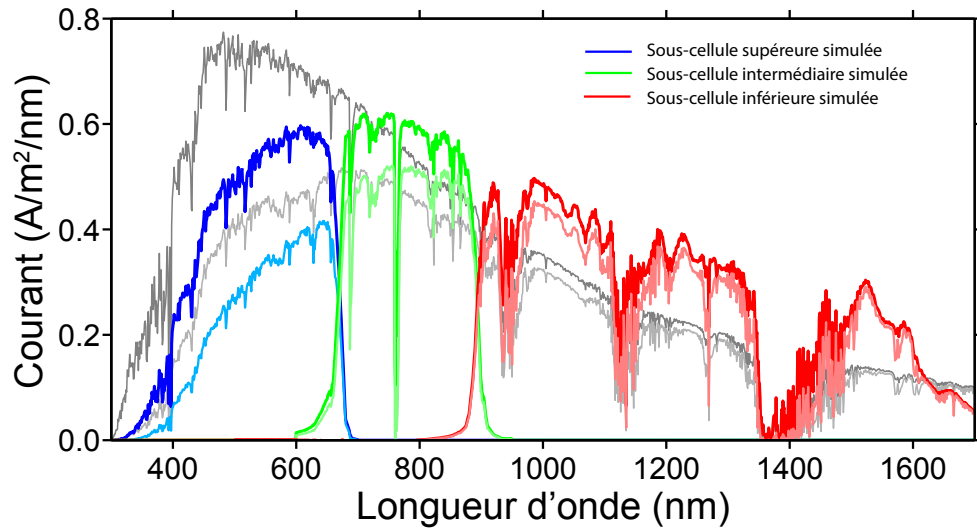


FIGURE 4.8 – Densité de courant pour deux temps différents de la journée du 23 mars 2014. Les courbes de couleurs vives représentent 13h10 (AM 1.40) et les courbes de couleurs pâles représentent 8h20 (AM 4.34). On remarque en arrière-plan les courbes du spectre de rayonnement correspondantes. Il est intéressant de remarquer la grandeur de variation des courbes bleues par rapport aux courbes vertes et rouges.

absorption majeure des longueurs d'ondes inférieure à 700 nm. Ceci a pour effet d'affecter la sous-cellule supérieure plus que les autres.

Si maintenant on applique l'intégrale de l'équation 2.13, on peut calculer le courant de court-circuit produit par chacune des sous-cellules à travers la journée. De cette façon, il sera possible d'observer le comportement de celles-ci et de voir si le changement de design des cellules de type 3 et 4 à bel et bien l'effet escompté.

Les figures 4.9, 4.10, 4.11 et 4.12 représentent les courbes de courant de court-circuit de chacune des sous-cellules pour les cellules de type 1, 2, 3 et 4 respectivement. Les courants ont été simulés le 30 mai 2014 à Ottawa et le 1 juin 2014 dans le désert de Mojave.

De façon similaire, dans toutes les quatre figures (4.9, 4.10, 4.11 et 4.12), on remarque que la production de courant de court-circuit pour les sous-cellules supérieures et intermédiaires est semblable lorsqu'on compare entre Ottawa et Mojave. Par contre, on

voit une différence notable pour celle des sous-cellules inférieures. La sous-cellule inférieure absorbe les photons de longueur d'onde au delà de 900 nm, tel que démontré à la figure 4.7. Puisque le désert de Mojave a un environnement plus sec que la région d'Ottawa, moins d'absorption est causé par les particules d'eau. Par conséquent, le spectre de rayonnement a plus d'énergie au delà de 900 nm. De plus, le spectre utilisé dans la simulation étant ajusté pour le rayonnement perpendiculaire direct réellement mesuré à Ottawa et dans le Mojave, on peut voir dans les courbes de courants de courts-circuits des variations reliées à des passages nuageux. Le phénomène est particulièrement important vers la fin de la journée, et cela, aux deux emplacements.

Tel que mentionné antérieurement, les cellules de type 3 et 4 ont été dessinées pour

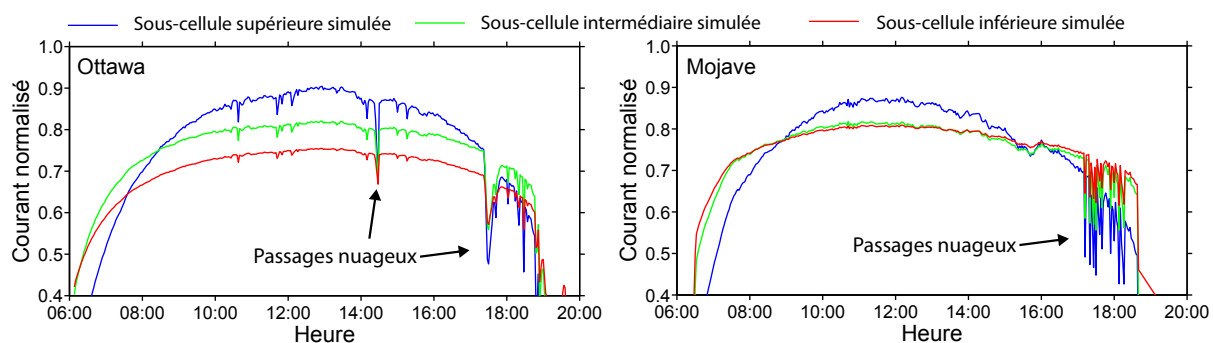


FIGURE 4.9 – Cellule de type 1 - Courbes de courants de chacune des sous-cellules pour Ottawa et Mojave.

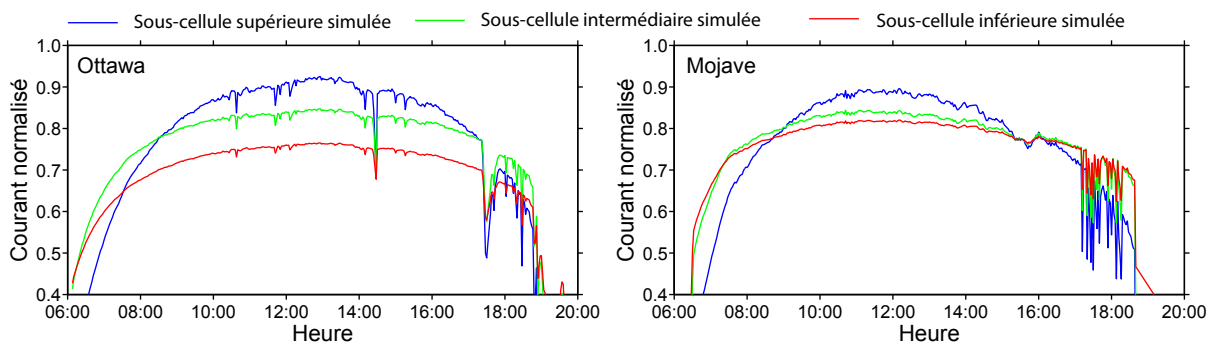


FIGURE 4.10 – Cellule de type 2 - Courbes de courants de chacune des sous-cellules pour Ottawa et Mojave.

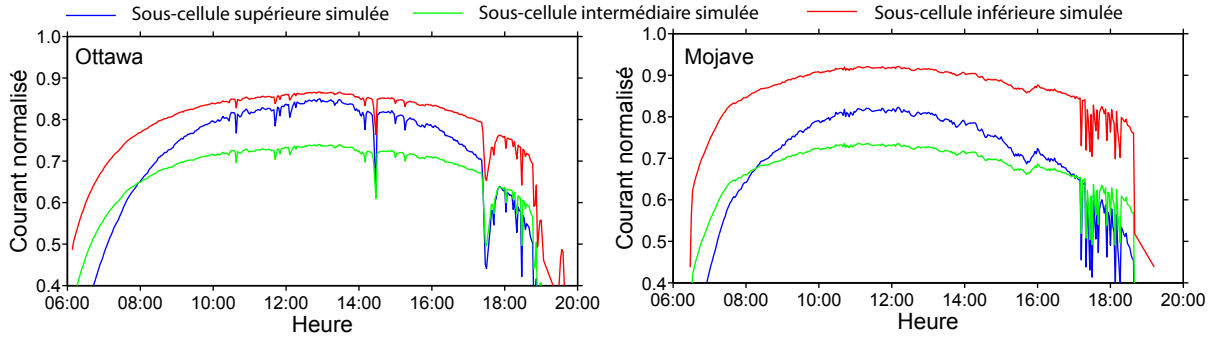


FIGURE 4.11 – Cellule de type 3 - Courbes de courants de chacune des sous-cellules pour Ottawa et Mojave.

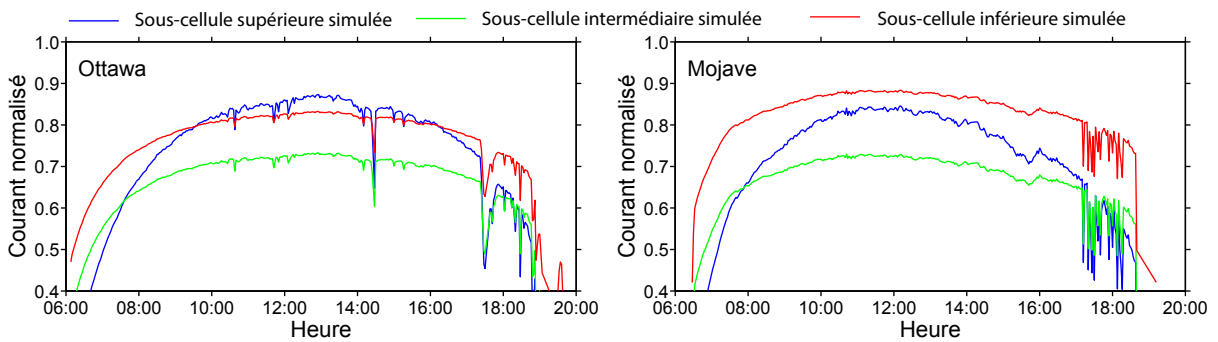


FIGURE 4.12 – Cellule de type 4 - Courbes de courants de chacune des sous-cellules pour Ottawa et Mojave.

augmenter la production de courant de la sous-cellule inférieure afin que celle-ci ne limite point la production totale de courant de la cellule. Ce phénomène est bien représenté aux figures 4.11 et 4.12. Par contre, on remarque aussi que ce changement est au détriment des sous-cellules supérieures et intermédiaires.

Ceci est particulièrement vrai pour le désert de Mojave. La figure 4.13 démontre à quel point la réduction de production de courant des sous-cellules supérieures et intermédiaires a, pour la journée sélectionnée, un impacte d'environ 10% sur la production théorique de courant de court-circuit.

Il est à noter que des résultats similaires ont été mesuré pas l'étudiant Mark Yandt lors de sa thèse de maîtrise [20].

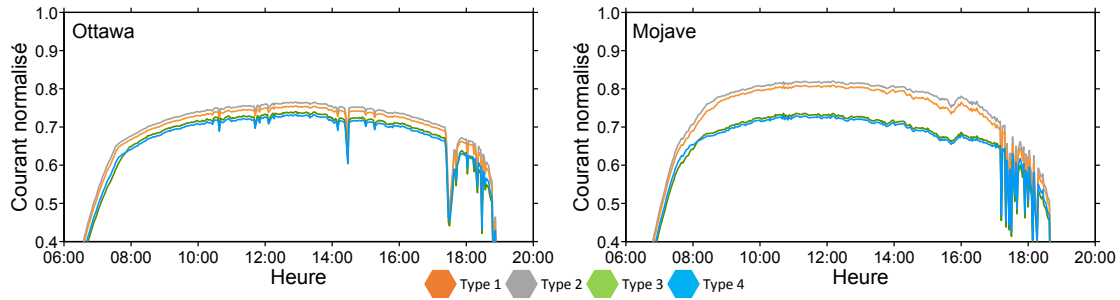


FIGURE 4.13 – Production de courant de court-circuit pour chacun des quatre type de cellules photovoltaïques. L’attribution des couleurs des courbes est telle qu’à la figure 3.9. On peut observer le meilleur rendement des cellules de type 1 et 2.

4.3 Analyse de données

4.3.1 Courbes $I-V$

À la base de l’analyse des performances des panneaux prototypes se trouve la mesure des courbes de courant - tension ($I-V$). Ces courbes permettent de vérifier différents aspects du fonctionnement des cellules à l’étude. Pour cette analyse, les journées sélectionnées sont le 30 mai 2014 à Ottawa et le 1 juin 2014 dans le désert de Mojave. On utilise les mêmes journées que pour les simulations puisque ceci nous permettra de faire une bonne comparaison des mesures réelles avec les valeurs théoriques. Les figures 4.14 et 4.15 représentent les mesures de courbe $I-V$ de chacune des cellules des panneaux d’Ottawa et de Mojave, respectivement, pour le midi solaire.

Les cellules de type 3 et 4, qui ont un design permettant à leurs sous-cellules inférieures de produire plus de courant, ont par conséquent une tension de circuit-ouvert quelque peu supérieure à celle des cellules de type 1 et 2. On peut prendre connaissance de ce phénomène à la figure 4.15 mais on ne peut malheureusement pas en dire autant de la figure 4.14. Cette dernière démontre également une présence de résistances séries indésirables pour quelques-

unes des cellules. C'est la pente moins prononcée de ces quelques cellules qui conduit à cette hypothèse [2]. Ce type de résistance peut être attribué à un problème à l'intérieur même de la cellule. Par contre, chacune des cellules du panneau a préalablement été testée en laboratoire pour détecter ce type de défaut de fabrication. Il est donc peu probable que cette résistance série soit causée par un défaut de fabrication. On peut alors penser à un problème de contact électrique, soit au niveau des connecteurs PV, soit au niveau de la soudure des fils aux bornes de la cellule.

La variation de la tension de circuit-ouvert pour un même type de cellule implique certainement une différence dans la température d'opération. On peut attribuer ceci soit à un mauvais contact entre la cellule et le dissipateur de chaleur, soit à un mauvais alignement de la cellule par rapport à la composante optique. En générale, lorsque la température augmente, la tension de circuit-ouvert diminue et le courant de court-circuit augmente

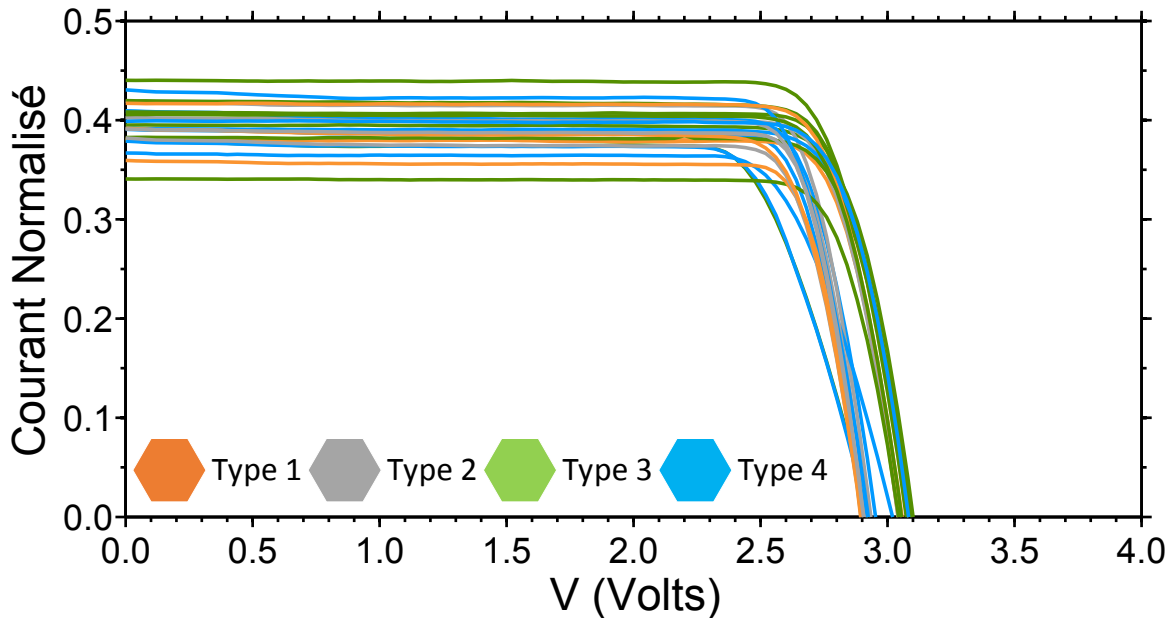


FIGURE 4.14 – Ottawa - Courbes $I-V$ des cellules photovoltaïques du panneau prototype au midi solaire. On remarque une variation d'environ 20% dans les courants de court-circuits.

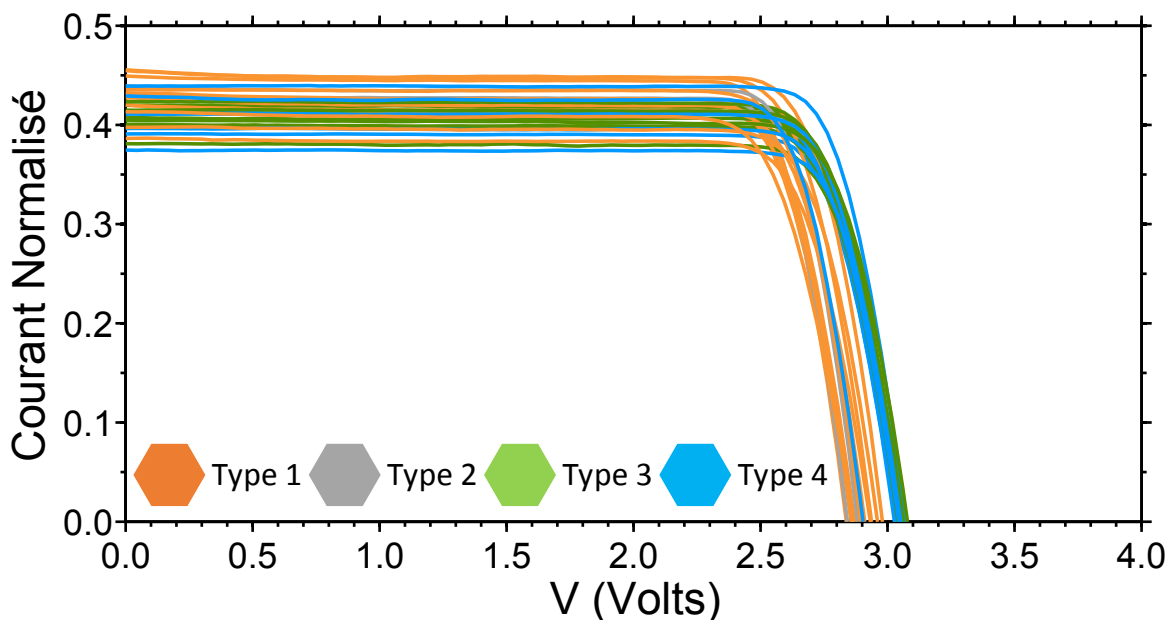


FIGURE 4.15 – Mojave - Courbes I - V des cellules photovoltaïques du panneau prototype au midi solaire. On remarque une variation d'environ 15% dans les courants de court-circuits.

légèrement [2].

Un point important à remarquer ici est la variation des points maximums de puissances et des courants de courts-circuits pour les différents types de cellules photovoltaïques. Du matin au soir et d'une journée à l'autre, on remarque une plage de variation similaire. Il est donc difficile de déterminer lequel des types de cellules est réellement meilleur. On voit cependant qu'en moyenne, les cellules ont un courant de court-circuit plus élevé dans le Mojave qu'à Ottawa. Ceci est dû au rayonnement ayant une puissance de $994 \text{ W/m}^2/\text{nm}$ dans le Mojave et une puissance de $955 \text{ W/m}^2/\text{nm}$ à Ottawa. Tel que mentionné antérieurement, la production de courant de court-circuit est proportionnelle à l'intensité du rayonnement.

4.3.2 Courant de courts-circuits

Le but de cette recherche est de déterminer si les cellules de type 3 et 4 réussissent à produire un courant de court-circuit plus élevé que les cellules de type 1 et 2, en augmentant la production de courant de la sous-cellule inférieure. Le matériel utilisé pour la fabrication de la composante optique des panneaux prototypes du partenaire industriel a une fonction de transfert de la lumière qui coupe l'apport en photons dans les longueurs d'ondes où la sous-cellule inférieure opère. Telle est la raison pour la fabrication des cellules de type 3 et 4. D'après les figures 4.14 et 4.15, il est difficile de tirer conclusion. Des cellules représentatives de chacun des types ont donc été sélectionnées pour Ottawa et le désert de Mojave. La figure 4.16 démontre la production de courant de court-circuit pour chacune de ces cellules représentatives au cours des journées préalablement choisies pour les deux emplacements. Les courbes des deux emplacements ont été superposées sur la même figure afin de pouvoir mieux les comparer.

Aucun des types de cellules n'est vraiment supérieur en terme de production de courant. On observe cependant que les cellules à Ottawa produisent environ 5% moins de courant que celles dans le désert de Mojave au midi solaire. Ceci correspond directement à la différence de rayonnement entre les deux emplacements, indiquant une performance comparable en tenant compte de l'ensoleillement local.

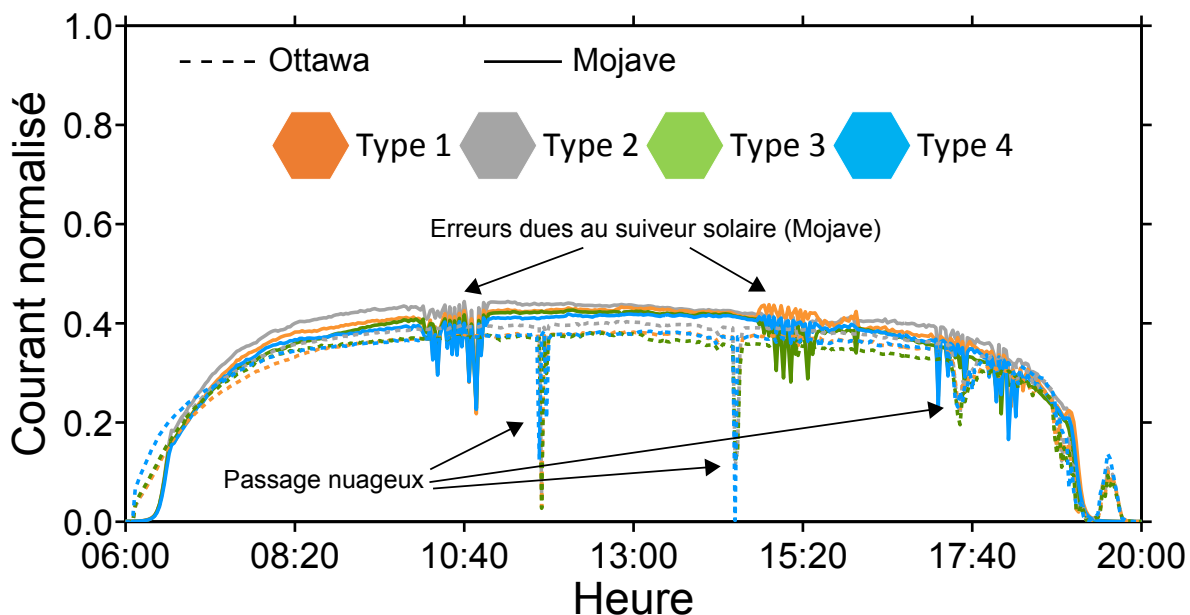


FIGURE 4.16 – Courbe de courants de courts-circuits pour une cellule représentative de la moyenne pour chacun des quatre types de cellules solaires à Ottawa et dans le désert de Mojave en fonction de l’heure de la journée.

4.3.3 Comparaison des courants de courts-circuits simulés et mesurés

Pour terminer l’analyse, une comparaison des courants de court-circuits simulés et mesurés sera présentée. Jusqu’à présent, les simulations ont démontré que pour une belle journée de printemps, les cellules de type 1 et 2 ont une production de courant plus élevée que celles de type 3 et 4. Ceci est particulièrement vrai pour le désert de Mojave étant donné l’environnement plus sec de l’emplacement. On remarque aussi que les cellules de type 2, au deux emplacements, produisent légèrement plus de courant (environ 10%) pour les journées sélectionnée.

Les figures 4.17 à 4.23 font la comparaison des courants de courts-circuits mesurés et simulés pour Ottawa et le désert de Mojave. La première chose qu’on remarque en regardant

ces figures est la différence importante de l'amplitude entre les courbes simulées et les courbes mesurées. En fait, les cellules de tous les types, tant à Ottawa que dans le Mojave, produisent environ 50% du courant en simulation. Pour essayer de mieux comprendre le comportement des cellules à l'étude, les courbes de courants de court-circuits simulées ont été adaptées (réduite d'un facteur d'environ 50%) pour suivre le mieux possible la courbe de courant mesurée. De cette façon, le courant mesuré est superposé aux courbes adaptées de courants des sous-cellules. Ceci permet de déterminer laquelle des sous-cellules limite le courant à travers la journée.

Dans tous les cas, en matinée et en soirée, la sous-cellule supérieure semble limiter le courant. D'autre part, c'est la sous-cellule intermédiaire qui semble limiter le courant pour le milieu de la journée, à l'exception des figures 4.21 et 4.23 où la sous-cellules supérieure semble limiter le courant pour toute la journée. Cependant, les courbes de la sous-cellule intermédiaire et celles de la sous-cellule inférieure se ressemblent beaucoup (se distinguant majoritairement en amplitude). Il est donc difficile d'être certain que la section de la journée qui semble être limitée par la sous-cellule intermédiaire ne serait pas en fait limitée par la sous-cellules inférieure. Un facteur qui augmente ce niveau d'incertitude est la différence de 50% entre le courant simulé et le courant mesuré.

L'hypothèse posé tient la route pour un ajustement correspondant à 50% du courant simulé. Ceci suppose un changement proportionnel pour les trois sous-cellules. En réalité, il est difficile de savoir à quelle niveau cette atténuation survient. Les concentrateurs du partenaire industriel guident la lumière à travers la composante optique jusqu'au centre de celle-ci. Le résultat est une absorption des photons pour certaines longueurs d'ondes à travers le matériel. Les simulations sont effectuées à l'aide de la fonction de transfert de

la composante optique déterminée par le partenaire industriel. Il serait possible que des pertes supplémentaires soient causées à l'étape d'assemblage du produit. Soit au niveau de la composante optique elle-même, soit au niveau de l'alignement. Peut-être aussi que des imperfections supplémentaires peuvent avoir lieu dans le matériel.

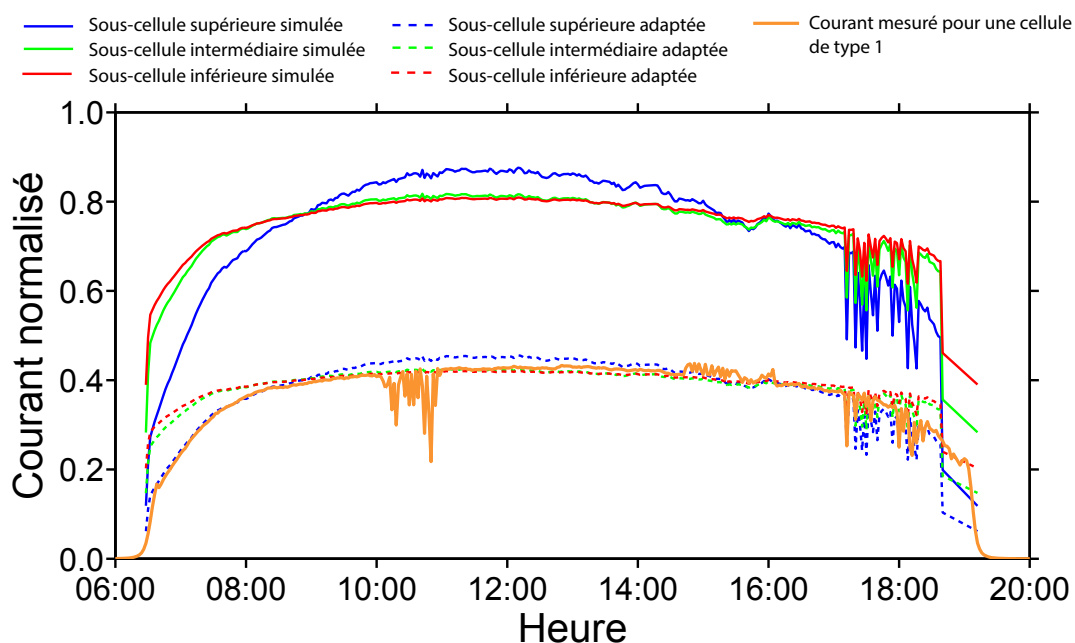


FIGURE 4.17 – Mojave, Type 1 - Courbes de courant de court-circuit simulées de chacune des sous-cellules en comparaison avec une courbe de courant de court-circuit mesurée en fonction de l'heure de la journée.

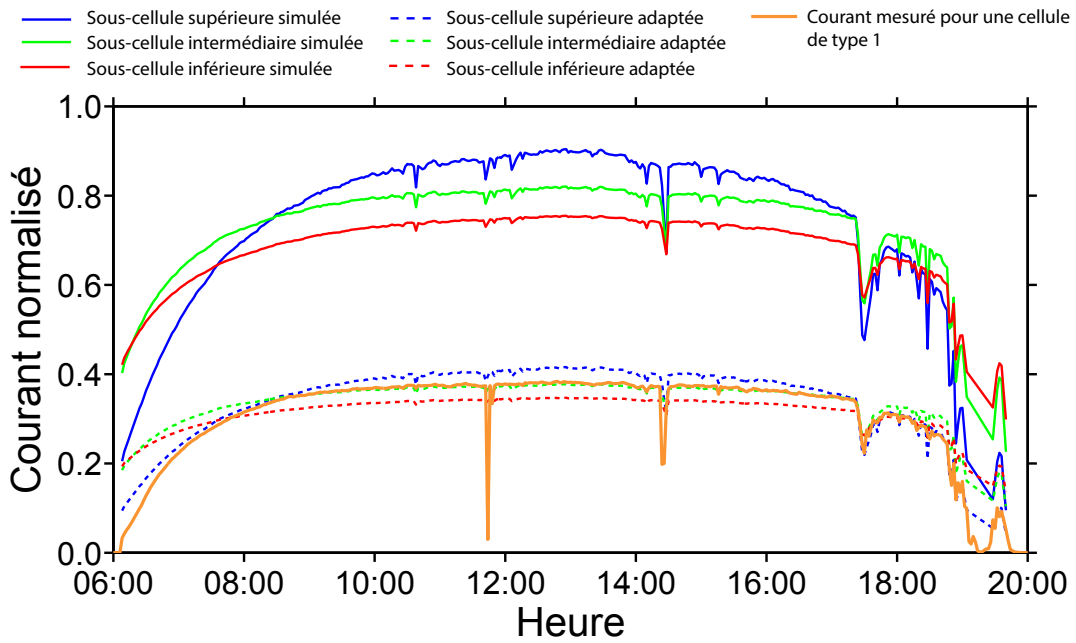


FIGURE 4.18 – Ottawa, Type 1 - Courbes de courant de court-circuit simulées de chacune des sous-cellules en comparaison avec une courbe de courant de court-circuit mesurée en fonction de l'heure de la journée.

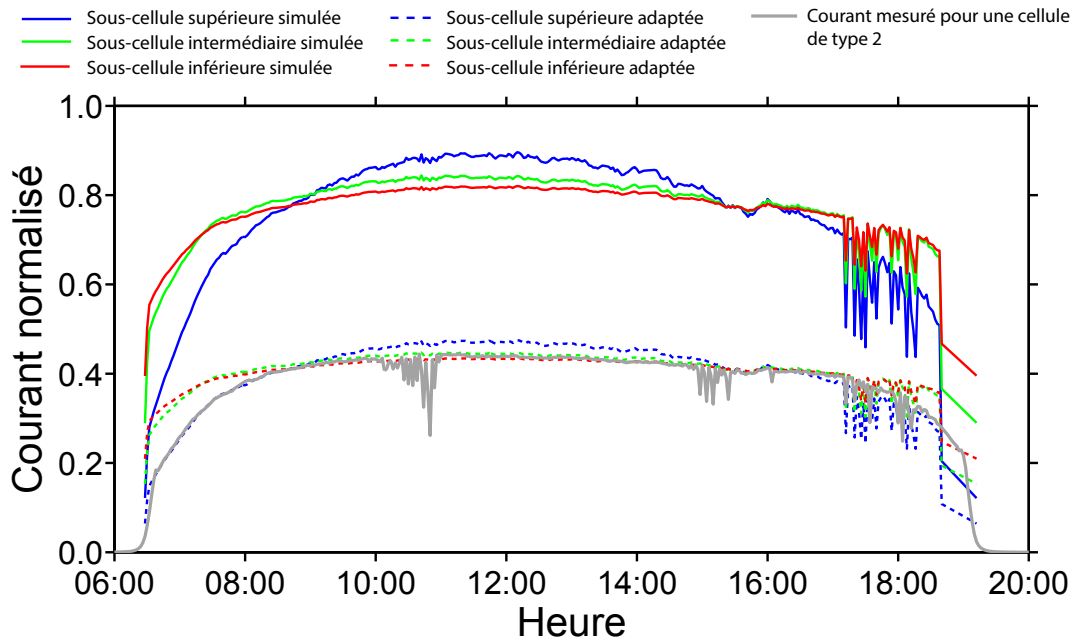


FIGURE 4.19 – Mojave, Type 2 - Courbes de courant de court-circuit simulées de chacune des sous-cellules en comparaison avec une courbe de courant de court-circuit mesurée en fonction de l'heure de la journée.

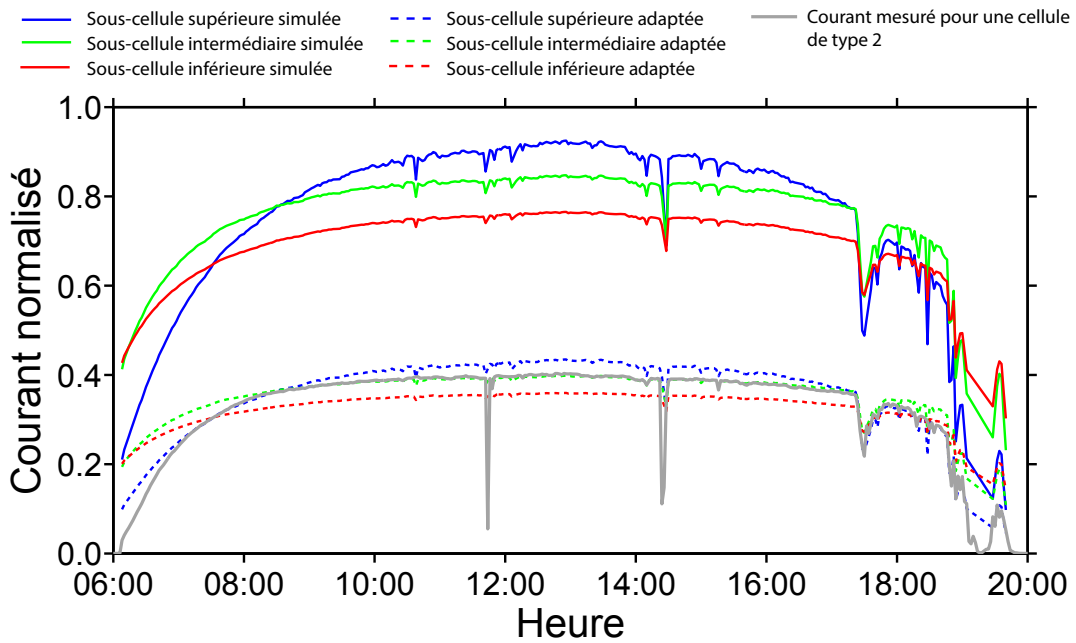


FIGURE 4.20 – Ottawa, Type 2 - Courbes de courant de court-circuit simulées de chacune des sous-cellules en comparaison avec une courbe de courant de court-circuit mesurée en fonction de l'heure de la journée.

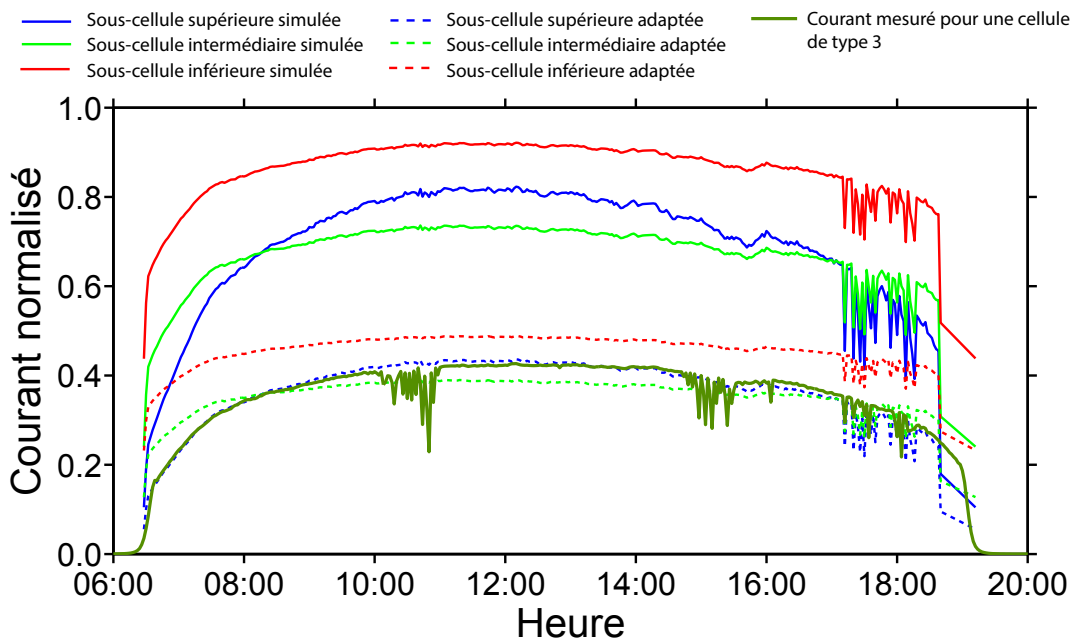


FIGURE 4.21 – Mojave, Type 3 - Courbes de courant de court-circuit simulées de chacune des sous-cellules en comparaison avec une courbe de courant de court-circuit mesurée en fonction de l'heure de la journée.

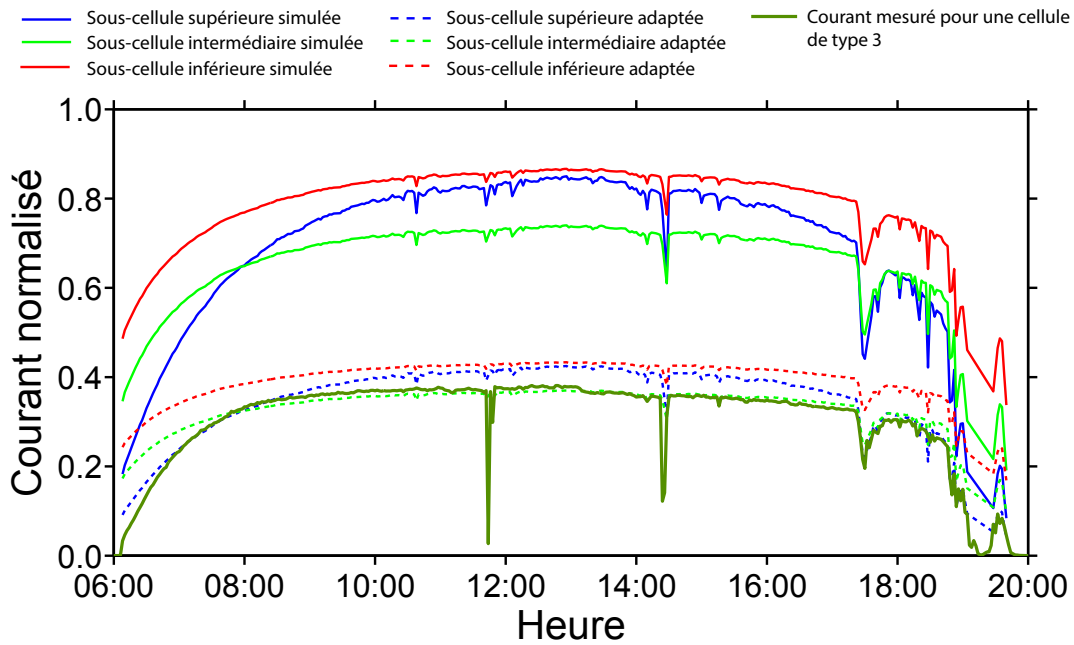


FIGURE 4.22 – Ottawa, Type 3 - Courbes de courant de court-circuit simulées de chacune des sous-cellules en comparaison avec une courbe de courant de court-circuit mesurée en fonction de l'heure de la journée.

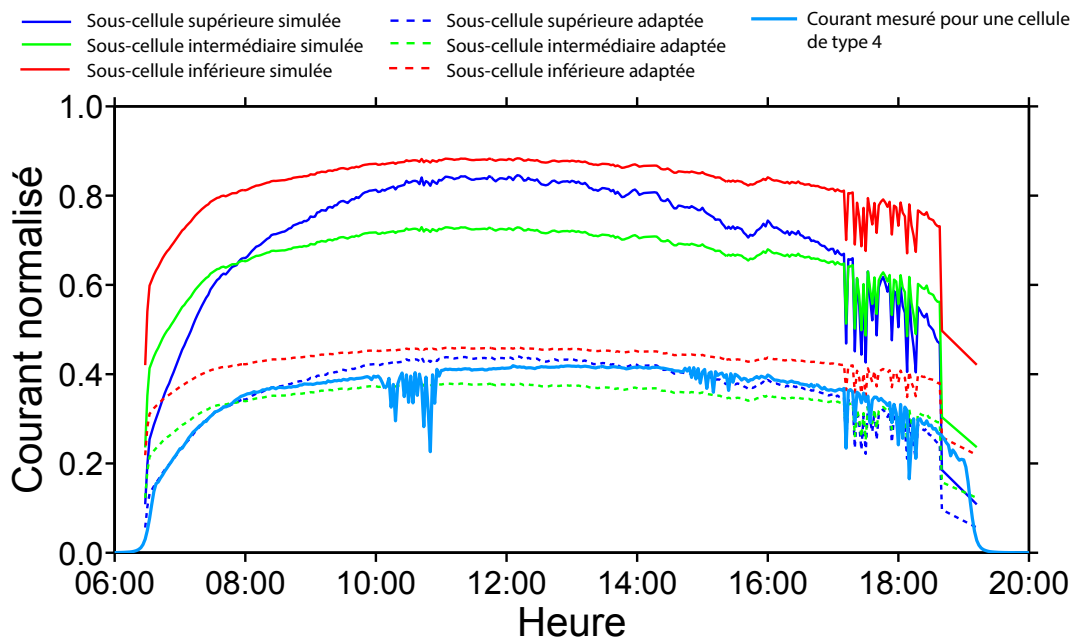


FIGURE 4.23 – Mojave, Type 4 - Courbes de courant de court-circuit simulées de chacune des sous-cellules en comparaison avec une courbe de courant de court-circuit mesurée en fonction de l'heure de la journée.

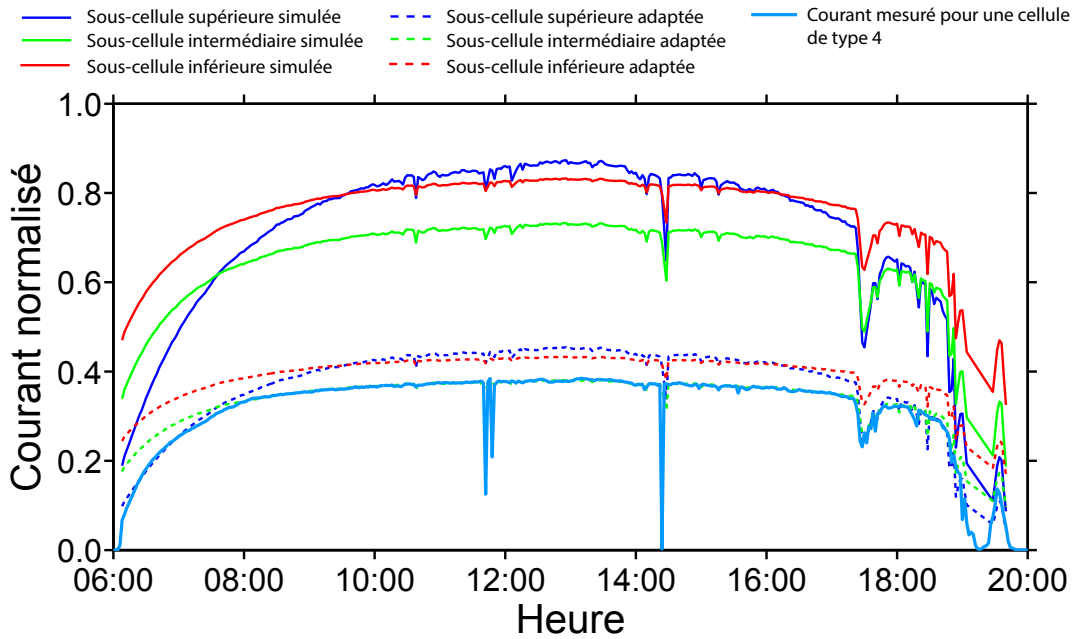


FIGURE 4.24 – Ottawa, Type 4 - Courbes de courant de court-circuit simulées de chacune des sous-cellules en comparaison avec une courbe de courant de court-circuit mesurée en fonction de l'heure de la journée.

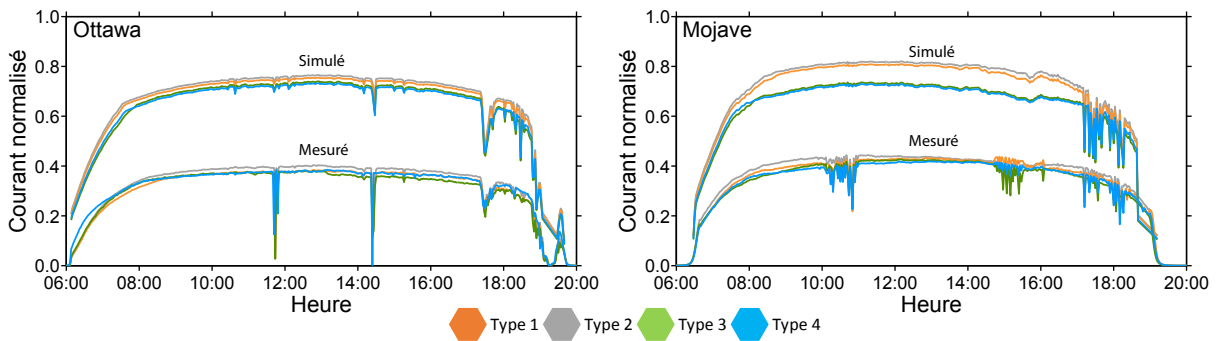


FIGURE 4.25 – Comparaison des courants de court-circuits mesurés et simulés pour Ottawa et le désert du Mojave en fonction de l'heure de la journée. Chacun des types de cellules est représenté.

Chapitre 5

Conclusions et recommandations

5.1 Conclusion

L'objectif de ce travail était de présenter le déploiement de deux sites de tests identiques ainsi que les résultats de recherches que ceux-ci ont permis d'obtenir. La recherche avait pour but de comparer les performances de quatre différents designs de cellules photovoltaïques à triple-jonctions en opération avec le système optique du partenaire industriel. Les résultats obtenus dans le cadre de cette thèse ont permis de mieux comprendre le fonctionnement des panneaux prototypes du partenaire industriel. Ils ont aussi permis d'identifier de nouveaux enjeux de recherches.

Les quatre types de cellules à l'étude ont démontré des performances similaires en opération aux deux emplacements des sites de tests. Ceci va à l'encontre des données de simulations, et ce, surtout pour le désert de Mojave. On peut tout de même mentionner que pour cette génération de panneaux prototypes fonctionnant comme des concentrateurs plats, l'opération du système est relativement tolérante des variations dans le design des

cellules solaire à triple-jonctions.

Le développement ainsi que le déploiement des systèmes de mesures et d'acquisition de données aux deux sites de tests du Sunlab ont permis de faire l'évaluation des performances de concentrateurs photovoltaïques telles que présentées dans cette thèse. De plus, les méthodes utilisées pourront être reprises pour l'analyse des prochaines générations de concentrateurs et servir à l'avancement de l'industrie.

L'expérience acquise, que ce soit lors du développement et déploiement du système ou lors de l'exécution des mesures en laboratoires et du traitement de données, figure aussi parmi les résultats importants de cette recherche.

5.2 Travaux subséquents

Plusieurs travaux subséquents pourraient être effectués afin de poursuivre la recherche :

1. Analyse supplémentaire de la fonction de transfert de la composante optique des concentrateurs photovoltaïques du partenaire industriel afin de s'assurer que les simulations sont bel et bien représentatives de la réalité.
2. Analyse de la qualité de fabrication des concentrateurs afin de détecter des imperfections aléatoires possibles dans le matériel ainsi que dans l'assemblage en général.
3. Analyse de l'alignement entre la composante optique et la cellule photovoltaïque des concentrateurs.

References

- [1] C. Gueymard. Daily spectral effects on concentrating pv solar cells as affected by realistic aerosol optical depth and other atmospheric conditions. In *SPIE Solar Energy+ Technology*, pages 741007–741007. International Society for Optics and Photonics, 2009.
- [2] G. Masters. *Renewable and efficient electric power systems*. John Wiley & Sons, 2013.
- [3] S. Wenham. *Applied photovoltaics*. Routledge, 2011.
- [4] C. Gueymard. The sun’s total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models. *Solar energy*, 76(4) :423–453, 2004.
- [5] R. Willson and H. Hudson. Solar luminosity variations in solar cycle 21. *Nature*, 332(6167) :810–812, 1988.
- [6] S. Bowden and C. Honsberg. Pvcdrum. *Online : <http://pveducation.org>*, 2011.
- [7] M. Iqbal. *An introduction to solar radiation*. Elsevier, 1983.
- [8] V. Andreev and A. Luque. *Concentrator photovoltaics*. Springer, 2007.

- [9] C. Gueymard. Simple model of the atmospheric radiative transfer of sunshine (smarts2) : algorithms and performance assessment. *Florida : Solar Energy Center*, 1995.
- [10] J. Messenger, R.A. Ventre. *Photovoltaic Systems Engineering. 3rd ed.* Florida : Taylor and Francis Group, 2010.
- [11] D. Chemisana. Building integrated concentrating photovoltaics : a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1) :603–611, 2011.
- [12] Morgan Solar. How it works, May 2014. <http://morgansolar.com/how-it-works>.
- [13] A. Muron. Field installation of a fully instrumented prototype solar concentrator system : Thermal and photovoltaic analysis. Master’s thesis, University of Ottawa, 2013.
- [14] NREL. Best research-cell efficiencies, May 2014. http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg.
- [15] J. Nelson. *The physics of solar cells*, volume 57. World Scientific, 2003.
- [16] Newport. *Oriel product training; spectral irradiance*. Oriel Instruments, 2006. http://assets.newport.com/webDocuments-EN/images/Light_Sources.pdf.
- [17] M. Wilkins, R. Beal, J. Haysom, et al. Design of a multiplexer to characterize individual optics at a concentrating photovoltaic test site. In *Photonics North 2011*, pages 800725–800725. International Society for Optics and Photonics, 2011.
- [18] NREL. About smarts. <http://www.nrel.gov/rredc/smarts/about.html>.

- [19] V. Tatsiankou. Instrumentation development for site-specific prediction of spectral effects on concentrated photovoltaic system performance. Master's thesis, University of Ottawa, 2014.
- [20] M. Yandt. Characterization and performance analysis of high efficiency solar cells and concentrating photovoltaic systems. Master's thesis, University of Ottawa, 2012.