

Étude avancée des comportements thermique et électrique d'une cellule photovoltaïque

Mohamed AMARA*, Rodolphe VAILLON

Université de Lyon, CNRS, INSA-Lyon, UCBL, CETHIL, UMR5008, F-69621, Villeurbanne, France
*(auteur correspondant : mohamed.amara@insa-lyon.fr)

Résumé – Les dispositifs expérimentaux et les simulateurs numériques disponibles à ce jour pour étudier les composants photovoltaïques ne sont pas en mesure de fournir une analyse complète des impacts thermiques sur leur fonctionnement et leurs performances. Nous présentons l'état actuel du développement d'une modélisation capable de prédire les comportements thermique et électrique couplés d'une cellule photovoltaïque. Une sélection de résultats pour une cellule PV solaire standard en silicium cristallin permet de mettre en évidence la possibilité d'effectuer des études avancées.

Nomenclature

h	coefficient d'échange, $W m^{-2} K^{-1}$	<i>Indices et exposants</i>
Q	source thermique totale, $W m^{-3}$	1,2 milieu extérieur (haut, bas)
V	vitesse de recombinaison de surface, m/s	
T	température, K	

1. Introduction

A l'heure actuelle, le rendement des cellules photovoltaïques (PV) industrielles dites de première génération à base de silicium cristallin ne dépasse pas 19% dans les conditions standards de température (25°C) et d'éclairement solaire (AM1.5). Ce rendement peut chuter considérablement dans des conditions réelles d'utilisation, particulièrement lorsque la température croît ($\sim -0,45\% K^{-1}$). A ce jour, deux approches sont classiquement mises en œuvre pour prédire le fonctionnement et les performances des composants PV. D'une part, les modèles analytiques expriment la variation du courant de court circuit et de la tension en circuit ouvert, en fonction de la température et de conditions environnementales (éclairage, vent,...), et pour ces dernières, via diverses corrélations issues de mesures [1-3]. Hélas ces modèles, bien que largement utilisés pour prédire la production électrique, ne traduisent pas toute la complexité du couplage entre les phénomènes optiques, thermiques (radiatif – conductif – convectif) et électriques. D'autre part, les modèles physiques et numériques classiquement employés pour optimiser certaines caractéristiques des cellules (propriétés électriques, architecture,...) tels que PC1D [4], AMPS-1D [5] et DESSIS [6], considèrent la température de fonctionnement comme une donnée d'entrée ou modélisent de manière très incomplète le couplage entre les phénomènes électriques et thermiques.

De ce fait, pour aller au-delà des fonctionnalités actuelles de ces modèles et proposer une analyse conjointe des comportements thermique et électrique, nous avons choisi de développer progressivement au CETHIL un modèle 1D couplant transport des charges électriques avec les transferts conductifs et radiatifs au sein de la cellule. Après une rapide présentation de la problématique, nous fournissons les éléments essentiels de ce modèle, avec une mise en exergue d'aspects particuliers. Nous proposons une analyse de quelques résultats dans l'optique de bien mettre en évidence les possibilités d'analyse avancée offerte par un tel outil de modélisation physique et numérique.

2. Descriptif du problème. Modélisations physiques et numériques

2.1. Descriptif du problème

On considère une cellule PV (figure 1) constituée d'une jonction (N sur P) d'épaisseur W_p , soumise sur sa face supérieure à des éclairagements –solaires– directs et diffus. Les échanges thermiques aux limites sont représentés par un coefficient d'échange (h_{f1} et h_{f2}) avec un milieu extérieur à température T_{f1} et T_{f2} . L'objectif est de mettre en place des modèles physiques et des méthodes de résolution pour déterminer, en fonction des caractéristiques de la cellule (géométrie, propriétés électriques, thermophysiques et radiatives), des conditions d'éclairément (solaire direct et diffus, de l'environnement diffus dans l'infrarouge) et aux limites thermiques : la caractéristique courant-tension, les rendements quantiques interne et externe, la puissance électrique maximale extractible et le rendement de la cellule, la température de la cellule, les contributions spectrales des diverses sources thermiques. L'établissement d'un modèle complet des transferts radiatifs, thermiques et du transport des charges pour une telle cellule, doit permettre d'accéder à ces grandeurs et de comprendre leur évolution en fonction des diverses variables d'intérêt.

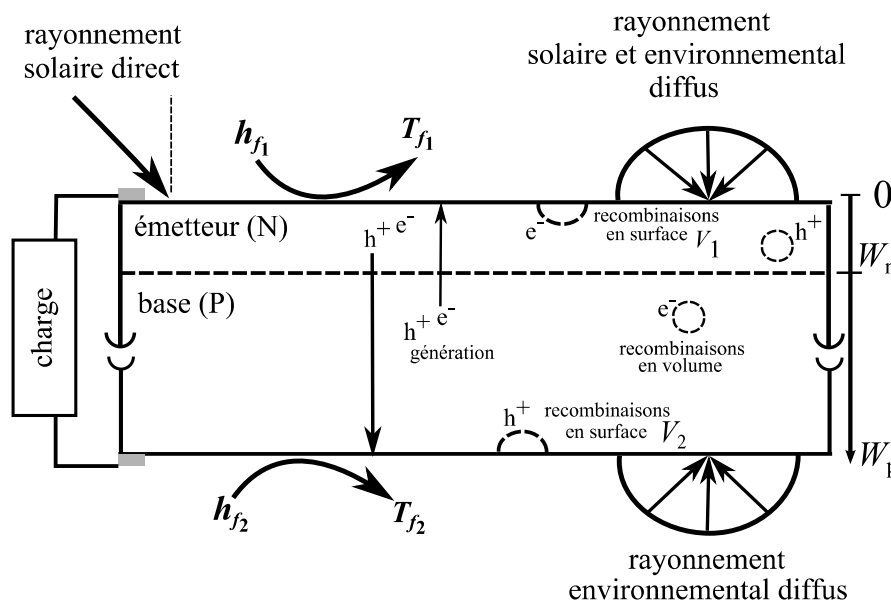


Figure 1 : Représentation schématique de la problématique.

2.2. Modélisations physiques et numériques

Les éléments de base relatifs à la physique du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque peuvent être consultés dans les références [1, 7]. Dans ce qui suit, nous fournissons les grandes lignes du modèle, dont les détails sur sa version initiale sont accessibles dans les références [8, 9]. Le schéma présenté sur la figure 2 met en évidence les composantes essentielles du modèle et les couplages entre les différents phénomènes physiques impliqués. En premier lieu (repère R1 sur la figure 2), les caractéristiques géométriques de la cellule sont définies, et les modules d'évaluation des propriétés radiatives, thermophysiques et électriques, la plupart dépendantes de la température, sont mis en place. Compte tenu de la thermodépendance des caractéristiques physiques et des couplages impliqués, la résolution du problème passe par une approche itérative et donc une initialisation de certaines variables (R2) de même que l'intégration des conditions aux limites radiatives (éclairéments), thermiques et électriques (vitesses de recombinaison aux surfaces V_1 et V_2). L'équation de la

chaleur (R3) est résolue une première fois par un algorithme de Thomas, sans sources, pour fournir un premier champ de températures. Lors des itérations suivantes, diverses sources locales thermiques pourront être intégrées : de thermalisation des charges photogénérées (S1), associées à leur recombinaison (S2) et thermique radiative (S3).

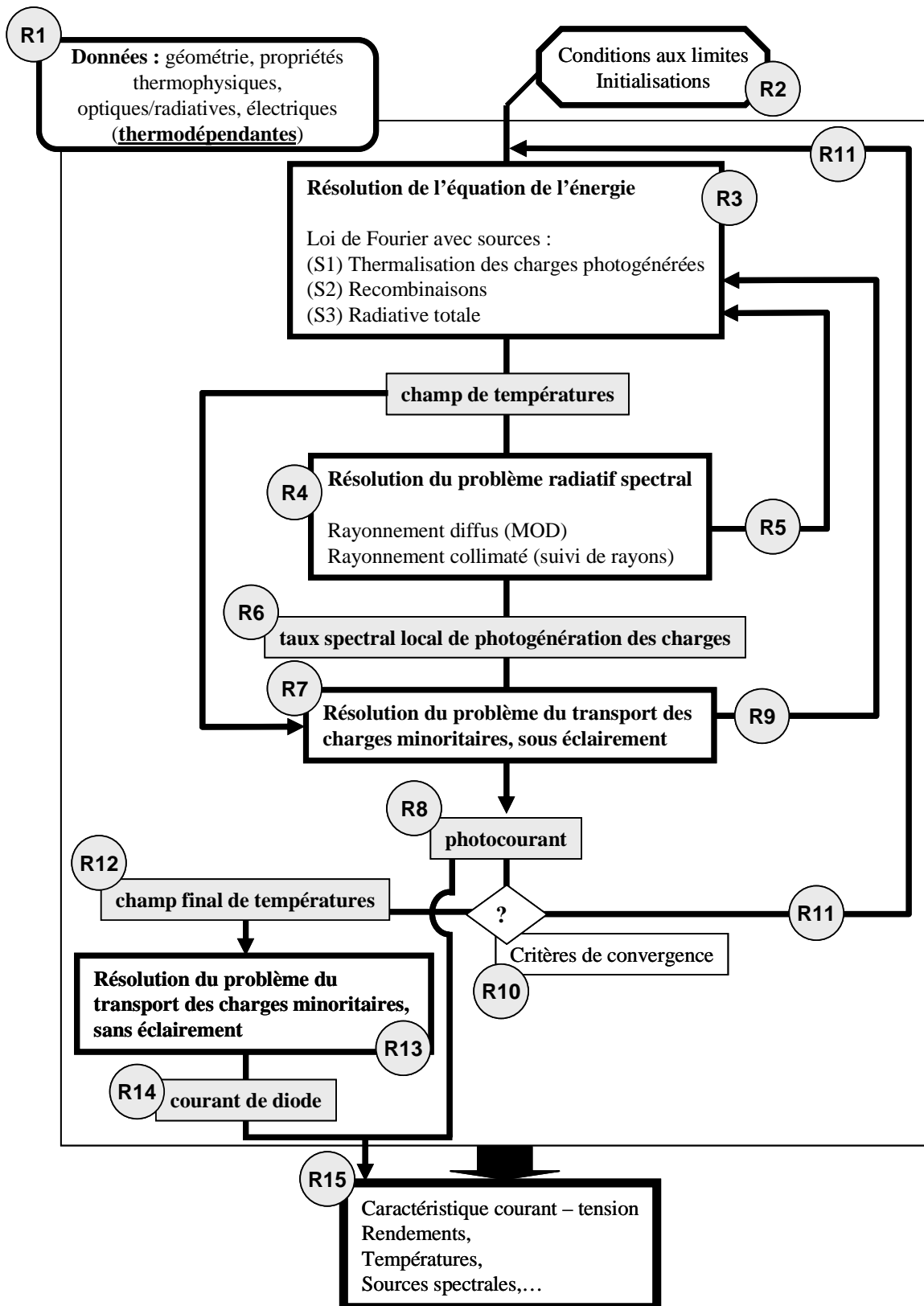


Figure 2. Représentation schématique des composantes du modèle physique et leurs liens.

Les transferts radiatifs spectraux sont ensuite traités (R4), via une méthode aux ordonnées discrètes pour la partie diffuse, et une approche en suivi de rayons pour la composante collimatée [8], pour délivrer les champs de sources locales totales de puissance radiative (R5) et les taux locaux spectraux de photogénération de charges minoritaires (R6). Ces derniers sont insérés dans les équations de diffusion des charges, dont la résolution (R7) par une ‘‘méthode de tir’’ permet de déterminer le photocourant (R8) mais aussi les sources locales thermiques de thermalisation et de recombinaison des charges (R9). Un test fondé sur des critères de convergence (R10 ; champ de températures, sources,...) détermine si une itération supplémentaire est requise (R11), ou si, avec un champ final de températures (R12), les équations de diffusion des charges en l’absence d’éclairement peuvent être résolues (R13) pour obtenir le courant de diode (R14) en fonction de la tension appliquée (charge). Sa soustraction au photocourant permet d’atteindre un des résultats finaux (R15) : la caractéristique courant – tension, à laquelle on peut aussi adjoindre la puissance électrique maximale, le rendement de photo-conversion de la cellule, les sources thermiques locales et leur dépendance spectrale,... Par rapport au modèle dans sa toute première version [9], des éléments nouveaux permettent de prendre en compte : une distribution spatiale du dopage dans l’émetteur, une réduction du gap pour les cas de fort dopage et ses effets sur la densité effective des charges, les recombinaisons dans la zone de déplétion, une éventuelle couche anti-reflet. L’analyse des grandeurs évaluées par le modèle peut être mise à profit afin de mieux comprendre les impacts des transferts thermiques sur le fonctionnement de la cellule et ses performances.

3. Exemples de résultats et analyse

Compte tenu du nombre important de variables du problème et de grandeurs qu’il est possible d’examiner, seuls quelques extraits de résultats de simulations sont présentés ci-après. Ils concernent une cellule standard en silicium cristallin nue (sans couche anti-reflet, sans encapsulation), dite de référence, dont les paramètres physiques principaux sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Variable	Valeur	Variable	Valeur
Epaisseur de la cellule (W_p)	250 μm	Vitesse de recombinaison de surface (émetteur) V_1	10 m s^{-1}
Epaisseur de l’émetteur (W_n)	0,3 μm	Vitesse de recombinaison de surface (base) V_2	50 m s^{-1}
Dopage de la base	8 10^{15} cm^{-3}	h_{f1} et h_{f2}	5 $\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$
Dopage de l’émetteur	3 10^{20} cm^{-3}	T_{f1} et T_{f2}	25°C

Tableau 1 : Paramètres principaux du problème traité (cellule de référence).

Pour la cellule référence, nous avons fait varier les conditions d’éclairement (hiver, été) ainsi que le rayonnement diffus environnemental. L’analyse de l’ensemble des résultats correspondants nous a permis de prédire un taux de variation du rendement de la cellule en fonction de la température égal à -0.004 K^{-1} . Ceci est en très bon accord avec les mesures expérimentales qui conduisent à une valeur moyenne de ce taux égal à -0.0045 K^{-1} [3].

Nous présentons sur la courbe C1 de la figure 3, les variations spatiales de la source thermique, pour une condition d’éclairement estival, avec un flux global incident de 1090 W/m^2 , sans rayonnement diffus environnemental (infrarouge). Cette source thermique locale présente une valeur positive tout le long de la cellule à l’exception d’une partie de

l'émetteur (côté éclairé de la cellule). En effet, le fort dopage de cette zone implique une domination du terme d'émission par rapport au terme d'absorption dans l'expression de la source radiative, ce qui se traduit par un refroidissement par émission de rayonnement infrarouge. Ce comportement est atténué en ajoutant une composante d'éclairage diffus supplémentaire (courbe C2) issue de l'environnement (corps noir à la température T_{fl}).

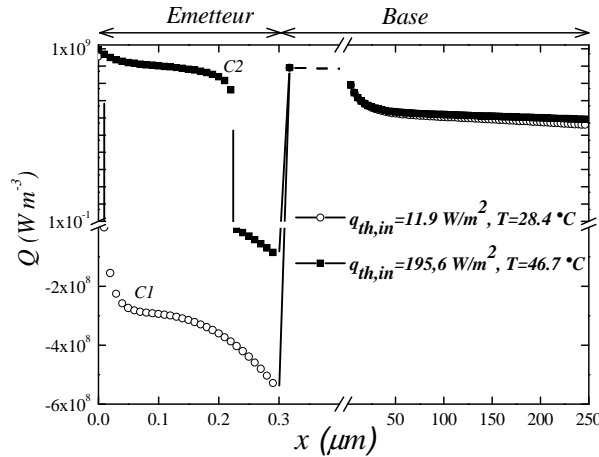


Figure 3 : Variations spatiales de la source thermique locale totale (Q). $q_{th,in}$ est la puissance thermique totale générée dans toute la cellule PV.

Nous proposons ensuite une analyse, en fonction du dopage de la base et de l'émetteur, des effets thermiques et électriques sur la température et le rendement de conversion (figure 4). Les résultats sont comparés à ceux obtenus pour des conditions standards (SRC) de fonctionnement des cellules PV : un spectre solaire AM1.5 et une température de cellule imposée à 25°C [10].

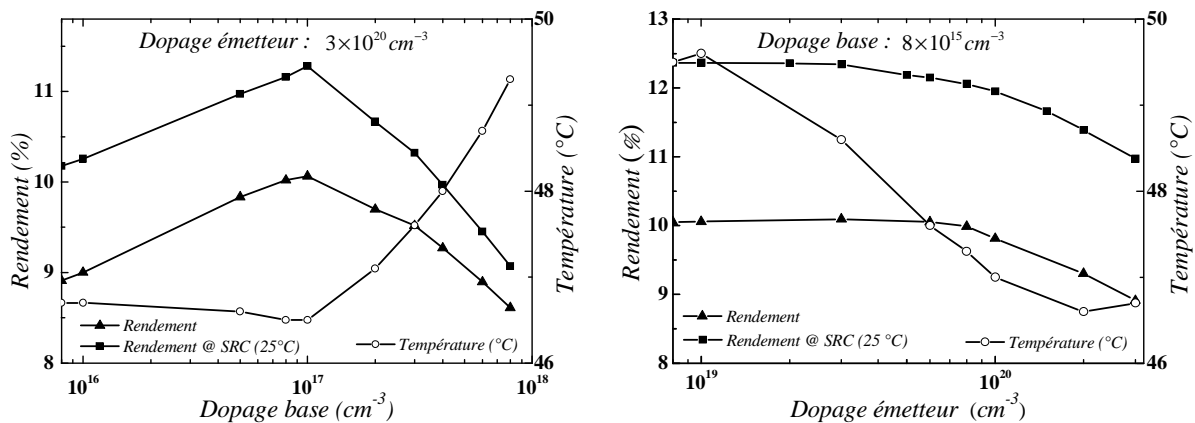


Figure 4 : Evolution du rendement et de la température de la cellule en fonction du dopage de la base ou de l'émetteur.

Nous constatons pour la base une évolution du rendement en forme de cloche, avec une valeur maximale à 10^{17} cm^{-3} . La température est quant à elle stable jusqu'à cette valeur de dopage, puis augmente. Une valeur élevée du dopage a pour effet d'accroître la barrière de potentiel de la jonction, et de ce fait, contribue à améliorer la collecte des charges [7]. De plus, jusqu'à 10^{17} cm^{-3} , la durée de vie des porteurs de charges est constante et régie par des recombinaisons de type Shockley-Read-Hall. En conséquence, le terme source correspondant dans l'équation de la chaleur est relativement peu affecté, ce qui explique la valeur constante de la température. Au-delà de 10^{17} cm^{-3} , les phénomènes de recombinaison sont dominés par les processus de type Auger. De ce fait, la durée de vie est inversement proportionnelle au

dopage. Ce changement de comportement engendre une diminution du rendement, et un accroissement de la température lié à l'augmentation des sources thermiques de recombinaisons non-radiatives. Pour l'émetteur, les variations du rendement sont semblables à celles pour la base dans le cas des dopages supérieurs à 10^{18} cm^{-3} . En revanche, la température présente un comportement différent. En effet, le refroidissement par émission de rayonnement infrarouge est accentué par le dopage de cette zone (voir la figure 3). Enfin, on peut observer les variations du rendement en fonction du dopage lorsque la température de fonctionnement est imposée à 25°C (pas de résolution du problème thermique) : si les variations sont globalement semblables, les rendements sont en valeur absolue évidemment plus élevés (température plus basse) et les gradients de variation en fonction du dopage relativement différents.

4. Conclusion

Nous avons introduit un modèle physique et numérique monodimensionnel d'une cellule PV solaire intégrant les transferts radiatifs, thermiques, le transport des charges, et leurs couplages. Nous avons, au travers d'exemples de résultats, montré que ce modèle peut constituer un outil d'analyse avancée de l'impact des transferts thermiques sur les performances de ces cellules PV. Nous avons notamment montré que les effets thermiques du dopage sont différents pour la base et l'émetteur dans le cas des cellules solaires en silicium cristallin. Les potentialités d'études sont nombreuses et certaines d'entre elles retiennent plus particulièrement notre attention pour des études futures : la recherche d'une collecte optimisée du rayonnement solaire qui intègre les effets thermiques, la prise en compte des éléments d'encapsulation et l'extension à d'autres types de cellules (thermophotovoltaïques [11], cellules en couche mince,...) ou de conditions d'utilisation (concentrateurs solaires,...).

Références

- [1] M.A. Green, *Solar cells*, National Library of Australia (1982).
- [2] J.A. Roger et C. Maguin, Photovoltaic solar panels simulation including dynamical thermal effects, *Solar Energy*, 29-3 (1982), 245-256.
- [3] E. Skoplaki et J.A. Palyvos, On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations, *Solar Energy*, 83-5 (2009), 614-624.
- [4] W.J. Basore et D. Clugston, *PCID 5.1*. (1997).
- [5] S.J. Fonash et al., *AMPS-1D, Analysis of Microelectronic and Photonic Structures* (1999).
- [6] DESSIS, *Development, modelling and optimization of microelectronics processes, devices and systems*, ISE Integrated Systems Engineering, Zurich (1999).
- [7] S.M. Sze et K.K. Ng, *Physics of Semiconductor Devices*, John Wiley & Sons Inc. (2007).
- [8] C. Muresan et al., Discrete ordinates solution of coupled conductive radiative heat transfer in a two-layer slab with Fresnel interfaces subject to diffuse and obliquely collimated irradiation, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 84-4 (2004), 551-562.
- [9] R. Vaillon et al., Modeling of coupled spectral radiation, thermal and carrier transport in a silicon photovoltaic cell, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49 (2006), 4454-4468.
- [10] K. Emery, *Measurement and Characterization of Solar Cells and Modules*, in *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, H.S. Luque A. Editor (2003), 701-747.
- [11] M. Francoeur et al., Thermal Impacts on the Performance of Nanoscale-Gap Thermophotovoltaic Power Generators, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, sous presse, 2011.