

1. Introduction

Le rendement énergétique des modules photovoltaïques (PV) est profondément influencé par l'ensemble des facteurs environnementaux liés à l'installation. L'impact de ces facteurs, difficilement évaluable en laboratoire, peut dépendre notamment de la stratégie de construction ou des technologies des cellules ou du module.

La dépendance des technologies pour des intensités lumineuses inférieures à $1000W.m^{-2}$ est liée aux niveaux de résistance série ou de résistance shunt, mais aussi à la distribution spectrale de la lumière à faible irradiane. La dépendance à la température est intimement liée au comportement de la cellule [1], mais sa détermination nécessite une évaluation précise de la température d'opération de la cellule en fonction des variables environnementales. Ces constatations démontrent qu'une appréciation correcte du productible du module nécessite un modèle multiphysique permettant le couplage de l'ensemble des paramètres optiques, électriques et thermiques ainsi qu'une description exhaustive des données environnementales.

L'étude réalisée par Tina et al [2] propose une description précise du comportement électrique mais néglige certains effets thermiques tels que la capacitance ou les échanges radiatifs provenant du ciel ou du sol et donne une formule simple pour l'intensité du rayonnement incident. La courbe caractéristique courant-tension (I-V) est donc correcte, mais peut ne pas être suffisante à déterminer le point de puissance maximum de manière précise.

Différents modèles dynamiques basés sur la résolution de l'équation de la chaleur en différents nœuds (approche dite nodale) du problème permettent de réaliser un couplage des transferts conductif, convectif et radiatif, permettant une description précise des effets de capacité thermique dans le module photovoltaïque. Ces modèles traitent la conduction au travers d'effets de résistance thermique dans un circuit thermique équivalent. Les effets convectifs (naturels ou forcés) sont décrits par des relations de corrélations dont l'application est notamment discutée par Nottton [3].

Le rayonnement solaire et les échanges radiatifs avec l'environnement sont différenciés en une étude optique et une étude radiative. Le rayonnement solaire absorbé dans les matériaux est converti en source de chaleur, et le rayonnement diffus est employé comme condition aux limites des échanges radiatifs. En vue de calculer de manière précise la part de rayonnement solaire absorbé par les différents éléments composant le module, un modèle spectral de multiréflexions peut être employé. Les modèles de multiréflexions se basent sur les lois de Fresnel aux interfaces entre des matériaux d'indice de réfraction distincts, et évaluent la transmission optique soit à l'aide de suites géométriques [4], soit au travers de méthodes de suivi de rayons [5] ou encore de la méthode de Monte Carlo [6]. Ces dernières méthodes permettent notamment l'évaluation précise de l'absorption. L'impact du rayonnement diffus aux courtes longueurs d'onde (ciel et/ou nuage) n'a pas été évalué à notre connaissance pour les modules photovoltaïques, alors que cet apport représente une part non-négligeable du rayonnement total. Le rayonnement diffus provenant de l'environnement peut être calculé à l'aide d'un facteur de forme, dépendant de l'angle d'incidence du module. Cette approche suppose un rayonnement de l'environnement homogène, bien que la température du ciel dépende de l'épaisseur de la masse d'air, et que l'émissivité des matériaux démontre une dépendance angulaire. L'impact de la réflectance spectrale [8], de la convection active (module hybride PVT) [9] ou du système d'intégration [10] sont étudiés au travers de modèles nodaux.

La présente étude construit un modèle multiphysique afin d'évaluer le comportement thermique, optique et électrique d'un module photovoltaïque en conditions réelles d'opération.

2. Présentation du modèle

2.1. Géométrie et caractéristiques des matériaux

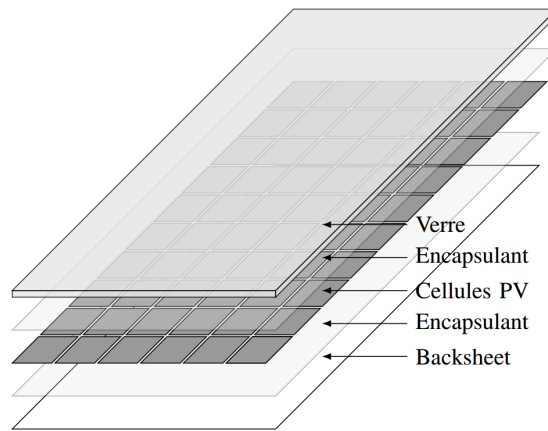


Figure 1 : Structure standard d'un module photovoltaïque

Les modules photovoltaïques peuvent être définis comme un multicouche de matériaux semi-transparents. La structure éclatée d'un module est présentée à la figure 1. La face du module PV est un verre trempé à faible teneur en fer pour favoriser la transmission optique. Les cellules photovoltaïques sont encapsulées entre deux feuilles d'encapsulant. La face arrière du module est appelée "backsheet" et consiste généralement en une feuille de polyester (isolant électrique), protégée par des couches de PVDF ou par un traitement de surface. Le modèle décrit dans cette étude se base sur un module commercial référencé VSMS275 chez VOLTEC Solar. Les caractéristiques des différents matériaux proviennent des fabricants de composants ou des références citées, et sont listées dans la table 1.

	Matériaux	Dimensions <i>mm</i>	Capacité thermique $J.kg^{-1}.K^{-1}$	Densité $kg.m^{-3}$	Conductivité thermique $W.m^{-1}.K^{-1}$
Cellules	Silicium	156*0.2 (w*e)	677 [11]	2330 [11]	148
Ruban	Cuivre	1.5*0.2 (w*e)	385	8700	400
Encapsulant	EVA	0.46 (e)	2090	960	0.23
Face avant	Verre	4.0 (e)	750	2700	1.06
Face arrière	PE	0.3 (e)	1250 [11]	960	0.36

Tableau 1 : Caractéristiques des matériaux

2.2. Les sources de chaleur

Rayonnement solaire spectral La densité de puissance radiative de la surface du Soleil a une distribution spectrale correspondant à celle d'un corps noir chauffé à une température de 5800K. Le spectre solaire arrivant sur la surface terrestre présentent différentes bandes d'absorption

dues à la diffusion Rayleigh aux gaz de l'atmosphère, en particulier la vapeur d'eau dans les infrarouges et l'ozone dans les ultra-violet. Pour déterminer la dépendance spectrale du rayonnement collimaté et de la composante diffuse, un algorithme basé sur le modèle SMARTS2 v.2.9.5 a été établi. Cet algorithme permet de calculer le spectre solaire incident à partir du spectre extra-terrestre et en fonction de la masse d'air [12]. L'angle d'incidence du rayonnement solaire collimaté sur une surface d'inclinaison et d'orientation données, et en fonction du jour, de l'heure, et du lieu d'installation a été déterminé à partir des travaux de Duffie et Beckmann [13]. Le niveau de pollution ou le type d'atmosphère (rural, urbain, maritime) ne sont pas pris en compte dans cette approche.

Absorption du rayonnement incident L'évaluation de l'absorption par les couches du module PV est faite par un algorithme de suivi de rayon basé sur les lois de Fresnel qui prend en compte les multiréflexions aux interfaces. Notre méthode décrit le rayonnement incident comme une matrice où la composante spectrale et la composante angulaire sont précisées. La première étape de l'algorithme correspond à la réflexion de la lumière incidente à l'interface air-verre. Suite à cette étape, une séquence d'itérations imbriquées débute, qui se base sur l'atténuation totale des rayonnement. Le principe est de calculer pour chaque couche la réflexion, la transmission et l'absorption via une série géométrique. Si un rayonnement se propage dans le milieu supérieur, une boucle est créée en vue d'évaluer la part de rayonnement absorbée ou réfléchi par le milieu supérieur. Si la réflexion vers le milieu supérieur est en-deça d'un niveau acceptable (fixé à 10^{-7} dans notre étude), la part transmise dans le milieu inférieur devient le rayonnement incident du prochain milieu. Les itérations se poursuivent jusqu'à ce que l'ensemble du rayonnement incident soit absorbé, transmis ou réfléchi (voir figure 2). Les indices de réfraction spectraux sont extraits des travaux de McIntosh [14] ou des fabricants de composants.

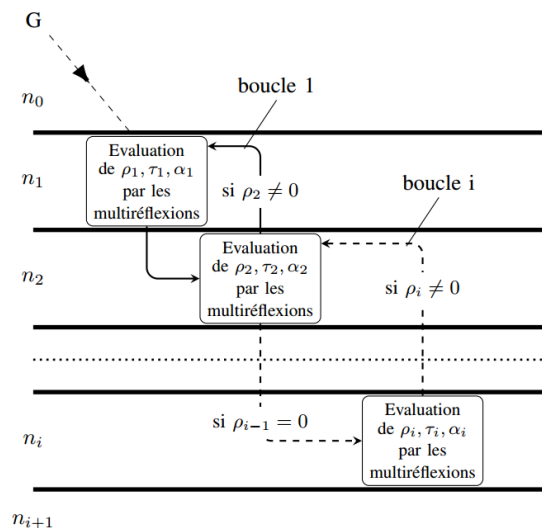


Figure 2 : Algorithme d'évaluation de l'absorption dans le module

Photoconversion La photoconversion, exprimée par son efficacité η_{cell} , est considérée dans notre problème comme un puit de chaleur présent dans les cellules photovoltaïques. Dans l'équation 1, la source de chaleur Q étant exprimée en $W.m^{-3}$, elle est divisée par l'épaisseur

de la cellule e_{cell} .

$$Q_{cell} = \frac{G_{abs,cell}(1 - \eta_{cell})}{e_{cell}} \quad (1)$$

Le rendement des cellules dépendant de la température et du niveau d'absorption, il est obtenu à partir des caractéristiques électriques (équation 2). Le photocourant est évalué à partir de la réponse spectrale des cellules, en prenant en compte le coefficient de température. La tension à circuit ouvert est obtenue à partir du courant de diode I_D (équation 4).

$$P_{cell,T,L} = I_{sc,L,T} \times V_{oc,L,T} \times FF_{L,T} \quad (2)$$

$$I_{L,T} = \frac{G}{G_{ref}} \int \frac{\alpha_{cell} SR}{A_{cell}} (1 + \beta(T_{cell} - T_{ref})) \quad (3)$$

$$V_{oc,L,T} = nk_B \frac{T}{q} \log \left(1 + \frac{I_{L,T}}{I_{D,T}} \right) \quad (4)$$

$$I_{D,T_{ref}} = \frac{I_{sc,G2}}{\exp \left[\log \left(1 + \frac{I_{sc,G1}}{I_D} \right) \frac{V_{oc,G2}}{V_{oc,G1}} \right]} \quad (5)$$

2.3. Transferts de chaleur

La détermination de la température d'opération est basée sur l'équation de la chaleur (6). Cette équation donne la température d'un milieu, à partir des sources de chaleur Q (W/m^2), de la capacité thermique C_p ($J.kg^{-1}.K^{-1}$) des matériaux et du transfert de chaleur à l'intérieur du matériaux et avec l'environnement (conditions aux limites). L'équation propose un couplage entre les trois modes de transferts de chaleur : conductif, convectif et radiatif. Les paragraphes suivants détaillent les méthodes employées pour chacun des modes de transfert.

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = -\nabla \cdot k(\nabla T) - h(T_{amb} - T) - \varepsilon \sigma (T_{amb}^4 - T^4) + Q \quad (6)$$

Le transfert de chaleur conductif dépend de la différence de température et de la conductivité thermique k ($W.(m.K)^{-1}$). Les conductivités thermiques pour les différents composants à 25 sont présentées dans le tableau 1. La conductivité varie généralement avec la température. Pour le silicium, on emploie la fonction de corrélation établie par Glassbrenner [16]. Des mesures sont requises pour obtenir les valeurs spécifiques au verre employé dans notre problème. En l'absence de mesure, la conductivité thermique a été calculée à partir de la méthode exposée par Choudhary qui donne la conductivité thermique en fonction de la concentration des composants. Ces concentrations ont été obtenues auprès du fabricant de verre.

Les échanges convectifs et radiatifs sont des conditions aux limites de notre problème. Le coefficient de convection h ($W.(m^2.K)^{-1}$) est généralement calculé à partir d'une fonction de corrélation. En vue d'avoir de faire apparaître la dépendance à la température, la formule retenue est basée sur le nombre de Nusselt pour le cas d'une convection laminaire (équations 7 et 8). Pour la face arrière, l'équation retenue (9 et 10) correspond à un cas de convection naturelle pour un mur incliné extraite de [18]. Dans ce second cas, les valeurs pour Rayleigh étaient de l'ordre de 1.34×10^6 et pour h de l'ordre de 3.12. Les échanges radiatifs sont traités par une méthode dite de radiosité qui suppose que les corps traités sont opaques au rayonnement

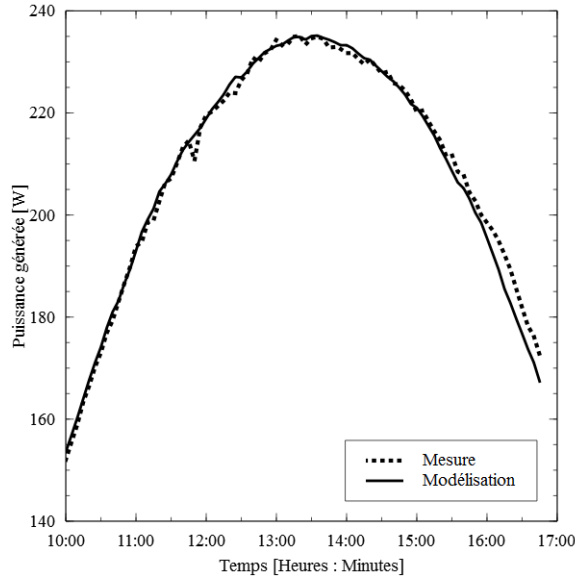


Figure 3 : Vérification expérimentale de la modélisation sur la puissance d'un module durant une journée

infrarouge, ce qui est le cas du verre. Ces relations se basent sur l'émissivité ε des surfaces, qui correspond au ratio du rayonnement émis par la surface avec le rayonnement émis par un corps noir. L'émissivité du verre est de 0.85 d'après son fabricant.

$$Nu_L = 0.664 \times Re_L^{1/2} Pr^{1/3} \quad (7)$$

$$h = (0.0064T + 2.054) \times V_{wind}^{1/2} L_{mod}^{-1/2} \quad (8)$$

$$h = \frac{k}{L} \left(0.68 + \frac{0.67(\cos(\Phi) Ra_L)^{1/4}}{\left(1 + \left(\frac{0.492k}{\mu C_p} \right)^{9/16} \right)^{4/9}} \right) \quad (9)$$

$$Ra_L = \frac{g |(\partial \rho / \partial T)_p| \rho C_p |T - T_{amb}| L^3}{k \mu} \quad (10)$$

Le modèle présenté a été développé sous environnement MATLAB (modélisation spectrale et algorithme d'absorption optique) couplé à COMSOL Multiphysics 4.3a (modèle électrique et thermique). L'étude optique permet d'évaluer l'absorption d'énergie visible incidente, l'étude thermique se sert de la valeur d'énergie absorbée comme source de chaleur.

Validation de la méthode Le modèle global a été validé sur la production d'énergie durant une journée. Les mesures ont été réalisées le 8 juillet 2013 entre 10h et 17h durant une journée présentant un ciel dégagé. L'installation est installée à une latitude de 48.32°N et à une altitude de 200m. Elle est orientée sous un azimut de -7° Sud et une inclinaison de 27°. La figure 3 démontre la capacité du modèle à décrire le comportement réel du module. L'erreur moyenne

entre la mesure et la prédiction est inférieure à 1%, soit inférieure à l'erreur de mesure elle-même, estimée à 2.8%.

3. Impact des conditions environnementales sur la production d'énergie

L'encapsulation des cellules solaires dans un module impacte les caractéristiques électriques et optiques. Ces facteurs, regroupés sous l'appellation de "pertes d'encapsulation" sont analysés par tout fabricant en conditions de laboratoire. La figure 4 montre l'évolution des caractéristiques optiques et électriques du module étudié. Les conditions réelles d'opération ont une influence sur ces facteurs. Les données de la simulation du paragraphe précédent ont été intégrés sur une journée afin d'identifier quelles étaient les pertes réelles d'un module en fonctionnement. La figure 5 reprend donc le niveau de puissance de la figure précédente et y ajoute l'effet, non négligeable, de la température sur le rendement. Les valeurs de réflexion et d'absorption du verre et de l'encapsulant sont corrigées, du fait de la variation spectrale et de la variation de l'angle d'incidence. L'absorption de l'encapsulant se fait principalement dans le rayonnement ultra-violet. La différence observée entre les mesures en laboratoire et celles effectuées en conditions réelles correspond à une sous-estimation de la quantité d'ultra-violet dans le rayonnement global, due à l'usage du spectre AM1.5. Les pertes électriques sont diminuées dans les conditions réelles d'opération, car l'intensité, et donc les pertes par effet Joule, obtenue lors des tests en laboratoire est systématiquement supérieure à celle observée en conditions réelles.

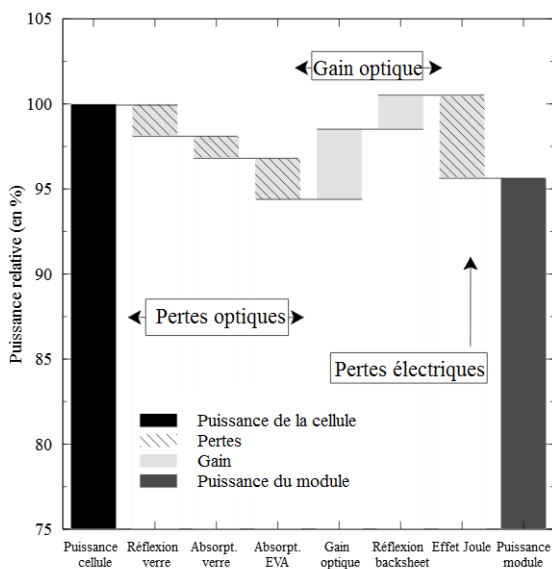


Figure 4 Pertes d'encapsulation en conditions de laboratoire

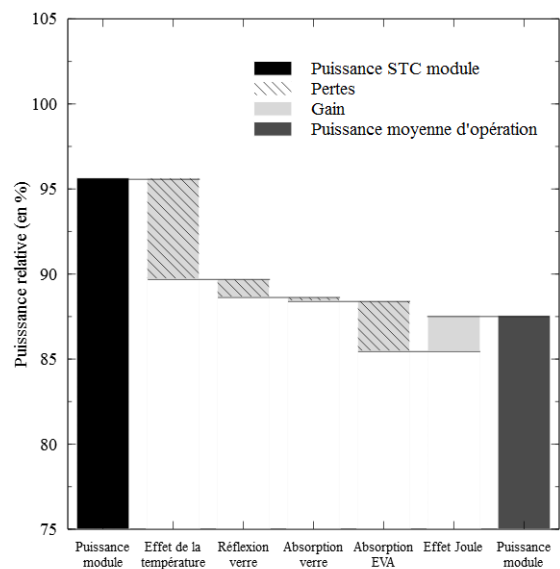


Figure 5 Pertes supplémentaires observées en conditions réelles

4. Conclusion

Un modèle multiphysique a été construit qui présente une excellente corrélation avec le comportement réel des modules sur champ. Ce modèle permet, outre la prédiction du productible des modules, d'appréhender les paramètres de production, et ainsi d'envisager des possibilités d'améliorations du module photovoltaïque. L'étude menée a permis d'identifier que les principaux secteurs de pertes de rendement correspondent à l'absorption du rayonnement ultra-violet par le polymère d'encapsulation et à la température d'opération des cellules. Il a été

remarqué que ces deux éléments ne sont pas directement mesurables dans la chaîne de fabrication des modules, du fait de l'absence de standard de mesure correspondant aux conditions réelles d'opération. La diminution de la température d'opération des modules, ou l'identification de voies permettant de rendre les cellules moins sensibles à l'élévation en température peuvent donc être considérés comme des axes de recherche primordiaux pour l'amélioration du rendement des installations.

Références

- [1] King, D.L. and Kratochvil, J.A. and Boyson, W.E., Coefficient for PV modules and arrays : measurements, methods, difficulties and results, *26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Anaheim, California, Septembre 29 - October 3 1997.
- [2] Tina, G.M. and Scrofani, S., Electrical and thermal model for PV module temperature evaluation, *14th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*, Melecon, 2008.
- [3] Notton, G. and Cristofari, C. and Mattei, M. and Poggi, P., Modelling of a double-glass photovoltaic module using finite differences, *Applied Thermal Engineering* 25, pp2854-2877, 2005.
- [4] Krauter, S. and Hanitsch, R., Actual optical and thermal performance of PV-modules, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 41/42, pp557-574, 1996.
- [5] McIntosh, K.R. and Swanson, R.M. and Cotter, J.E., A simple ray tracer to compute the optical concentration of photovoltaic modules, *Progress in Photovoltaics : research and applications* 14, pp167-177, 2006.
- [6] Muresan, C., Etude des transferts thermiques rayonnement spectral - conduction - convection naturelle dans des systèmes photovoltaïques hybrides en vue de leur intégration au bâti, *Thèse de doctorat, CETHIL, Insa de Lyon, France*, pp167-177, 2005.
- [7] Modest, M.F., Radiative heat transfer, *Elsevier, Kidlington, Oxford, UK*, Third Edition, 2013.
- [8] Silva, J.P. and Nofuentes, G. and Munoz, J.V., Spectral reflectance patterns of photovoltaic modules and their thermal effects, *Journal of Solar Energy Engineering* 132, 2010.
- [9] Dupeyrat, P., Experimental development and simulation investigation of a Photovoltaic-Thermal hybrid solar collectore, *Thèse de doctorat, CETHIL, Insa de Lyon, France*, 2011.
- [10] Davis, M.W. and Dougherty, B.P. and Fanney, A.H., Prediction of building integrated photovoltaic cell temperature, *Solar Thermochemical processing* 123, pp200-210, 2001.
- [11] Jones, A.D. and Underwood, C.P., A thermal model for photovoltaic systems, *Solar Energy* 70, pp349-359, 2001.
- [12] Gueymard, C.A., Parameterized transmittance model for direct beam and circumsolar spectral irradiance, *Solar Energy* 71, pp323-346, 2001.
- [13] Duffie, J.A. and Beckmann, W.A., Solar engineering of thermal processes, *John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey*, Second Edition, 1991.
- [14] McIntosh, K.R., PV Lighthouse - Tracey (Version 1-2-1), www.pvlighthouse.com.au/simulation/hosted/tracey/tracey.aspx, consulté le 21/07/2013.
- [15] Sze, S.M. and Kwok, K.N.G., Physics of semiconductor devices, *Third Edition, John Wiley and Sons, Inc, Hoboken, New Jersey*, 2007.
- [16] Glassbrenner, C.J. and Slack, G.A., Thermal conductivity of silicon and germanium from 3K to melting point, *Physical review* 134, pp1058-1069, 1964.
- [17] Choudhary, M.K. and Potter, R.M., Properties of glass-Formation Melts, *CRC Press, Boca Raton, Florida*, Chapter 9, 2005.
- [18] Incropera, F.P. and DeWitt, D.P., Fundamentals of heat and mass transfer, *John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey*, Fifth Edition, 2002.