

ED SMAER

Sujet de thèses 2013

Laboratoire

Laboratoire de Génie Électrique de Paris (LGEP, UMR CNRS 8507)

Équipe

Semiconducteurs en Couches Minces (www.lgep.supelec.fr/scm)

Etablissement de rattachement

UPMC

Directeur de thèse et section CNU ou CNRS

Denis Mencaraglia, CNRS 08

Codirection et section CNU et CNRS

Anne Migan, CNU 63

Titre de la thèse

Modélisation numérique du couplage thermique-photoélectrique pour des modules photovoltaïques sous faible concentration

Collaborations dans le cadre de la thèse :

Vincent Bourdin et Michel Pons, CNRS 10, du Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur (LIMSI, UPR 3251)

Résumé du sujet :

Dans le cadre d'une première collaboration, le LGEP et le LIMSI ont réalisé une première expérience qui a permis de démontrer l'intérêt de l'adjonction de miroirs pour augmenter la productivité électrique de modules photovoltaïques (PV). Il s'agit de réaliser un modèle numérique d'une association panneaux PV-miroirs permettant d'évaluer la production électrique des modules en fonction des données climatiques, ensoleillements direct et diffus, vitesse de vent et température ambiante. Seront donc couplées les équations des transferts radiatifs, des transferts conductifs et convectifs, et de la conversion photoélectrique, en intégrant la réflexion sur les miroirs en fonction de la position du soleil. La composition du rayonnement et la réponse spectrale des divers composants seront prises en compte. Le schéma numérique devra être efficace afin de pouvoir simuler le fonctionnement de l'installation sur une année entière, et ainsi estimer, puis maximiser, le productible moyen. Ce modèle, validé par le démonstrateur monté au LGEP, permettra l'optimisation selon différents critères : encombrement au sol, performance hivernale ou sur l'année, régularité de la puissance, etc. et ce pour un climat et un lieu donnés.

Les principaux résultats attendus de ce travail sont :

- Établissement d'un modèle inédit de panneaux photovoltaïques sous faible concentration et dans un environnement radiatif et thermique complexe ;
- Meilleure connaissance des champs de température dans le module PV, ce qui permettra d'aborder d'autres problématiques telles que le vieillissement ou les contraintes thermo-mécaniques ;
- Exploration de différents critères d'optimisation du système PV+miroirs ;

Sujet développé

Contexte de travail :

Dans le cadre d'une première collaboration, le LGEP et le LIMSI ont réalisé une première expérience qui a permis de démontrer l'intérêt de l'adjonction de miroirs pour augmenter la productivité électrique de modules photovoltaïques (Figure 1). Il s'agit maintenant de réaliser une modélisation fine décrivant les couplages entre les échanges thermiques avec l'environnement et la conversion photoélectrique. Le projet à long terme, est de savoir optimiser en fonction du gisement solaire la géométrie de l'ensemble modules-miroirs, notamment en ce qui concerne le refroidissement des cellules PV (convection, rayonnement et conduction).

Etat de l'art :

La production d'électricité photovoltaïque (PV) représente une forme durable de production d'électricité qui a le potentiel de fournir une partie importante du mix énergétique [1]. Les coûts d'installation diminuent constamment et devraient continuer dans l'avenir [2]. Actuellement, l'industrie PV est dominée par le silicium cristallin (c-Si), basée sur les technologies PV où plus de la moitié du coût total de l'installation du système est fixée par le coût des modules dont la part la plus importante réside dans les cellules cristallines [3, 4]. Faire le meilleur usage possible des modules PV est donc une méthode claire pour diminuer les coûts de production de l'électricité. La base de comparaison est un système commercial classique, qui opère dans une orientation donnée et présente de faibles coûts d'exploitation et de maintenance.

Une première façon d'augmenter l'efficacité des systèmes est le suivi de la course du soleil, mais à cause des pièces mobiles, les coûts à la fois initiaux et continus tout au long de la durée de vie des systèmes, sont augmentés. Une autre méthode pour améliorer l'efficacité d'un système PV est l'utilisation de concentration optique, où l'insolation solaire qui tombe dans la zone autour d'un dispositif PV est concentrée sur l'appareil lui-même.

La méthode appelée à faible concentration permet d'augmenter l'ensoleillement incident par un facteur inférieur à 10 et inclue soit des concentrateurs paraboliques ou semi-paraboliques soit des réflecteurs plans, également connus comme boosters [5]. Les concentrateurs plans ont été largement étudiés pour une utilisation associée à des capteurs solaires thermiques et leur efficacité à augmenter considérablement le rendement énergétique n'est plus à prouver [6-8]. En outre, il n'y a eu que quelques études sur la performance des réflecteurs plans joints à des systèmes PV [9-15]. Ces études, soit expérimentales soit théoriques, ont porté sur les effets du positionnement d'un réflecteur par rapport à un panneau PV pour maximiser l'ensoleillement, et ont montré une augmentation des performances de 20-30%.

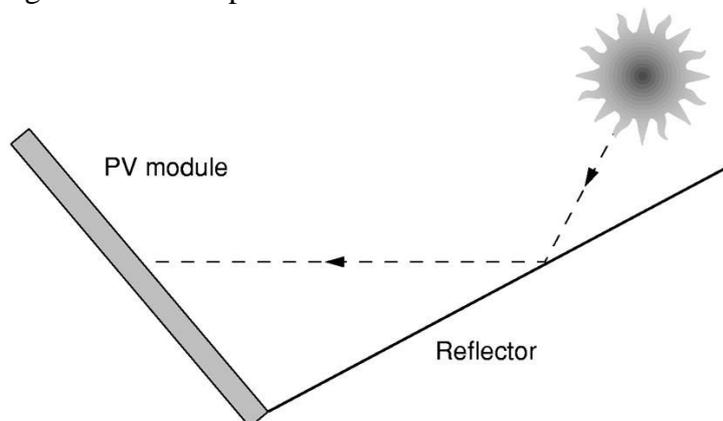


Figure 1 - Schéma de principe d'un réflecteur plan dans un système PV.

À ce jour, ces travaux qui sont restés assez empiriques, doivent encore être complétés pour comprendre les échanges thermiques mis en œuvre dans l'association de réflecteurs à un système PV, et comment les systèmes à faible concentration peuvent être optimisés pour tenir compte de ce couplage thermo-électrique. La plupart des études menées prennent en compte les facteurs suivants :

- l'insolation totale reçue sur la surface du panneau,
- l'angle d'incidence,
- la température,
- la répartition spectrale,
- le mismatch (différence d'éclairement entre les cellules PV d'un même string)
- la réflectivité des miroirs.

Les effets thermiques sont pris en compte en utilisant le modèle de Sandia, qui est une méthode simplifiée et robuste pour le calcul de la relation entre l'insolation et l'élévation de température du panneau [16]. L'augmentation de la température due au réflecteur est également modélisé de façon empirique [17]. Les effets radiatifs, de convection et de conduction ne sont pas considérés dans les modélisations proposées.

Descriptif scientifique :

Il s'agit de réaliser un modèle numérique d'une association panneaux PV-miroirs permettant d'évaluer la production électrique des modules en fonction des données climatiques, ensoleillements direct et diffus, vitesse de vent et température ambiante. Seront donc couplées les équations des transferts radiatifs, des transferts conductifs et convectifs, et de la conversion photoélectrique, en intégrant la réflexion sur les miroirs en fonction de la position du soleil. En effet, le rendement de conversion des panneaux PV dépend fortement de la température des cellules, de l'homogénéité et de la qualité du flux lumineux incident sur le panneau, et du schéma d'interconnexion électrique des cellules. La température des cellules dépend de l'éclairement des panneaux, de leur production électrique et des échanges thermiques par conduction, convection et rayonnement. D'où la nécessité d'un modèle couplé. Il serait souhaitable que la répartition spectrale dans le domaine visible de ces différents phénomènes soit intégrée au modèle. De même, la possibilité de prendre en compte aussi bien la convection naturelle que la convection forcée grâce à un ventilateur serait un atout de taille.

Le schéma numérique devra être efficace afin de pouvoir simuler le fonctionnement de l'installation sur une année entière, et ainsi estimer, puis maximiser, le productible moyen.

Seront ainsi comparés des panneaux PV et des miroirs de différentes technologies, ainsi que différentes configurations géométriques de l'installation.

Ce modèle, validé par le démonstrateur monté au LGEP, permettra l'optimisation selon différents critères : encombrement au sol, performance hivernale ou sur l'année, régularité de la puissance, etc. et ce pour un climat et un lieu donnés.

Résultats attendus :

En raison de la simplicité de ce système par rapport aux techniques de suivi de la course du soleil par les panneaux ou les concentrateurs optiques classiques (lentilles de Fresnel ou réflecteurs paraboliques ou semi-paraboliques), on peut prédire que cette méthode, qui augmente aussi l'éclairement diffus, sera efficace pour réaliser des gains importants en productivité et rendement énergétique, notamment en zone tempérée.

Les principaux résultats attendus de ce travail sont :

- Établissement d'un modèle inédit de panneaux photovoltaïques sous faible concentration et dans un environnement radiatif et thermique complexe ;
- Meilleure connaissance des champs de température dans le module PV, ce qui permettra d'aborder d'autres problématiques telles que le vieillissement ou les contraintes thermo-mécaniques ;
- Exploration de différents critères d'optimisation du système PV+miroirs.

Moyens consacrés :

L'équipe SCM du LGEP travaille dans le photovoltaïque depuis près de 20 ans. Cette équipe est constituée de 9 permanents chercheurs et enseignants-chercheurs, autant de personnels non permanents (doctorants et post-doctorant) ainsi que 2 ingénieurs et 1 technicien à temps partiel. La plate-forme de caractérisation "CAMADISC" (CARactérisation de MATériaux et DIspositifs SemiConducteurs) est au cœur des activités de recherche et s'enrichit de nouvelles techniques chaque année.

L'équipe TSF du LIMSI compte 8 chercheurs et enseignants-chercheurs. Un des thèmes de recherche de ce groupe porte sur les transferts convectifs appliqués, avec notamment la modélisation d'écoulements thermo-convectifs en géométries ouvertes pour application à l'habitat ainsi que l'analyse du second principe de la thermodynamique appliqué aux systèmes solaires et à l'habitat.

Références :

- [1] J. Pearce, "Photovoltaics: a path to sustainable futures", *Futures* 34, 663-674, 2002.
- [2] C Breyer, A Gerlach, D Schafer and J Schmid, "Fuel-Parity: New Very Large and Sustainable Market Segments for PV Systems". IEEE Energy Conference, Manama 18-22, 2010.
- [3] C del Canizo, G del Coso and W Sinke, "Crystalline silicon solar module technology: Towards the 1 € per watt-peak goal" *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 17, 199-209, 2009.
- [4] P Fath, S Keller, P Winter, W Jooss and W Herbst, "Status and perspective of crystalline silicon solar cell production". Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2009 34th IEEE 002471-002476, doi:10.1109/PVSC.2009.5411274, 2009.
- [5] J. Nilsson, "Optical Design and Characterization of Solar Concentrators for Photovoltaics", Lund University Faculty of Engineering, Report EBD-T 05/06, 2005.
- [6] H. Tabor, "Mirror boosters for solar collectors", *Solar Energy*. Jul;10(3):111-118, 1966.
- [7] SC. Seitel, "Collector performance enhancement with flat reflectors", *Solar Energy*. 17(5):291-295, 1975.
- [8] D. Larson, "Optimization of flat-plate collector-flat mirror systems", *Solar Energy*, 24(2):203-207, 1980.
- [9] S. Kulkarni, S. Tonapi, P. Larochelle, K. Mitra, "Effect of Tracking Flat Reflector Using Novel Auxiliary Drive Mechanism on the Performance of Stationary Photovoltaic Module", *Proceedings of IMECE2007*, 2007.
- [10] B Perers, B Karlsson, "External reflectors for large solar collector arrays, simulation model and experimental results", *Solar Energy* 51(5):327-337, 1993.
- [11] T Matsushima, T Setaka, S Muroyama, "Concentrating solar module with horizontal reflectors", *Solar Energy Materials and Solar Cells*.;75(3-4):603-612, 2003.
- [12] J Wennerberg, J Kessler, J Hedström, L Stolt, B Karlsson, M Rönnelid, "Thin film PV modules for low-concentrating systems", *Solar Energy*, Jul, 69, 243-255, 2001.
- [13] M.D.J. Pucar, A.R. Despic, "The enhancement of energy gain of solar collectors and photovoltaic panels by the reflection of solar beams", *Energy*. 27 205-223, 2002.
- [14] G.E. Ahmad, H.M.S. Hussein, "Comparative study of PV modules with and without a tilted plane reflector", *Energy Conversion and Management*, 42, 1327-1333, 2001.
- [15] M Rönnelid, B Karlsson, Krohn P, J Wennerberg, "Booster reflectors for PV modules in Sweden", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 8 (3), 279-291, 2000.
- [16] D.L King, W.E Boyson, J.A. Kratochvil, "Photovoltaic Array Performance Model", Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico. Document 87185-0752, 2004.
- [17] R Andrews, Nabeil Alazzam, and Joshua M. Pearce, "Model of Loss Mechanisms for Low Optical Concentration on Solar Photovoltaic Arrays with Planar Reflectors", 40th American Solar Energy Society National Solar Conference Proceedings, 446-453 (2011).