



# 1. Introduction

Le déploiement de panneaux photovoltaïques est en constante augmentation depuis quelques années [1, 2], en France et dans le monde et semble être une solution de premier plan pour le développement des énergies renouvelables. Ces technologies, majoritairement à base de silicium en ce qui concerne les cellules elles-mêmes, permettent de convertir l'énergie solaire en électricité. Les rendements obtenus sont de l'ordre de 20 % à 25 % mais sont dégradés par l'augmentation de la température des cellules, phénomène inhérent au fonctionnement des panneaux [3, 4]. Par ailleurs, il a été observé une grande variabilité de la production des panneaux en fonction des conditions climatiques, ce qui nous amène à prendre en compte la complexité des échanges entre les panneaux et leur environnement (e.g. intermittence du rayonnement solaire, vitesse du vent, pluie). C'est pourquoi l'étude des transferts thermiques appliquée au photovoltaïque est primordiale et doit permettre de répondre à des problématiques d'ingénierie : durée de vie des cellules, détermination de la configuration optimale, rendement électrique etc. Les paramètres à intégrer dans le bilan thermique sont les caractéristiques physiques des panneaux (e.g. conductivité thermique, émissivité) et les conditions climatiques auxquelles ils sont soumis.

Deux approches principales permettent d'évaluer la température des panneaux et son impact sur les performances des cellules photovoltaïques : expérimentale et numérique. L'expérimentation donne des corrélations empiriques entre les différents paramètres considérés [5]. Cependant, ces résultats sont souvent restreints à des lieux et des configurations particulières ce qui empêche une application directe à d'autres systèmes. Les modèles numériques, quant à eux, exploitent le bilan d'énergie global au niveau des panneaux [6, 7]. Ces approches amènent généralement à un nombre important d'hypothèses plus ou moins fortes. Par exemple, de nombreux modèles résolvent le bilan d'énergie en 1D et ignorent l'hétérogénéité de la température, en surface ou dans le volume. Dans cet article, un modèle 3D s'appuyant sur la méthode de Monte-Carlo est proposé afin d'obtenir une estimation de la température en n'importe quel point du panneau sans résoudre tout le champ de température.

Le modèle proposé, basé sur la méthode de Monte-Carlo, présente de nombreux avantages dont la prise en charge de la complexité géométrique 3D du panneau et de son environnement. Par ailleurs, la méthode de Monte-Carlo a déjà fait ses preuves sur sa capacité à gérer des géométries complexes [8] ainsi que dans la prise en compte de phénomènes transitoires présentant une grande variabilité tels que l'énergie solaire [9]. Ce travail se focalise principalement sur l'intégration temporelle des flux externes au panneau dans le bilan d'énergie et leur résolution par la méthode de Monte-Carlo. Ainsi, nous ne considérerons pas dans le bilan le couplage entre la température et la production électrique du panneau. De même, la situation étudiée permettra d'utiliser des corrélations usuelles pour la convection. Les développements relatifs à ces deux points seront abordés dans des travaux ultérieurs.

Tout d'abord, le modèle du bilan d'énergie du panneau et le travail d'interprétation des différents échanges thermiques en termes probabilistes sont introduits dans la section 2. Les résultats obtenus sont présentés dans la section 3. Deux journées types et plusieurs matériaux ont été sélectionnés afin d'effectuer les simulations. Enfin, les résultats sont discutés en fonction des configurations adoptées et des comportements thermiques observés.

## 2. Modèle couplé des échanges thermiques

### 2.1. Système étudié et hypothèses

La géométrie d'étude est une plaque opaque de section carrée de dimensions  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 0.035 \text{ m}$ . Ce choix concorde avec les dimensions caractéristiques d'un panneau photovoltaïque et permet de se rapprocher de configurations expérimentales existantes.

La plaque est disposée horizontalement par rapport au sol et l'écoulement est supposé turbulent dans la direction de l'axe des  $x$ . Cette hypothèse permet de simplifier le calcul des échanges convectifs en considérant un coefficient d'échange local à partir d'une corrélation de type plaque plane. Le coefficient d'échange convectif pour la face inférieure est obtenu avec la même corrélation :  $h_u^{cv}(\mathbf{x}, t) = h_b^{cv}(\mathbf{x}, t)$ . De plus, les faces latérales de la plaque étant de faibles dimensions par rapport aux surfaces supérieure et inférieure, la valeur du coefficient convectif est fixé à  $h_l^{cv} = 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ .

Concernant les transferts radiatifs, nous considérons que la plaque échange avec l'atmosphère (faces latérales et supérieure) et avec le sol (face inférieure). Dans le bilan d'énergie, nous procédons à une linéarisation des transferts radiatifs en introduisant un coefficient d'échange radiatif  $h_R$ . Cette approximation se justifie par la faible amplitude des températures considérées par rapport à l'ambiante. Le rayonnement solaire est représenté par le flux global horizontal reçu par la plaque, généralement mesuré sur les plateformes expérimentales dédiées au photovoltaïque. Les échanges thermiques intégrés au modèle sont résumés sur la figure 1.

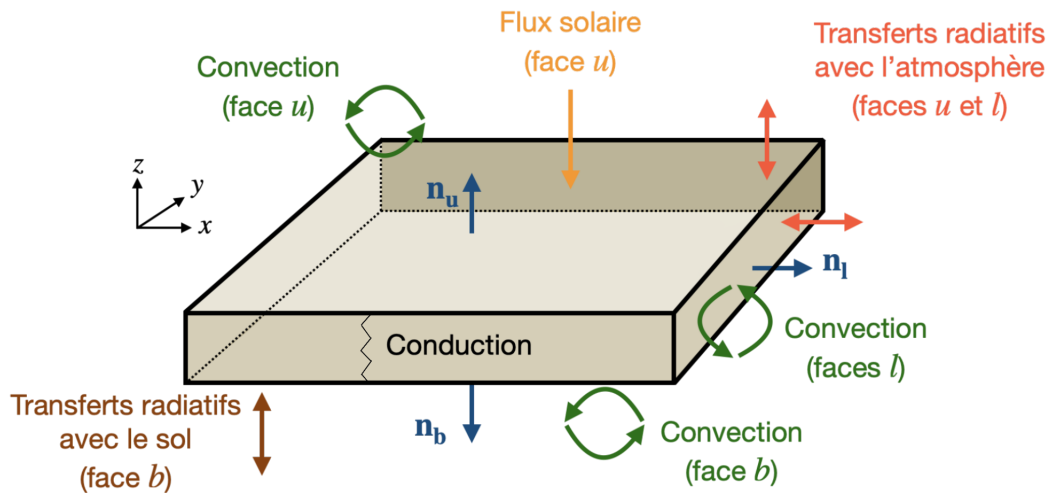


Figure 1 : Bilan des transferts thermiques gérés par le modèle

### 2.2. Interprétation probabiliste du bilan d'énergie

L'observable simulé par Monte-Carlo est la température en un point quelconque du panneau, en régime instationnaire :  $T(\mathbf{x}, t)$ . Pour cette application, la température est solution d'un problème couplé faisant intervenir l'équation de la chaleur en régime instationnaire, des conditions aux limites et une condition initiale, comme présenté dans les équations (1) à (5). La convention de signe choisie consiste à compter les flux positivement dans le sens de la normale à une interface. Les normales sont orientées vers l'extérieur du domaine solide. Finalement, le modèle des transferts thermiques est reformulé afin d'aboutir à une résolution probabiliste du problème.

$$\mathbf{x} \in \mathcal{D}, t \in [t_I, t_F] : \rho c_p \frac{\partial T(\mathbf{x}, t)}{\partial t} = -\nabla \cdot (-\lambda \nabla T(\mathbf{x}, t)) \quad (1)$$

$$\mathbf{x}_u \in \partial \mathcal{D}_u, t \in [t_I, t_F] : -\lambda \nabla T(\mathbf{x}_u, t) \cdot \mathbf{n}_u = \varphi_u^{cv}(\mathbf{x}_u, t) + \varphi_u^{rad}(\mathbf{x}_u, t) - \varphi_u^s(t) \quad (2)$$

$$\mathbf{x}_b \in \partial \mathcal{D}_b, t \in [t_I, t_F] : -\lambda \nabla T(\mathbf{x}_b, t) \cdot \mathbf{n}_b = \varphi_b^{cv}(\mathbf{x}_b, t) + \varphi_b^{rad}(\mathbf{x}_b, t) \quad (3)$$

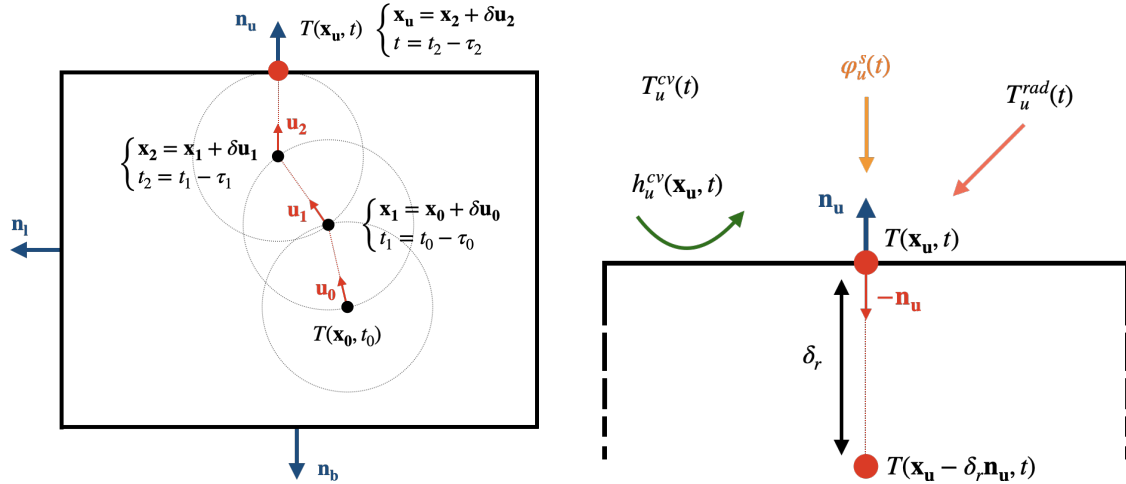
$$\mathbf{x}_l \in \partial \mathcal{D}_l, t \in [t_I, t_F] : -\lambda \nabla T(\mathbf{x}_l, t) \cdot \mathbf{n}_l = \varphi_l^{cv}(\mathbf{x}_l, t) + \varphi_l^{rad}(\mathbf{x}_l, t) \quad (4)$$

$$\mathbf{x} \in \mathcal{D}, t = t_I : T(\mathbf{x}, t = t_I) = T_I(\mathbf{x}) \quad (5)$$

À partir de ce problème couplé, un algorithme de Monte-Carlo est construit et permet d'exprimer la température au point sonde comme l'espérance d'une variable aléatoire  $X$  (équation (6)).

$$T(\mathbf{x}, t) = \mathbb{E}[X] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (6)$$

La température est estimée en effectuant  $N$  réalisations indépendantes et identiquement distribuées de la variable aléatoire  $X$ , une réalisation étant un chemin aléatoire de propagation de la chaleur dans le milieu. Pour chaque réalisation, la position  $\mathbf{x}$  est initialisée au point sonde considéré et au temps  $t$  désiré. L'algorithme de Monte-Carlo remonte le temps et s'arrête lorsque  $t_{courant} < t_I$  ou lorsqu'une température connue (condition initiale) du système a été atteinte. Cette procédure est ensuite répétée de nombreuses fois afin d'obtenir d'autres réalisations de la variable aléatoire, *i.e.* d'autres chemins de propagation.



(a) Marche aléatoire en conduction selon le principe de Walk on Sphere à pas constant  $\delta$  [10]. Le chemin a démarré au point  $\mathbf{x}_0$  à l'instant  $t_0$  et a atteint la surface supérieure à la position  $\mathbf{x}_u$  à l'instant  $t$ .

(b) Continuité des flux thermiques à l'interface supérieure. La température  $T(\mathbf{x}_u, t)$  est évaluée par superposition des températures et flux connus du problème pondérés par les probabilités associés à chacun des événements.

Figure 2 : Principe de la marche aléatoire en conduction et comportement aux interfaces

L'algorithme *Walk on Sphere* à pas constant est utilisé pour la conduction dans le solide (figure 2a), méthode compatible avec les techniques de lancer de rayons [10]. La marche permet de se déplacer en 3D dans le solide en échantillonnant une direction aléatoire  $\mathbf{u}$  et en se déplaçant à pas constant  $\delta$ . À chaque déplacement, la variable *temps* est décrémentée à l'aide d'un tirage aléatoire selon une loi exponentielle. Les paramètres de cette loi dépendent des propriétés thermiques du matériau considéré ( $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $c_p$ ). La marche se poursuit jusqu'à atteindre une interface

solide ou la condition initiale. Dans notre cas, la température à la condition initiale étant connue, l'algorithme s'arrête et cette contribution est retenue pour ce chemin. À l'inverse, si la marche aboutit à une interface, la continuité des flux thermiques est interprétée sous forme probabiliste, ce qui permet de poursuivre l'algorithme de Monte-Carlo (figure 2b). Nous présentons, à titre d'exemple, la continuité des flux à l'interface supérieure (équation (7)).

$$-\lambda \nabla T(\mathbf{x}_u, t) \cdot \mathbf{n}_u = \varphi_u^{cv}(\mathbf{x}_u, t) + \varphi_u^{rad}(\mathbf{x}_u, t) - \varphi_u^s(t) \quad (7)$$

Le flux conductif de l'équation (7) est linéarisé afin d'obtenir une expression en fonction des températures de paroi et du solide (équation (8)).

$$-\lambda \frac{T(\mathbf{x}_u, t) - T(\mathbf{x}_u - \delta_r \mathbf{n}_u, t)}{\delta_r} = \varphi_u^{cv}(\mathbf{x}_u, t) + \varphi_u^{rad}(\mathbf{x}_u, t) - \varphi_u^s(t) \quad (8)$$

Les termes du membre de droite, à savoir la convection et le rayonnement, sont remplacés par leurs expressions. Pour rappel, la convection est modélisée par un coefficient d'échange local,  $h_{cv}(\mathbf{x}, t)$ , et le rayonnement est linéarisé à l'aide du coefficient  $h_{rad}(t)$ . Ce jeu de réécriture donne l'équation (9).

$$-\lambda \frac{T(\mathbf{x}_u, t) - T(\mathbf{x}_u - \delta_r \mathbf{n}_u, t)}{\delta_r} = h_u^{cv}(\mathbf{x}_u, t)(T(\mathbf{x}_u, t) - T_u^{cv}(t)) + h_u^{rad}(t)(T(\mathbf{x}_u, t) - T_u^{rad}(t)) - \varphi_u^s(t) \quad (9)$$

Finalement, la température à l'interface supérieure, au point  $\mathbf{x}_u$  et à l'instant  $t$ , peut s'écrire comme la somme des températures sources pondérées par les probabilités associées à chacun des transferts thermiques (équation (10)).

$$T(\mathbf{x}_u, t) = \frac{h_u^{cv}(\mathbf{x}_u, t)}{\lambda/\delta_r + h_u^{rad}(t) + h_u^{cv}(\mathbf{x}_u, t)} T_u^{cv}(t) + \frac{h_u^{rad}(t)}{\lambda/\delta_r + h_u^{rad}(t) + h_u^{cv}(\mathbf{x}_u, t)} T_u^{rad}(t) + \frac{\lambda/\delta_r}{\lambda/\delta_r + h_u^{rad}(t) + h_u^{cv}(\mathbf{x}_u, t)} T(\mathbf{x}_u - \delta_r \mathbf{n}_u, t) + \frac{\varphi_u^s(t)}{\lambda/\delta_r + h_u^{rad}(t) + h_u^{cv}(\mathbf{x}_u, t)} \quad (10)$$

Les avantages de cette méthode pour le système étudié sont multiples. Nous pouvons complexifier autant que nécessaire la scène et prendre en compte les ombrages par exemple. Il est également possible d'intégrer temporellement le bilan thermique sur n'importe quel intervalle (intervalle de 24 h dans cet article) sans difficulté particulière. Il est intéressant de noter que cette méthode donne une estimation de la température accompagnée de son écart-type, cela permet de construire un intervalle de confiance associé à l'estimation.

### 3. Résultats

#### 3.1. Écosystème de développement

Le code de calcul présenté ici s'appuie sur la bibliothèque libre *Star-Engine* développée par la start-up Mésio-Star (<https://www.meso-star.com/fr/>). Celle-ci propose des solutions innovantes de modélisation et de résolution de problèmes thermiques et énergétiques complexes en lien avec la plateforme EDStar. Cette plateforme de recherche, qui regroupe une quarantaine de chercheurs autour de la physique énergétique, a fait la preuve de sa capacité à gérer de façon similaire une quasi-infinité des rapports d'échelle spatio-temporels, ainsi qu'un nombre très élevé d'emboîtements phénoménologiques, dans des contextes de physique énergétique très divers : centrales solaires, combustion, conversion photochimique, microfluidique, photobio-réacteurs, rayonnement atmosphérique, refroidissement de l'électronique, refroidissement des moteurs, thermique de l'habitat, thermique des milieux poreux, thermique médicale, thermique planétaire, etc.

### 3.2. Matériaux étudiés

Afin d'interpréter physiquement les résultats, plusieurs matériaux avec des propriétés thermiques suffisamment éloignées sont étudiés (tableau 1).

Matériaux	Conductivité thermique $\lambda$ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	Masse volumique $\rho$ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Capacité calorifique $c_p$ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	Émissivité $\epsilon$	Réflectance $\rho_r$
Bois	0.105	480	1530	0.9	0.5
Béton	1	2200	2500	0.9	0.4
Titane	21.9	4510	520	0.2	0.2
PV <i>éq.</i>	0.885	2724.75	552.64	0.85	0.1

Tableau 1 : Propriétés thermiques et optiques des différents matériaux étudiés. Les propriétés du matériau *PV éq.* sont extraites de [11] et représentent les propriétés équivalentes pour un panneau photovoltaïque réaliste.

### 3.3. Données expérimentales

Les données climatiques en entrée du modèle sont : le rayonnement solaire global horizontal ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ), la vitesse du vent ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), la température d'air ( $^{\circ}\text{C}$ ) et la température à la surface du sol ( $^{\circ}\text{C}$ ). Ces mesures proviennent de la base de données du Cerema à Nancy.

L'instrumentation est disposée sur une plateforme expérimentale en toiture. Afin de valider le modèle et la méthode, les résultats sont confrontés à deux journées typiques : une journée ensoleillée (8 juillet 2013) sans nuages et une journée ensoleillée avec passage de nuages (6 octobre 2013).

Les profils de vent mesurés à 2 m au-dessus du sol sont complexes et révèlent le caractère turbulent de l'écoulement de l'air en environnement urbain. Dans cet article, une corrélation usuelle est utilisée pour le calcul du coefficient d'échange convectif local. Cependant, une étude spécifique devrait être entreprise pour modéliser finement la couche limite turbulente au niveau du panneau.

### 3.4. Application du modèle

Par souci de concision, les résultats sont présentés pour les deux journées sélectionnées et pour une position spécifique de la sonde de température seulement. En effet, le point sonde où la température est modélisée se situe au centre de la face inférieure de la plaque. Ses coordonnées dans le repère cartésien sont : (0.5, 0.5, 0).

Les données climatiques sont résumées sur les figures 3 à 6. La journée du 8 juillet 2013 présente un profil de rayonnement solaire représentatif d'une journée estivale avec un fort ensoleillement et sans perturbations météorologiques. La journée du 6 octobre 2013 montre des fluctuations dans le rayonnement solaire, ce sont des marqueurs de la présence de nuages.

Les résultats (figures 7 et 8) montrent que le flux solaire a un impact important sur le comportement de la température au cours d'une journée de simulation et détermine son profil global. De même, la vitesse du vent agit de manière significative et ponctuelle sur les fluctuations de température observées. En particulier sur la figure 7 (titane et PV *éq.*) où des pics sont présents en milieu de journée alors que le flux solaire ne fluctue pas. Comme le suggèrent les propriétés des matériaux, la plaque en titane est celle dont l'échauffement est le plus important alors que le bois et le béton présentent des variations moins importantes car moins conducteurs de la

chaleur. L'inertie thermique est particulièrement visible avec le béton pour lequel la montée en température est plus lente que les autres matériaux.

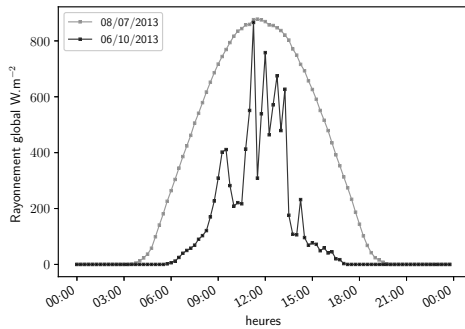


Figure 3 : Variation journalière du rayonnement solaire global horizontal. Les mesures du 06/10/2013, sont caractéristiques d'une journée nuageuse.

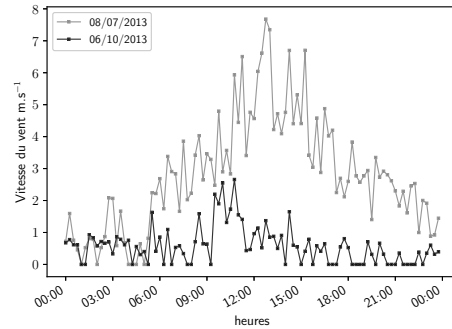


Figure 4 : Mesures de la vitesse du vent

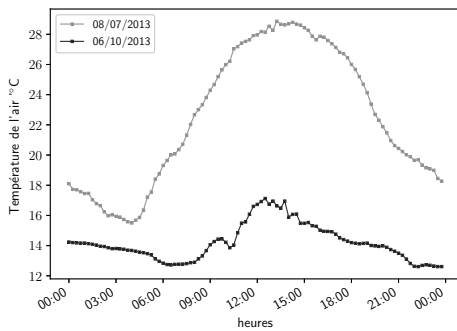


Figure 5 : Mesures des températures d'air. Les températures du mois d'octobre sont plus fraîches que les températures estivales.

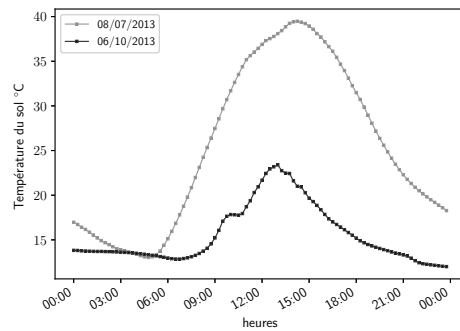


Figure 6 : Mesures des températures de la surface du sol

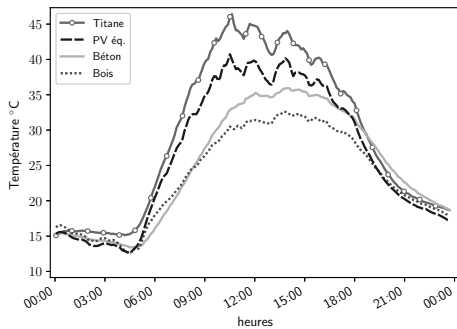


Figure 7 : Résultats des simulations en températures pour la journée chaude sans nuages (08/07/2013)

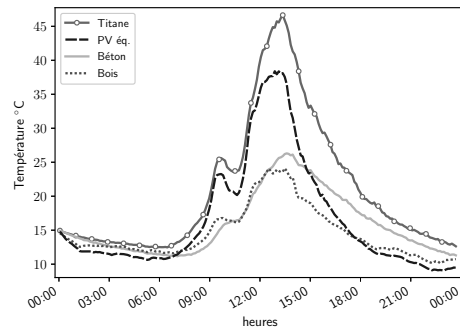


Figure 8 : Résultats des simulations en températures pour la journée chaude avec nuages (06/10/2013)

## 4. Conclusion

Dans cet article, un modèle thermique 3D d'une plaque soumise à des conditions climatiques transitoires a été développé par la méthode de Monte-Carlo. Cette approche permet de simuler la température en un point quelconque du solide en prenant en compte les complexités géométrique, phénoménologique et temporelle en intégrant un nombre important d'échanges énergétiques entre la plaque et son environnement. La motivation de ce travail est l'application aux problèmes photovoltaïques, en particulier l'étude du rendement électrique en tant que fonction de la température des cellules. Les études expérimentales, bien que fournissant des tendances intéressantes, sont souvent restreintes aux sites où elles ont été effectuées et les variations brusques de température sont difficilement reproductibles à partir des corrélations empiriques qui en découlent. Pour ce qui est de la modélisation numérique, de nombreux travaux s'appuient sur des hypothèses fortes dont les objectifs principaux sont la simplification des échanges thermiques et la réduction du problème en 1D. Cependant, les variations temporelles importantes des paramètres climatiques, principalement le rayonnement solaire et la vitesse du vent, induisent des changements brusques de la température en des endroits localisés du panneau. Le modèle introduit s'affranchit de ces restrictions tout en garantissant un temps de calcul raisonnable. Les travaux futurs permettront de confronter le modèle à des données expérimentales.

## Références

- [1] Suivi du marché 2019 des installations solaires photovoltaïques individuelles, Observatoire des Énergies renouvelables (Observ'ER), 2020, disponible en téléchargement sur le site [énergies renouvelables](#)
- [2] Baromètre 2020 de l'énergie photovoltaïque dans l'Union européenne, Livrable du projet Européen *EurObservER*. Disponible sur [Connaissances des énergies](#)
- [3] A. Virtuani, D. Pavanello, G. Friesen, Overview of temperature coefficients of different thin film photovoltaic technologies, *25th European photovoltaic solar energy conference and exhibition/5th World conference on photovoltaic energy conversion* (2010), 6-10
- [4] E. Skoplaki, J. A. Palyvos, On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance : A review of efficiency/power correlations, *Solar Energy*, (2009), Volume 83, 614-624
- [5] A. Gaglia, S. Lykoudis, A. A. Argiriou, C. A. Balaras, E. Dialynas, Energy efficiency of PV panels under real outdoor conditions—An experimental assessment in Athens, Greece, *Renewable Energy*, (2017), Volume 101, 236-243
- [6] A. D. Jones, C. P. Underwood, A thermal model for photovoltaic systems, *Solar Energy*, (2000), Volume 70, 349-359
- [7] S. Armstrong, W. G. Hurley, A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions, *Applied Thermal Engineering*, (2010), Volume 30, 1488-1495
- [8] M. Sans-Laurent, O. Farges, V. Schick, C. Moyne, G. Parent, Modeling the Flash Method by using a Conducto-Radiative Monte-Carlo Method : Application to Porous Media, *9th International Symposium on Radiative Transfer (RAD-19)*, (Athens, Greece, June 2019), 319-326
- [9] O. Farges, J.J. Bézian, H. Bru, M. El-Hafi, R. Fournier, C. Spiesser, Life-time integration using Monte Carlo Methods when optimizing the design of concentrated solar power plants, *Solar Energy*, (2015), Volume 113
- [10] L. Ibarrart, Description en espaces de chemins et méthode de Monte Carlo pour les transferts thermiques couplés dans les structures fluides et solides, une approche compatible avec l'informatique graphique, Thèse de doctorat, École des mines d'Albi, Février 2020
- [11] N. Dabaghzadeh, M. Eslami, Temperature distribution in a photovoltaic module at various mounting and wind conditions : A complete CFD modeling, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, (2019), Volume 11