

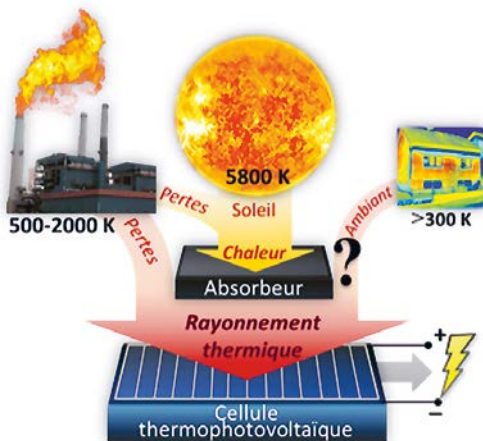
THERMOPHOTOVOLTAÏQUE : DES CELLULES PV POUR CONVERTIR LE RAYONNEMENT THERMIQUE

Pierre-Olivier CHAPUIS^{1*}, Christophe LUCCHESI¹, Rodolphe VAILLON²

¹ Centre d'Énergétique et de Thermique de Lyon (CETHIL), CNRS – INSA Lyon – Université Claude-Bernard Lyon 1, INSA de Lyon, Villeurbanne, France

² IES, Univ Montpellier, CNRS, Montpellier, France

* olivier.chapuis@insa-lyon.fr



Les cellules solaires permettent de convertir le rayonnement du soleil en puissance électrique, mais le rayonnement thermique issu des corps chauds est une autre source d'énergie omniprésente dans le milieu ambiant qui peut être mise à profit. Les cellules dites thermophotovoltaïques convertissent en électricité ce rayonnement dans la gamme infrarouge avec des rendements attendus élevés.

<https://doi.org/10.1051/photon/202010537>

Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation correcte de la publication originale.

RÉCUPÉREONS L'ÉNERGIE THERMIQUE !

Le besoin en énergie électrique toujours croissant et la nécessité de la produire de manière décarbonée dans la mesure du possible sont à l'origine du regain d'intérêt pour les sources alternatives depuis une quinzaine d'années. Une partie importante de la puissance électrique pourrait idéalement être obtenue par récupération de l'énergie disponible dans le milieu ambiant. La récupération de l'énergie thermique, possible lorsqu'un corps possède une température supérieure à l'ambiante, peut se faire par conversion thermoélectrique, mais ceci requiert de maintenir une différence de température entre les deux faces d'un composant solide. Une alternative prometteuse est la

La loi de Wien stipule que la longueur d'onde du maximum du spectre du rayonnement thermique est $\lambda_{\max} = \frac{2898 \mu\text{m}\cdot\text{K}}{T}$, où T est la température (en kelvins). D'autre part, 98% de l'énergie rayonnée est située entre $\lambda_{\max}/2$ et $8\lambda_{\max}$. Autour de l'ambiante, la récupération du rayonnement thermique nécessiterait donc de convertir des photons de longueurs d'ondes proche de 10 μm . Malheureusement, les lois de la thermodynamique limitent la capacité à convertir la chaleur des sources proches de la température ambiante (T_0) puisque le rendement maximum de Carnot est $\eta_{\text{Carnot}} = (T_c - T_0)/T_c$ où T_c est la température du corps chaud. D'autre part, la loi de Stefan-Boltzmann indique que la puissance émise par un corps dépend de sa température à la puissance quatrième ($P \propto T^4$). Il est donc plus facile d'obtenir une puissance électrique significative pour des différences de températures plus importantes que quelques kelvins. Les dispositifs thermophotovoltaïques actuels sont basés sur des émetteurs thermiques de température supérieure à 100 °C, certains pouvant atteindre 2000 °C.

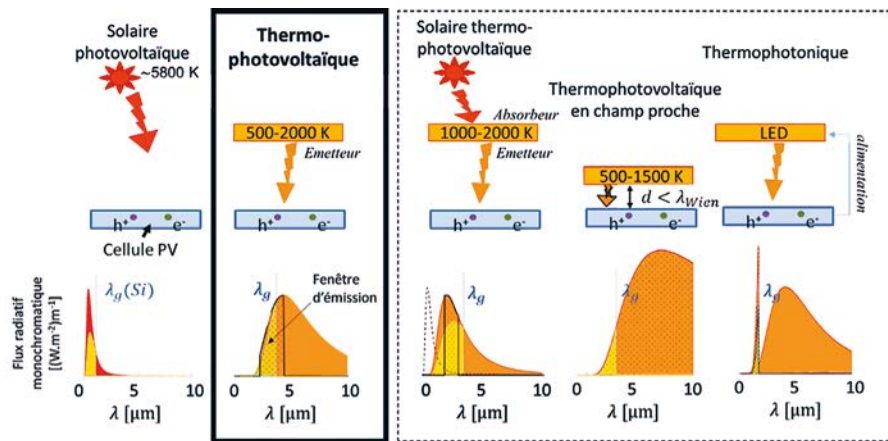


Figure 1. La famille des concepts thermophotovoltaïques.

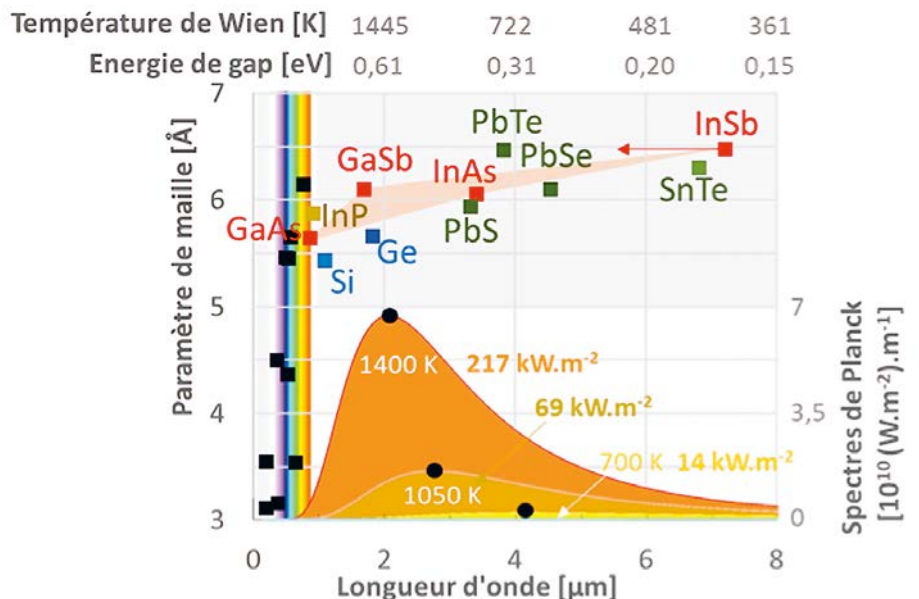
conversion thermophotovoltaïque (TPV) permettant de convertir le flux radiatif issu d'un corps chaud, qui peut être éloigné du récupérateur, *via* une cellule photovoltaïque qui fonctionne dans l'infrarouge (voir Fig. 1) [1]. De multiples sources de chaleur (moteurs de véhicules, usines, etc.) pourraient être mises à profit.

PRINCIPE DE LA CONVERSION THERMOPHOTOVOLTAÏQUE

Un dispositif thermophotovoltaïque est composé d'un émetteur de rayonnement thermique chaud et d'une cellule TPV, typiquement une jonction p-n de température moins élevée (idéalement à la température ambiante). Il est important de bien saisir les différences entre les cellules solaires et les cellules TPV. Les cellules photovoltaïques (PV) solaires convertissent le rayonnement thermique du soleil assimilé à un corps noir rayonnant à une température de 5800 K (voir Fig. 1) : l'énergie est donc comprise entre 250 nm et plusieurs microns (les cellules PV au silicium convertissent la partie inférieure à 1,1 μm). Il est difficile de convertir efficacement un rayonnement incident dont le spectre est étalé : une cellule photovoltaïque fonctionne optimalement uniquement pour les photons juste en-dessous de la longueur d'onde de gap λ_g (la puissance qui peut être convertie pour chaque longueur d'onde est représentée en jaune sur la Fig. 1), et l'énergie d'un photon de longueur d'onde bien inférieure n'est pas

convertie intégralement en électricité puisque la différence à l'énergie de gap $hc/\lambda - hc/\lambda_g$ est perdue en chaleur. La conséquence est que le rendement maximum des cellules solaires actuelles en silicium n'atteint que ~30 % (proche du rendement maximum pour une cellule mono-jonction). Contrairement au cas du solaire photovoltaïque, il est possible de contrôler, au moins partiellement,

Figure 2. Matériaux d'intérêt pour le thermophotovoltaïque (figure inspirée des travaux de l'IES).



les propriétés radiatives (optiques) de la source chaude pour le TPV ou, si la source et la cellule sont suffisamment proches, de renvoyer le rayonnement non-converti par la cellule vers la source pour éviter une perte de rendement. Sur la figure 1, une partie seulement du rayonnement maximal qui peut être réceptionné (corps noir, en orange), la « fenêtre d'émission », est émise par le corps chaud. Ceci permet en principe d'optimiser le rayonnement émis par la source afin d'en convertir une grande partie, par exemple en concentrant la puissance émise juste en-dessous de la longueur d'onde de gap. Le rendement maximal théorique est alors proche de 100 % ! Mais cela signifie aussi que la puissance électrique générée est plus faible, puisque la fenêtre d'émission est alors réduite. Contrairement au cas du PV, rendement et puissance générée ne sont pas systématiquement proportionnels pour le TPV.

L'autre élément clé est la cellule TPV. Les matériaux dont l'énergie de gap est située dans l'infrarouge sont peu nombreux et certains, notamment InSb, doivent même être refroidis pour fonctionner (comme le sont les détecteurs IR). L'un des défis importants est de concevoir des cellules TPV qui fonctionnent aux températures proches de l'ambiante sans

être refroidies. La figure 2 indique que les matériaux thermoélectriques (repérés en vert) et les matériaux III-V (repérés en rouge), qui peuvent être épitaxiés sous forme d'alliages à base de In/Ga/As/Sb (zone rosée), sont adaptés à l'infrarouge. Dans un certain nombre de cas, des structures compliquées avec empilement de couches peuvent être nécessaires, ce qui impose une contrainte : seuls des matériaux de paramètres de maille proches peuvent en principe être combinés. Les puissances émises par les corps noirs (émetteurs parfaits) à haute température sont indiquées sur la figure 2, et sont à comparer au flux solaire maximal incident de $1,35 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ sur la surface terrestre. Le soleil est un astre qui apparaît très petit dans le ciel : l'angle solide sous lequel le rayonnement solaire direct est incident est très faible. En comparaison, une surface chaude pourra illuminer une cellule TPV avec un angle solide beaucoup plus grand, en raison de sa proximité, et générer des flux radiatifs beaucoup plus importants.

CONCEPTION DES ÉMETTEURS EN CHAMP LOINTAIN

L'un des éléments clés pour obtenir un rendement élevé est de concevoir un émetteur dont le spectre est accordé à celui qui peut être photoconverti par la cellule TPV. Il existe différents moyens pour modéliser le spectre échangé, et les possibilités ouvertes par la photonique sont immenses (structures MIM, structures planaires en réseau de croix, etc.) [2]. Nous allons détailler un cas simple, où la totalité du rayonnement de l'émetteur atteint la cellule. L'émissivité hémisphérique monochromatique d'un milieu semi-infini de surface lisse peut être reliée à ses coefficients de Fresnel $r_{p,\lambda}$:

$$\epsilon_\lambda = \int_{\theta \in [0, \frac{\pi}{2}]} \sum_{p=TE, TM} (1 - |r_{p,\lambda}|^2) \times \frac{\cos\theta \sin\theta d\theta d\phi}{2\pi} \quad (1)$$

où p est la polarisation, θ l'angle à la normale à la surface et ϕ l'angle azimutal. Le flux surfacique émis

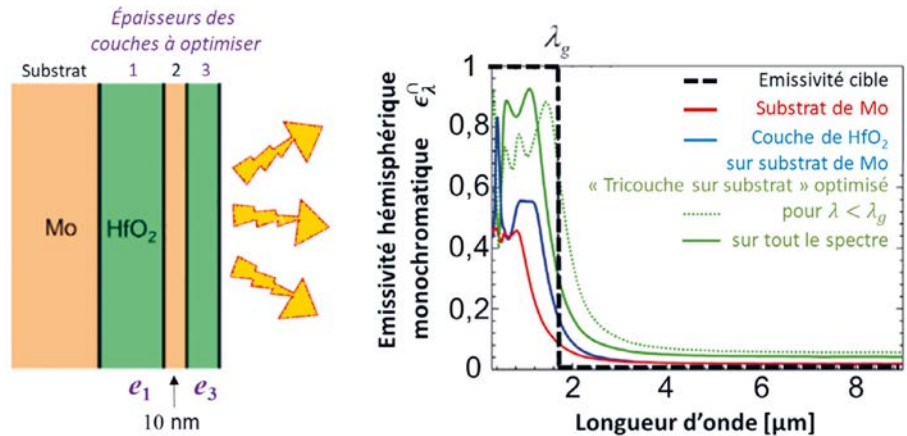


Figure 3.

Structure multicouche pour l'émission thermique optimisée dans une fenêtre $[0-\lambda_g]$ (figure détaillée dans [3]).

s'écrit alors :

$$\varphi = \int_{\lambda=0}^{+\infty} \epsilon_\lambda \cdot \varphi_{CN}(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

où le flux radiatif du corps noir $\varphi_{CN}(\lambda)$ est donné par la loi de Planck. Si le milieu n'est pas semi-infini et qu'il est par exemple constitué par un empilement de couches minces (voir Fig. 3), il suffit de remplacer les coefficients $r_{p,\lambda}$ de Fresnel par les coefficients de réflexion généralisés du matériau $R_{p,\lambda}$ (réflexion à la surface du matériau). Lorsque l'empilement est constitué d'un milieu transparent encapsulé entre deux métaux, on obtient une cavité de Fabry-Pérot qui n'émet qu'à certaines longueurs d'onde bien définies. Un objectif simple peut être d'obtenir un matériau d'émissivité maximale pour les photons convertibles par la cellule TPV (pour $\lambda < \lambda_g$) et minimale sous l'énergie de gap (pour $\lambda > \lambda_g$) de telle sorte qu'on ait une fenêtre d'émission similaire à celle représentée sur la figure 1. La figure 3 montre un exemple d'optimisation de l'émission. Même pour ces matériaux résistants à haute température, l'oxydation qui modifie les propriétés optiques reste un défi au-dessus de 1000°C .

QUELQUES APPLICATIONS

Les rendements de conversion TPV viennent d'atteindre 30 % pour des émetteurs vers 1200°C .

Diverses applications sont en plein développement.

L'une d'elles est la conversion *solaire thermophotovoltaïque* [4], qui a été développée pour contourner la limite de rendement des cellules solaires (Fig. 1). Il s'agit tout d'abord d'absorber l'entière du rayonnement solaire (par exemple avec un matériau noir) afin de chauffer un composant (absorbant-émetteur) qui réémet un rayonnement vers la cellule TPV avec un spectre idéal (fenêtre proche du gap) pour qu'il puisse être converti en électricité. En principe, ce système permet un rendement très élevé. En pratique, les problèmes à régler sont les suivants : le matériau absorbant le flux solaire ne doit pas réémettre de rayonnement vers l'atmosphère (il doit donc avoir une émissivité élevée dans le visible mais faible dans le proche infrarouge), il ne doit pas y avoir de pertes thermiques dans l'air autour de l'absorbant-émetteur ni de pertes par conduction thermique vers les supports. Enfin, la cellule ne doit pas chauffer sous peine d'avoir un rendement dégradé.

L'intermittence des énergies renouvelables requiert de développer des moyens de stockage de quantités d'énergie importantes pour que la distribution ne soit pas interrompue. L'un des moyens envisagés est le *stockage d'énergie sous forme de chaleur à haute température*, celle-ci pouvant être obtenue quasiment sans perte à partir de l'électricité. Ceci requiert de fondre un matériau en le ●●●

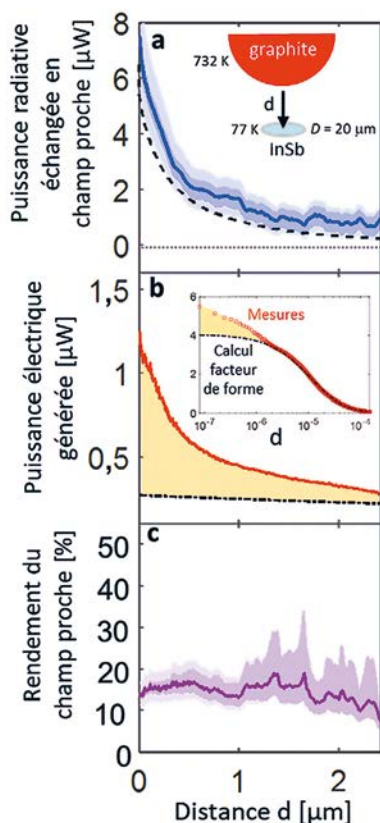


Figure 4.

Conversion thermophotovoltaïque en champ proche : puissance radiative échangée, puissance électrique générée et rendement (rapport) en fonction de la distance.

chauffant et de le stocker ensuite à haute température sous forme liquide dans une enceinte bien isolée. La fusion étant un changement d'état qui met en jeu des énergies très élevées, la possibilité de décider quand le matériau doit refroidir et donc relâcher une partie de cette énergie est une des clés du stockage. L'autre point clé est la reconversion de la chaleur en électricité. Permettre au matériau de rayonner et convertir ce flux par voie thermophotovoltaïque est l'une des voies qui est explorée, notamment en Europe par les membres du projet AMADEUS (<https://amadeus-project.eu>).

Enfin, le déploiement attendu de l'internet des objets requiert d'alimenter électriquement de nombreux dispositifs nomades (*wireless*), notamment les capteurs de consommation électrique modérée. L'alimentation

thermophotovoltaïque est envisageable dans un certain nombre de cas.

NOUVELLES APPROCHES POUR AUGMENTER LA DENSITÉ DE PUISSANCE

L'un des points limitants du thermophotovoltaïque est que la puissance rayonnée est bornée par celle du corps noir ($\varphi = \int_{\lambda=0}^{+\infty} \varphi_{\text{CN}}(\lambda) d\lambda = \sigma T_C^4$ où σ est la constante de Stefan-Boltzmann) : à 300 K, celle-ci ne vaut que 0,46 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$. La première approche pour dépasser cette borne repose sur l'effet tunnel de photons, aussi appelé *rayonnement en champ proche*. La loi de Planck ne s'applique qu'aux ondes propagatives (optique géométrique), alors que les corps situés à des distances inférieures à la longueur d'onde échangent, via le couplage d'ondes évanescentes, des puissances bien supérieures (voir Fig. 1). Ce fait a été clarifié théoriquement dans les années 1970 et a été l'objet de nombreuses démonstrations expérimentales depuis une dizaine d'années. La figure 4 présente une application au TPV obtenue en collaboration avec l'Institut d'Electronique et des Systèmes (IES) à Montpellier. On observe une grande augmentation de la puissance radiative perdue par le corps chaud lorsque l'on approche la cellule, bien supérieure à ce que prédit la théorie macroscopique du rayonnement thermique, et la puissance électrique générée par la cellule TPV augmente parallèlement, bien plus que ne le prédit le facteur de forme macroscopique (voir insert). En divisant ces deux puissances, on

obtient un rendement de conversion en champ proche de l'ordre de 15 %. Nous avons montré qu'une densité de puissance de 7,5 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ peut être générée pour une différence de température proche de 650 K, du même ordre de grandeur que certains modules thermoélectriques aujourd'hui répandus [5].

Un autre moyen de dépasser la limite du corps noir est de forcer le corps chaud à émettre à une certaine longueur d'onde en y concentrant l'énergie, à la manière d'une diode électroluminescente (LED). La figure 1 présente le concept appelé *thermophotonique*, objet du projet européen TPX-Power. Il consiste à accorder la luminescence de l'émetteur thermique (LED), cette fois-ci contrôlé électriquement, au spectre que la cellule TPV peut convertir. L'intérêt du concept réside dans le fait que l'énergie électrique nécessaire pour alimenter la LED peut être issue de celle qui est produite par la cellule TPV, afin qu'il n'y ait pas besoin d'alimentation électrique extérieure. La concentration de l'énergie dans une bande spectrale limitée permet d'envisager des densités de puissance très élevées tout en maintenant un rendement proche de l'unité.

REMERCIEMENTS :

Ces travaux ont été effectués avec E. Blandre, M. Shimizu et O. Merchiers au CETHIL, D. Cakiroglu, J.-P. Perez, T. Taliencio et E. Tournié à l'IES. Ils ont reçu le soutien financier de l'ANR (projet DEMO-NFR-TPV), de l'INSA (BQR RedCav) et de l'Union Européenne (EFINED et TPX-Power). ●

RÉFÉRENCES

- [1] T. Bauer, *Thermophotovoltaics: Basic Principles and Critical Aspects of System Design*, Springer (2011)
- [2] E. Nefzaoui, J. Devillon, K. Joulain, *J. Appl. Phys.* **111**, 084316 (2012)
- [3] E. Blandre, M. Shimizu, A. Kohiyama *et al.*, *Opt. Express* **26**, 4346 (2018)
- [4] D.M. Bierman, A. Lenert, W.R. Chan *et al.*, *Nat. Energy* **1**, 16068 (2016)
- [5] C. Lucchesi, D. Cakiroglu, J.-P. Perez *et al.*, arXiv:1912.09394 (2019)