

Cellules thermophotovoltaïques pour la conversion d'énergie stockée à très haute température

Direction : Alexis Vossier (PROMES)/ Guilhem Almuneau (LAAS)

Collaboration : Inès Massiot (LAAS)/ Rodolphe Vaillon (IES)

Contexte : Le déploiement des technologies de production d'électricité basées sur des énergies renouvelables (EnR) dites « variables » est aujourd'hui contraint par la pilotabilité limitée de ces dernières. Parmi les multiples solutions de stockage aujourd'hui à l'étude afin d'accroître la pilotabilité des EnR et favoriser une meilleure adéquation entre production et demande, la conversion thermophotovoltaïque (TPV) de chaleur haute-température constitue indéniablement l'une des options les plus prometteuses, tant sur le plan technologique qu'économique. Cette technologie de stockage thermique d'énergie solaire concentrée ou même d'énergie électrique (dénommée « power-to-heat »), suivie d'une conversion en électricité, repose sur l'association de deux composants clés : 1) un émetteur de rayonnement thermique basé sur du silicium ou de l'étain, porté à très haute température par le biais d'un chauffage résistif ; 2) un module de conversion thermophotovoltaïque, inséré en vis-à-vis de l'émetteur thermique, et permettant de convertir le rayonnement émis par ce dernier en électricité. Si ce concept de stockage d'énergie sous forme thermique à haute température a fait l'objet de plusieurs évaluations théoriques au cours des dernières années [1], [2], la démonstration expérimentale de sa conversion efficace a fait l'objet d'une publication récente très remarquée : un rendement de conversion de 40% a ainsi été mesuré sur des architectures de cellules tandem exposées au rayonnement émis par une source de chaleur dont la température est comprise entre 2000 et 2400°C [3].

Problématique : l'intérêt technico-économique de ce moyen de stockage est largement contraint par le niveau de température caractéristique de la source d'émission thermique. Une température d'émission élevée constitue en effet un levier important permettant d'assurer simultanément :

- ✓ Une densité de puissance rayonnée par l'émetteur élevée.
- ✓ Une distribution spectrale du rayonnement émis compatible avec l'utilisation de cellules solaires caractérisées par des largeurs de bande interdite ≥ 1 eV.
- ✓ Un faible coût de l'électricité stockée (le coût relatif des cellules étant d'autant plus faible que la densité de puissance électrique fournie par ces dernières est élevée).

Dans cet objectif, un certain nombre de verrous scientifiques et technologiques devront nécessairement être surmontés, puisque les cellules TPV pour la conversion du rayonnement haute température fonctionneront dans un environnement et des conditions très spécifiques (non-standards : forte illumination provenant d'une source thermique) et devront garantir :

- ✓ Une réflectivité en face arrière de la cellule proche de 100 % sur une large gamme spectrale : une réflexion efficace des photons non-absorbés par la cellule vers l'émetteur étant impérative afin de garantir des pertes optiques minimales et une efficacité maximale.
- ✓ Une efficacité de conversion élevée : celle-ci doit notamment être adaptée au rayonnement de l'émetteur de rayonnement thermique et fonction des propriétés opto-électroniques des matériaux semi-conducteurs utilisés.
- ✓ Des pertes résistives minimales : l'exposition de cellules TPV au rayonnement haute-température occasionnera nécessairement une augmentation du courant véhiculé par ces dernières, ainsi que des pertes résistives.

Ce projet de thèse vise donc à développer des technologies de cellules TPV optimisées pour la conversion d'énergie stockée à très haute température. Il s'articulera essentiellement autour de trois volets complémentaires et en interconnexion :

1. *Evaluation théorique d'architectures de cellules TPV pour la conversion du rayonnement haute-température* : il s'agit notamment d'évaluer et de comparer les performances d'architectures de cellules tandem (basées sur un empilement multijonctions *pn* [4] ou encore de cellules III-V de faible épaisseur [5]). On veillera à quantifier comment les différents mécanismes limitants que constituent les pertes résistives, les absorptions parasites, ou les recombinaisons non-radiatives, sont susceptibles d'affecter les performances des différentes architectures de cellules étudiées.
2. *Modélisation de cellule* : en se basant sur les résultats du travail d'évaluation théorique, l'architecture de cellule la plus prometteuse et répondant potentiellement à un certain nombre de critères de performance et de coût sera sélectionnée et modélisée afin de déterminer les caractéristiques optimales (en termes de dopage, épaisseur, caractéristiques de la structuration réfléchissante en face arrière...). Ce travail s'appuiera sur des outils spécifiques de modélisation optique et électrique des composants.
3. *Fabrication et caractérisation de cellule TPV* : le dernier volet de ce travail sera dédié à la fabrication et à la caractérisation d'une architecture de cellule TPV identifiée comme particulièrement prometteuse à l'issue du travail de modélisation. Une étude spécifique sera menée sur la fabrication et la caractérisation du réflecteur large bande à base de multicouches ou/et de structures nanophotoniques. D'autre part son intégration technologique à la cellule à base de semiconducteurs III-As(N) de bande interdite adéquate (1-1.4eV) sera également étudiée.

Profil recherché : Formation de type Ingénieur ou Master 2 (physique/énergie/matériaux).

Compétences en physique, optique, science des matériaux et physique des semi-conducteurs, des connaissances dans le domaine de la conversion photovoltaïque seront appréciées.

Références bibliographiques :

- [1] C. Amy, H. R. Seyf, M. A. Steiner, D. J. Friedman, et A. Henry, « Thermal energy grid storage using multi-junction photovoltaics », *Energy & Environmental Science*, vol. 12, n° 1, p. 334-343, 2019, doi: 10.1039/C8EE02341G.
- [2] A. Datas, *Ultra-High Temperature Thermal Energy Storage, Transfer and Conversion*. Woodhead Publishing, 2020.
- [3] A. LaPotin *et al.*, « Thermophotovoltaic efficiency of 40% », *Nature*, vol. 604, n° 7905, p. 287-291, avr. 2022, doi: 10.1038/s41586-022-04473-y.
- [4] M. El-Gahouchi, M. R. Aziziyan, R. Arès, S. Fafard, et A. Boucherif, « Cost-effective energy harvesting at ultra-high concentration with duplicated concentrated photovoltaic solar cells », *Energy Science & Engineering*, vol. 8, n° 8, p. 2760-2770, 2020, doi: 10.1002/ese3.692.
- [5] H.-L. Chen *et al.*, « A 19.9%-efficient ultrathin solar cell based on a 205-nm-thick GaAs absorber and a silver nanostructured back mirror », *Nat Energy*, vol. 4, n° 9, p. 761-767, sept. 2019, doi: 10.1038/s41560-019-0434-y.