

Stage M2/Ingénieur : Modélisation en bilan détaillé d'un système hybride PEC/PV pour la production de carburants solaires

Informations générales:

Localisation: PROMES-CNRS – 7 rue du Four Solaire, 66120 Font-Romeu-Odeillo-Via, France.

Encadrement: Jean-François Cornet, Jérémie Dauchet, Thomas Vourc'h (Institut Pascal, Clermont-Ferrand), Alexis Vossier, Maxime Giteau (PROMES, Odeillo), Rodolphe Vaillon (LAAS, Toulouse)

Salaire: ~630€/mois.

Début du stage et durée: Flexible (entre Février/Mars et Septembre 2026, jusqu'à 6 mois).

Mots-clés: Carburants solaire, systèmes photo-électrochimique, calcul en bilan détaillé, limites théoriques

Contexte scientifique:

La production d'hydrogène et de carburants solaires par voie photo-électrochimique (Photo-Electrochemical Cell, PEC) représente l'une des approches les plus prometteuses pour stocker l'énergie solaire sous forme de molécules chimiques propres et décarbonées [1].

Ces dispositifs reposent sur des cellules photo-électrochimiques capables, sous illumination solaire, de scinder l'eau en hydrogène et oxygène grâce à des réactions d'oxydation et de réduction se produisant sur une photo-anode semi-conductrice et une cathode métallique. Cette approche est connue sous le nom de « photosynthèse artificielle ».

L'un des défis majeurs de cette technologie réside dans la valeur élevée de la différence de potentiel d'oxydoréduction de dissociation de l'eau (1,23 eV), qui limite le choix de matériaux photo-actifs à large bande interdite, souvent peu efficaces dans l'absorption du spectre solaire. Pour contourner cette contrainte, une stratégie consiste à séparer spectralement (sur la même surface de captation) le flux solaire dont la partie UV-Visible alimente une PEC et la partie infrarouge alimente une cellule photovoltaïque (PV) fournissant la surtension additionnelle nécessaire aux réactions photochimiques. Toutefois, cette solution élégante nécessite d'abord une compréhension fine des phénomènes physiques à l'œuvre dans chacun des sous-systèmes (PEC et PV), puis dans un système hybride couplant les deux. Ces phénomènes sont le transfert de rayonnement, la photogénération de paires électron-trou, leur migration par dérive-diffusion-réaction, leur transfert aux interfaces et, dans le cas de la PEC, leur participation aux réactions de photosynthèse artificielle.

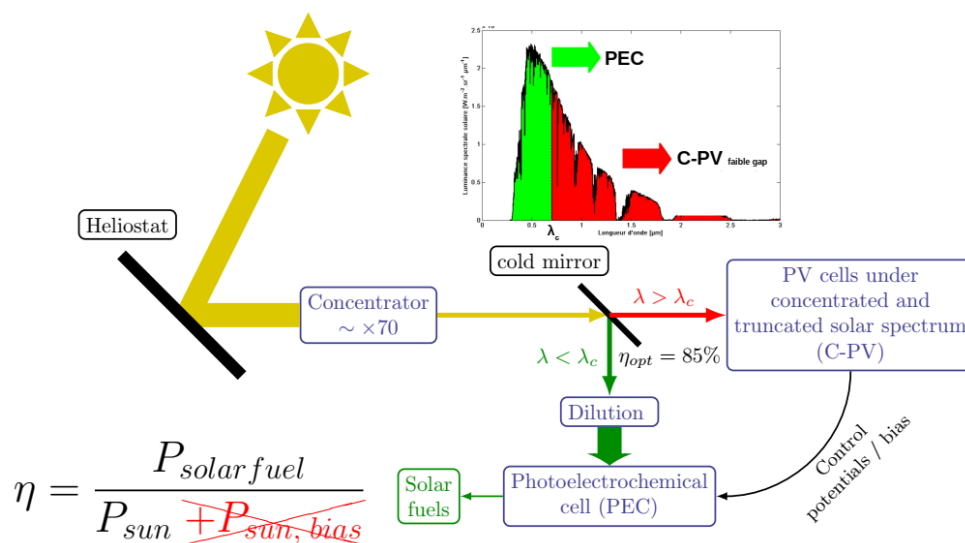


Figure 1 – Schéma de principe d'un système hybride photovoltaïque/photoélectrochimique pour la production de carburants solaires



Objectifs du stage

Malgré son potentiel, cette approche hybride reste peu étudiée et soulève plusieurs questions fondamentales :

- Quel gain d'efficacité peut être attendu grâce à l'hybridation PEC/PV ?
- Quels couples de matériaux permettent d'atteindre les meilleures performances ?
- Comment les non-idéalités réelles (recombinaisons, pertes résistives, échauffement) influencent-elles les rendements atteignables ?

Dans le but de répondre à ces questions, le stage visera à développer un modèle physique basé sur le formalisme du bilan détaillé, qui est par ailleurs largement utilisé pour la modélisation des cellules photovoltaïques classiques [2].

Ce formalisme permettra de calculer les performances maximales de conversion solaire en hydrogène, à partir d'un modèle d'échanges radiatifs et énergétiques intégrant un nombre restreint de paramètres physiques.

Les principales étapes du travail seront :

1. **Modélisation idéale :**

1-a- dans une première phase, on cherchera, sur la base de la littérature, à s'approprier en profondeur le concept de bilan détaillé appliqué aux cellules PV[3]. Le principe de bilan détaillé permet de relier le comportement global d'un système thermodynamique aux réversibilités des propriétés décrivant les interactions en son sein, à l'échelle moléculaire (ici les interactions lumière/matière menant à la génération de charges), et l'interaction de ces charges dans des champs de potentiels électrostatiques et électrochimiques.

1-b- La compréhension profonde qui résultera de cette première étape devrait alors permettre la transposition de la méthode, appliquée pour la première fois à une cellule photo-électrochimique (domaine d'expertise des encadrants à l'Institut Pascal). Ce travail permettra une évaluation des performances maximales théoriques du système hybride en fonction des largeurs de bande des cellules PEC et PV, et des conditions d'illumination.

2. **Prise en compte des non-idéalités :** on cherchera ici à rapprocher le modèle des comportements réels de cellules PEC et PV observés expérimentalement par intégration de pertes réelles (résistives, non-radiatives, thermiques) afin d'estimer les rendements atteignables dans des conditions réalistes (sur la base d'un démonstrateur en cours de développement à l'Institut Pascal).

3. **Analyse de sensibilité et optimisation :** si le temps le permet, le modèle aboutit sera utilisé afin de déterminer l'identification des paramètres critiques et des configurations les plus prometteuses pour maximiser l'efficacité globale du système hybride.

Environnement:

Le stage se déroule au laboratoire PROMES-CNRS à Odeillo (Font-Romeu), dans les Pyrénées françaises, à haute altitude (1 600 m), combinant un cadre montagnard unique et une infrastructure de recherche solaire de classe mondiale. PROMES abrite l'une des plus grandes installations solaires au monde, comprenant un four solaire de 1 MW et un concentrateur solaire de 6 kW pour des expériences à l'échelle du laboratoire. Attendez-vous à un ciel clair, un ensoleillement abondant et un accès immédiat à des activités de plein air (randonnée, ski, escalade), tout en menant des recherches de pointe sur l'énergie à haute température.

Ce stage s'inscrit dans une collaboration étroite avec les partenaires académiques de l'Institut Pascal à Clermont-Ferrand (Jérémi Dauchet, Thomas Vourc'h, Jean-François Cornet) et du LAAS-CNRS à Toulouse (Rodolphe Vaillon). Il impliquera des échanges scientifiques réguliers, des réunions de suivi et une participation active aux discussions inter-laboratoires, offrant au stagiaire une immersion concrète dans un réseau de recherche collaboratif.



Profil recherché

Étudiant·e de niveau **Master 2 (thermodynamique, physique statistique)** ou école d'ingénieur, disposant :

- d'une solide formation en physique, énergétique ou thermodynamique, avec goût pour la modélisation,
- d'un intérêt marqué pour les énergies renouvelables et la conversion photovoltaïque,
- de bonnes aptitudes en codage numérique (Matlab/Python).

Ce stage s'adresse à un·e candidat·e motivé·e par la recherche et souhaitant contribuer au développement de nouvelles technologies de conversion solaire à haut rendement, à l'interface entre photochimie, photonique et thermodynamique.

Comment postuler:

Envoyer un CV et une lettre de motivation justifiant de votre intérêt pour ce stage à:

- **Alexis Vossier:** alexis.vossier@promes.cnrs.fr
- **Jérémi Dauchet :** jeremi.dauchet@sigma-clermont.fr

Références:

- [1] T. Bak, J. Nowotny, M. Rekas, et C. C. Sorrell, « Photo-electrochemical hydrogen generation from water using solar energy. Materials-related aspects », *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 27, n° 10, p. 991-1022, oct. 2002, doi: 10.1016/S0360-3199(02)00022-8.
- [2] W. Shockley et H. J. Queisser, « Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells », *J. Appl. Phys.*, vol. 32, n° 3, p. 510-519, mars 1961, doi: 10.1063/1.1736034.
- [3] A. Vossier, F. Gualdi, A. Dollet, R. Ares, et V. Aimez, « Approaching the Shockley-Queisser limit: General assessment of the main limiting mechanisms in photovoltaic cells », *J. Appl. Phys.*, vol. 117, n° 1, p. 015102, janv. 2015, doi: 10.1063/1.4905277.