

## PROPOSITION DE SUJET DE THESE

**Intitulé : Développement d'un modèle prédictif de puissance électrique pour un module photovoltaïque soumis à des contraintes spatiales**

Référence : **PHY-DPHY-2025-29**  
 (à rappeler dans toute correspondance)

**Début de la thèse** : Octobre 2025

**Date limite de candidature** : Juin 2025

### Mots clés

Cellules solaires, modélisation, environnement spatial, radiation

### Profil et compétences recherchées

Diplômé(e) d'école d'ingénieurs ou de master en physique des matériaux, photonique/lasers ou aérospatiale, connaissance générale en simulation électrique, goût pour les mesures et simulation.

### Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

Actuellement, l'énergie photovoltaïque (PV) permet de produire de l'électricité avec une empreinte carbone réduite. Près de 510 GWp de modules PV ont été installés dans le monde en 2023. De nombreux acteurs industriels et académiques développent de nouvelles technologies pour augmenter l'efficacité des panneaux solaires et leur durée de vie (> 20 ans) dans des environnements sévères. Le CEA développe des nouvelles architectures de cellules et de modules ainsi que des outils de simulation pour évaluer les performances électriques des systèmes photovoltaïques dans leur environnement de fonctionnement. Un des modèles appelé CTMod (Cell To Module) [1], permet de tenir compte des différents matériaux (face avant, encapsulant, face arrière) constituant le module, mais aussi des différentes métallisations des cellules et des moyens d'interconnexion des cellules entre elles. En sortie, le modèle permet d'avoir accès à la caractéristique courant-tension (IV) du module, et une classification des pertes optiques et électriques.

En parallèle, depuis quelques années, le besoin de générateurs solaires pour les missions spatiales est croissant, que ce soit pour la propulsion électrique, les constellations, les Cubesats et les missions d'explorations. De nombreuses recherches poussent à utiliser des technologies terrestres de cellules solaires à base de silicium, moins coûteuses que les solutions à base de matériaux III-V couramment utilisées dans le spatial, et pouvant être également intégrées sur des générateurs solaires fabriqués à partir d'assemblage PV (PVA) flexibles. Toutefois, l'environnement spatial est très hostile et impose de très fortes contraintes sur les PVAs : irradiations aux protons et électrons, UV, vide et cycles thermiques qui dégradent leurs performances et réduisent leur durée de vie. Une évaluation pertinente des performances en début et fin de mission est indispensable pour le dimensionnement des panneaux.

L'objectif de la thèse est d'enrichir le modèle CTMod pour tenir compte des dégradations des performances liées aux différentes irradiations électrons, protons et UV de l'environnement spatial. Ces dégradations sont issues de phénomènes de dépôts d'énergie non ionisants, quantifiés par la dose de défauts par déplacement (DDD), et ionisants quantifiés par la dose ionisante totale (TID) pour les protons et électrons [2]. Pour les UV, l'excitation des électrons de la matière engendre des ruptures de chaînes dans les matériaux organiques qui modifient les propriétés mécaniques et optiques (apparition de centres chromophores). Dans les matériaux inorganiques, il apparaît principalement des défauts optiquement actifs (centres colorés). Les modèles physiques des dégradations seront corrélés aux modèles électriques et optiques et permettront de spatialiser le modèle. La première partie de la thèse consistera à prendre en main l'outil de simulation CTMod avec des données de cellules silicium intégrées dans des architectures de matériaux spatiaux. Les simulations seront validées par la réalisation et l'évaluation électrique et optique des modules correspondants. Ensuite, le modèle de simulation sera enrichi à l'aide de données de matériaux irradiés disponibles au niveau de la bibliographie mais également accessibles au CEA et à l'ONERA. L'état de l'art des différents modèles de vieillissement sous irradiation sera étudié et mis à jour pour les cellules silicium à hétérojonction. Des modules seront également réalisés, passés sous environnement radiatif et une correction/validation du modèle sera apportée en fonction des données empiriques. Ces dernières étapes seront itératives pour améliorer la précision du modèle et rendre plus robuste le modèle développé en fonction des différents matériaux utilisés.

Le déroulement envisagé de la thèse est le suivant :

- Prendre en main l'outil CTMod
- Réaliser les échantillons PVA et matériaux spatiaux
- Estimer à T0 des caractéristiques IV des PVA spatiaux
- Comprendre les phénomènes d'irradiation (cellules et matériaux)
- Réaliser les irradiations
- Développer le modèle « radiation »
- Intégrer le modèle dans CTMod et évaluer la robustesse de l'outil de simulation.
- Estimation des caractéristiques IV des PVA spatiaux sous contraintes radiatives (e-, p+, UV)
- Rédaction de la thèse

Cette thèse se fera sur les deux sites de l'ONERA Toulouse et du CEA au Bourget du Lac.

Ainsi, le sujet de la thèse consiste à enrichir les outils de simulation des performances électriques et à développer un module prédictif de puissance spécifique qui prenne en compte les contraintes spatiales. Dans un premier temps, la cellule solaire utilisée dans le modèle sera une cellule Silicium, mais le modèle pourra être complété avec d'autres types de cellules solaires en développement telles que les cellules à base de pérovskite.

Références :

[1] Julien Eymard – *Contribution to the Investigation of Cell-To-Module Performance Ratios in Advanced Heterojunction Silicon Photovoltaic Technologies, PhD Thesis (2021).*

[2] Walters, Morton, Messenger, *Displacement Damage Effects in Solar Cells—Mining Damage From the Microelectronics and Photonics Test Bed Space Experiment, 2004.*

**Collaborations envisagées**

CEA-Liten à l'INES (Le Bourget du Lac)

**Laboratoire d'accueil à l'ONERA**

Département : Physique, instrumentation, environnement, espace

Lieu (centre ONERA) : TOULOUSE

**Contact :** Thierry NUNS

Tél. : 05 62 25 27 58 Email : [thierry.nuns@onera.fr](mailto:thierry.nuns@onera.fr)

**Directeur de thèse :**

Nom : Thierry NUNS

Laboratoire : ONERA DPHY

**Co direction :**

Nom : Philippe VOARINO

Laboratoire : CEA/Liten/DTS/SMSP/LAM

Pour plus d'informations : <https://www.onera.fr/rejoindre-onera/la-formation-par-la-recherche>