

Ecole doctorale I-MEP2 - Ingénierie –  
Matériaux, Mécanique, Environnement,  
Énergétique, Procédés, Production (N° 510)

## PROPOSITION D'UN SUJET

### CONTRAT DOCTORAL 2022/2023

(à retourner avec l'argumentaire du directeur de laboratoire)

**Demi-contrat doctoral : NON**

#### 1 - Rattachement administratif

**SPECIALITE** \* : Mécanique des fluides, Énergétique, Procédés

**Unité de recherche** \* : LPSC UMR 5821

**Etablissement de préparation de la thèse** \* : UGA

**Année universitaire de 1ère inscription en doctorat** \* : 2022/2023

**Date de début de la thèse** \* : 01/10/2022

**Date limite de candidature** \* : 30/05/2022

**Co-tutelle**\* : NON

**Université :**

#### 2 - Projet Doctoral

**Directeur de thèse** \* : Ana LACOSTE

Taux d'encadrement % : 50%

**Co-directeur (externe UGA et externe I-MEP<sup>2</sup>) :**

Taux d'encadrement % :

**Co-encadrant** : Alexandre BES (LPSC)

Taux d'encadrement % : 30%

**Co-encadrant** : Perrine CARROY (LCT CEA-LITEN/DTS)

Taux d'encadrement % : 20%

## **Modalités d'encadrement, de suivi de la formation et d'avancement des recherches du doctorant \* :**

Le suivi sera assuré par l'équipe encadrante et effectué selon un planning qui sera établi. Parrainé(e) par un membre du CST (Comité de Suivi des Thèses) du LPSC, le (la) doctorant (te) participera aux actions prévues au niveau de l'établissement : entretiens individuels (T<sub>0</sub>+6), présentation orale sous forme de séminaire devant les membres du laboratoire (T<sub>0</sub>+18), préparation à la rédaction de la thèse et à la recherche d'un emploi (à partir de T<sub>0</sub>+24). Il (elle) suivra les formations de l'ED et respectera les modalités fixées par celle-ci concernant le CSI.

 **Titre en français \* :** Nouvelle technologie hybride pour le dépôt en film mince d'oxydes transparents conducteurs pour applications photovoltaïques

### **Mots clés \* :**

- |                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| 1* - plasma micro-onde              | 2 *-évaporation assistée par plasma           |
| 3 – oxydes transparents conducteurs | 4 – dépôt en film mince à faible bombardement |
| 5 -                                 | 6 -   |

 **English title \* :** New hybrid technology for thin film deposition of transparent conductive oxides for photovoltaic applications

### **Keys words \* :**

- |                                   |                                     |
|-----------------------------------|-------------------------------------|
| 1* - microwave plasma             | 2 *-plasma-assisted evaporation     |
| 3 – transparent conductive oxides | 4 – low-damage thin film deposition |
| 5 -                               | 6 -                                 |

## **Résumé du projet de thèse \* :**

Dans le contexte d'amélioration des rendements de conversion des cellules photovoltaïques (PV), une attention particulière doit être accordée au dépôt d'oxydes transparents conducteurs (OTC) qui constituent les électrodes de nombreuses technologies de cellules. Actuellement, la méthode de pulvérisation cathodique (magnétron), est la plus couramment utilisée pour le dépôt des OTC. Cependant, elle génère des espèces hautement énergétiques qui peuvent endommager certaines couches actives des cellules, limitant ou dégradant ainsi leur rendement. Le projet de cette thèse porte sur une technique de dépôt innovante (brevetée en 2021) qui limite ce bombardement énergétique et sur les procédés associés afin d'augmenter le rendement de conversion photovoltaïque. Après la validation de la preuve du nouveau concept d'évaporation assistée par plasma micro-onde lors d'une précédente collaboration, il s'agira dans le cadre de la thèse, d'un travail de perfectionnement du dispositif, par la modélisation et l'expérimentation, pour optimiser l'efficacité énergétique et thermique du système actif constitué d'un évaporateur intégré dans une source plasma unitaire. Les performances de la décharge seront examinées en corrélation avec les films OTC déposés sur différents substrats allant jusqu'à leur intégration sur des cellules PV. Les travaux de thèse comporteront donc une partie d'optimisation de procédé/matériau afin de démontrer la capacité de cette technique à dépasser la technologie de référence (magnétron) et d'aller vers un transfert industriel de technologie.

 **Summary of the thesis project \* :**

In the context of improving the conversion efficiency of photovoltaic cells (PV), particular attention must be paid to the deposition of transparent conductive oxides (TCO) which form the electrodes of numerous solar cell technologies. Currently, magnetron sputtering (MS) is the commonly used technique for the deposition of TCOs. However, it generates highly energetic species that can damage underlying active layers of the cells, thus limiting or degrading their performance. This thesis project focuses on an innovative deposition technique (patented in 2021) that limits this energetic bombardment and on the related processes for increasing PV conversion efficiency. After the validation of the new proof-of-concept of microwave plasma assisted evaporation during a previous collaboration, the thesis will focus on the further improvement of the tool, through modeling and experimentation, to optimize the energy and thermal efficiency of the active system, which consists of an evaporator integrated into a unitary plasma source. The performances of the discharge will be jointly examined in terms of TCO deposition process on different substrates up to their integration on PV cells. The thesis work will therefore include a process/material optimization phase in order to demonstrate the ability of this technique to surpass the reference technology (MS) and to progress towards an industrial technology transfer.

## **Thématique**

Technologie plasma, évaporation, film mince

## **Domaine :**

Photovoltaïque, Oxyde Transparent Conducteur

## **Objectifs**

Optimisation et développement d'un dispositif innovant mettant en œuvre une nouvelle technique de dépôt en film mince à faible bombardement énergétique, pour l'augmentation des rendements des cellules photovoltaïques. Validation des procédés de dépôts d'oxydes transparents conducteurs sur substrats sensibles à la chaleur et au bombardement énergétique comme, par exemple, les couches actives sous-jacentes des cellules solaires.

## **Contexte \* :**

La technologie la plus répandue dans l'industrie pour les dépôts en film mince à partir de cibles solides est celle de la pulvérisation cathodique. Toutefois, pour le dépôt de couches d'oxydes transparents conducteurs (OTC) utilisées comme électrodes transparentes des cellules photovoltaïques (PV) à haut rendement, telles que les cellules à hétérojonction de Si (SHJ) ou à pérovskites (PK), cette technologie présente un inconvénient majeur qui entrave leurs performances. En effet, elle génère des particules de haute énergie<sup>[1]</sup> qui endommagent, aussi bien les couches actives des cellules (a-Si:H, PK), que le film OTC en croissance. Avec le développement grandissant des cellules PV-Tandem (PK/SHJ) ou organiques (OSC), il est devenu impératif d'apporter des solutions technologiques alternatives permettant de surmonter cet inconvénient intrinsèque à la technologie magnétron. Dans le cadre d'un projet collaboratif CNRS/CEA, nous avons mis en œuvre une technologie hybride de dépôt<sup>[2]</sup> qui associe la production d'un plasma micro-onde à RCE (résonance cyclotron électronique) et l'évaporation assistée par ce même plasma. Ce dispositif a permis la validation des procédés de dépôt sur des cellules SHJ avec des résultats très prometteurs quant à la qualité des films OTC (e.g., IWO avec de grains de taille micrométrique, mobilité de  $80 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  vs.  $50 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  attendu) et aux propriétés électriques des cellules HET (e.g., démonstration de rendements à l'état de l'art), et ce, pour des cellules sorties de la chaîne d'opérations sous atmosphère contrôlée. Cette nouvelle technologie est en rupture nette par rapport à l'état de l'art<sup>[1,3]</sup> et confère une simplicité accrue pour l'extension d'échelle du procédé. Au vu des enjeux importants dans le domaine du PV et du fort potentiel d'industrialisation de cette technologie, il est important maintenant de poursuivre les travaux pour la mener à un TRL 3-4.

## **Méthode :**

Le projet proposé comporte deux principaux volets d'étude et de développement : technologie et procédé. Du point de vue technologique, il s'agit d'optimiser par des simulations amont (Comsol Multiphysics) le design de l'applicateur d'onde électromagnétique et de l'évaporateur intégré pour améliorer l'efficacité énergétique et thermique du système. La

caractérisation électrique et optique de la décharge pour différentes configurations magnétiques associées à l'applicateur d'onde à pour objectif le contrôle, d'une part, de la répartition spatiale sélective de deux populations d'électrons ayant des fonctionnalités différentes (évaporation pour les électrons énergétiques et production d'espèces réactives pour les électrons du corps du plasma de moindre énergie) et, d'autre part, du flux d'énergie à la surface de dépôt. Cette caractérisation systématique, réalisée pour différents paramètres opératoires (puissance micro-onde, pression et composition de gaz, courant de chauffage, distance source plasma – substrat de dépôt...), sera effectuée par des techniques existantes au LPSC (sonde électrostatique, OES, analyseur d'énergie, techniques standard de mesures électriques et de températures) et permettra de sélectionner un ensemble de paramètres optimum en termes de production d'espèces réactives et de flux de faible énergie à la surface de croissance.

En termes de procédé, l'étude sera dans un premier temps conduite sur des échantillons (Si, verre) disposés sur un porte-substrat de surface équivalente aux cellules (156×156 mm<sup>2</sup>) pour l'examen des propriétés des films (*i.e.*, concentration et mobilité des porteurs de charge, résistivité, absorption, constantes optiques, morphologie, structure cristalline), d'uniformité de dépôt, de vitesse de croissance, ainsi que pour la validation de la reproductibilité de procédé. Les matériaux étudiés d'électrodes seront principalement des oxydes d'indium avec différents dopants : tungstène (IWO) et étain (ITO) notamment, mais aussi hydrogène (IOH), cérium (ICO) ou zinc (IZO). L'objectif ultime est la validation du procédé sur des cellules PV-Tandem avec une évaluation de leurs performances (*i.e.*, tension de circuit-ouvert, courant de court-circuit, facteur de forme, efficacité de conversion d'énergie).

### Résultats attendus :

Technologie : Fiabilité du dispositif d'évaporation, efficacité du couplage de l'onde électromagnétique – plasma, uniformité plasma, faible énergie sur le substrat (cinétique < 50 eV, thermique < 80 °C)

Procédé : Electrodes conformes en termes d'uniformité (épaisseur, composition), de propriétés optique (transmission) et électrique (porteur de charges, résistivité, mobilité) et de rendement pv > 25%

### Références bibliographiques \* :

1. Jon M. Andersson, E. Wallin, E. P. Mürger, U. Helmersson, J. of Appl. Phys. 033305 **100** (2006)  
<https://doi.org/10.1063/1.2219163>
2. A. Lacoste, A. Bès, F. Ozanne, Dispositif pour le dépôt de films minces assisté par plasma micro-onde, brevet CEA/UGA/CNRS n°2013733 déposé le 18/12/2020, extension PCT 2021
3. H. Kitami, M. Miyashita, T. Sakemi, Y. Aoki, T., Japanese Journal of Applied Physics 54, 01AB05 (2015)  
<http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.54.01AB05>

### Conditions scientifiques matérielles (conditions de sécurité spécifiques) et financières du projet de recherche \* :

Les équipements de production et de caractérisation du plasma sont disponibles au LPSC. Les dépenses de fonctionnement et de sous-traitance (caractérisation des films), estimées à 25 k€, seront pris en charge par l'équipe sur ses crédits propres. La caractérisation des films sera effectuée sur les plateformes existantes à Grenoble (IMEP, CMTC, Nanofab) et, dans le respect des normes de fonctionnement de ces plateformes, le/la doctorant.e participera aux caractérisations. La caractérisation sur cellules sera effectuée ponctuellement au LCT (CEA-LITEN/DTS).

### Ouverture Internationale :

### Collaborations envisagées :

Pour la fourniture de cellules et leurs caractérisations ponctuelles, une collaboration avec le LCT (co-auteurs du brevet) est prévue.

**Objectifs de valorisation des travaux de recherche du doctorant : diffusion, publication et confidentialité, droit à la propriété intellectuelle,...** \* :

Publication d'articles et diffusion des résultats scientifiques relatifs aux performances de la décharge et des procédés.

**Caractère confidentiel des travaux** \* : non

### 3 - Financement du projet doctoral

**Type de Financement du projet doctoral\*** : Concours pour un contrat doctoral

### 4 - Candidature

 **Profil et compétences recherchées\*** :

Profil : Sciences pour l'ingénieur, Génie des procédés. Compétences : physique et ingénierie des décharges, physico-chimie des plasmas, science de matériaux, aptitudes expérimentales.

 **Profile and skills required\*** :

Profile: Engineering Sciences, Process Engineering.

Skills: physics and chemistry of plasmas, electrical discharge engineering, materials science, experimental skills

Niveau de français requis (aucun ou niveau de A1 à C2) :

Niveau d'anglais requis (aucun ou niveau de A1 à C2) :

Candidature en ligne du sujet sur le site ADUM\* : OUI

Avez-vous un candidat et souhaitez-vous lui réserver ce projet ? OUI/NON

**Tous les champs ayant un \* doivent être obligatoirement complétés pour l'insertion de la demande sur ADUM. Attention : ne pas insérer de figures !!!**