

# Modélisation thermomécanique de la solidification du silicium à l'échelle des grains et des lingots pour les cellules solaires photovoltaïques<sup>1</sup>

Habibi Mohamed Mehdi<sup>1\*</sup>, Barrallier Laurent<sup>1</sup>, Depriester Dorian<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire MSMP, Arts et Métiers Institut de Technologie, 13100 Aix-en-Provence

\*Mail : [mohamed\\_mehdi.habibi@ensam.eu](mailto:mohamed_mehdi.habibi@ensam.eu)

Dans le contexte de la transition énergétique, les cellules photovoltaïques monocristallines sont favorisées dans l'industrie pour leur rendement élevé. Cependant, leurs performances restent limitées par des défauts cristallins formés lors de la solidification du silicium, tels que les dislocations, sous-joints de grains et microfissures induites par les contraintes résiduelles. Ces défauts favorisent la recombinaison des porteurs de charge et dégradent le rendement électrique. C'est pourquoi cette étude vise à analyser les défauts générés dans le silicium lors de sa solidification. Le four GaTSBI (Growth at high Temperature observed by Synchrotron Beam Imaging) permet de réaliser des expériences in situ de fusion et de solidification directionnelle du silicium sous rayonnement synchrotron (Figure 1), combinant radiographie et la topographie. Dans un premier temps, un modèle thermique 3D par méthode des éléments finis est développé sous Abaqus/Standard afin de reproduire l'historique thermique complet du four, depuis les phases de chauffage jusqu'au refroidissement.

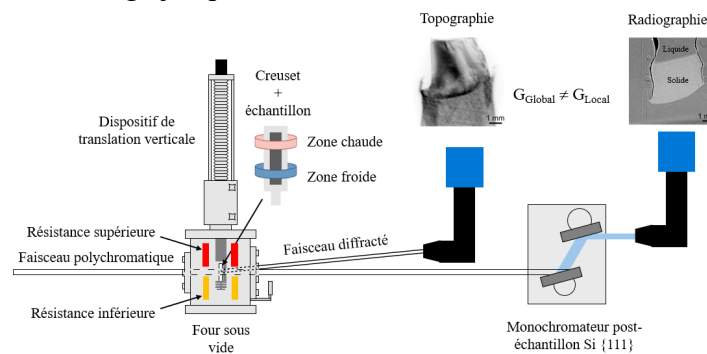


Figure 1: Schéma du dispositif expérimental GaTSBI pour l'analyse in situ (adapté du projet ANR DeFI2 – IM2NP, 2024)

Le modèle thermique est validé par comparaison des gradients globaux (pyrométrie aux éléments chauffants) et des gradients locaux dans l'échantillon, ainsi que par la radiographie synchrotron in situ de l'interface solide-liquide. Dans un second temps, ces champs thermiques sont utilisés comme chargement pour une modélisation de la plasticité cristalline du silicium à l'état solide, basée sur une approche CPFEM (Crystal Plasticity Finite Element Method), implémentée dans Abaqus via une sous-routine utilisateur UMAT (Eralp Demir, 2022). Le modèle prend en compte les systèmes de glissement  $\{111\}\{110\}$ , la loi de glissement dépendante de la température, l'évolution des densités de dislocations (écrouissage), de la CRSS (Critical Resolved Shear Stress) et des mécanismes de fluage, dont les paramètres sont issus de la littérature dédiée au silicium monocristallin à haute température. Les résultats numériques sont confrontés à une caractérisation expérimentale par diffraction des rayons X, soit par la méthode d'Ortner, soit par diffraction de Laue, afin d'accéder aux champs locaux de déformation et de contraintes. L'ensemble de cette démarche vise à établir un lien quantitatif entre les conditions thermiques du procédé, la plasticité cristalline du silicium et la formation des défauts responsables de la dégradation des performances électriques des cellules photovoltaïques.

<sup>1</sup> Cette étude est effectuée dans le cadre du projet ANR DeFI2 (n° ANR-23-CE50-0022-01) qui vise à comprendre l'origine de la formation de ces défauts afin d'optimiser les procédés de solidification et, ainsi, améliorer la qualité structurale et fonctionnelle des lingots de silicium monocristallin.