



Vue en coupe d'une céramique de combustible nucléaire

Modélisation multiphysique du frittage du combustible nucléaire : effet de l'atmosphère sur la cinétique du retrait

DEC/SESC/LDOP

Cette thèse se consacre à la mise en place d'un modèle multiphysique du frittage pour simuler l'impact de la composition et des propriétés physiques de l'atmosphère sur la cinétique de densification du combustible à l'échelle de la pastille.

Le frittage des matériaux céramiques est une étape clé dans de nombreux processus industriels. C'est également le cas pour les combustibles utilisés dans les centrales nucléaires électrogènes. Les caractéristiques microstructurales du combustible et son comportement en réacteur dépendent de cette étape.

L'étape de frittage des combustibles consiste en un traitement thermique en phase solide sous pression partielle d'oxygène contrôlée permettant de consolider et densifier le matériau, et de faire croître les grains de la céramique. La taille de grain et la densification évoluent suivant les caractéristiques thermochimiques imposées par le four de frittage. Si le compact (poudre comprimée par pressage avant le frittage) admet de fortes hétérogénéités de densité, une différence de densification dans la pastille peut avoir lieu entraînant un retrait différentiel et potentiellement l'apparition de défauts (fissures et éclats).

Cette thèse se consacre à la mise en place d'une modélisation macroscopique (échelle de la pastille) du frittage couplant la thermique, la chimie et la mécanique, afin de simuler l'impact de la composition et des propriétés physiques de l'atmosphère sur la densification du combustible. Cette échelle permet en premier lieu de considérer les gradients de densité issus du pressage, mais également de prendre en compte la cinétique de diffusion d'oxygène impactant localement la vitesse de densification.

La densification modifiant la porosité, le transport d'oxygène est donc impacté. Un couplage multiphysique est donc nécessaire afin de prendre en compte les phénomènes d'interaction entre la diffusion, la thermique et la réponse mécanique de la pastille. Le modèle de densification repose sur une modélisation thermomécanique en grandes transformations du frittage dont la loi de comportement est une loi viscoplastique poreuse dont les paramètres évoluent avec l'évolution de la microstructure [2]. Cette thèse sera donc à l'interface entre plusieurs spécialités et échelles.

Ce travail de thèse s'appuiera donc sur de la modélisation multiphysique (thermique, diffusion, chimie et mécanique), le développement de méthodes numériques ainsi que le développement de code. Il sera notamment utilisé le code thermomécanique MFEM-MGIS [3] couplé avec le solveur multi-espèces réactif SLOTH-PLIEADES [4].

Ce travail de thèse sera mené au sein du Laboratoire commun MISTRAL (Aix-Marseille Université, CNRS, Centrale Méditerranée et l'institut IRESNE du CEA Cadarache). Au sein du CEA, la thèse s'effectuera au Service d'Etudes et de Simulation du Comportement des combustibles (SESC) et sera à l'interface entre Le Laboratoire de Développement des OCS combustibles PLEIADES (LDOP) et le Laboratoire de Modélisation du Comportement des Combustibles (LM2C). Cette collaboration permet de bénéficier des ressources numériques et de modélisation multiéchelle essentielles dans la mise en place des simulations.

Le doctorant valorisera ses résultats au travers de publications et participations à des congrès et aura acquis de solides compétences qui sont recherchées et valorisables dans un grand nombre de domaines académiques et industriels.

Références

- [1] K. Torrente, C. Duguay, F. Doreau, F. Lebreton et G. Bernard-Granger, « Revisiting the sintering of uranium dioxide », *Journal of the European Ceramic Society*, 45(3), (2025)
- [2] C. Manière, T. Grippi, and S. Marinel, « Estimate microstructure development from sintering shrinkage : A kinetic field approach ». *Materials Today Communications*, 31 :103269. (2022).
- [3] T. Helfer, G. Latu, R. Prat, M. Wangermez et F. Cuterie, « MFEM/MGIS, a HPC mini-application targeting nonlinear thermo-mechanical simulations of nuclear fuels at mesoscale », *Journal of Open Source Software*, 10(108), 7719. (2025)
- [4] C. Introini, R. Prat, R. Le Tellier, C. Plumecocq, L. Messina, T. Barani, I. Ramière, J. Sercombe, E. Delobre, « SLOTH : the multiphase-field multicomponent framework of the PLEIADES platform », *NUMAT* 2024, (2024).

■ Formation recommandée :

Ecole d'ingénieur ou Master 2 en mécanique non linéaire du solide et des matériaux ou physique des matériaux.

■ Ecole doctorale :
ED 353 Aix-Marseille Université Sciences pour l'Ingénieur : Mécanique, Physique, Micro et Nanoélectronique (SIMPNN)

■ Date souhaitée de début de thèse :

01/10/2026

■ Lieu :
Centre CEA de Cadarache et Laboratoire Mécanique et Acoustique (LMA) Marseille

■ Directeur(s) de thèse :

LEJEUNES Stéphane
CNRS - LMA

■ Chercheur de l' IRESNE à contacter :

Socié Adrien
adrien.socie@cea.fr

04 42 25 27 22

