

PROPOSITION DE SUJET DE THÈSE

Laboratoire : Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne (ICB)

Titre de la thèse : Transition d'échelle pour la modélisation de la compaction isostatique à chaud

Direction et éventuelle co-direction de la thèse (grades, HDR)

Jean-Philippe Chateau-Cornu, PR

Adéquation scientifique avec les priorités de l'établissement

La plateforme CALHIPSO de l'ICB s'est dotée en 2026 d'une enceinte CIC de grande dimension ($\varnothing 410h1000$) sur le site de l'IUT du Creusot (EQUIPEX+ ANR-21-ESRE-0039), venant compléter l'enceinte déjà existante sur le site de l'I3M à Dijon depuis 2016 et de plus petite dimension ($\varnothing 180h500$). Cette offre complète permet à l'ICB d'accompagner ses partenaires industriels dans le développement de cette technologie pour la fabrication de pièces par métallurgie des poudres depuis les études amont (TRL 1 à 4) juste qu'à la réalisation de prototypes (TRL 5 à 7).

Cette thèse s'inscrit dans l'objectif de développement des modèles numériques (thermomécaniques et évolutions microstructurales) nécessaires à la maîtrise du procédé CIC, y compris sur des pièces de très grande dimension, comme envisagé dans le nucléaire, par exemple, dans lesquelles il faut tenir compte des gradients thermiques.

Descriptif du sujet (enjeux scientifiques, applicatifs, sociétaux...)

L'ICB a développé ces dernières années des modèles thermomécaniques de densification d'une poudre métallique ainsi que les protocoles expérimentaux permettant leur ajustement, notamment dans le cadre de la Chaire uB/Framatome pour un acier 316L. Ces modèles prédisent la forme finale d'une pièce densifiée par CIC en simulant la déformation de la poudre encapsulée dans son conteneur. Pour des pièces de petite dimension (< 10 cm), les résultats montrent qu'un modèle purement viscoplastique (assimilant la densification de la poudre au simple fluage d'un milieu poreux) et des simulations homothermes (température croissant de façon uniforme dans toute la pièce) donnent d'excellents résultats.

Les résultats obtenus sur une pièce de grande dimension (80 cm) du même matériau montrent qu'il est nécessaire de prendre en compte la diffusion thermique depuis la surface de la pièce : les gradients thermiques générés par la faible conductivité de la poudre et les différences de vitesse de densification entre parties massives et parties élancées qui en résultent provoquent des distorsions qui ne sont pas prédictes par des simulations homothermes. Cependant, les résultats montrent également qu'une sous-estimation de la conductivité de la poudre, en particulier en début de densification, peut conduire à des résultats moins bons qu'en simulation homotherme en exagérant les distorsions prédictes.

Le premier objectif de la thèse est de développer le modèle de diffusion thermique de la poudre permettant de simuler correctement les gradients thermiques et de définir le protocole expérimental permettant de l'ajuster ; définition de la géométrie de la pièce type de dimension intermédiaire élaborée dans l'enceinte $\varnothing 410$ permettant de caler le modèle de diffusion thermique sur les distorsions observées.

Les conteneurs pour pièces de grande dimension sont généralement remplis avec une densité relative initiale de poudre (75%) suffisante pour qu'il n'y ait pas de phase réarrangement granulaire en début de compaction avant la phase de densification proprement dite par fluage. Cette phase de réarrangement est susceptible de se produire dans des pièces de dimension intermédiaire avec un taux de remplissage initial plus faible. Il doit être pris en compte pour estimer correctement la diffusivité thermique de la poudre en début de compaction. Le deuxième objectif de la thèse est de développer et d'ajuster un modèle de réarrangement granulaire de type Cam-Clay et de l'implémenter dans les simulations par éléments finis.

Le troisième objectif de la thèse est d'étendre le modèle et de valider le protocole expérimental sur un autre matériau d'intérêt pour le nucléaire, tel que les aciers bainitiques des cuves ou générateurs de vapeur d'EPR.

Contexte partenarial (*cotutelle, partenariat avec un autre laboratoire, une entreprise...*)

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de l'EQUIPEX+ CALHIPSO et se fera en interaction avec les autres partenaires. En particulier, le CEMEF développe des modèles de grossissement de grains par simulations de type Level-Set déjà utilisés par Framatome pour estimer la taille de grains après forgeage. Il est envisagé de développer ce même type d'outil pour la CIC. Cependant, la cinétique de grossissement de grains dépend très fortement de la température. Les modèles nécessitent donc une estimation précise de celle-ci en tout point de la pièce et à tout instant. Le modèle thermomécanique développé dans la thèse fournira les profils de température et de contrainte utilisés comme données d'entrée du modèle de grossissement de grains. Le résultat de simulation obtenu en collaboration avec le CEMEF sera confronté aux mesures de taille de grains réalisées en différents points de la pièce réelle utilisée pour caler le modèle de diffusion thermique.

Impacts (*scientifiques, technologiques, socio-économiques, environnementaux, sociétaux...*)

La CIC permet d'élaborer des matériaux à performances améliorées (microstructure fine, homogène et isotrope) qui intéressent particulièrement l'industrie nucléaire. Elle permet en outre réduire la quantité de matière engagée en permettant une fabrication au plus près des cotes finales, même sur des formes relativement complexes. Elle permet également de réduire le nombre de soudures en offrant une plus grande liberté de forme que le forgeage.

Sa qualification dans le secteur du nucléaire en particulier nécessite de disposer des outils de prévision des caractéristiques finales des pièces pour lesquels les modèles nécessaires font actuellement défaut.

Programme de travail du doctorant (*tâches confiées au doctorant*)

Calendrier de réalisation

Définition de la géométrie de la pièce type et du protocole de calage du modèle de diffusion thermique

Développement du modèle de réarrangement granulaire et implémentation par éléments finis

Réalisation de la pièce et calage du modèle de diffusion thermique

Fourniture des données d'entrée (température et contrainte) au CEMEF pour le modèle de grossissement de grains et confrontation avec les mesures de taille de grains sur la pièce type

Extension du modèle et validation du protocole sur une poudre d'acier de type 16MND5

Accompagnement du doctorant / Fonctionnement de la thèse (*accompagnement humain, matériel, financier, en particulier pour la prise en charge du fonctionnement de la thèse et des dépenses associées*)

Machines CIC QIH15L (Dijon) et QIH60 (Le Creusot)

Machines SPS (Dijon) pour caractérisations complémentaires

Ingénieur responsable des équipements à Dijon + Ingénieur responsable de l'équipement du Creusot

Logiciel ABAQUS® sur le serveur de calcul de l'UBE

Chercheurs des équipes MaNaPI à Dijon et LTm au Creusot pour accompagnement (frittage, microscopie, simulation)

Unité Mixte de Recherche N°6303