

## SUJET DE THESE CIFRE :

# ANALYSE DES PRODUITS DE DECOMPOSITION DE L'AUSTENITE PENDANT LA TREMPE : APPLICATION A LA CUVE D'UN REACTEUR NUCLEAIRE DE TECHNOLOGIE EPR

## CONTEXTE SCIENTIFIQUE :

Framatome est un chaudiériste nucléaire, fournisseur d'équipements, de services et de combustible pour des niveaux de sûreté et de performance élevés. Framatome Etablissement de Le Creusot Forge (FLC) fabrique en particulier les composants en acier bas-carbone spécifiquement déployés pour la fabrication des cuves des réacteurs nucléaires.

Aujourd'hui les centrales nucléaires de dernière génération jouent un rôle majeur dans la décarbonation de la production d'électricité. Des investissements importants sont à prévoir pour la construction de nouvelles centrales et dans la modernisation des infrastructures existantes. L'un des principaux enjeux est de garantir la sûreté et la sécurité des installations.

Une cuve est un gros composant qui contient le cœur nucléaire du réacteur. Il s'agit donc d'un élément de sûreté primordial du circuit primaire des centrales électronucléaires dont l'intégrité doit être assurée dans toutes les situations de fonctionnement du réacteur et pour toute la durée de son exploitation.

Les différentes pièces de la cuve sont forgées à partir de lingots de plusieurs dizaines de tonnes. Une fois l'ébauche obtenue en forge, cette dernière est usinée à un certain profil avant d'être traitée thermiquement par une séquence d'austénitisation – trempe et revenu. L'objectif est d'obtenir un état métallurgique correspondant à une bainite revenue, offrant un bon compromis entre résistance mécanique et ténacité [1].

Cependant, la dimension exceptionnelle de ces composants conduit lors de leur élaboration à la présence d'hétérogénéités chimiques multi-échelles complexes qui impactent localement la microstructure et par conséquent les propriétés mécaniques [2]. Il est donc impératif d'anticiper la réponse en tout point de la pièce à chaque instant du traitement thermique.

Dans ce contexte, Framatome cherche à mieux maîtriser les différentes étapes de la genèse de la microstructure avant et après la trempe dans l'épaisseur d'une calotte de couvercle de la cuve d'un réacteur nucléaire de technologie EPR.

## OBJECTIF :

L'objectif de ce travail est d'améliorer la connaissance de l'acier 16MND5 utilisé par Framatome, établissement de Le Creusot Forge pour la fabrication de parties irradiées de la cuve d'un réacteur à eau pressurisée. Le programme de recherche s'appuie sur une étude multipartenaire à partir d'une pièce de réacteur sacrificielle. Par conséquent, FLC se dote de moyens pour identifier sur cette pièce :

- la microstructure de solidification et la répartition de la ségrégation dans le lingot dont est issue la pièce,
- la simulation des étapes de forgeage et de rétro forgeage-forgeage avec la traçabilité des zones ségréguées,
- la réalisation de traitements thermiques (austénitisation et trempe) sur pièce instrumentée.

Au cours de la thèse, les microstructures dans la pièce forgée, héritées initialement de la zone équiaxe et de la zone colonnaire du lingot d'origine sont tracées et comparées entre elles. On s'intéressera particulièrement aux hétérogénéités chimiques observées à l'échelle mésoscopique dans la pièce après forgeage, appelées "filets sur pièce". Les traitements thermiques seront effectués sur des échantillons prélevés en différentes localisations de la pièce. Ces traitements seront réalisés sur un dilatomètre capable d'appliquer une vitesse de refroidissement jusqu'à plusieurs dizaines de degrés par seconde, pour couvrir la gamme observée dans la pièce réelle lors de la trempe.

Pour FLC, il est essentiel de comprendre les différences entre les contributions ségréguées positivement et négativement des « filets sur pièce » en termes de produits de transformation de phase hérités sur la gamme de vitesse de refroidissement vue par la pièce pendant la fabrication.

## Laboratoire LEM3 – METZ France

CNRS – Université de Lorraine – Arts et Métiers

<http://www.lem3.univ-lorraine.fr>

En partenariat avec Framatome

Etablissement Le Creusot Forge (FLC)

- **La première partie de la thèse se concentre uniquement sur l'étape d'austénitisation et la genèse de la microstructure austénitique** : L'objectif est de modéliser les cinétiques de grossissement des grains austénitiques de la matière analysée en fonction du temps et de la température. Si une stagnation de la taille des grains austénitiques est mise en évidence, l'observation des ex-joints de grains austénitiques en microscopie électronique en transmission devrait permettre de révéler la présence de précipités limitant la mobilité des joints de grains.

- **La deuxième partie de la thèse est consacrée à la définition structurale des produits de transformation de l'austénite pendant le refroidissement** : Le cœur du travail est d'exploiter les différentes relations d'orientation entre la phase mère (l'austénite) et les phases filles (potentiellement ferrite, bainite supérieure, bainite inférieure, bainite granulaire et martensite) afin de donner une définition structurale de chaque produit. Ces définitions peuvent inclure des arguments s'appuyant sur des descriptions morphologiques ou/et des exploitations spécifiques de données acquises par la technique EBSD (Electron BackScattered Diffraction) dans un Microscope Electronique à Balayage [3,4].

Les analyses microstructurales s'appuient sur des méthodes innovantes en microscopie pour l'acquisition des données, couplées à des approches par intelligence artificielle pour leur exploitation [5,6]. Il s'agit par exemple d'exploiter les possibilités de suivi in-situ des transformations de phases à l'aide d'une platine chauffante couplée à la technique EBSD dans un Microscope Electronique à Balayage. Cette approche sera complétée des méthodes indirectes de reconstruction des microstructures austénitiques à haute température pour lesquels l'équipe du LEM3 est leader.

L'ensemble des analyses sera exploité pour construire un diagramme de transformation de phase en refroidissement continu. L'objectif est de mettre en place une exploitation des données permettant de découpler les transformations s'effectuant dans les parties ségréguées négativement et positivement des filets sur pièce. Pour compléter les diagrammes ainsi construits, des traitements thermiques en refroidissement continu interrompus par trempe peuvent être déployés. L'ensemble doit permettre de développer un outil de prédiction des microstructures héritées en fonction de l'histoire chimique, thermomécanique et thermique en tout point de la pièce.

## PROFIL RECHERCHE :

En formation de niveau BAC+5 en science des matériaux ou généraliste avec des connaissances en métallurgie/cristallographie. Très bon expérimentateur, avec un goût pour la modélisation. Rigoureux avec de bonnes capacités d'analyse et de synthèse. Un intérêt pour la programmation et les méthodes d'analyse des données par Intelligence Artificielle est un plus.

**Pour candidater** : Merci d'adresser votre dossier complet (CV, lettre de motivation et relevés de notes) à

**Nathalie Gey** : [nathalie.hey@univ-lorraine.fr](mailto:nathalie.hey@univ-lorraine.fr) / **Lionel Germain** : [lionel.germain@univ-lorraine.fr](mailto:lionel.germain@univ-lorraine.fr)

**Thomas Billotte** : [thomas.billotte@framatome.com](mailto:thomas.billotte@framatome.com) (Réponse garantie aux personnes strictement dans le profil)

**Démarrage** : octobre à décembre 2024 (flexible)

**Lieu** : LEM3 UMR 7239 - METZ - FRANCE

**Rémunération** : selon grille de Framatome

## Références

[1] Jean Baptiste Delattre, *Etude du lien entre traitement thermique, propriétés mécaniques et amorçage de la rupture fragile par clivage d'un acier faiblement allié trempé revenu*, Thèse de l'Université de Paris Sciences et Lettres, Mines Paris PSL, 2024

[2] N. Leriche, *Etude de la Transition Colonnaire-Equiaxe dans les lingots et en coulée continue d'acier et influence du mouvement des grains*, Thèse de l'Université de Lorraine, 2015

[3] Introduction à l'EBSD : <https://nano.oxinst.com/library/fr/blog/quest-ce-que-lebsd-introduction>

[4] Meriem Ben Haj Slama, *Étude multi-échelle et in situ des évolutions microstructurales en conditions isothermes d'aciers bainitiques en lattes*, Thèse de l'Université de Lorraine, 2018

[5] Tomas Martinez Ostormujof, *Apport des approches avancées en microscopie d'orientation pour l'analyse des microstructures de transformation de phase dans les aciers*, Thèse de l'Université de Lorraine, 2022

[6] S. Breumier, T. Martinez Ostormujof, B. Frincu, N. Gey, A. Couturier, N. Loukachenko, P.E. Aba-perea, L. Germain, *Leveraging EBSD data by deep learning for bainite, ferrite and martensite segmentation*, *Materials Characterization* 186, 2022, 111805