



Sujet de thèse : Etude thermodynamique du système Fe-O-U-Zr pour la compréhension du comportement du corium en cuve

Cette thèse s'effectuera à l'UMET (Unité Matériaux Et Transformations, Université de Lille) en collaboration avec le CEA (Université Paris-Saclay, Service de recherche en Corrosion et Comportement des Matériaux) et le CIRIMAT (Université de Toulouse).

En cas d'accident grave survenant dans un réacteur à eau pressurisée (REP), les différents matériaux (combustible, gaine et cuve) vont réagir entre eux pour former un mélange oxyde-métal appelé corium. L'existence d'une lacune de miscibilité dans le mélange liquide à haute température va donner lieu à une stratification de ce dernier en couches dont l'épaisseur dépend de la composition chimique du mélange. Une question importante est de pouvoir calculer le flux thermique imposé par le corium à la cuve afin de déterminer les conditions de rupture éventuelle de celle-ci et les conditions initiales de l'interaction entre le corium et le béton, ultime barrière de confinement. La rétention du corium à l'intérieur de la cuve par le biais d'un refroidissement externe de la cuve du réacteur est aujourd'hui adoptée dans certains réacteurs de Génération III et également dans les concepts de type SMR (Small Modular Reactor). Ce dispositif constitue une stratégie de confinement du corium en cas d'accident grave. Il est donc primordial, afin de prévoir le comportement thermique du corium, d'en connaître ses propriétés thermodynamiques.

L'objectif de cette thèse est d'améliorer la description thermodynamique du système « corium en cuve ». Il s'agit pour cela d'acquérir des données expérimentales dans le système Fe-O-U-Zr, choisi en première approximation, afin d'alimenter la modélisation thermodynamique par méthode CALPHAD (CALculation of PHase Diagrams). Les relations de phases et les propriétés thermodynamiques des phases intermédiaires seront étudiées à différentes températures. Pour cela des échantillons de compositions choisies seront élaborés à des températures d'intérêt. Les structures cristallines et compositions chimiques des différentes phases à l'équilibre seront déterminées par différentes techniques de caractérisations couplées (microsonde électronique, DRX, MEB-EDS-EBSD). Les propriétés thermodynamiques telles que la capacité calorifique et l'enthalpie de formation de composés définis seront mesurées par analyse thermique différentielle et par calorimétrie isotherme de dissolution, respectivement. La lacune de miscibilité à l'état liquide sera étudiée par des méthodes de chauffage à haute température (four Joule et chauffage laser) pour déterminer les compositions des phases liquides à l'équilibre. Les résultats expérimentaux seront ensuite pris en compte pour l'amélioration des modèles sur le système Fe-O-U-Zr dans la base de données TAF-ID (Thermodynamic Advanced Fuels – International Database) développée à l'AEN/OCDE [1].

[1] C. Guéneau et al, TAF-ID: An international thermodynamic database for nuclear fuels applications, Calphad, 72 (2021) 102212

Mots - clés : accidents graves, corium, thermodynamique, CALPHAD

Contacts :

Dr. Matthieu Touzin, Tél : +33 3 20 33 65 94 ; e-mail : matthieu.touzin@univ-lille.fr

Dr. Christine Guéneau, Tél : +33 1 69 08 67 41 ; e-mail : christine.gueneau@cea.fr

Dr. Enrica Epifano, Tél : +33 5 34 32 34 39 ; e-mail : enrica.epifano@toulouse-inp.fr



Ecole Doctorale - 104

Sciences de la Matière, du Rayonnement
et de l'Environnement

Informations :

Laboratoire UMET – site : <https://umet.univ-lille.fr/>

Laboratoire CIRIMAT- site : <https://cirimat.fr/>

Profil des candidats :

Le candidat devra être titulaire d'un Master 2 ou d'un diplôme d'ingénieur dans les domaines des sciences des matériaux, de la physique, de la chimie ou de disciplines connexes. De solides connaissances en thermodynamique, techniques d'élaboration et de caractérisation structurale seront appréciées. Le candidat devra avoir un goût prononcé pour le travail expérimental, des capacités de travail en équipe et devra faire preuve d'esprit d'initiative. Des séjours seront prévus au CEA Saclay pour effectuer les essais à haute température.

Toute candidature devra être accompagnée des bulletins de notes ainsi que du classement en M1 et M2, d'un CV et d'une lettre de motivation.

Date de recrutement envisagée : Octobre 2026



PhD Thesis Topic: Thermodynamic Study of the Fe-O-U-Zr System to Understand the Behavior of Corium in the Reactor Vessel

This thesis will be performed at UMET (University of Lille) in collaboration with the CEA (Université Paris-Saclay, Service de recherche en Corrosion et Comportement des Matériaux) and CIRIMAT (Toulouse).

In case of a severe accident in a pressurized water reactor (PWR), the various materials (fuel, cladding, and vessel) will react with each other to form a metal-oxide mixture called corium. The existence of a miscibility gap in the high-temperature liquid mixture will lead to its stratification into layers, whose thickness depends on the chemical composition of the mixture. A key question for safety calculations is the heat flux imposed by the corium on the vessel: this is necessary in order to determine the conditions for its potential failure and the initial conditions of the interaction between the corium and the concrete, the ultimate containment barrier. Retaining the corium within the reactor vessel through external cooling is now used in some Generation III reactors and also in SMR (Small Modular Reactor) designs. This system constitutes a corium containment strategy in the event of a severe accident. Therefore, understanding the thermodynamic properties of the corium is essential for predicting its thermal behavior.

The objective of this thesis is to improve the thermodynamic description of the corium system. This involves acquiring experimental data in the Fe-O-U-Zr system, chosen as a first approximation, to inform the thermodynamic modeling based on the CALPHAD (CALculation of PHase Diagrams) method. The phase equilibria and thermodynamic properties of the intermediate phases will be studied at different temperatures. To this end, samples of selected compositions will be prepared at temperatures of interest. The crystalline structures and chemical compositions of the different phases at equilibrium will be determined by various characterization techniques (EPMA, XRD, SEM-EDS-EBSD). Thermodynamic properties such as the heat capacity and enthalpy of formation of defined compounds will be measured by differential thermal analysis and isothermal dissolution calorimetry, respectively. The miscibility gap in the liquid state will be studied using high-temperature heating methods (Joule furnace and laser heating) to determine the compositions of the liquid phases at equilibrium. The experimental results will then be taken into account to improve the models on the Fe-O-U-Zr system in the TAF-ID (Thermodynamic Advanced Fuels – International Database) database developed at the NEA/OECD [1].

[1] C. Guéneau et al, TAF-ID : An international thermodynamic database for nuclear fuels applications, Calphad, 72 (2021) 102212

Key-words: nuclear accidents, corium, thermodynamics, CALPHAD

Contacts :

Dr. Matthieu Touzin, Tél : +33 3 20 33 65 94 ; e-mail : matthieu.touzin@univ-lille.fr

Dr. Christine Guéneau, Tél : +33 1 69 08 67 41 ; e-mail : christine.gueneau@cea.fr

Dr. Enrica Epifano, Tél : +33 5 34 32 34 39 ; e-mail : enrica.epifano@toulouse-inp.fr

Informations :

Laboratoire UMET – site : <https://umet.univ-lille.fr/>

Laboratoire CIRIMAT- site : <https://cirimat.fr/>



Ecole Doctorale - 104

Sciences de la Matière, du Rayonnement
et de l'Environnement

Candidate Profile :

The candidate must hold a Master's degree (Master 2) or an engineering degree in materials science, physics, chemistry, or related fields. A strong background in thermodynamics, fabrication and characterization techniques will be highly valued. The candidate should have a keen interest in experimental work, the ability to work effectively in a team, and autonomy. Travel to CEA Saclay will be required to conduct high-temperature tests.

All applications must include: academic transcripts, class rankings from the first and second years of the Master's program (M1 and M2), a detailed CV, and a cover letter.

Expected date of recruitment : October 2026