

## **AVIS DE SOUTENANCE DE THESE**

**Monsieur Matthieu REYMOND** est autorisé à présenter ses travaux en vue de l'obtention du diplôme national de DOCTORAT délivré par l'école CENTRALE MARSEILLE

**Le 17 octobre 2022, à 13H30**

Lieu : Amphi INSTN, CEA CADARACHE  
Saint-Paul-lez-Durance

*(inscription obligatoire préalable auprès de Corine Farnaud : [corine.farnaud@cea.fr](mailto:corine.farnaud@cea.fr) + documents d'identité avec mention de la nationalité requis le jour même)*

Titre : : **Chauffage par Laser pour l'étude des mécaniques physiques impliqués dans les combustibles nucléaires en situation accidentelle hypothétique**

École doctorale : **ED 352 Physique et Sciences de la Matière**

Spécialité : **Energie, Rayonnement et Plasma**

### **Rapporteurs**

Monsieur Laurent VIDEAU, Directeur de Recherche, CEA DAM, Bruyères -le -Chatel, France.  
Monsieur Rudy KONINGS, Professor, European Commission, Karlsruhe, Allemagne.

### **Membres du Jury**

Monsieur Laurent VIDEAU, Directeur de Recherche, CEA DAM, Bruyères -le -Chatel, France.  
Monsieur Rudy KONINGS, Professor, European Commission, Karlsruhe, Allemagne.  
Monsieur Laurent GALLAIS, Professeur, Ecole Centrale de Marseille, France.  
Madame Suzanne GIORGIO, Professeur, Aix - Marseille Université, France.  
Monsieur Guillaume KERMOUCHE, Professeur, Ecole des Mines de Saint-Etienne, France.  
Monsieur Yves PONTILLON, Directeur de recherche, CEA Cadarache / DES, France.

### **Résumé (FR)**

Dans un Réacteur à Eau Pressurisé (REP), la modélisation du comportement du combustible en situation accidentelle comme l'Accident par Insertion de Réactivité (*Reactivity Initiated Accident - RIA*) ou l'Accident par Perte de Réfrigérant Primaire (APRP) est nécessaire pour prédire le comportement du combustible et pour déterminer les critères de sûreté du parc en exploitation.

Dans le cas du RIA, la validation des codes de simulation repose sur les données expérimentales obtenues lors d'essais intégraux en réacteur de recherches comme Cabri en France ou le NSRR au Japon. Bien que les données ainsi obtenues sont cruciales et permettent de valider les codes de simulation, ces essais ne peuvent bien évidemment pas être multipliés ou paramétrés facilement. De ce fait, certains mécanismes comme la fragmentation du combustible et le relâchement des gaz de fission pendant le transitoire restent difficiles à précisément reproduire. Or, ce relâchement des gaz de fission et sa cinétique peuvent potentiellement conduire à la rupture de la gaine par ballonnement et à une dispersion d'une partie de l'inventaire du crayon combustible dans la cuve du réacteur.

Dans ce contexte, ces travaux de thèse aborderont le développement et l'utilisation d'une technique de chauffage par laser originale, basée sur l'utilisation de lasers de hautes-puissances (> kW), capable d'induire des transitoires thermiques d'intérêts sur des échantillons de céramique nucléaire ( $UO_2$  appauvri) pour l'étude du combustible nucléaire en conditions accidentelles de type RIA.

Associé à ces développements expérimentaux, nous avons développé au cours de ces travaux la modélisation du comportement thermo-mécanique de l' $UO_2$  durant ces chauffes en prenant en compte la spécificité de l'interaction laser- $UO_2$  et le chargement thermique en résultant. Nous avons pour ce faire développé un modèle numérique basé sur la méthode des éléments finis utilisant le solveur thermo-mécanique Cast3m du CEA. En parallèle, la préparation d'échantillons dits « lames minces » nous ont permis de déterminer les propriétés optiques de la céramique afin de décrire le plus fidèlement possible le chargement laser responsable de l'élévation de température dans l'échantillon. Nous verrons que nous pouvons exprimer le terme source de chaleur résultant du chargement laser soit par une description analytique soit de manière statistique par une étape préalable de simulation Monte-Carlo.

Le comportement mécanique de l' $UO_2$  est quant à lui décrit par une loi de comportement mécanique que nous avons développé pour rendre compte du comportement de la céramique à hautes-vitesses de sollicitations ( $>1.s^{-1}$ ) caractéristiques de ces chauffes laser. Cette loi d'endommagement décrit la perte de rigidité du matériau en fonction du mode de chargement (à dominante de traction ou de compression) et de la température. Son application sur des chauffes laser dites annulaires mène à une bonne estimation de l'instant et de la localisation de la fracturation. De plus l'analyse du chargement mécanique et de la répartition des contraintes dans l'échantillon met en évidence un chargement mécanique représentatif du cas prototypique en réacteur de recherche.

Enfin nous présenterons des chauffes laser visant à reproduire l'intégralité de la phase de montée en température d'un transitoire RIA et discuterons des perspectives de ce travail et notamment de l'implémentation possible de cette technique de chauffe laser en Laboratoire de Haute-Activité.

### **Mots clés :**

Chauffage laser, accident par insertion de réactivité, combustible nucléaire, simulation thermo-mécanique, interaction laser-matière

## **Abstract (EN)**

In a Pressurized Water Reactor (PWR), the modeling of fuel behavior in accident situations such as Reactivity Initiated Accident (RIA) or Loss of Coolant Accident (LOCA) is necessary to predict the fuel behavior and to determine the safety criteria of the operating park.

In the case of the RIA, the validation of the simulation codes is based on experimental data obtained during full-scale tests in research reactors such as Cabri in France or NSRR in Japan.

Although the data obtained this way are crucial and allow the validation of the simulation codes, these tests can obviously not be multiplied or parameterized easily. Therefore, certain mechanisms such as fuel fragmentation and the release of fission gases during the transient remain difficult to reproduce completely. This release of fission gases and its kinetics can potentially lead to the rupture of the cladding by ballooning and to a dispersion of part of the fuel rod inventory in the reactor vessel.

In this context, this thesis will address the development and use of an original laser heating technique, based on the use of high-powered lasers ( $> \text{kW}$ ), capable of inducing thermal transients of interest on nuclear ceramic samples (depleted  $\text{UO}_2$ ) for the study of nuclear fuel in accidental RIA type conditions.

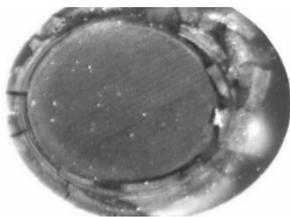
Associated with these experimental developments, we have developed during this work the modeling of the thermo-mechanical behavior of  $\text{UO}_2$  during these heating experiments by taking into account the specificity of the laser- $\text{UO}_2$  interaction and the resulting thermal loading. We have developed for this purpose a numerical model based on the finite element method using the CEA's Cast3m thermo-mechanical solver. In parallel, the preparation of samples called "thin slides" allowed us to determine the optical properties of the ceramic in order to describe as accurately as possible the laser loading responsible for the temperature rise in the sample. We will see that we can express the heat source term resulting from the laser loading either by an analytical description or statistically by a preliminary step of Monte-Carlo simulation.

The mechanical behavior of  $\text{UO}_2$  is described by a mechanical behavior law that we have developed to account for the behavior of the ceramic at high strain rates ( $> 1 \cdot \text{s}^{-1}$ ) characteristic of these laser heating experiments. This damage law describes the loss of stiffness of the material as a function of the loading mode (tension or compression dominated) and temperature. Its application to so called annular laser heating experiments leads to a fairly good estimate of the time and location of fracturing. Moreover, the analysis of the mechanical loading and of the stress distribution in the sample highlights a mechanical loading representative of the prototypical case in a research reactor.

Finally, we will present laser heating experiments aiming to reproduce the entire temperature rise phase of a RIA transient and will discuss the perspectives of this work and the possible implementation of this laser heating technique in a High-Activity Laboratory.

**Keywords:**

Laser heating, Reactivity Initiated Accident, nuclear fuel, thermo-mechanical simulation, laser-matter interaction



Echantillon fracturé post chauffe



0.5 mm

Modélisation associée de l'endommagement en 2D axisymétrique