

AVIS DE SOUTENANCE DE THESE

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

Le 16 décembre 2021, à 10H00

Lieu : Amphithéâtre François Canac, Laboratoire de mécanique et d'acoustique (LMA), 4 impasse Nikola Tesla 13453 Marseille cedex 13

Titre : **Contribution à l'étude du comportement du matériau constitutif (acier A316L(N)-IG) de l'enceinte à vide d'ITER
- modélisation thermomécanique et simulations numériques-**

École doctorale : **ED 353 SCIENCES POUR L'INGENIEUR : Mécanique, Physique, Micro et Nanoélectronique**

Spécialité : **Mécanique des Solides**

Rapporteurs

Madame Carole NADOT-MARTIN, Professeure des universités, ENSMA, Chasseneuil-du-Poitou, France.

Monsieur Yves CHEMISKY, Professeur des universités, Université de Bordeaux, France.

Membres du Jury

Madame Carole NADOT-MARTIN, Professeure des universités, ENSMA, Chasseneuil-du-Poitou, France.

Monsieur Yves CHEMISKY, Professeur des universités, Université de Bordeaux, France.

Monsieur Noel LAHELLEC, Professeur des universités, Aix-Marseille Université, France.

Monsieur Farid ABED-MERAIM, Professeur des universités, Ecole nationale supérieure des arts et métiers, Metz, France.

Monsieur Stéphane LEJEUNES, Ingénieur de recherche, Laboratoire de mécanique et d'acoustique, Marseille, France.

Monsieur Thierry DESOYER, Professeur des universités, Ecole Centrale de Marseille, France.

Résumé (FR)

Le réacteur thermonucléaire ITER a été classifié Installation Nucléaire de Base (INB n°174) par l'autorité de sûreté nucléaire française, ceci impliquant qu'ITER sera le premier Tokamak soumis à la réglementation française en vigueur des équipements nucléaires sous pression.

Les chargements mécaniques et électromagnétiques combinés aux chargements thermiques induits par la réaction de fusion nucléaires nécessitent d'avoir une approche multiphysique de l'endommagement, ce qui, à ce jour ne fait pas parti des codes & standards nucléaires.

Dans la majorité des cas, l'intégrité structurelle est justifiée au travers de méthodes analytiques et/ou éléments finis supposant un comportement élastique du matériau. Lorsque ces types de méthode ne suffisent plus à justifier une structure, d'autres méthodes basées sur des comportements non-linéaires du matériau peuvent être utilisées. Cependant, les modèles de comportement proposés dans les codes nucléaires, ne permettent pas de représenter avec précision des comportements observés expérimentalement, plus particulièrement, dans le cas de notre étude: le phénomène de rochet.

Le phénomène de rochet est un sujet ancien car de nombreux articles abordent ce sujet depuis la caractérisation du matériau jusqu'au développement du modèle ; la plupart des études ont été réalisées par J. L. Chaboche et ses collaborateurs. Cependant, l'application d'une approche thermomécanique pour évaluer ce phénomène reste rare : c'est pourquoi nous avons proposé de développer un modèle *incluant un couplage thermomécanique fort*.

Dans la première partie de nos travaux, nous avons réalisé une campagne d'essais mécaniques, exécutés sur l'acier inoxydable 316L(N)-IG qui est le matériau de structure de l'enceinte à vide ITER (Vacuum Vessel). Cette campagne était composée de plusieurs essais de traction/compression cycliques réalisés en contrainte imposée (quasi inexistante dans la littérature) et d'essais de torsion cyclique réalisés avec un moment imposé. L'objectif était d'observer la réponse du matériau en fatigue oligocyclique, pour mieux comprendre les phénomènes d'adaptation élastique et/ou d'accommodation plastique ainsi que le phénomène de Rochet.

Dans la deuxième partie de notre travail, nous avons développé un modèle de comportement, à partir d'un modèle *modèle type Chaboche (modèle elasto-(visco)-plastique) comprenant différent types d'écrouissages*. Nous l'avons ensuite enrichi pour prendre en compte explicitement l'influence de la température sur le comportement mécanique et, réciproquement, l'influence du comportement mécanique sur la température, c'est-à-dire le couplage thermomécanique. De plus, sur la base des observations faites sur les essais cycliques, nous avons proposé d'implémenter une variable d'endommagement couplée avec les écrouissages cinématique et isotrope.

Dans la dernière partie de notre travail, nous avons implémenté le modèle dans le logiciel d'éléments finis Abaqus® et simulé différents scénarios dont une géométrie Vacuum Vessel simplifiée, appelée « rails », qui a été testée sous chargement cyclique thermomécanique.

Mots clés : ITER, chambre à vide, couplage thermomécanique, modèle de comportement, écrouissage non linéaire, endommagement, phénomène de rochet, SS316L(N)-IG.

Abstract (EN)

The ITER machine has been classified as a Basic Nuclear Installation (INB n°174) by the French nuclear regulator, which implies that it will be the first fusion reactor to go through the complete French nuclear licencing process. The combination of mechanic and electromagnetic phenomena with the heat loads caused by neutron streaming requires a multi-physics approach to the damage assessment; this has not yet been implemented in the common nuclear codes and standards.

In most cases, structural integrity is justified within a linear elastic behaviour. When this route is not enough to respect the design criteria, several non-linear approaches to the material's mechanical behaviour can be considered, requiring a more elaborated demonstration of the design compliance. Nevertheless, the models proposed in the nuclear model database are sometimes not sufficient to properly describe the experimentally observed cyclic plasticity behaviour and, in particular, the ratcheting and shakedown phenomena.

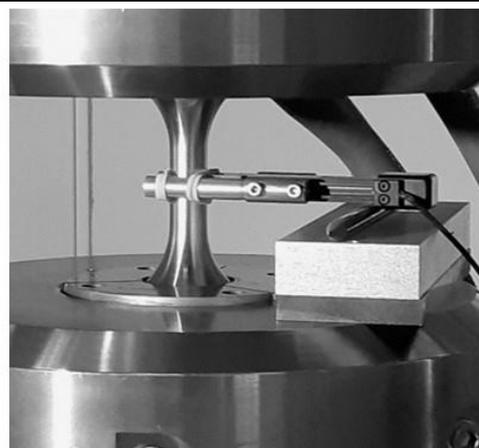
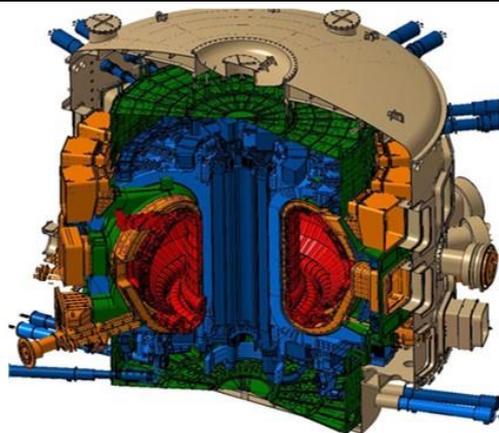
The ratcheting phenomenon is an old topic as many papers discuss this subject from the material characterisation up to the model development; most of the studies were performed by [J. L. Chaboche and his collaborators](#). However, the application of a thermomechanical approach to assess this phenomenon remains rare: that is why we proposed to develop a fully coupled thermomechanical model.

In the first step of our work, we carried out a mechanical test campaign, executed on the SS316L(N)-IG which is the ITER Vacuum Vessel (VV) structural material. This campaign was composed of several cyclic tension/compression tests performed with an imposed stress (almost non-existent in the literature) and cyclic torsion tests conducted with an imposed moment. The objective was to observe the material response under low cyclic fatigue, to better understand the shakedown (elastic and/or plastic) and ratcheting.

In the second step of our work, we developed the material behaviour model, starting from a Chaboche's model available in the literature (elasto-(visco)-plastic model, with various types of hardening). We then enriched it to explicitly take into account the influence of the temperature on the mechanical behaviour and, reciprocally, the influence of the mechanical behaviour on the temperature, i.e. the thermomechanical coupling. In addition, based on the observations made on the cyclic tests, we proposed to implement a damage variable on both kinematic and isotropic hardening behaviours.

In the final step of our work, we implemented the model in the Abaqus® finite element software and simulated different scenarios including a simplified VV geometry, called the VV "rails", which was tested under thermomechanical cyclic loading.

Keywords: Thermo-mechanical coupling, material behaviour model, non-linear hardening, damage, return radial, ratcheting, SS316L(N)-IG.



$$\frac{\rho_0 C_\varepsilon}{T_0} T \dot{T} - k_T \Delta T - r^v =$$

$$-(3\lambda + 2\mu)\gamma \text{Tr}(\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}) T + \Lambda J(\boldsymbol{\sigma} - d \sum_{i=1}^{N_{kh}} M_i \mathbf{X}_i)$$

$$+ d\Lambda \sum_{i=1}^{N_{kh}} M_i \Gamma_i \mathbf{X}_i : \mathbf{X}_i + k\Lambda(1-d)(1-e^{-mp})$$

$$+ k \left(p + \frac{1}{m} e^{-mp} \right) \Lambda \frac{d(1-d)}{n} \langle \text{Tr}(\boldsymbol{\sigma}) \rangle$$

