

> Mercredi 3 avril

16 h 00 - 17 h 15 Salle Manadiers

SESSION PARALLÈLE

> FONCTIONNEMENT DES INSTALLATIONS - Vieillessement des matériaux du réacteur

Présidente: Fabienne RIBEIRO

Docteure en chimie physique

Apou Martial KPEMOU - Hydruration secondaire et fragilisation d'une gaine M5Framatome après une sollicitation de type APRP.

Kushal Gowda JAYARAM - Understanding the mechanisms of low cycle fatigue of Alloy 690 in the PWR environment.

Loïc CHAIX - Modélisation micromécanique du comportement viscoplastique d'un polycristal : application au durcissement d'un acier irradié.

Estelle LAGARDÈRE - Corrosion des tubes de générateurs de vapeur et effets du plomb et du soufre sur les mécanismes d'endommagement.

SUJET DE LA THÈSE

Hydruration secondaire et fragilisation d'une gaine M5Framatome
après une sollicitation de type APRPP

Doctorant :	Apou Martial KPEMOU
Date du début de la thèse :	13/09/2021
Laboratoire IRSN :	PSN-RES/SEREX/LE2M
Référent IRSN de la thèse :	Séverine GUILBERT
Direction de la thèse :	Marie-Christine BAIETTO/INSA Lyon
École doctorale :	Lyon COMUE - MEGA de Lyon (Mécanique, Énergie, Génie Civil, Acoustique) - ED 162
Financement de la thèse :	IRSN, EDF & Framatome

L'IRSN, dans le cadre de la sûreté des centrales nucléaires, étudie différents scénarios accidentels hypothétiques. Cette thèse s'intègre dans l'étude des Accidents de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP). Les APRP résultent de l'apparition d'une brèche sur le circuit primaire d'un réacteur à eau pressurisée (REP) et conditionnent le dimensionnement des dispositifs de secours. Lors d'un transitoire APRP, les crayons combustibles constitués de gaine en alliage de zirconium et de pastilles de combustible sont soumis à des sollicitations thermomécaniques et chimiques. En cas d'éclatement de la gaine, un phénomène de prise massive d'hydrogène peut survenir en interne du crayon combustible. Ce phénomène complexe connu sous le nom d'hydruration secondaire résulte de l'oxydation à haute température (au-delà d' $\sim 900^{\circ}\text{C}$) de la surface interne de la gaine par de la vapeur d'eau. Des essais dits semi-intégraux ont été développés au niveau international afin d'étudier le comportement des crayons combustibles en conditions d'APRP. La nature de ces essais, ainsi que la difficulté de maîtrise des différents paramètres influents complexifient l'analyse fine du phénomène d'hydruration secondaire.

Dans ces travaux de thèse, des essais analytiques ont été mis en place pour une meilleure compréhension du phénomène. Au travers de ces essais, l'influence de divers paramètres sur l'hydruration secondaire a été investiguée. Les résultats obtenus indiquent par exemple que la quantité totale d'hydrogène absorbée par la gaine est liée au degré d'oxydation de cette dernière et également de l'espace entre la pastille de combustible et la gaine. Le positionnement des pastilles dans la gaine a également une influence sur la distribution azimutale de l'hydrogène absorbée par la gaine. Des méthodes de caractérisations microscopiques et de micro-analyses (microsonde de Castaing, micro-LIBS, SIMS) ont permis d'analyser la distribution de l'hydrogène et de l'oxygène qui fragilisent la gaine. Ces analyses ont permis de mettre en évidence un lien entre ces deux éléments. Les résultats obtenus serviront de données de validation pour les codes modélisant l'hydruration secondaire. Dans ce cadre, des développements ont été effectués afin de pouvoir modéliser les essais réalisés par le biais du logiciel SHOWBIZ développé par l'IRSN. Les résultats préliminaires obtenus à ce stade indiquent une cohérence entre les résultats expérimentaux et numériques, offrant une base pour la validation et l'affinement des modèles physiques utilisés.

Mots clés : APRP, hydruration secondaire, oxydation, fragilisation, micro, analyses, M5, Framatome.

SUJET DE LA THÈSE

Understanding the mechanisms of low cycle fatigue of Alloy 690 in the PWR environment

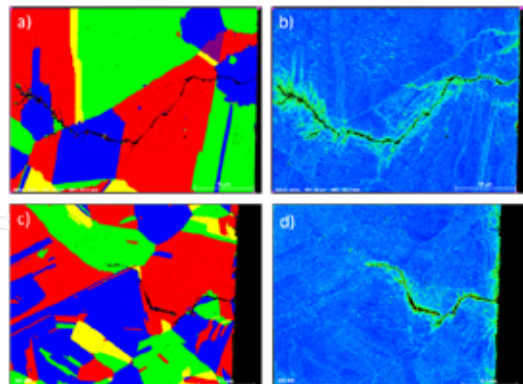
Doctorant :	Kushal Gowda JAYARAM
Date du début de la thèse :	17/10/2022
Laboratoire IRSN :	PSN-RES/SEREX/LE2M
Référent IRSN de la thèse :	Joseph HURET & Walter CHITTY
Direction de la thèse :	Gilbert HENAFF/ENSMA
École doctorale :	Universités de Poitiers & de Limoges - Sciences et Ingénierie des Matériaux, Mécanique, Énergétique (SIMME) - ED 609
Financement de la thèse :	IRSN

Environmentally Assisted Fatigue (EAF) is one of the concerns for the extended operation of nuclear power plants. Over time, certain components experience thermal cycling while being exposed to the chemically active environment of Pressurized Water Reactors (PWRs). While many components in the primary loop are made of stainless steels, some critical parts are made from Alloy 690, a nickel-based alloy. Compared to the extensive research on EAF in stainless steels, only a limited focus has been placed so far on Alloy 690. So, it is therefore identified as the interest of the institute to evaluate the effects of the environment on the fatigue life of Alloy 690.

This study aims to assess the impact of the PWR primary water environment on the fatigue life of Alloy 690. Low cycle fatigue tests were conducted in two different environments, namely air and PWR environment, at different strain amplitudes and strain rates. To investigate the mechanisms of EAF in Alloy 690, fracture surfaces were analyzed to estimate the fatigue crack growth rate from striation spacing measurements. To understand the effect of the environment on the strain localization near the crack path, the fractured samples were cut axially and were analyzed using Electron Backscatter Diffraction (EBSD). Additionally, microstructural changes were examined using Transmission Electron Microscopy (TEM) on the specimens from interrupted tests at different stages of the fatigue life.

First, the continuous increase in maximum stress observed throughout the cycling process at 300°C signifies the presence of Dynamic Strain Aging (DSA) mechanism. This observation is further confirmed by the appearance of serrations in the hysteresis loops observed in tests conducted at 300°C.

Secondly, the results indicate that, at a F_{en} (Environmental factor) of 2, there is minimal or almost no influence of the environment on the fatigue life of Alloy 690 in PWR conditions when compared to its behavior in an air environment. This observation is consistent with the crack growth rates, which demonstrate similar characteristics in both environments. However, the below EBSD images show two different modes of crack propagation i.e., intragranular propagation in air and mixed propagation both intragranular and intergranular propagation in PWR environment. Moreover, the Kernel Average Misorientation (KAM) images show almost similar strain localization in both the environment.



Mots clés : Alloy 690, LCF, environmentally assisted fatigue.

SUJET DE LA THÈSE

**Modélisation micromécanique du comportement viscoplastique d'un polycristal :
application au durcissement d'un acier irradié**

Doctorant :	Loïc CHAIX
Date du début de la thèse :	02/11/2021
Laboratoire IRSN :	PSN-RES/SEMIA/LSMA
Référent IRSN de la thèse :	Pierre-Guy VINCENT
Direction de la thèse :	Mihail GARAJEU / Aix Marseille Université & Martin IDIART / Université Nationale de La Plata (UNLP - Buenos Aires)
École doctorale :	Aix Marseille Université - Sciences pour l'ingénieur : mécanique, physique, micro et nanoélectronique - ED 353
Financement de la thèse :	IRSN & ISFIN

Cette thèse vise à améliorer la modélisation du comportement mécanique des aciers de cuve irradiés en réacteur, en considérant l'effet des défauts cristallins induits par l'irradiation neutronique. Cela impacte le durcissement et la fragilisation de l'acier, notamment sa température de transition. Ce travail contribue à évaluer l'impact sur la sûreté des installations nucléaires, en accord avec la stratégie scientifique de l'IRSN.

Pour cela, le programme de travail comporte trois axes principaux :

- l'intégration d'une nouvelle loi de plasticité cristalline à base physique [Monnet, 2022] spécifique pour les aciers de cuve dans le code de calcul FFT CraFT [Moulinec et Suquet, 1994],
- la réalisation d'une campagne de simulations FFT en champs complets sur polycristaux, en considérant différents types de résultats expérimentaux, pour calibrer et valider la loi,
- l'implémentation de différentes méthodes d'homogénéisation et réalisation de calculs en champs moyens sur polycristaux pour être confrontés à des simulations FFT.

Une fois l'implémentation de la loi cristalline dans le code CraFT réalisée et la calibration de la loi faite au travers de six paramètres, les simulations FFT ont révélées un bon accord général avec les différents résultats expérimentaux considérés, pour une plage de températures, de vitesses de chargement et de doses d'irradiation.

Par la suite, des résultats déterminés par homogénéisation via des approximations en champs moyens et par des simulations FFT sont confrontés. Les approximations en champs moyens sont obtenues en utilisant des méthodes d'homogénéisation non-linéaires «à un potentiel», qui homogénéisent séparément les déformations élastiques et plastiques, et en employant divers schémas de complexité croissante tels que les schémas élémentaires de Taylor et Sachs ou les schémas auto-cohérents plus récents basés sur le concept de milieu linéaire de comparaison comme FOSO [Ponte Castañeda, 2015]. Plusieurs façons de prendre en compte le durcissement local dans les approximations en champs moyens sont présentées et discutées. Les résultats sont fournis pour des polycristaux non texturés soumis à un essai de traction uniaxiale. Dans l'ensemble, le schéma FOSO s'avère offrir le meilleur compromis entre précision et complexité mathématique pour générer des descriptions homogénéisées.

Actuellement, une piste théorique est explorée avec la méthode FOSO. En s'inspirant des travaux de [Lahellec et Suquet, 2007] sur les principes variationnels incrémentaux, elle vise à traiter l'homogénéisation de façon couplée, en considérant la partie élastique déviatorique et plastique du tenseur des déformations, l'idée étant d'améliorer la transition élastoplastique et de pouvoir étudier les statistiques de champs, chose non faisable avec l'approche découplée.

Mots clés : aciers de cuve irradiés, plasticité cristalline, polycristal, méthode à base de transformées de Fourier rapides, micromécanique.

SUJET DE LA THÈSE

Corrosion des tubes de générateurs de vapeur et effets du plomb et du soufre sur les mécanismes d'endommagement

Doctorante :	Estelle LAGARDÈRE
Date du début de la thèse :	02/11/2022
Laboratoire IRSN :	PSN-EXP/SES/BECM
Référent IRSN de la thèse :	Ian DE CURIERES
Direction de la thèse :	Lydia LAFFONT/Université de Toulouse
École doctorale :	Université Toulouse 3 – Sciences de la matière - ED 482
Financement de la thèse :	IRSN & CNL

Dans les centrales nucléaires, les tubes de générateur de vapeur (GV) permettent le transfert de chaleur entre le circuit primaire et le circuit secondaire. La dégradation de ces tubes constitue un risque de perte de confinement et de relâchement de produits radioactifs dans l'atmosphère. Afin de maîtriser ce risque, il est nécessaire d'identifier l'effet des produits de corrosion et des polluants sur la dégradation des tubes de GV. Les recherches menées lors de cette thèse ont pour objectif d'analyser l'effet du plomb et du soufre, polluants parfois présents dans le milieu secondaire, sur la sensibilité à la corrosion et corrosion sous contrainte (CSC) en paroi externe des tubes de GV.

Afin d'étudier ces phénomènes, des éprouvettes U-Bend ont été testées dans des conditions d'essais similaires aux conditions de fonctionnement des GV. Ces éprouvettes sont constituées d'Inconel 690 TT, l'alliage base nickel que l'on retrouve majoritairement dans les tubes de GV actuels. Deux facteurs environnementaux sont alors étudiés : l'état physique de l'environnement à proximité des tubes (trois possibilités : dépôts solides, milieu secondaire en phase liquide ou milieu secondaire en phase vapeur humide) et la présence de polluants à base de plomb et/ou de soufre dans les dépôts solides. Le rôle de ces paramètres dans les phénomènes d'endommagement des tubes de GV est étudié à l'aide de différentes techniques de caractérisation, allant de la microscopie optique à la microscopie électronique à balayage (MEB), en passant par la microscopie électronique en transmission (MET) associée à la spectroscopie de dispersion en énergie des rayons X (EDS). La première partie de ces analyses concerne le rôle du soufre sur la corrosion et la CSC de l'alliage 690 TT. Une étude complémentaire de l'impact du soufre combiné avec le plomb est envisagée pour la suite des recherches.

Les faibles concentrations en soufre présentes dans le milieu secondaire (inférieures à 10 000 ppm) nécessitent des techniques de mesures très précises et un post traitement rigoureux lors de l'interprétation des résultats d'analyses. Ces caractérisations permettent de constater que si la présence de soufre dans le milieu ne semble pas influencer la nature et l'épaisseur des oxydes formés en surface des échantillons, elle semble toutefois favoriser l'oxydation et la fragilisation du métal à l'interface avec l'oxyde. De faibles traces de soufre sont aussi détectées localement dans les oxydes de surface mais aussi dans les oxydes formés en pointe de fissure.

Mots clés : alliage base nickel, tubes de GV, corrosion, corrosion sous contrainte, plomb, soufre.

