



*ÉMINAIRE du 26 octobre 2012*  
*Centre des Matériaux - Évry*

## **Vieillessement des aciers des composants de l'industrie nucléaire**

P. JOLY, P. LE-DELLIOU, A. MARAIS, A. ANDRIEU

---

***La prise en compte du vieillissement thermique des aciers faiblement alliés, dans les analyses de rupture brutale des gros composants en acier bainitique des centrales REP***

**Pierre JOLY**

AREVA, Chef de section métallurgie

Les gros composants des réacteurs des centrales nucléaires à eau sous pression et en acier bainitique de type 16MND5 (Cuve, Pressuriseur et Générateurs de Vapeur), font l'objet d'études visant à évaluer la marge vis à vis de la rupture brutale, en présence de défauts (fissures) postulés. Ces études, de mécanique de la rupture, font intervenir dans le domaine fragile et la transition fragile-ductile, la ténacité,  $K_{Ic}$ , du matériau et son évolution avec la température. Cette présentation rappelle comment est établie cette propriété importante, pour chaque pièce constitutive des composants en question, et en particulier comment est prise en compte l'éventualité d'une fragilisation par vieillissement thermique de certaines zones, les plus chaudes en service, de ces composants. Ce vieillissement thermique peut être de deux types: du vieillissement après déformation (ou "strain aging") ou une fragilisation de type "fragilisation de revenu réversible", i.e. engendrée par la ségrégation aux joints de grains d'éléments résiduels tels que le Phosphore. L'exposé montrera plus particulièrement dans ce cas les règles actuellement utilisées pour évaluer cette fragilisation et les éléments expérimentaux qui ont permis de les établir, essentiellement sur la base de vieillissements accélérés et d'essais de résilience. On introduira ainsi, le thème de l'étude confiée au Centre des Matériaux dans le cadre d'une thèse au sein de la Chaire AREVA."



# *Vieillessement des matériaux métalliques des Réacteurs à Eau Pressurisée et influence sur la rupture*

**Patrick LE-DELLIOU**

EDF-R&D, Département Matériaux et Mécanique des Composants

L'Arrêté ministériel du 10 novembre 1999 relatif à la surveillance en exploitation du circuit primaire principal (CPP) et des circuits secondaires principaux (CSP) des REP impose à l'exploitant (EDF) d'établir puis de tenir à jour des Dossiers de Référence dits « Réglementaires » (DRR). L'article 12 de l'Arrêté demande à l'exploitant de mettre en œuvre les moyens nécessaires pour connaître l'évolution, en exploitation, des matériaux constitutifs des matériels concernés. En particulier, les DRR doivent être réactualisés à chaque visite décennale (VD) (« requalification complète » selon l'Arrêté).

Dans l'objectif d'une exploitation des tranches jusqu'à 60 ans, un programme « matériaux 60 ans » a été engagé en 2010/2011 afin de consolider les valeurs prises dans les dossiers relatifs aux matériels métalliques du CPP et des CSP. Il s'agit d'une part de vérifier que tous les mécanismes de vieillissement sont envisagés et d'autre part d'améliorer les connaissances et d'acquérir des données dans les zones et domaines où des lacunes ont été identifiées.

Le mécanisme de dégradation par vieillissement thermique affecte quatre familles de matériaux :

- Les pièces moulées en acier inoxydable austéno-ferritique du CPP et les joints soudés en acier inoxydable du CPP et des circuits auxiliaires du primaire ;
- Le métal de base (acier faiblement allié) et les joints soudés des gros composants du CPP ;
- Le métal de base (acier au carbone-manganèse) et les joints soudés associés des CSP (essentiellement les tuyauteries VVP du fait de leur température de service) ;
- Les liaisons bimétalliques (LBM) en acier inoxydable du CPP, notamment en présence d'anomalies de dilution de la première couche de beurrage.

Le vieillissement sous déformation concerne les aciers au carbone-manganèse et les aciers faiblement alliés tandis que la fragilisation neutronique touche spécifiquement les viroles de cœur de la cuve.

L'exposé a pour but de présenter le contexte réglementaire, l'état des lieux composant par composant en terme de connaissance des matériaux et l'effet du vieillissement sur les caractéristiques des matériaux, notamment vis-à-vis de leur résistance à la rupture.



# ***Influence du vieillissement statique sur la transition ductile-fragile des aciers au C-Mn dans les tuyauteries du circuit secondaire des REP***

**Anthony MARAIS**

Doctorant, Centre des Matériaux Mines ParisTech / EDF R&D

La plupart des aciers ferritiques pour structures industrielles présentent une transition fragile-ductile de ténacité et de résilience avec leur température. Leur résistance à la rupture fragile joue un rôle essentiel dans la certification de la sécurité des structures industrielles importantes. De nos jours, le souci de performance et de longévité sont des points clés pour des acteurs majeurs comme EDF. L'augmentation de la durée de vie en service des centrales est un objectif capital pour rester compétitif tout en garantissant une sécurité maximale et optimale.

Dans ces démarches de transition ductile-fragile de ténacité et de résilience, la ténacité est prédite à partir de la résilience. Plusieurs travaux antérieurs ont montré que la probabilité de rupture par clivage peut être correctement décrite dans le palier fragile par une approche locale de la rupture. Mais ces études supposent que le matériau ne subit pas de vieillissement sous déformation, ce qui est en fait rarement pertinent pour les aciers bas carbone et peu calmés.

Il s'agit donc d'expliquer l'influence des instabilités mécaniques liées au vieillissement statique appelées instabilités de Piobert-Lüders.

Le travail a été d'une part de caractériser le comportement et d'autre part à proposer une modélisation robuste et explicite des phénomènes observés. L'étude expérimentale a consisté en la réalisation d'essais de traction entre  $-150^{\circ}\text{C}$  et  $20^{\circ}\text{C}$  à plusieurs vitesses de déformation. Un modèle capable de simuler le vieillissement statique est identifié en mettant en place une stratégie adéquate et systématique.

Des essais à rupture de résilience nous permettent de construire la courbe de transition ductile-fragile du matériau pour différentes conditions afin de comprendre et d'observer l'influence du vieillissement statique sur la rupture. Enfin, la modélisation de la rupture fragile a été décrite pour toutes les conditions expérimentales testées en utilisant le modèle de comportement développé et identifié dans la partie précédente afin de prédire numériquement la transition pour les différentes conditions matériau.



# ***Influence du vieillissement thermique sur les propriétés à rupture des aciers Mn-Ni-Mo : Effet de la microstructure et modélisation multi-échelle***

**Antoine ANDRIEU**

Doctorant, Centre des Matériaux Mines ParisTech / Chaire AREVA

Les aciers faiblement alliés, de type 16-20MND5, sont employés pour la fabrication de composants de centrales nucléaires tels que la cuve, le générateur de vapeur ou le pressuriseur. En fonctionnement ces composants sont exposés à des températures allant jusqu'à 350°C et ce pendant toute leur durée d'utilisation (40 ans). Le maintien à relativement « haute » température active des phénomènes thermodynamiques qui provoquent une dégradation des propriétés à rupture. Cette dégradation est mesurée à l'aide du décalage des courbes de transition ductile/fragile, établies à partir d'essais mécaniques sur des éprouvettes entaillées ou fissurées. De nombreuses corrélations empiriques permettent de relier les conditions de vieillissement, i.e le couple (temps de maintien, température de maintien), au décalage de la température de transition. L'objectif de l'étude est de proposer une approche multi-échelle permettant de « prédire » l'impact du vieillissement thermique sur le décalage de la température de transition et tenant compte de la microstructure (essentiellement la taille de grain). Depuis l'échelle « atomique », l'étude s'articule autour de la description des phénomènes prépondérants influençant au premier ordre les mécanismes des échelles supérieures.

A l'échelle atomique, le vieillissement thermique se traduit par la ségrégation d'impuretés aux joints des grains. Ces impuretés, notamment le phosphore, sont responsables de la diminution de l'énergie de cohésion des interfaces (particules/matrice, joint de grains, etc...). Une description précise de ce phénomène, tenant compte de la taille de grain et des interactions entre les éléments ségrégeant aux interfaces, est essentielle pour estimer l'effet du vieillissement thermique.

A l'échelle microscopique, la rupture fragile est contrôlée par deux mécanismes : l'amorçage d'une micro-fissure et la propagation de cette micro-fissure à plusieurs grains ; ce qui implique le franchissement des joints des grains. Le vieillissement thermique, via l'affaiblissement des interfaces, facilite l'extension de ces micro-fissures et provoque une diminution de la contrainte critique de clivage. Nous esquissons un modèle permettant d'estimer la contribution des joints des grains à la résistance à l'amorçage de la rupture fragile. Il permet également de calculer de la diminution de la contrainte critique de clivage engendrée par le vieillissement.



Dans le cadre de l'approche locale de la rupture, la diminution de la contrainte critique de clivage se traduit, à l'échelle de la structure, en un décalage de la température de transition. Les résultats obtenus en appliquant le modèle sont confrontés aux mesures expérimentales.

