



Etude sur la variabilité du comportement à rupture de l'acier de cuve REP

Expérimentation, Modélisation et Simulation d'essais de fissuration à haute température dans l'acier de cuve REP

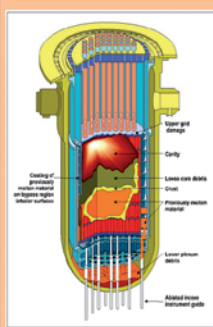
Nicolas Tardif, Vincent Koundy, Cataldo Caroli *

Michel Coret, Alain Combescure **

* Direction de la Sûreté des Réacteurs, IRSN, BP 17, F92262 Fontenay-aux-Roses Cedex

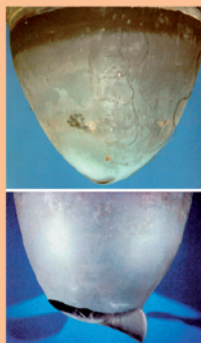
** LaMCoS, INSA-Lyon, CNRS UMR5259, F69621, Villeurbanne

En cas d'accident de fusion du cœur survenant dans un réacteur à eau pressurisée (REP), une quantité importante de corium (mélange des métaux et oxydes fondus) est susceptible de s'amasser dans le fond de cuve. Il y a alors risque de rupture à haute température du fond de cuve et épanchement du corium vers l'enceinte de confinement. La connaissance de l'instant et du mode de rupture du fond de cuve est un élément important vis-à-vis de la gestion de l'accident. La position et la section finale de la brèche en fond de cuve sont déterminantes pour le déroulement de l'accident hors cuve (explosion de vapeur, échauffement direct de l'enceinte, interaction corium/radier).



Scénario d'accident grave

- 1) Défaut de refroidissement du cœur (défaillances humaines et/ou matérielles)
- 2) Dégénération et fusion du cœur (échec des procédures de sauvegarde)
- 3) Ecoulement et relocalisation du corium dans le fond de cuve
- 4) Surchauffe du fond de cuve pressurisé et risque de rupture
- 5) Le déroulement de l'accident hors cuve dépend de l'instant, position et taille finale de la brèche



Enjeux : Des essais de rupture sur maquettes de fond de cuve ont montré des modes de rupture et des tailles de brèche très différentes même pour des nuances d'acier répondant à la même spécification. Les analyses chimiques et métallurgiques ont suggéré que des éléments présents en trace (MnS, AlN...) sont responsables de cette variabilité de comportement à haute température. Pour prédire le comportement du fond de cuve en accident grave le critère de rupture doit prendre en compte cette variabilité des propriétés de rupture de l'acier.

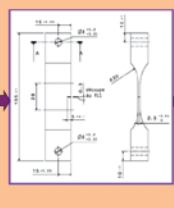
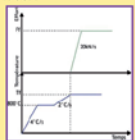
Objectif de l'étude : 1) réaliser des essais à haute température simples et bien instrumentés sur des tubes pressurisés et pour différentes nuances d'acier de cuve avec un système de mesure qui permettra de caractériser la propagation de la fissure en cours de rupture, les déformées au cours du temps, ainsi que le mode de rupture; 2) proposer une simulation réaliste de ces essais en utilisant les modèles numériques développés par le laboratoire LaMCoS; 3) Utiliser ces essais pour la validation de critères de rupture adaptés.

Démarche scientifique : a) Mise au point du banc d'essais et des méthodes de mesure à haute température par des essais préliminaires sur des plaques fissurées, suivie par des modélisations préliminaires; b) Réalisation des essais sur des tubes pressurisés et modélisation de ces essais et c) Proposition des modèles pour la simulation des essais de rupture et pour la prédiction du comportement des cuves en condition d'accident grave. Cette recherche est réalisée dans le cadre du programme commun de recherche entre l'IRSN et le CEA sur la rupture à haute température des fonds de cuve. Ce programme comprend un volet expérimental (essais de déchirure et de caractérisation à haute température, caractérisation métallurgique) et un volet théorique (développement d'un critère de rupture).

Expérimentations au LaMCoS

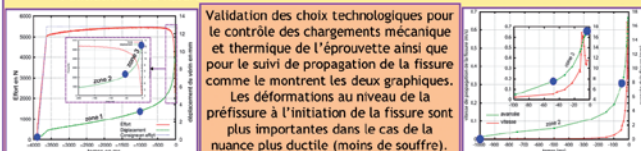
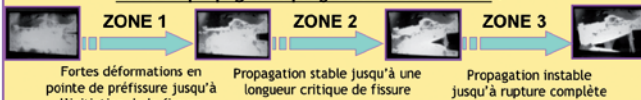
Essais préliminaires : essais de fluage sur des plaques pré-fissurées

- Chargement thermique (induction): $T_f = 900$ ou 1000°C
- Chargement mécanique (machine de traction): $F_f = 5500$ ou 4900N

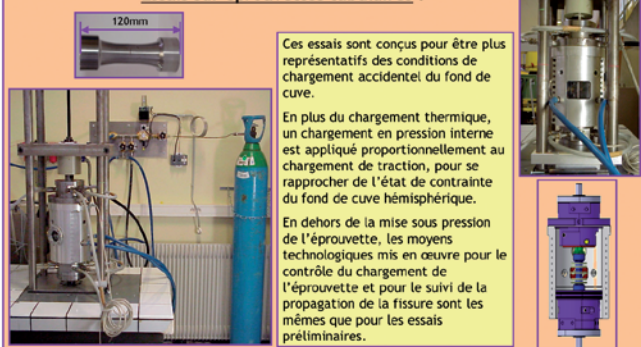


- Distribution de température : thermocouples et caméra infrarouge
- Déplacement du vérin de la machine de traction
- Effort : cellule d'effort de la machine de traction
- Position de la pointe de la fissure au cours de la propagation : caméra numérique rapide (1000/s) Mesure électrique

Etats de propagation progressive de la fissure :



Essais sur éprouvettes tubulaires :



Ces essais sont conçus pour être plus représentatifs des conditions de chargement accidentel du fond de cuve.

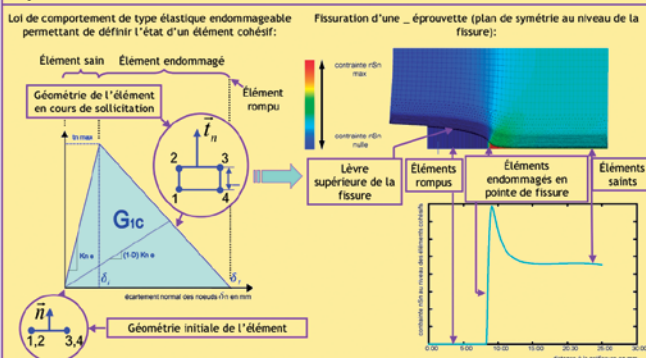
En plus du chargement thermique, un chargement en pression interne est appliqué proportionnellement au chargement de traction, pour se rapprocher de l'état de contrainte du fond de cuve hémisphérique.

En dehors de la mise sous pression de l'éprouvette, les moyens technologiques mis en œuvre pour le contrôle du chargement de l'éprouvette et pour le suivi de la propagation de la fissure sont les mêmes que pour les essais préliminaires.

Modélisation et Simulation à l'IRSN

Modélisation des essais préliminaires à l'aide d'éléments finis :

Utilisation d'éléments cohésifs pour simuler la propagation de la fissure. La trajectoire de la fissure est maillée à l'aide des « éléments cohésifs » qui n'ont initialement pas d'épaisseur. L'initiation et la propagation de la fissure sont gérées à partir d'une loi de comportement qui relie l'état de contrainte au sein de l'élément au déplacement relatif de ses nœuds, déplacement qui symbolise l'ouverture des lèvres de la fissure.



Problématiques numériques :

- Zone 1 : Fortes déformations (striction) en pointe de pré-fissure : Modélisation 3D en grandes déformations et grands déplacements, matériau viscoplastique
- Zone 2 : Propagation stable de la fissure jusqu'à une longueur critique de fissure : Vitesse de propagation dépendant de la partition d'énergie induite par le chargement extérieure entre l'énergie dissipée inélastiquement et l'énergie dissipée dans le processus de rupture.
- Zone 3 : Propagation instable de la fissure : Nécessité de prendre en compte les effets dynamiques pour régulariser la propagation de la fissure.

