



HAL
open science

Vers la prévision du déchirement d'une cuve de réacteur à eau pressurisée en cas d'accident

Nicolas Tardif, Michel Coret, Grégory Nicaise, Alain Combescure

► **To cite this version:**

Nicolas Tardif, Michel Coret, Grégory Nicaise, Alain Combescure. Vers la prévision du déchirement d'une cuve de réacteur à eau pressurisée en cas d'accident. *Matériaux & Techniques*, 2009, 97 (4), pp.220-223. hal-01007430

HAL Id: hal-01007430

<https://hal.science/hal-01007430>

Submitted on 3 Jun 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Vers la prévision du déchirement d'une cuve de réacteur à eau pressurisée en cas d'accident

Par Nicolas Tardif ^{1,2}, Michel Coret ¹, Grégory Nicaise ² et Alain Combescure ¹

¹ Université de Lyon, CNRS, INSA-Lyon, LaMCoS UMR5259, 69621, France ;

² Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, DSR/SAGR/BPhAG, BP 17, 92262 Fontenay-aux-Roses Cedex, France ;

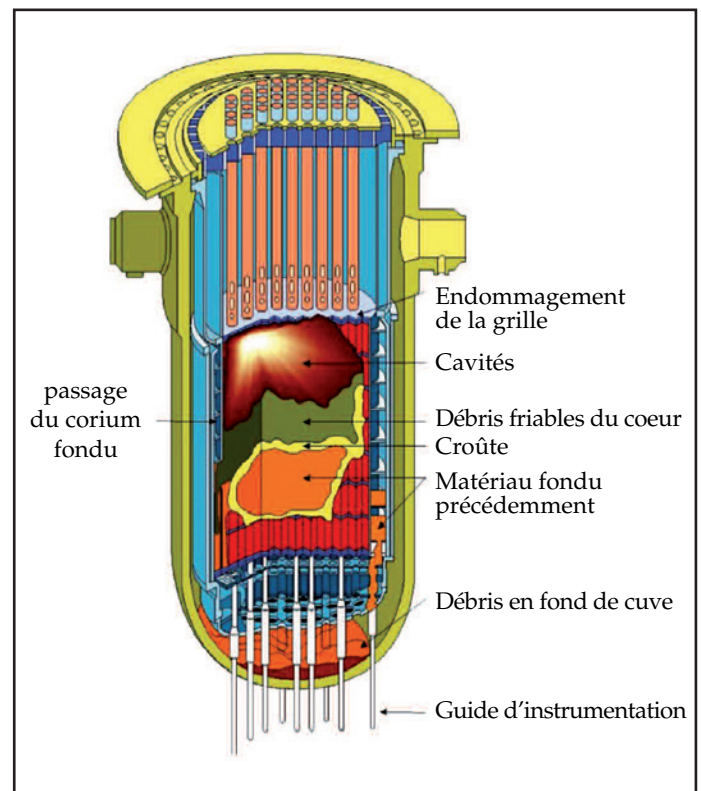
A travers une maquette de cuve de réacteur soumis à un chargement mécanique et thermique de type accident grave, des essais réalisés en laboratoire permettent de suivre l'initiation et la propagation de fissures en temps réel.

Analyse prédictive d'une rupture de cuve de réacteur

Un accident grave est un accident au cours duquel le combustible du réacteur est significativement dégradé par une fusion plus ou moins complète du cœur.

Malgré toutes les dispositions de prévention mises en œuvre sur les réacteurs en exploitation d'EDF, le risque d'accident grave ne peut être totalement écarté et l'étude de ce type d'accident est une composante essentielle de la défense en profondeur. En particulier, la modélisation des phénomènes physiques susceptibles d'intervenir lors d'un accident grave permet d'évaluer les éventuelles conséquences radiologiques et leur cinétique d'apparition ainsi que la pertinence des mesures qui peuvent être mises en œuvre dans ces situations.

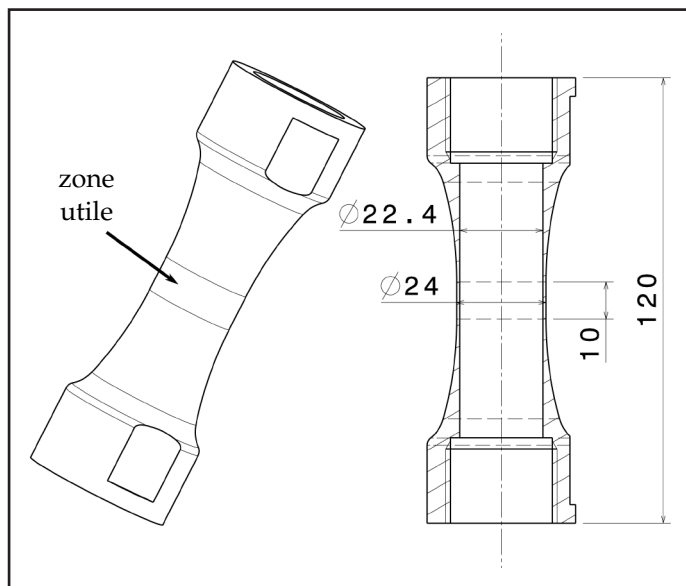
Au cours du déroulement d'un scénario d'accident grave sur un REP (Réacteur à Eau Pressurisée), un des points-clés est la tenue de la cuve du réacteur, lorsque celle-ci contient en son fond le produit de la fusion du cœur et de tous les matériaux internes de structure (Fig. 1). Ce mélange de matériaux fondus est dénommé « corium ». En s'épanchant en fond de cuve, il vient former un bain très calorifique, qui chauffe localement la paroi de la cuve à des températures supérieures à 900 °C [1]. L'acier du fond de cuve obéit alors à une loi de comportement viscoplastique. Dans le même temps, la pression de vapeur d'eau dans la cuve peut atteindre, suivant le scénario consi-



▲ Figure 1 : Schéma d'un réacteur en configuration accidentelle (TMI-2).

déré, quelques dizaines de bars. Une rupture de la cuve peut ainsi se produire par fluage, sous l'effet de la contrainte de pression interne et du poids du bain de corium. Le temps à rupture, la taille finale de la brèche ainsi que sa localisation sont des paramètres très importants pour la gestion de l'accident hors cuve.

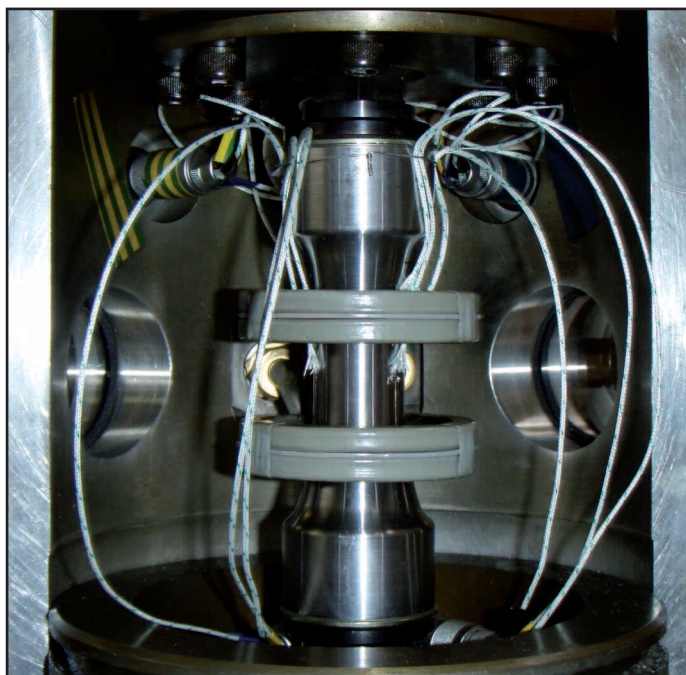
L'objectif des essais ici présentés est ainsi de quantifier les vitesses de propagation de brèche par un dispositif dont le dimensionnement peut autoriser une transposition directe des résultats à l'échelle de la cuve d'un REP.



▲ Figure 2 : Géométrie de l'éprouvette.

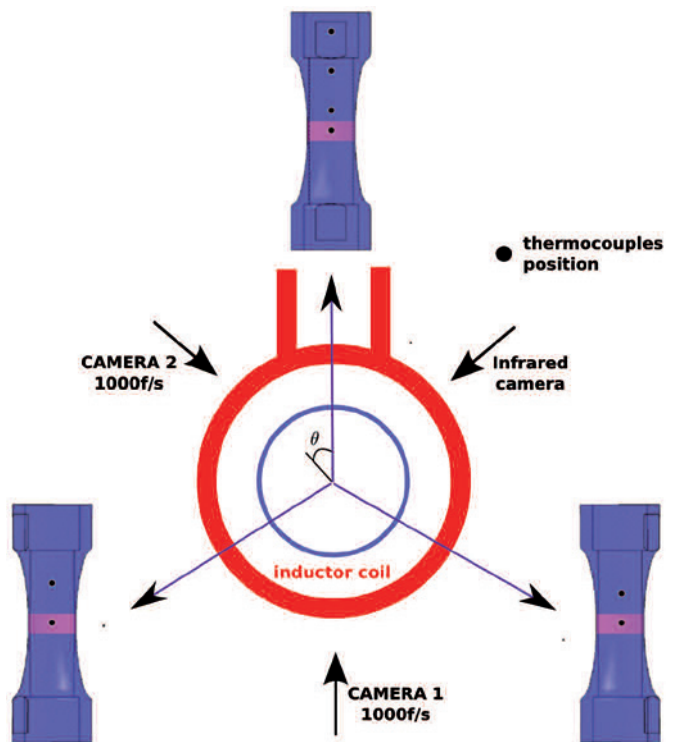
► Figure 4 : Disposition des caméras face à l'éprouvette.

▼ Figure 3 : Photo du dispositif expérimental.



Maquette analytique de cuve de réacteur en condition accidentelle

Des essais à l'échelle 1 étant beaucoup trop onéreux, nous avons conçu une maquette constituée d'un tube fermé représentant la cuve, et les conditions de chargement accidentelles sont produites en chauffant le tube puis en appliquant une pression interne superposée à un effort de traction. Plus précisément, les éprouvettes utilisées sont globalement tubulaires (Fig. 2) [2,3]. La partie centrale est un cylindre de diamètre extérieur 24 mm, de 10 mm de hauteur et de 0,8 mm d'épaisseur, ce qui représente globalement les mêmes proportions que celles rencontrées sur une cuve d'un REP. L'intérêt d'une structure tubulaire par rapport à un fond sphérique est de pouvoir contrôler indépendamment la contrainte axiale et la contrainte circonférentielle induite par la pression. Ainsi, un plus grand nombre de chargements peut être envisagé, correspondant soit à une rupture de fond de cuve, soit à une rupture de la partie cylindrique. Un montage spécifique permet d'installer l'éprouvette au sein d'une machine servo-hydraulique de capacité 1 kN appliquant la contrainte axiale (Fig. 3). La mise en pression est assurée par une alimentation contrôlée d'argon. Enfin, le chauffage de la partie centrale de l'éprouvette est un chauffage par induction de 6 kW dont les spires sont visibles en figure 3. Le tout est placé dans une enceinte de sécurité munie de 3 hublots. En sus des mesures habituelles d'effort, de déplacement, de température et de pression, deux caméras rapides et une caméra infrarouge permettent de suivre l'avancée de la fissure sur la totalité de la surface externe du tube (Fig. 4).



Observation de la fissuration en temps réel : une vitesse maximale de 2m/s

L'essai présenté ici a été réalisé à 1000 °C sous une contrainte axiale de 58 MPa et une contrainte circonférentielle de 34 MPa obtenue par la mise en pression de l'éprouvette (Fig. 5). La température est homogène avec une variation spatiale et temporelle d'environ +/-20 °C et le chargement mécanique est maintenu constant jusqu'à la fissuration (Fig. 6) à partir de laquelle il n'est plus possible de réellesment contrôler l'état de contraintes (dépressurisation rapide du tube). Ainsi, pendant les 20 dernières millisecondes, le rapport de la contrainte axiale à la contrainte circonférentielle n'est plus constant et la consigne en effort de la machine n'est plus suivie par l'asservissement.

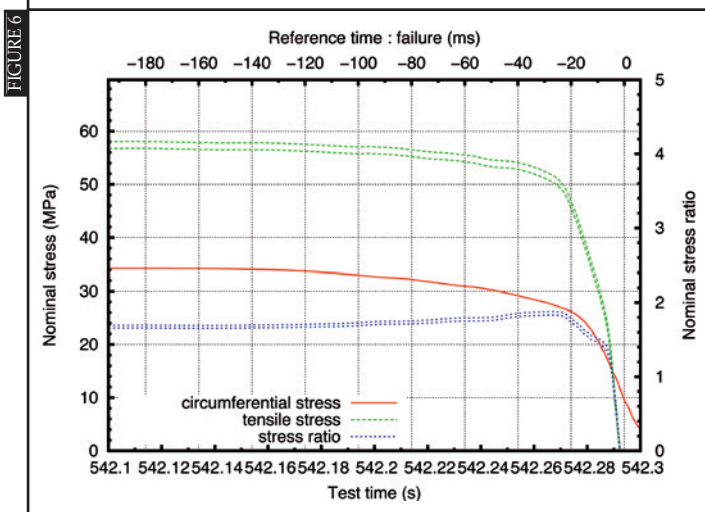
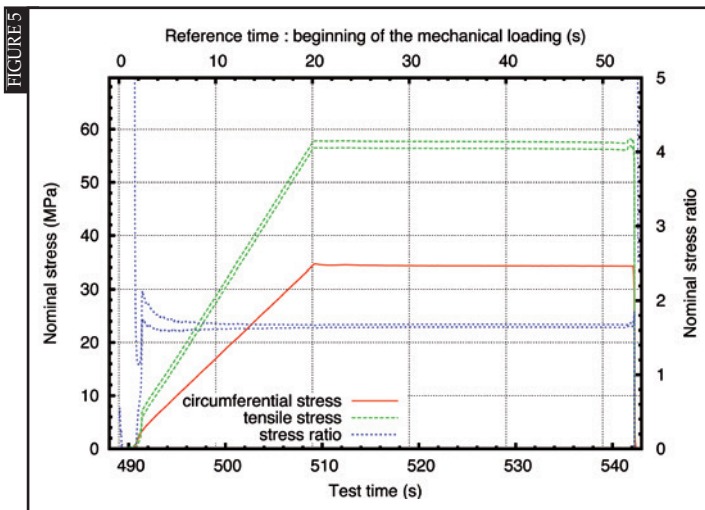
La propagation de la fissure sur toute la circonférence du tube dure environ 300 ms. L'initiation, facilement détectable par la baisse de pression (Fig. 8), est plus difficile à observer sur les images des différentes caméras. Une fois cette fissure initiale légèrement ouverte, elle apparaît plus clairement sur les premières images des caméras (CAM2 et infrarouge en Fig. 7). La couleur sensiblement différente des lèvres de la fissure montre que le gaz en sortant les refroidit. D'autres fissures

apparaissent ensuite (à partir de 542,198 s) pour finalement toutes se rejoindre et rompre complètement l'éprouvette dans un délai de 100 ms.

Avec un tel scénario, la propagation de la fissure résulte de deux étapes principales. Dans un premier temps, la propagation est stable car le travail des efforts extérieurs est converti en énergie de déformation viscoplastique et énergie de surface portée par les lèvres de la fissure (Fig. 8). La vitesse de propagation est alors de l'ordre de 30 mms⁻¹, puis s'accélère pour aboutir à une phase de propagation instable. Durant cette seconde étape, une part importante du travail des efforts extérieurs est convertie en accélération et la vitesse de propagation de fissure atteint 2 ms⁻¹.

Avec l'ouverture des fissures, on observe la dépressurisation rapide de l'éprouvette (Fig. 9). L'initiation de la dépressurisation est un bon indicateur de début de fissuration et son évolution est corrélée à la surface fissurée. Après traitement des images des caméras, l'aire fissurée peut être encadrée (Fig. 9). Enfin, la dépressurisation mesurée est comparée à une loi de détente adiabatique de gaz parfait qui semble ici bien adaptée.

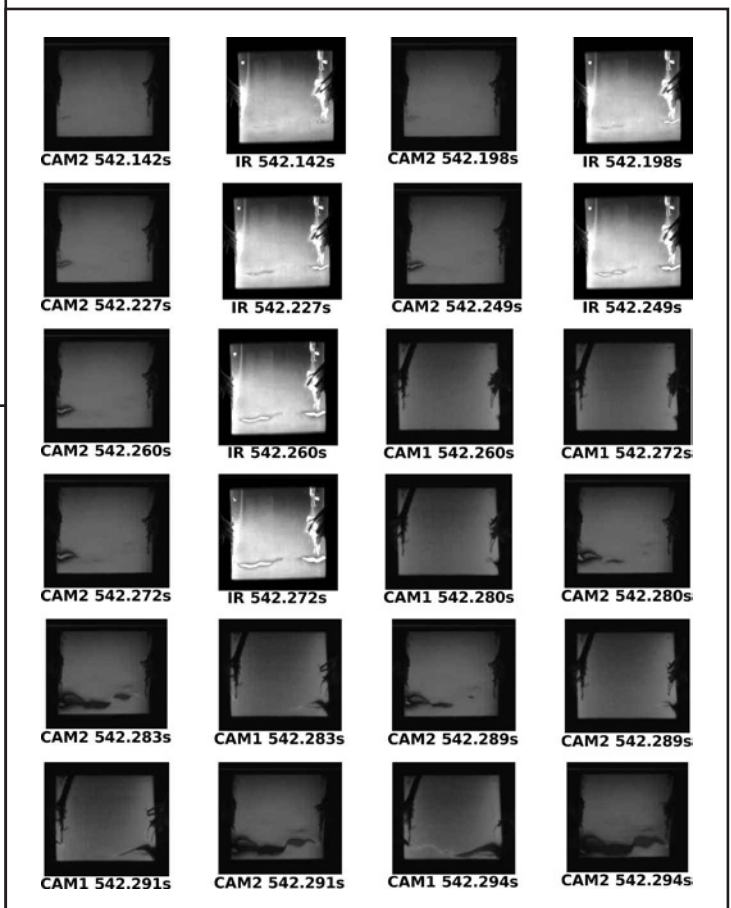
D'un point de vue beaucoup plus microscopique, il est intéressant de voir sur une image obtenue en microscopie électronique à balayage (Fig. 10) que le faciès de rupture est



◀ Figure 5 : Evolution temporelle du chargement mécanique.

◀ Figure 6 : Evolution du chargement pendant la rupture.

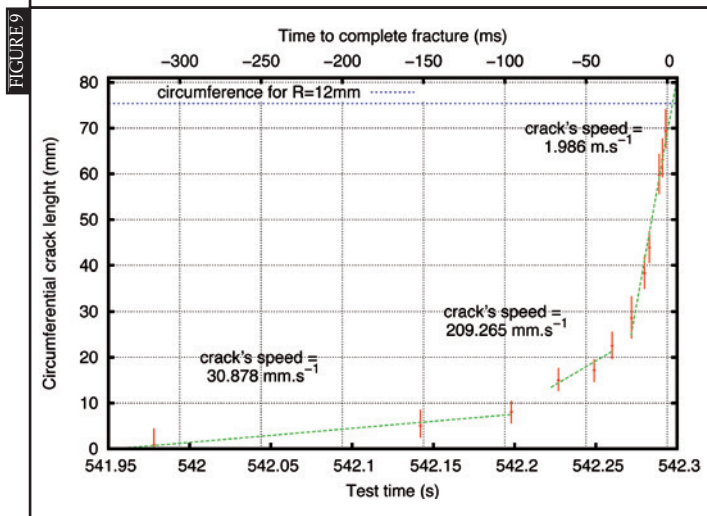
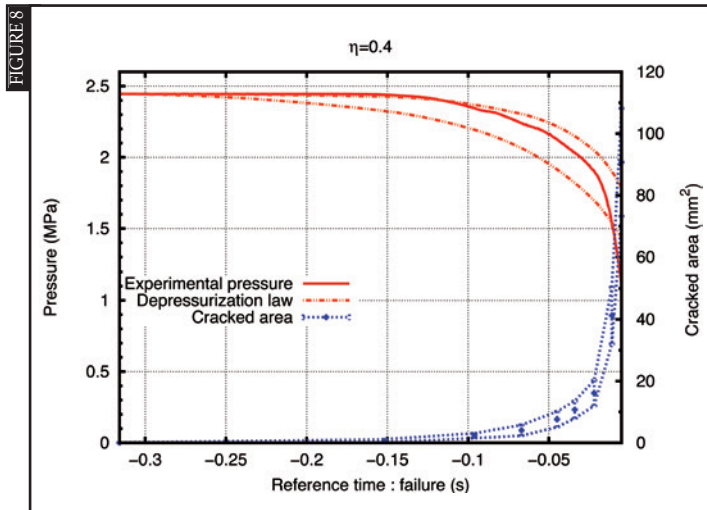
▼ Figure 7 : Photos prises par la caméra rapide et infrarouge pendant la fissuration.



particulièrement pointu. A cette température, la rupture n'est que le stade ultime de séparation d'une paroi très amincie par la déformation viscoplastique.

Résultats principaux

Le dispositif expérimental proposé permet une exploration des scénarii de rupture de cuve à une échelle raisonnable et représentative.



Les très nombreux résultats issus de l'exploitation des essais (mesures globales, vitesses de fissuration, dépressurisation) constituent une base de données précieuse et pourront être comparés à des simulations numériques futures. Par ailleurs, les résultats mettent clairement en évidence que l'énergie nécessaire à la fissuration n'est qu'une petite partie de l'énergie dissipée par déformation viscoplastique et par extension une infime partie du réservoir d'énergie disponible via le chargement mécanique. Cela tend à montrer que la prédiction de la fissuration est un problème délicat par son instabilité et sa dépendance au chargement mécanique, qui pourra sensiblement varier dans le cas réel d'une cuve de réacteur en situation de fusion de cœur.

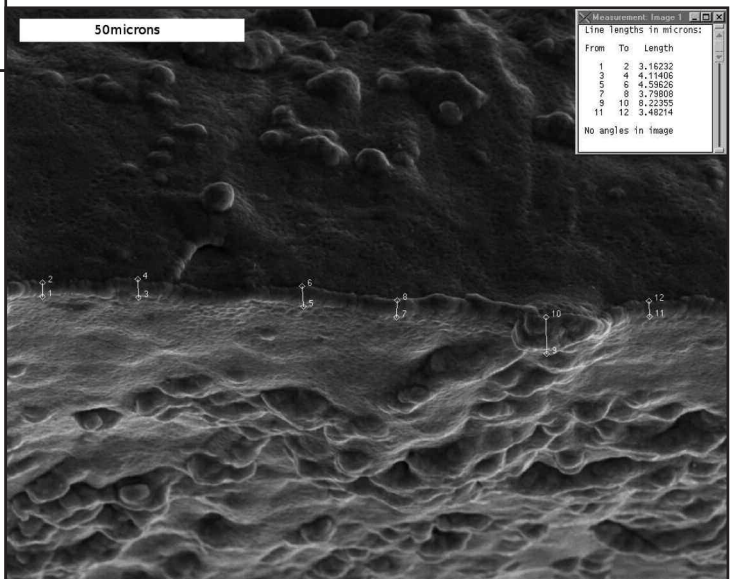
A noter :

Cette problématique de recherche a commencé dans les années 90. Le lecteur intéressé pourra se reporter aux travaux Américains [4,5] et Français [6-8].

◀ Figure 8 : Evolution de la longueur de fissure en fonction du temps.

◀ Figure 9 : Evolution expérimentale et simulée de la pression, et de l'aire fissurée en fonction du temps.

▼ Figure 10 : Photo en microscopie électronique du faciès de rupture.



Bibliographie

- [1] Three Miles Island Reactor pressure Vessel investigation project, Achievements and Significant Results OECD, 1993
- [2] N. Tardif, M. Coret, A. Combesure, *Unstable crack propagation under severe accident scenario conditions in a pressurized water reactor*, in Proceedings of the ASME PVP09 conference, 2009
- [3] Nicolas Tardif, *Étude du comportement à haute température d'une fissuration instable dans l'acier 16MND5 et application au calcul de la rupture d'un fond de cuve en cas d'accident grave*, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, soutenance 10/12/2009
- [4] L.L. Humphries et al., *OECD Lower Head Failure project Final report*, Tech. Rep. Report OECD/NEA/CSNI/2(2002)27, OECD, 2002
- [5] B. Sehgal et al., *Nuclear Engineering and Design* **235** (2005) 213-232
- [6] V. Koundy, I. Cormeau, *Nuclear Engineering and Design* **235** (2005) 845-853
- [7] V. Koundy, F. Fichot, H.G. Willschuetz, E. Altstadt, L. Nicolas, J.S. Lamy, L. Flandi, *Nuclear Engineering and Design* **238**, (2008) 2420-2429
- [8] V. Koundy, C. Caroli, L. Nicolas, P. Matheron, J.M. Gentzbittel, M. Coret, *Nuclear Engineering and Design* **238** (2008) 2411-2419

Copyright des images : © LaMCoS/INSA-Lyon