



HAL
open science

Contribution à la prévision de la ruine à haute température des cuves de REP

Benoit Vereecke, René Billardon, Joël Kichenin

► **To cite this version:**

Benoit Vereecke, René Billardon, Joël Kichenin. Contribution à la prévision de la ruine à haute température des cuves de REP. 7e colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2005, Giens, France. hal-01813033

HAL Id: hal-01813033

<https://hal.science/hal-01813033>

Submitted on 12 Jun 2018

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.

Public Domain

Contribution à la prévision de la ruine à haute température des cuves de REP

Benoit Vereecke* — **René Billardon*** — **Joël Kichenin****

* *LMT-Cachan, ENS de Cachan/CNRS UMR 8535/Université Paris 6*

61, Avenue du Président Wilson

94235 Cachan Cedex

{vereecke,billardon}@lmt.ens-cachan.fr

** *DEN/SAC/DM2S/SEMT/LM2S*

CEA Saclay

91191 Gif sur Yvette Cedex

kich@semt2.smts.cea.fr

RÉSUMÉ. Le formalisme de la loi multi-mécanismes présentée permet de modéliser le comportement à haute température de la famille d'aciers 16MND5 constituant les cuves des centrales nucléaires françaises. L'implantation de cette loi de comportement dans Cast3M permet de simuler le risque de ruine des cuves en cas d'accident grave.

ABSTRACT. The multi-mechanisms constitutive law that is presented models the behaviour at high temperature of the 16MND5 steel family that is used to build the pressure vessel of French nuclear reactors. The implementation of this law in FEM code Cast3M enables to predict the failure of the pressure vessel during a severe accident.

MOTS-CLÉS: Accident grave, couplage endommagement-viscoplasticité, Cast3M, ruine, 16MND5, fluage

KEYWORDS: Severe accident, damage-viscoplasticity coupling, Cast3M, failure, 16MND5, creep

1. Introduction

Cette étude se place dans le cadre général des travaux ayant pour but d'analyser la tenue mécanique des cuves de Réacteur à Eau Pressurisée en cas d'accident grave. Ce concept d'accident peut correspondre à de très nombreux scénarios différents, c'est à dire à des évolutions très différentes des sollicitations thermo-mécaniques imposées à la structure et donc au matériau. De plus, il s'est avéré que pour le même chargement thermo-mécanique, le comportement mécanique et en particulier la dégradation à très haute température de l'acier 16MND5 constituant ces cuves peuvent, d'une cuve à l'autre, être très différents. Une approche probabiliste a été proposée [VER 04] afin de déterminer les probabilités de rupture d'une cuve en cas d'accident grave pour une classe de chargement et pour la famille d'aciers 16MND5 constituant le parc français.

Dans cette présentation, nous présentons brièvement une loi de comportement élasto-viscoplastique non linéaire couplée à deux mécanismes d'endommagement. Cette loi a été développée pour rendre compte des différents mécanismes observés sur la famille d'acier 16MND5 à haute température. Cependant, l'utilisation de cette loi de comportement dans une approche probabiliste de la ruine des cuves de centrale nécessite un outil de simulation particulièrement robuste. Dans la deuxième partie de cette présentation, nous présentons donc l'implantation numérique de la loi de comportement et un résultat de calcul de ruine de cuve dans Cast3M.

2. Une loi de comportement multi-mécanismes

Le formalisme général de la loi de comportement que nous avons choisie a été développé par C. Petry [PET 03]. L'ensemble des variables représentatives de l'état thermodynamique du matériau est constitué des variables observables, les déformations totales ϵ et la température T , ainsi que des variables internes mécaniques, les déformations viscoplastiques ϵ^{vp} , la variable d'écrouissage isotrope r et deux variables d'endommagement D_d et D_c . La loi de comportement est résumée par les équations ci-après. Nous introduisons deux mécanismes d'endommagement différents : un endommagement ductile intragranulaire isotrope D_d et un endommagement intergranulaire anisotrope D_c . Le tenseur d'élasticité endommagé est alors choisi de la forme suivante :

$$\tilde{\mathbf{E}}^{-1}(D_c, D_d) = \frac{1}{E(1 - D_d)} \begin{bmatrix} \frac{1}{1 - D_c} & -\nu & -\nu \\ -\nu & 1 & -\nu \\ -\nu & -\nu & 1 \end{bmatrix}_{\sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III}} \quad [1]$$

où E et ν représentent respectivement le module d'Young et le coefficient de Poisson du matériau non endommagé. La partition des déformations totales en déformations élastiques, déformations viscoplastiques et déformations thermiques est la suivante :

$$\epsilon = \epsilon^{elas} + \epsilon^{vp} + \epsilon^{th} = \tilde{\mathbf{E}}^{-1} : \sigma + \epsilon^{vp} + \epsilon^{th} \quad [2]$$

En faisant une hypothèse d'écrouissage additif, le domaine de réversibilité du comportement est décrit par la fonction seuil de plasticité suivante

$$f_p = \tilde{\sigma}_{eq} - R - \sigma_Y \text{ avec } \tilde{\sigma}_{eq} = \sqrt{\frac{\sigma : \tilde{\mathbf{M}} : \sigma}{(1 - D_d)(1 - D_c)}}, R = R_\infty (1 - e^{-br}) \quad [3]$$

où R représente l'écrouissage isotrope, σ_Y la limite d'élasticité et $\tilde{\sigma}_{eq}$ une contrainte équivalente effective. Par souci de simplicité, cette écriture néglige un éventuel écrouissage cinématique ce qui limite a priori l'utilisation de ce modèle à des chargements quasi-monotones. L'écriture de la contrainte équivalente effective $\tilde{\sigma}_{eq}$ est basée sur un critère en énergie élastique déviatorique (ou énergie élastique de cisaillement). Appliquée au matériau non endommagé, cette hypothèse conduit au critère de Von Mises standard. Appliquée au matériau endommagé, cette hypothèse permet de définir l'opérateur $\tilde{\mathbf{M}}$ qui prend en compte l'effet anisotrope de l'endommagement intergranulaire. Les lois d'évolution de ϵ^{vp} et r sont classiquement déduites d'un pseudo-potential de dissipation viscoplastique, ce qui conduit aux expressions suivantes

$$\dot{\epsilon}^{vp} = \left\langle \frac{\tilde{\sigma}_{eq} - R - \sigma_Y}{K} \right\rangle^n \frac{\tilde{\mathbf{M}} : \sigma}{\tilde{\sigma}_{eq}(1 - D_d)(1 - D_c)} \text{ et } \dot{r} = \left\langle \frac{\tilde{\sigma}_{eq} - R - \sigma_Y}{K} \right\rangle^n \quad [4]$$

où K et n sont des paramètres matériau dépendant de la température. Les lois d'évolution des deux endommagements intragranulaire ductile et intergranulaire de fluage sont choisies classiquement [LEM 96b] [LEM 96a] tel que

$$\dot{D}_d = \left(\frac{Y_d}{S_d} \right)^{s_d} \dot{r} H(p - p_d) \text{ et } \dot{D}_c = \left(\frac{Y_c}{S_c} \right)^{s_c} \quad [5]$$

où S_d , s_d , p_d , S_c et s_c sont des paramètres matériau dépendant de la température et où $H(\cdot)$ représente la fonction de Heaviside. Pour l'endommagement intragranulaire, un seuil d'endommagement p_d est introduit sur la déformation plastique cumulée p . Enfin, Y_d (respectivement Y_c) représente le taux de restitution d'énergie par endommagement intragranulaire (respectivement par endommagement intergranulaire) et dépend du taux de triaxialité des contraintes (respectivement de la contrainte principale maximale).

Les différents paramètres de la loi de comportement ont été identifiés sur une base d'essais mécaniques de 800 à 1300°C sur trois nuances différentes d'acier 16MND5.

3. Implantation et simulations numériques dans Cast3M

La loi de comportement a été implantée dans le logiciel éléments finis Cast3M [CAS 03] du CEA. L'introduction d'une nouvelle loi de comportement [CAS 03], peu différente de lois déjà implantées, ne requiert que quelques modifications dans les sources *esope* du code. L'algorithme de résolution globale utilise la méthode des

contraintes initiales [CAS 03]. Au cours des itérations sur un pas de temps, cet algorithme utilise uniquement la matrice de rigidité et non l'opérateur tangent. Localement, en chaque point de Gauss, les différentes variables internes de la loi de comportement sont intégrées par une méthode de Runge-Kutta au deuxième ordre. Toutes les simulations présentées dans la suite sont réalisées en grands déplacements et grandes déformations. Tout d'abord, des simulations d'essais de fluage sur des éprouvettes axisymétriques entaillées [VER 04] ont permis de prévoir des évolutions et des répartitions spatiales différentes pour chacun des deux endommagements. Ces phénomènes dus aux formes différentes des lois d'évolution des deux variables ainsi qu'à leurs couplages différents avec le comportement mécanique est illustré figure 1.

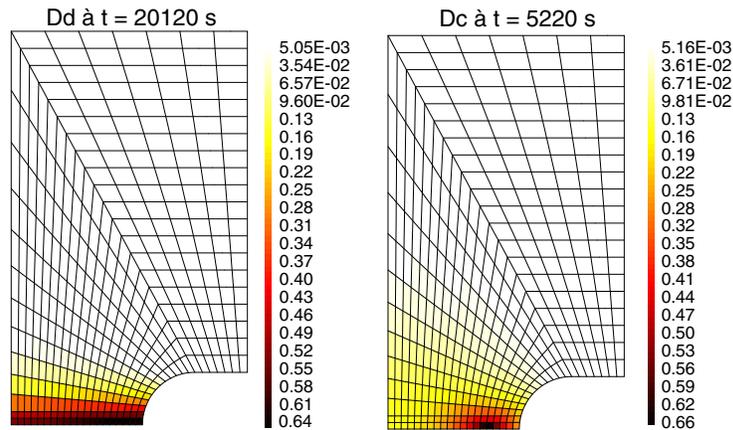


Figure 1. Répartition spatiale des deux endommagements intra- et inter-granulaire.

Ces simulations ont également permis de tester l'implantation, de mettre en évidence la stabilité de l'algorithme et la qualité de l'intégration jusqu'à des valeurs très élevées de l'endommagement. Cependant, une dépendance de la solution au maillage apparaît lorsque l'endommagement tend à se localiser dans une zone de taille comparable à celle d'un élément fini. Ceci est illustré par la figure 2.

Enfin, nous avons utilisé cette loi de comportement pour simuler la ruine d'une cuve en conditions accidentelles. L'objectif de cette simulation est de prouver la faisabilité d'un calcul industriel 3D, en simulant des endommagements proches de 1.0. La simulation que nous présentons correspond à la géométrie et à un chargement thermo-mécanique proches de ceux utilisés pour des essais sur des maquettes de cuve composées d'un acier peu différent du 16MND5. A l'aide des relevés expérimentaux de la température en différents points de la maquette au cours de l'essai, un premier calcul uniquement thermique, réalisé par L.Nicolas [NIC 02], a permis de connaître au cours de l'essai la température en chaque noeud du maillage (cf. figure 3). Du fait de la faible épaisseur de la cuve, il n'existe qu'un gradient de température dans le sens axial de la cuve, la température étant constante à travers l'épaisseur. Lors de l'ana-

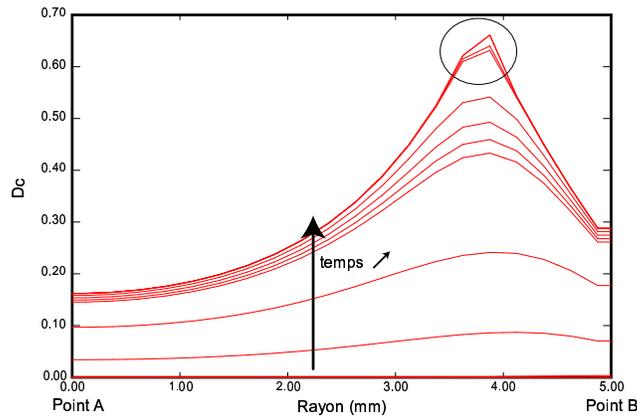


Figure 2. Solution dépendante du maillage : évolution de l'endommagement intergranulaire D_c dans la section la plus faible de l'éprouvette entaillée au cours des différents pas de temps.

lyse mécanique, la température est imposée au cours du chargement (cf. figure 3). Les conditions limites en déplacement correspondent aux blocages du haut de la cuve, ce qui simule sa fermeture à l'aide d'un couvercle. Enfin, le chargement mécanique est réalisé à l'aide d'une pression interne. Un des résultats de la simulation est donné en figure 3. Nous remarquons qu'en certaines zones de la structure l'endommagement atteint des valeurs critiques proche de 1.0 et que le temps de calcul (19.4 heures sur un PC Linux équipé d'un Pentium IV 2.4GHz et de 1.5 Go de Ram) reste raisonnable.

4. Conclusions et perspectives

Ce travail s'inscrit dans les travaux ayant pour but d'analyser la tenue des cuves de centrale à réacteur à eau pressurisée. Dans ce papier, nous avons présenté une loi de comportement multi-mécanismes permettant de modéliser le comportement à haute température de la famille d'acier 16MND5 constituant les cuves de centrale nucléaire française. Cette loi a été développée pour rendre compte de plusieurs mécanismes d'endommagement de cet acier. Pour simuler la ruine des cuves, il faut cependant un outil de simulation robuste. La loi de comportement a donc été implantée dans le code de calcul Cast3M. Quelques simulations sur des cas simples ont mis en évidence les performances et les limites de l'outil de simulation développé. Enfin, la simulation de ruine d'un cuve complète a été réalisée en un temps raisonnable ce qui permet d'envisager une étude probabiliste.

Quelques perspectives à ce travail peuvent être envisagées. Tout d'abord, nous n'avons considéré ici que l'évolution des endommagements jusqu'à la ruine locale

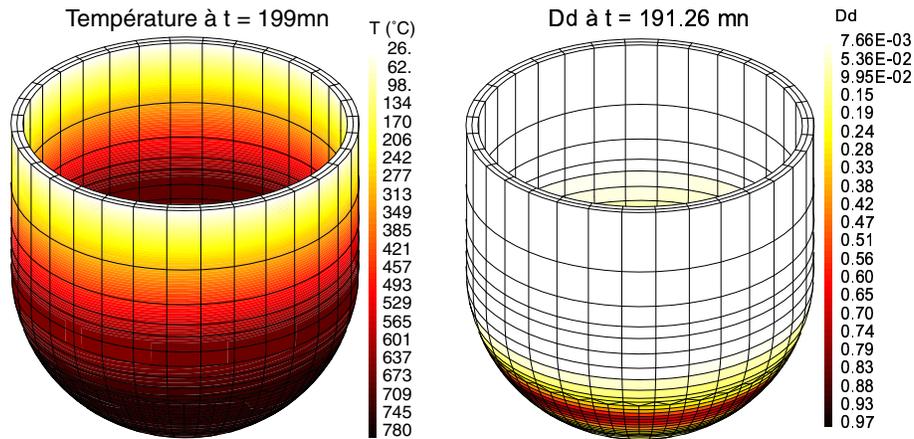


Figure 3. Champ de température imposée au cours du calcul et simulation de l'endommagement ductile à $t=191.26mn$.

du matériau. Une analyse complète devrait considérer les instabilités géométriques ainsi que la fissuration ou la déchirure de la cuve, qui peut être réalisé par érosion des éléments endommagés.

5. Bibliographie

- [CAS 03] CAST3M, « Logiciel éléments finis développé par le CEA », <http://www-cast3m.cea.fr>, , 2003.
- [LEM 96a] LEMAITRE J., « A course on damage mechanics », *Springer Verlag 2nd edition*, , 1996.
- [LEM 96b] LEMAITRE J., CHABOCHE J., « Mécanique des matériaux solides », vol. 2^{ème} édition, 1996.
- [NIC 02] NICOLAS L., « Post-test-3D calculations based on OLHF-1 test. », *rapport DM2S/SEMT/LM2S/RT/02.027*, , 2002.
- [PET 03] PETRY C., « Caractérisation de l'endommagement du Narloy-Z en fluage », DEA S3M, Université Paris 6, 2003.
- [VER 04] VEREECKE B., « Une analyse probabiliste du comportement d'une famille d'aciers pour cuve de REP en cas d'accident grave. », Thèse de doctorat, Université Paris 6, 2004.