



HAL
open science

Sandia OLHF-1 fracture mechanics modelisation

Gregory Nicaise, Grégory Castano

► **To cite this version:**

Gregory Nicaise, Grégory Castano. Sandia OLHF-1 fracture mechanics modelisation. PSN-RES/SAG 2012-00026, IRSN - Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire. 2012. hal-04270049

HAL Id: hal-04270049

<https://hal.science/hal-04270049>

Submitted on 3 Nov 2023

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.

Copyright

Mécanique fond de cuve - cinétique brèche

Modélisation de l'essai « OLHF-1 »

G. CASTANO (SOCOTEC) - G. NICAISE

Rapport n° PSN-RES/SAG 2012-00026

Pôle sûreté des installations et des systèmes nucléaires
 Service des Accidents Graves
 B.P. 17,
 92262 Fontenay-aux-Roses Cedex

Mécanique fond de cuve - cinétique brèche

Modélisation de l'essai « OLHF-1 »

Rapport n° PSN-RES/SAG 2012-00026

	Unité Unit			Approbation pour diffusion Approval for diffusion	
	Rédacteur(s) Author(s)	Vérificateur(s) Reviewer(s)	Chef d'unité Head of unit	Chef de service Head of department	Directeur Director
Nom Name	G. CASTANO G. NICAISE	H. BONNEVILLE	C. CAROLI	J.M. BONNET	J.C. MICAELLI
Date	03.01.2012	27/11/2012	27/01/12	3.08.2012	
Visa					

Qualité
Quality

Nom name	
Date	
Visa	

Projet
Project

Nom name	
Date	
Visa	

Fiche descriptive du rapport
Report description sheet

Titre :

Mécanique fond de cuve - cinétique brèche

Sous-titre :

Modélisation de l'essai « OLHF-1 »

Title :

Sub title :

Auteur/author(s) :

G. CASTANO (SOCOTEC) - G. NICAISE

Type de document : Document type :	RT	Date de diffusion : Distribution date :	JANVIER 2012
Référence archivage :	SAG-2012-017	E-mail :	gregory.castano-socotec@irsn.fr
Élément EOTP :	01D/T06-003/08		

Mots-clés (Max. 5) :	Eléments finis, OLHF-1, loi thermo-élastoviscoplastique endommageable, SA533B1, 16MND5
Key-words (Max. 5):	

Résumé

Dans le cadre de l'action tripartite « Cinétique Brèche » (CEA/EDF/IRSN), le SAG est chargé, depuis début 2010, de mettre au point une modélisation thermomécanique à l'échelle réacteur (échelle simplifiée hémisphérique) pouvant rendre compte du comportement thermomécanique du fond de la cuve d'un REP au contact d'un bain de corium, jusqu'à l'éventuelle rupture de la cuve, en cas d'accident de fusion de cœur [1].

Cette note synthétise les résultats de calculs thermomécaniques aux éléments finis ABAQUS pour la dernière étape de qualification des développements numériques réalisés sur la période 2010-2011. Il s'agit de la modélisation éléments finis de l'essai « OLHF-1 ».

La modélisation 2D axisymétrique à la longitude 0° de la cuve de l'essai « OLHF-1 » avec les données matériau, thermo-élastoviscoplastique endommageable, du 16MND5 aboutit à une bonne adéquation des résultats entre calcul et essai.

Abstract

HISTORIQUE DES MODIFICATIONS
CHANGE HISTORY

Indice de révision <i>Revision</i>	Référence <i>Reference</i>	Date	Auteur <i>Author</i>	Pages ou paragraphes modifiés <i>Pages or paragraphs changed</i>	Nature des modifications <i>Nature of the changes</i>
0		03.01.2012	G. CASTANO G. NICAISE	Toutes	Document initial
0.1		03.01.2012	G. CASTANO G. NICAISE	4, 7, 10, 11	Révisions mineures G. NICAISE
0.2		09.01.2012	G. CASTANO G. NICAISE	4, 8, 9, 19	Révisions mineures C. CAROLI
0.3		13.01.2012	G. CASTANO G. NICAISE	Toutes	Modification du format de rapport
0.4		27.01.2012	G. CASTANO G. NICAISE	Toutes	Révisions mineures H. BONNEVILLE

Table des matières

1.	CONTEXTE DE L'ETUDE	7
2.	OBJET DE L'ETUDE	8
3.	L'ESSAI «OLHF-1».....	9
3.1.	HISTORIQUE	9
3.2.	LES DONNEES EXPERIMENTALES.....	9
4.	LES DONNEES DU CALCUL	11
4.1.	LE MAILLAGE ET LES CONDITIONS AUX LIMITES	11
4.2.	LES CHARGEMENTS.....	13
4.2.1.	Les chargements mécaniques	13
4.2.2.	Les chargements thermiques.....	13
4.3.	LE MATERIAU.....	14
5.	RESULTATS ET INTERPRETATION	15
6.	CONCLUSION	18
7.	LISTE DES REFERENCES	19
8.	ANNEXES.....	20

Liste des illustrations

Figure 1 :	Angles pour le positionnement des points de la cuve OLHF.	9
Figure 2 :	Schéma de la cuve des essais OLHF.	10
Figure 3 :	Historiques de T_{int} à $\Phi=0^\circ$ et $\theta=80^\circ, 90^\circ$; Historiques de T_{ext} et de ΔT à $\Phi=0^\circ$ and $\theta=80^\circ$; Historiques de la pression en cuve et du déplacement vertical.	10
Figure 4 :	MEF - Géométrie de la cuve de l'essai « OLHF-1 ».	11
Figure 5 :	MEF - Maillage de la cuve de l'essai OLHF-1.	12
Figure 6 :	MEF - Conditions aux limites mécaniques de la cuve de l'essai OLHF-1.	12
Figure 7 :	Températures extrapolées en face interne à la longitude $\Phi=0^\circ$ et aux latitudes de $\theta=0^\circ$ à $\theta=90^\circ$	13
Figure 8 :	Températures extrapolées en face externe à la longitude $\Phi=0^\circ$ et aux latitudes de $\theta=0^\circ$ à $\theta=90^\circ$	14
Figure 9 :	Comparaison essai - calculs des flèches verticales de la cuve en fonction du temps.	15
Figure 10 :	Comparaison essai - calculs des épaisseurs de la cuve à rupture.	15
Figure 11 :	Déformée de la cuve à rupture.	16
Figure 12 :	Endommagements plastique (SDV2) et visqueux (SDV3) de la cuve à rupture.	16
Figure 13 :	Champ de températures de la cuve à rupture.	17
Figure 14 :	Champ de contraintes suivant θ de la cuve à rupture.	20
Figure 15 :	Champ de contraintes suivant Φ de la cuve à rupture.	20
Figure 16 :	Champ de contraintes de Von Mises de la cuve à rupture.	21
Figure 17 :	Champ des déformations plastiques équivalentes de la cuve à rupture.	21
Figure 18 :	Champ des déformations visqueuses équivalentes de la cuve à rupture.	22

Liste des tableaux

Table 1 :	Variation de l'épaisseur de la cuve OLHF-1 à la longitude $\Phi=0^\circ$	11
-----------	---	----

1. CONTEXTE DE L'ETUDE

Dans le cadre de l'action tripartite « Cinétique Brèche » (CEA/EDF/IRSN), le SAG est chargé, depuis début 2010, de mettre au point une modélisation thermomécanique à l'échelle réacteur (échelle simplifiée hémisphérique) pouvant rendre compte du comportement thermomécanique du fond de la cuve d'un REP au contact d'un bain de corium, jusqu'à l'éventuelle rupture de la cuve, en cas d'accident de fusion de cœur [1].

La méthodologie déployée pour l'étude du problème est la suivante :

- Récupération de l'évolution spatio-temporelle des chargements mécaniques et thermiques (depuis les phases d'un corium stratifié) depuis des calculs ASTEC, et intégration de conditions limites évolutives pour la modélisation en éléments finis [2].
- Mise au point de la modélisation thermomécanique en éléments finis : cette mise au point a été progressive dans l'intégration de modèles de comportement de l'acier de cuve de plus en plus élaborés [3] et [4].
- Analyse de sensibilité aux conditions limites (et donc à l'aspect scénario) ainsi qu'à de potentielles actions de sauvegarde (refroidissement externe) [5].

La mise au point de la modélisation, en particulier pour l'aspect du comportement thermomécanique à rupture de l'acier de cuve, soumis aux conditions extrêmes rencontrées en accident grave, a nécessité une stratégie de qualification en profondeur, sur diverses échelles de calcul, et diverses sollicitations mécaniques. La géométrie cubique analytique, et la géométrie cylindrique expérimentale, sollicitées en traction et fluage ont ainsi été choisies pour qualifier le développement numérique d'une loi thermo-élastoviscoplastique ductilement endommageable qui a été intégrée par le SAG dans le logiciel de calcul aux éléments finis ABAQUS (v6.9).

Cette qualification, et les résultats particulièrement satisfaisants obtenus sont restitués dans le rapport en référence [4].

Dans cette note, il est présenté la validation de cette modélisation sur la base de l'essai « OLHF-1 ».

2. OBJET DE L'ETUDE

L'objet de la présente étude est d'effectuer une dernière étape de qualification des développements numériques réalisés sur la période 2010-2011 permettant ainsi de valider la pertinence de la modélisation pour le problème du comportement thermomécanique du fond de cuve d'un REP. Il s'agit de modéliser l'essai « OCDE / LHF-1 » [6], qui est précisément réalisé sur une géométrie hémisphérique sous pression, à haute température, et d'effectuer la comparaison calcul/expérience.

En outre, la modélisation développée au SAG s'est appuyée sur des données matériaux relatives à l'acier 16MND5, dont les caractéristiques mécaniques et microstructurales sont voisines de celles de l'acier SA533B1, ces deux aciers constituant les aciers de cuve du parc français (cf. [7]).

L'essai « OLHF-1 » a été réalisé sur un fond de cuve à échelle réduite en SA533B1 mais il a été fait le choix d'appliquer la loi thermo-élastoviscoplastique endommageable développée à partir des données du 16MND5 pour le modéliser.

En cas de bon accord calcul/expérience, il sera ainsi possible d'avancer que la modélisation développée au SAGR sur la période 2010-2011 est pertinente et robuste, et qu'elle pourra s'appliquer à tout réacteur du parc REP français, quel que soit la nuance de son acier de cuve, à condition de mener une étude complémentaire de l'effet de l'irradiation sur ces aciers de cuve en 2013.

3. L'ESSAI «OLHF-1»

L'objet de ce paragraphe est de rappeler brièvement les spécifications et les résultats de l'essai « OLHF-1 ».

3.1. HISTORIQUE

L'objectif du programme d'essai OLHF (Organisation for Economic Co-operation and Development / Lower Head Failure) est de fournir des données et de dégrossir les caractéristiques des mode, temps et taille de la rupture d'une cuve de réacteur pressurisé pour les conditions :

- d'une pression modérée de 5 MPa en cuve, à l'échelle 1, incluant une phase de pressurisation constante et une autre transitoire,
- un gradient de températures au travers de l'épaisseur de l'ordre de 200 K à 400 K pour développer des stratégies de gestion d'accident impliquant une dépressurisation du circuit primaire.

Le programme OLHF complète le précédent programme d'essais SNL/NRC Lower Head Failure (LHF) qui était principalement axé sur des niveaux de pressions en cuve, à l'échelle 1/4.85, de l'ordre de 10 MPa associé à des conditions d'accidents similaires à celui de 'Three Miles Island'.

3.2. LES DONNEES EXPERIMENTALES

La cuve de l'essai « OLHF-1 » (cf. Figure 2) est décrite par un hémisphère de diamètre intérieur de 0.914 m, d'épaisseur de 0.072 à 0.080 m, en acier SA533B1. L'expérience a été conduite avec une pression interne de 12.3 MPa, ce qui équivaut à une pression primaire en REP de 47 bar. La montée en température a été progressive, c'est-à-dire avec une pente de -6 K/min jusqu'à 800 K. Au-delà de cette valeur, la pente était de -12 K/min (cf. Figure 3).

Le fluage de la cuve s'est initié à un temps expérimental approximatif de 165 minutes. La température interne de la cuve oscille entre 1170 K ($\theta = 60^\circ$) et 1200 K ($\theta = 90^\circ$) le long de la longitude 0_0 ($\Phi = 0^\circ$) (cf. Figure 3). Le gradient de température était de l'ordre de 250 K à 290 K. La ruine de la cuve est intervenue à 192 minutes du temps expérimental. Juste avant la rupture de la cuve, la température interne de la cuve se situait entre 1440 K et 1480 K avec un gradient de 340 K à 400 K. La flèche de la cuve était approximativement de 0.146 m. La rupture de la cuve se localise le long de la latitude $\theta = 75^\circ$ entre les longitudes $\Phi = 327^\circ$ et $\Phi = 5^\circ$. La longueur de la fissure était d'approximativement 0.014 m et la largeur maximale était d'approximativement 0.021 m. Il y a une sévère striction au niveau de la fissure, où l'épaisseur finale est de l'ordre du millimètre.

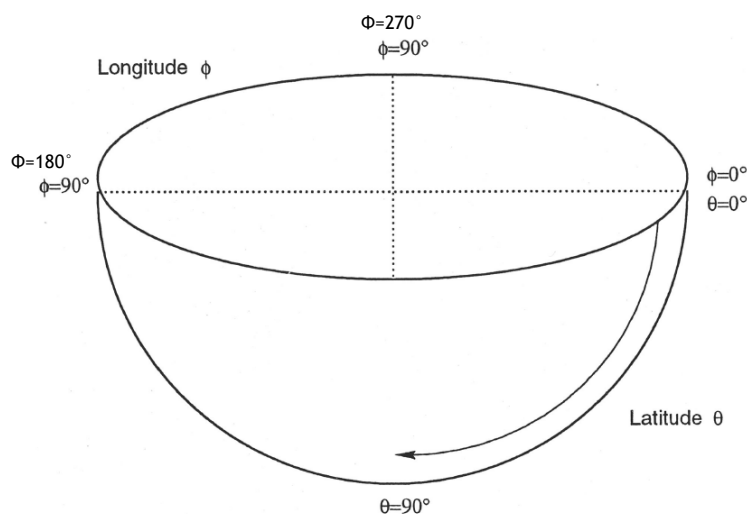


Figure 1 : Angles pour le positionnement des points de la cuve OLHF.

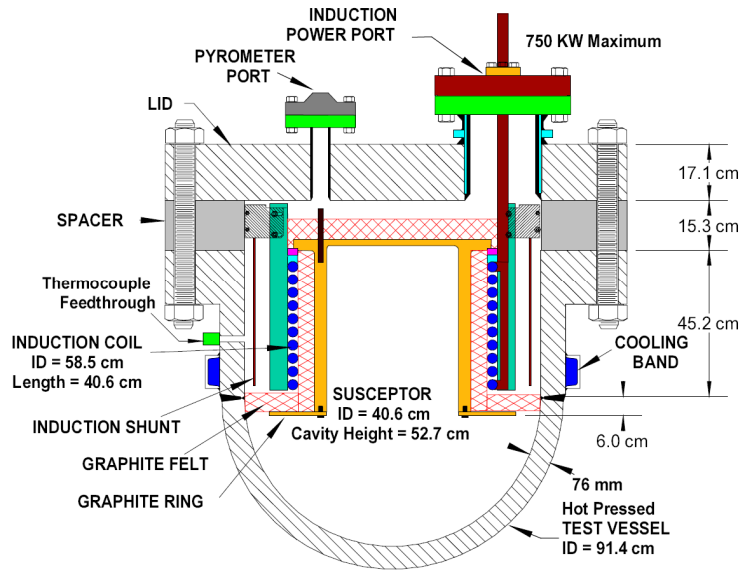


Figure 2 : Schéma de la cuve des essais OLHF.

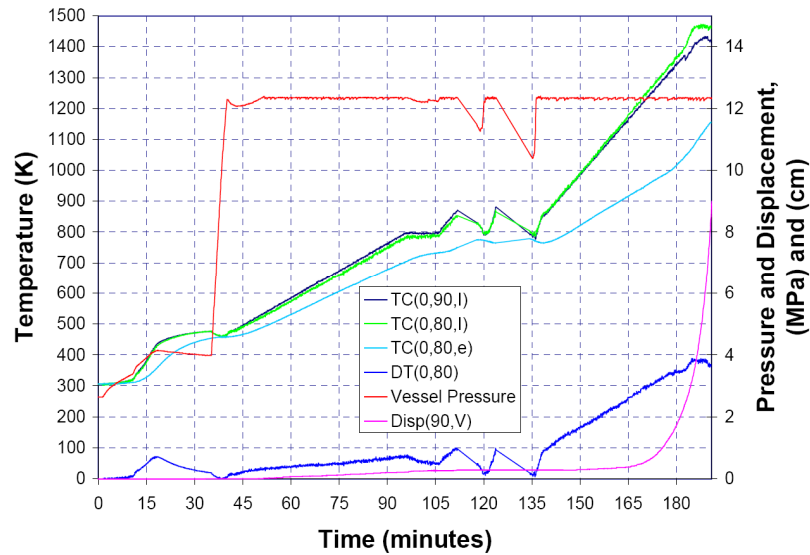


Figure 3 : Historiques de T_{int} à $\Phi=0^\circ$ et $\theta=80^\circ, 90^\circ$; Historiques de T_{ext} et de ΔT à $\Phi=0^\circ$ and $\theta=80^\circ$; Historiques de la pression en cuve et du déplacement vertical.

4. LES DONNEES DU CALCUL

L'objet de ce paragraphe est de présenter la définition du modèle éléments finis qui va simuler l'essai « OLHF-1 ».

4.1. LE MAILLAGE ET LES CONDITIONS AUX LIMITES

La cuve est représentée, en 2D axisymétrique, par un hémisphère de diamètre intérieur de 0.914 m et d'épaisseur variable en fonction de la latitude, à la longitude $\Phi=0^\circ$.

Table 1 : Variation de l'épaisseur de la cuve OLHF-1 à la longitude $\Phi=0^\circ$.

Latitude [°]	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
Epaisseur [m]	0.0867	0.0867	0.085	0.0817	0.0784	0.0745	0.071	0.0716	0.074	0.076

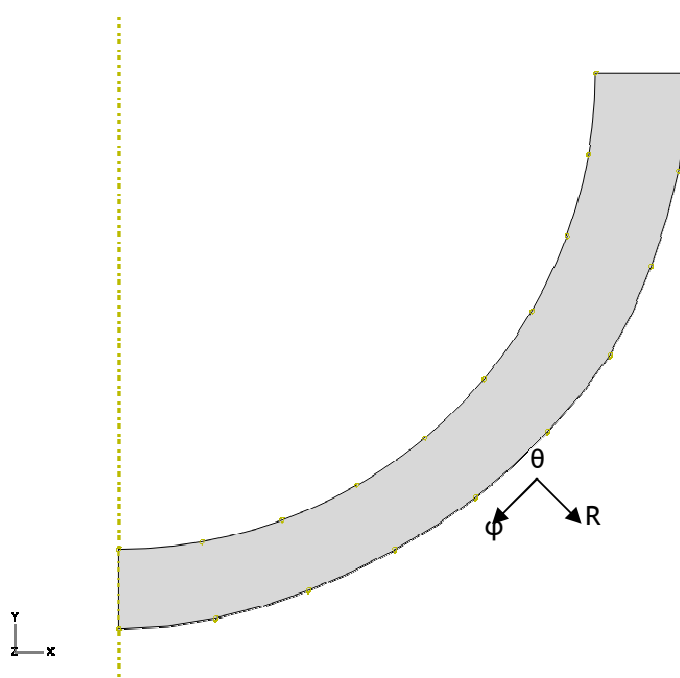


Figure 4 : MEF - Géométrie de la cuve de l'essai « OLHF-1 ».

Le maillage de la cuve est réalisé en éléments solides axisymétriques à 4 nœuds et 1 point de Gauss, référencés CAX4RT sous ABAQUS. Chaque nœud possède trois degrés de liberté : UX, UY et T (Température). Le maillage est composé de 657 nœuds et 576 éléments.

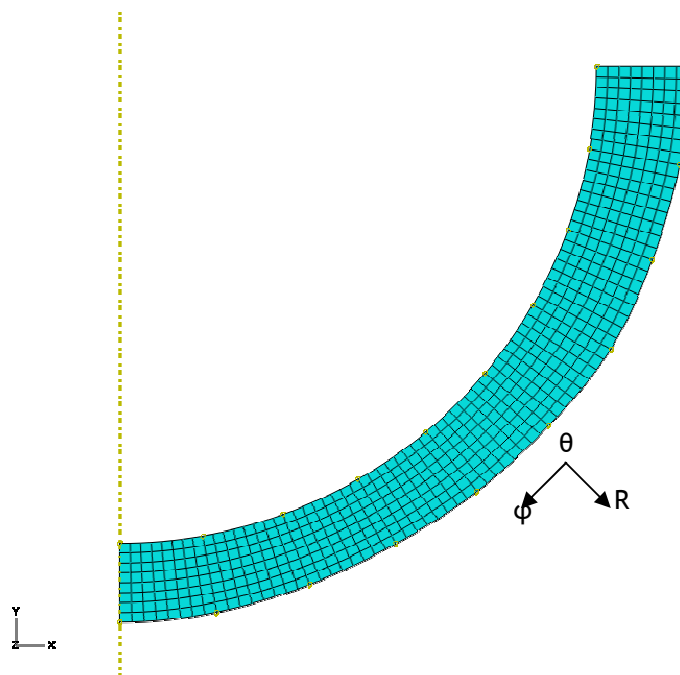


Figure 5 : MEF - Maillage de la cuve de l'essai OLHF-1.

Les conditions aux limites mécaniques sont localisées aux extrémités du maillage de la cuve. Les nœuds coïncidant avec l'axe de symétrie sont bloqués en translation suivant l'axe X. Pour l'autre extrémité, les nœuds forment l'ensemble des nœuds esclaves d'un corps rigide dont le nœud maître est encastré.

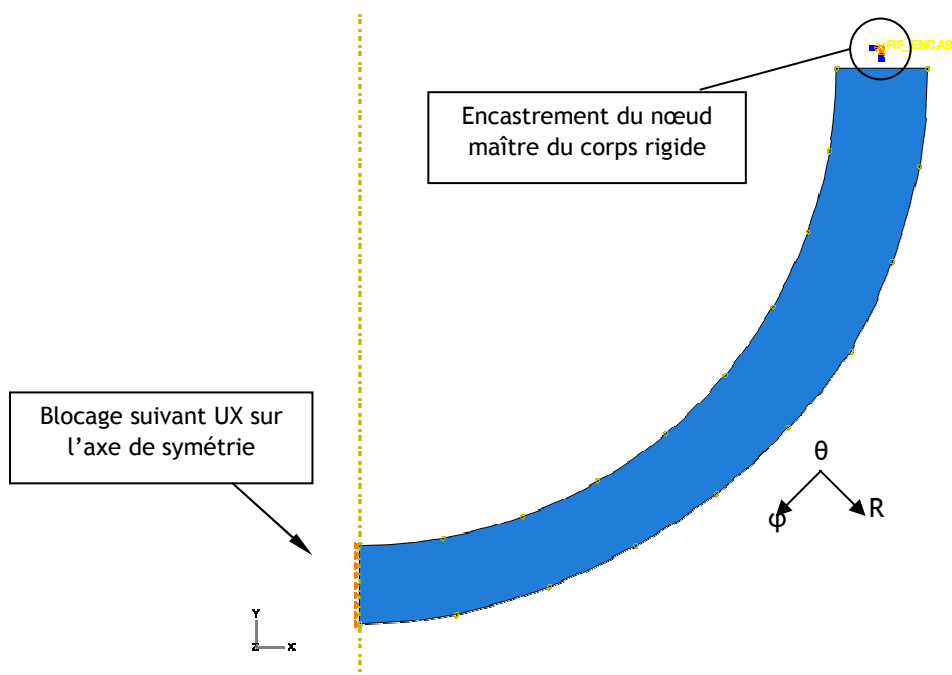


Figure 6 : MEF - Conditions aux limites mécaniques de la cuve de l'essai OLHF-1.

Il n'y a pas de conditions aux limites thermiques compte tenu du mode de chargement thermique de la cuve.

4.2. LES CHARGEMENTS

4.2.1. LES CHARGEMENTS MECANIQUES

Les chargements mécaniques sur la cuve sont au nombre de deux :

- la gravité,
- la pression.

4.2.1.1. La gravité

Le champ de gravité est représenté par une accélération suivant l'axe Y et d'intensité - 9.81 m/s².

4.2.1.2. La pression

Le régime de pression de l'essai est de 12.3 MPa. Ce chargement est transitoire. Il est appliqué sur la surface intérieure de la cuve de façon normale à la surface (cf. la courbe rouge de la Figure 3 pour son évolution temporelle).

4.2.2. LES CHARGEMENTS THERMIQUES

Le chargement thermique sur la cuve correspond à l'interpolation linéaire, en chaque nœud du maillage, de la température, à partir des mesures réalisées avec les thermocouples positionnés en face interne et externe à la longitude $\Phi=0^\circ$ et aux latitudes de $\theta=0^\circ$ à $\theta=90^\circ$ par pas de 10° .

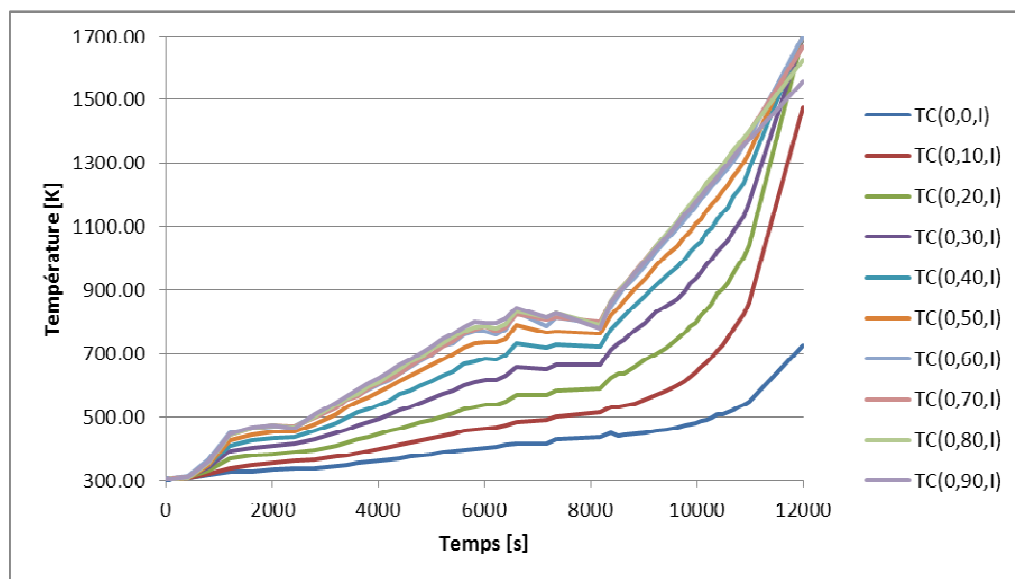


Figure 7 : Températures extrapolées en face interne à la longitude $\Phi=0^\circ$ et aux latitudes de $\theta=0^\circ$ à $\theta=90^\circ$.

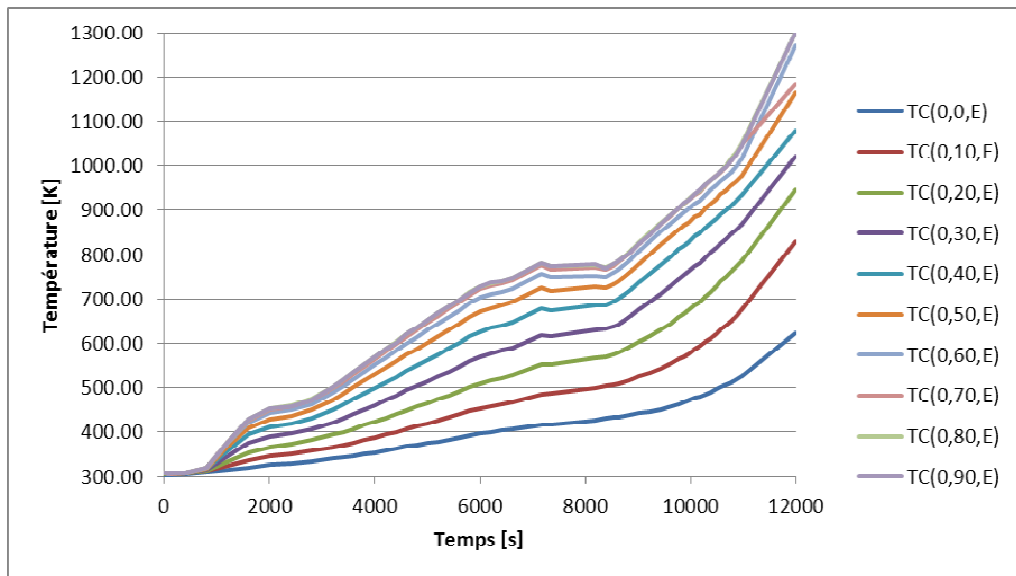


Figure 8 : Températures extrapolées en face externe à la longitude $\Phi=0^\circ$ et aux latitudes de $\theta=0^\circ$ à $\theta=90^\circ$.

Remarque :

Les températures sont extrapolées entre 192.9 minutes (soit 11574 secondes) et 200 minutes (soit 12000 secondes)

4.3. LE MATERIAU

L'essai « OLHF-1 » a été réalisé sur un fond de cuve à échelle réduite en SA533B1 mais il a été fait le choix d'appliquer la loi thermo-élastoviscoplastique endommageable développée à partir des données du 16MND5 pour le modéliser.

Les propriétés thermomécaniques du 16MND5 sont présentées en référence [4].

Les propriétés thermomécaniques du SA533B1 sont présentées en référence [6].

5. RESULTATS ET INTERPRETATION

L'arrêt du calcul éléments finis ABAQUS, par divergence de la déformée, intervient à 189.6 minutes contre 192.9 minutes lors de l'essai et contre 181.2 minutes lors du calcul CASTEM du CEA.

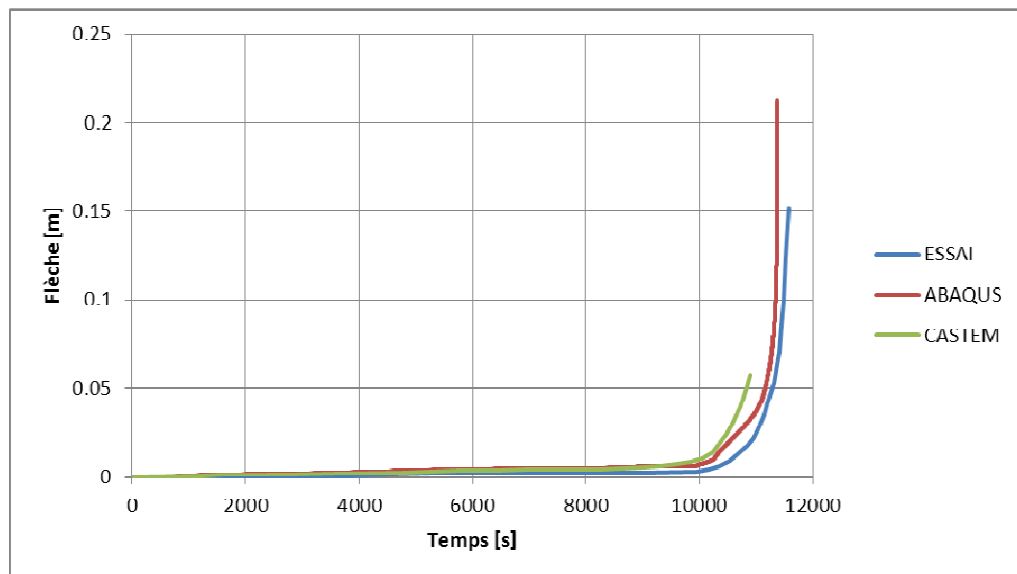


Figure 9 : Comparaison essai - calculs des flèches verticales de la cuve en fonction du temps.

La flèche atteinte par le calcul ABAQUS est de 212.7 mm contre 151.7 mm lors de l'essai et contre 57.7 mm lors du calcul CASTEM (cf. Figure 9). Les écarts de flèche, entre ABAQUS et l'essai, sont supposés provenir des variations entre les lois de fluage des deux matériaux.

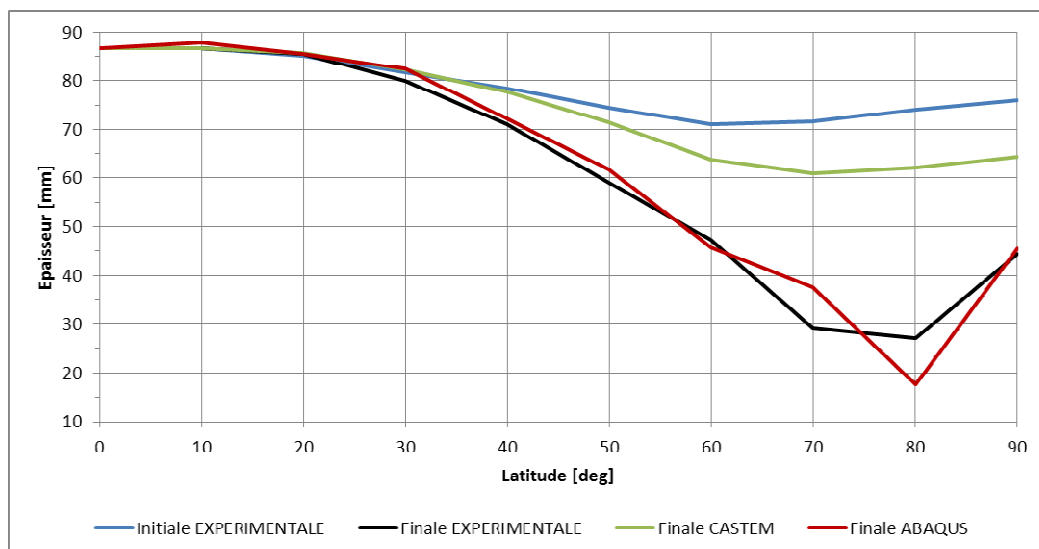


Figure 10 : Comparaison essai - calculs des épaisseurs de la cuve à rupture.

L'épaisseur minimale du calcul ABAQUS est 17.5 mm, elle intervient à la latitude 80°, contre 27.15 mm à 80° lors de l'essai et contre 60.9 mm à 70° lors du calcul CASTEM.

Le phénomène mécanique dominant lors de cet essai est le fluage de la cuve. On le visualise grâce à l'analyse de la déformée (cf. Figure 11).

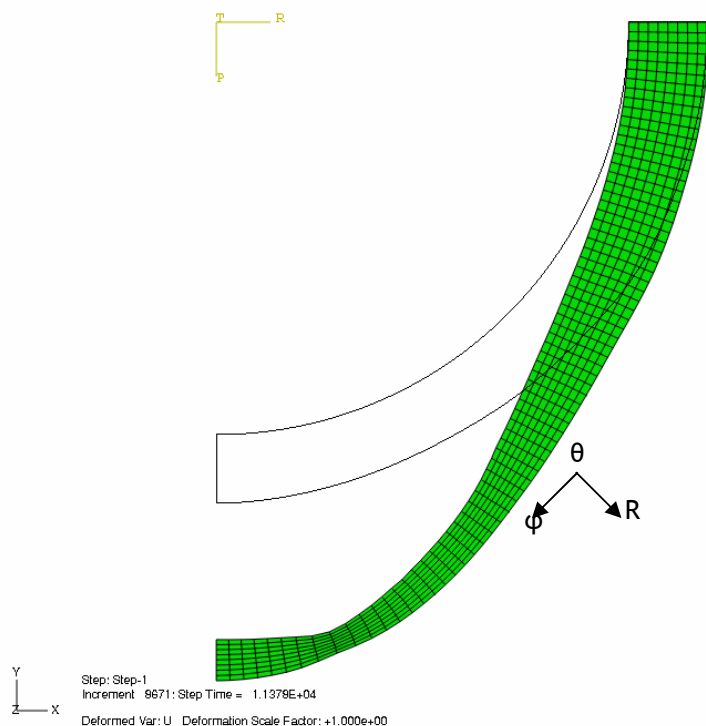


Figure 11 : Déformée de la cuve à rupture.

La rupture de la cuve intervient au niveau de la plus faible épaisseur, c'est-à-dire à la latitude 80° (cf. Figure 11) contre une latitude à 75° lors de l'essai. C'est aussi là que le champ de température est le plus élevé (cf. Figure 13).

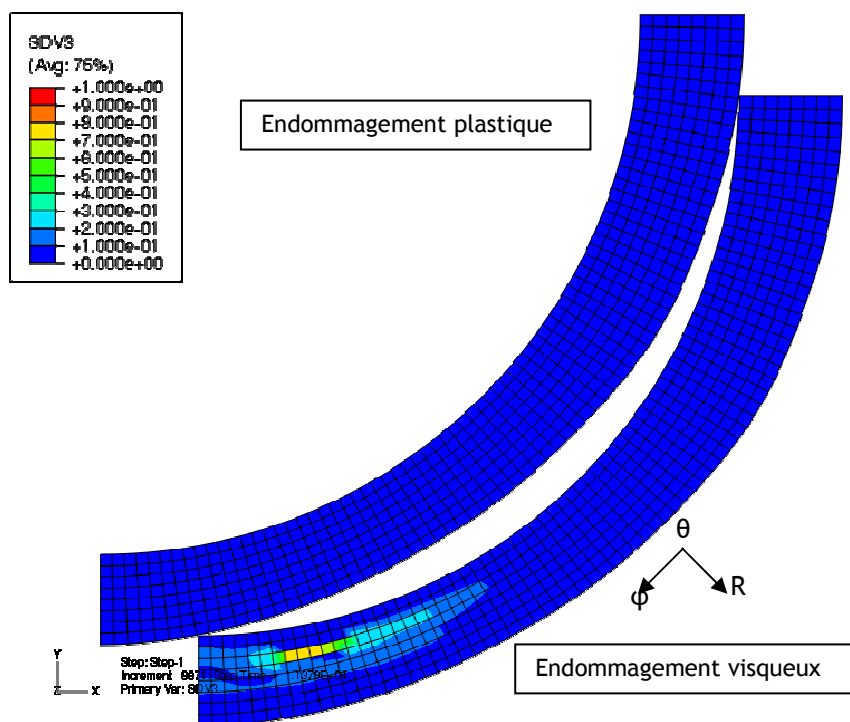


Figure 12 : Endommagements plastique (SDV2) et visqueux (SDV3) de la cuve à rupture.

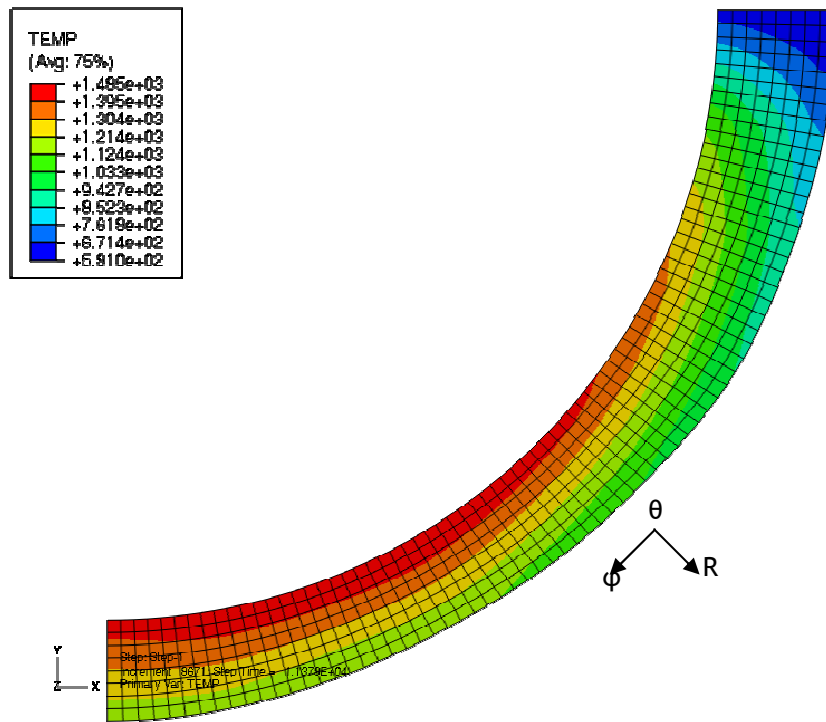


Figure 13 : Champ de températures de la cuve à rupture.

6. CONCLUSION

Globalement, on constate un excellent accord entre les résultats du modèle éléments finis, réalisés avec le modèle thermo-élastoviscoplastique endommageable du 16MND5, et ceux de l'essai « OLHF-1 », réalisé avec une cuve en SA533B1. Cela permet donc de valider, par rapport à un essai à échelle réduite, la modélisation mise en place en 2010 et enrichie en 2011, par la prise en compte de l'endommagement.

Il reste maintenant à affiner les données matériau notamment en prenant en compte l'effet de l'irradiation sur les caractéristiques mécaniques.

Après avoir réalisé l'étude sur l'effet d'irradiation, nous serons en mesure de mener des études réacteur par la modélisation éléments finis d'une géométrie 3D réaliste.

7. LISTE DES REFERENCES

- [1] Fiche d'action 2011.
CEA - EDF - IRSN / CPSIN - GGP - PAC.
Mécanique du fond de cuve - cinétique de brèche
- [2] Mécanique fond de cuve - Cinétique brèche
Analyse de scénarios à partir des calculs ASTEC V1.3 pour l'EPS2 1300
Rapport DSR / SAGR N° 2010 - 119
G. CASTANO (SOCOTEC)
- [3] Mécanique fond de cuve - Cinétique brèche
Calculs thermomécaniques ABAQUS à partir des résultats de calculs ASTEC V1.3 pour l'EPS2 1300
Rapport DSR / SAGR N° 2010 - 162
G. CASTANO (SOCOTEC)
- [4] Mécanique fond de cuve - Cinétique brèche
Développement numérique et validation d'une loi matériau utilisateur élastoviscoplastique endommageable (EVPE) - Calculs thermomécaniques sur une cuve en situation d'accident grave
Rapport DSR / SAGR N° 2011 - 225
G. CASTANO (SOCOTEC)
- [5] Mécanique fond de cuve - Cinétique brèche
Etude de sensibilité à la pression primaire et au taux de fusion de cœur, avec et sans refroidissement externe sur une cuve en situation d'accident grave
Rapport DSR / SAGR N° 2011 - 250
G. CASTANO (SOCOTEC)
- [6] Post-test calculations based on OLHF-1 test
Rapport DM2S - SEMT/LM2S/RT/02-005
L. Nicolas
- [7] Calottes de fond de cuve tous contrats
synthèse des caractéristiques chimiques et mécaniques et recensement des fiches d'anomalies et de non conformités
Rapport FRA NFPMT DC 53
M. Lemoine

8. ANNEXES

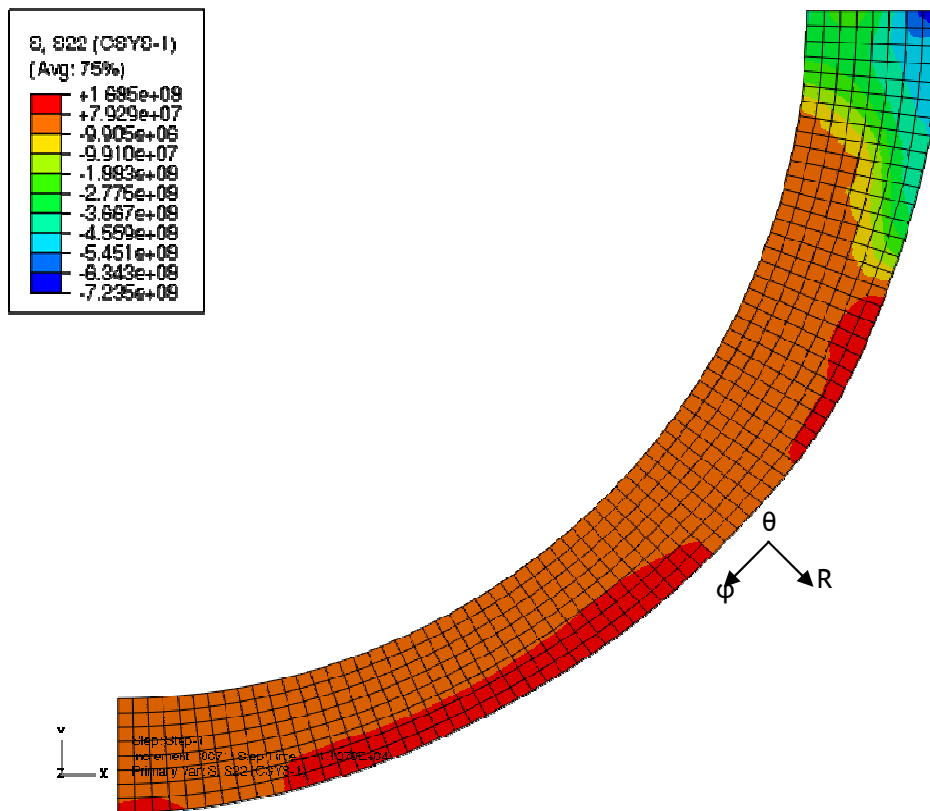


Figure 14 : Champ de contraintes suivant θ de la cuve à rupture.

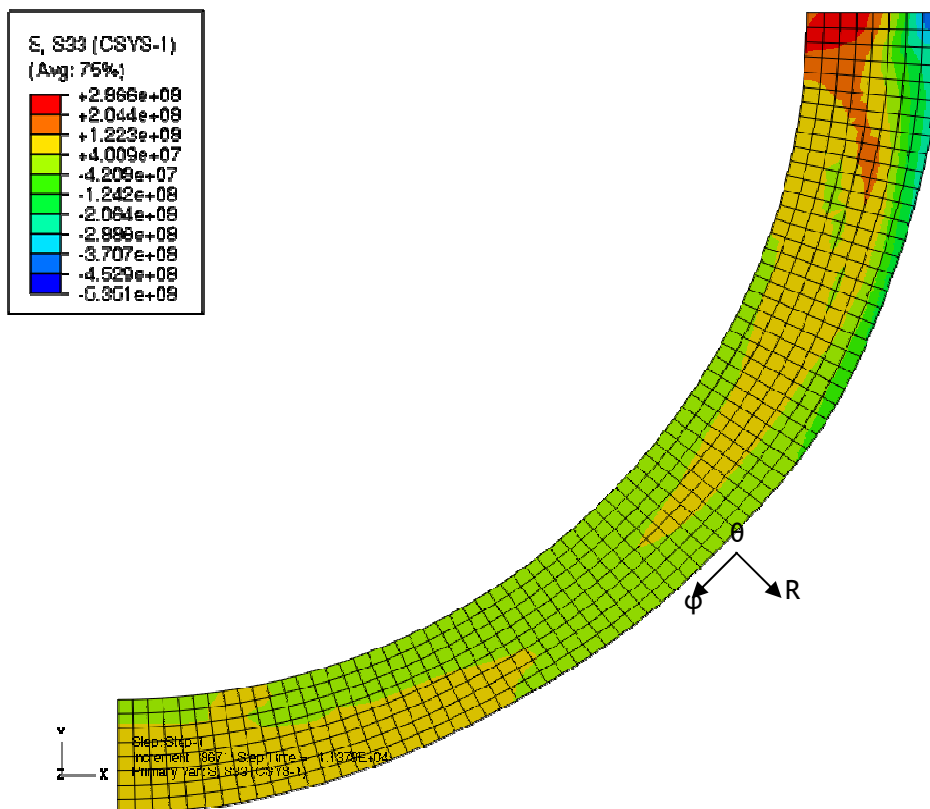


Figure 15 : Champ de contraintes suivant Φ de la cuve à rupture.

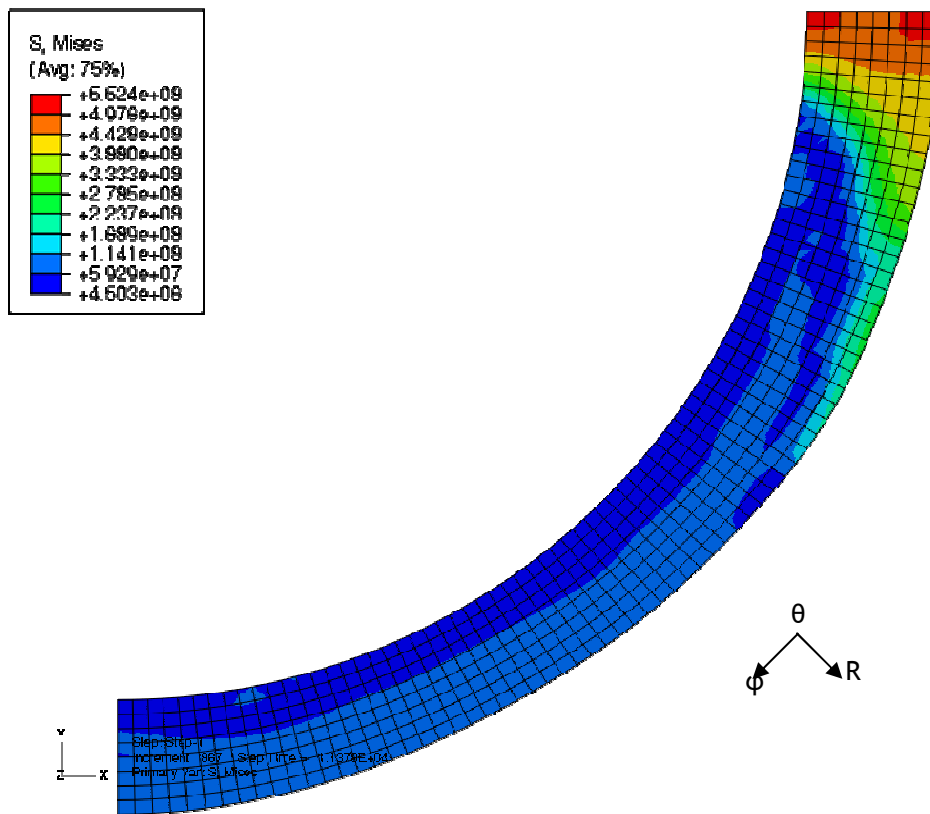


Figure 16 : Champ de contraintes de Von Mises de la cuve à rupture.

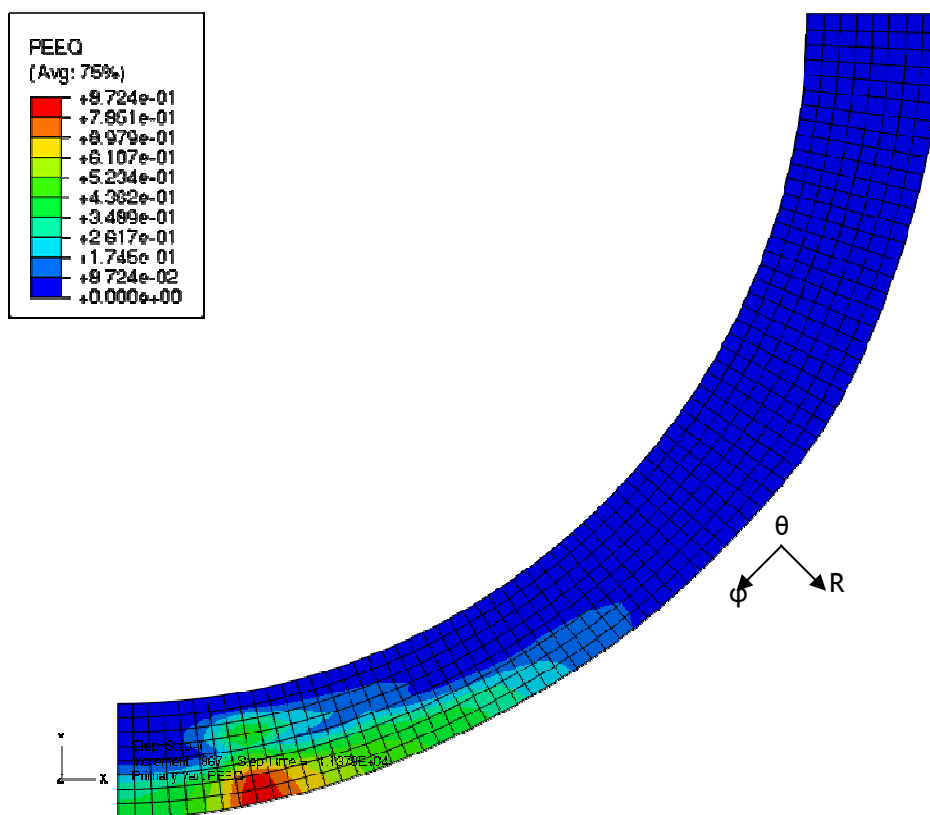


Figure 17 : Champ des déformations plastiques équivalentes de la cuve à rupture.

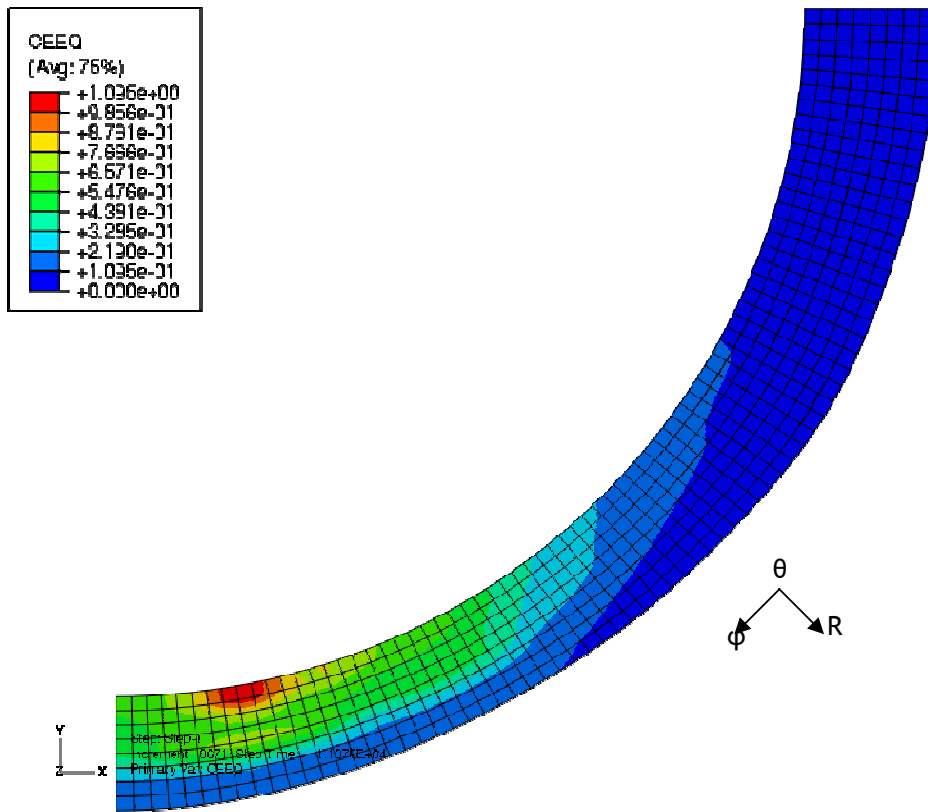


Figure 18 : Champ des déformations visqueuses équivalentes de la cuve à rupture.