

Caractérisation, modélisation et simulation numérique du comportement mécanique de conteneurs de stockage de déchets radioactifs de haute activité.

J. Serveaux^{1,2}, C. Labergere¹, K. Saanouni¹, F. Bumbieler²

¹Université de Technologie de Troyes ICD/LASMIS, 12 Rue Marie Curie, Troyes, 10300, France, jeremy.serveaux@utt.fr, carl.labergere@utt.fr, khemais.saanouni@utt.fr

²Andra R&D Division, 1 Rue Jean Monnet, Châtenay-Malabry, 92290, France
frederic.bumbieler@andra.fr

Résumé :

Prédire la rupture ductile sous des chargements complexes reste une tâche ardue, en particulier lorsqu'il s'agit de matériaux hétérogènes pour lesquels les mécanismes de rupture dépendent des propriétés microstructurales avec effet de l'environnement. L'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra), est en charge d'étudier le stockage des déchets de Haute Activité et de Moyenne Activité à Vie Longue (HA et MA-VL) dans un centre de stockage géologique (projet Cigéo). Il est prévu d'encapsuler les déchets HA dans des conteneurs mécano-soudés en acier non allié P285NH, puis de les insérer dans des micro-tunnels horizontaux appelés alvéoles de stockage. Les travaux présentés ici concernent la prédiction du comportement à long terme de conteneurs soumis à diverses sollicitations représentatives des conditions de stockage. L'objectif principal est de savoir si le modèle proposé et la méthode numérique associée sont capables de prédire fidèlement le comportement à long terme (plusieurs centaines d'années) de ces conteneurs en situation de stockage.

Le comportement ductile de l'acier P285NH a été caractérisé par des essais sur des éprouvettes prélevées sur une maquette échelle 1:1. Les essais de traction ont été réalisés sur des éprouvettes lisses ou entaillées, plates ou cylindriques, issues du matériau de base ainsi que du joint soudé. Pour ces matériaux, un modèle de comportement elastoplastique avec écrouissages non linéaires cinématique et isotrope fortement couplés à l'endommagement ductile isotrope et faiblement couplé à la corrosion généralisée, a été développé. Sa formulation est basée sur la thermodynamique des processus irréversibles avec des variables d'état macroscopiques en considérant des grandes déformations plastiques mais des petites déformations élastiques de sorte à assurer l'additivité des taux des déformations réversibles et irréversibles.

Les conteneurs étant fermés par deux couvercles soudés par faisceau d'électron sans apport de matière, l'étude présentée ici concerne le comportement du joint soudé. Une attention particulière est accordée à la prise en compte de la soudure dans les prévisions, par simulations numériques, du comportement mécanique et de l'endommagement. Dans le but d'obtenir des données précises sur le joint soudé, ses dimensions et les microstructures des différentes zones du joint ont été déterminées par microscopie optique et mesure de dureté. La soudure est décomposée en trois parties : matériau de base (P285NH n'ayant pas subi de transformation métallurgique), Zone Affectée Thermiquement (ZAT) et Zone Fondue (ZF) de microstructures sensiblement différentes. Les propriétés mécaniques de ces zones sont très différentes, c'est pourquoi des essais de traction ont été réalisés sur des éprouvettes de traction lisses comprenant une soudure représentant au mieux le joint soudé du

conteneur. La géométrie de ces éprouvettes est la même que celle utilisée auparavant lors des essais de traction sur le matériau de base, dans le but de réaliser des comparaisons.

Des comparaisons entre des résultats expérimentaux et numériques sur la base des courbes globales force-déplacement sont réalisées afin de prouver la bonne identification des paramètres du modèle de comportement développé sur ce matériau hétérogène. Des mesures fines par corrélation d'images sont également réalisées sur éprouvettes plates avec soudures. Ceci a permis d'optimiser l'identification des paramètres matériau du P285NH dans les trois zones du joint soudé à utiliser dans les simulations numériques du comportement des conteneurs. La reproduction très satisfaisante par simulation numérique des essais réalisés permet d'être confiant dans la capacité de la modélisation à simuler le comportement à long terme, l'initiation de fissures ductiles et leur propagation dans le conteneur avec soudures.

La faible largeur des zones soudées (12 mm) en comparaison avec la longueur (1600 mm) et le diamètre (570 mm) des conteneurs implique un difficile compromis en termes de discrétisation spatiale lorsqu'il s'agit de garder des temps de simulations raisonnables ainsi qu'une précision suffisante. Finalement, l'impact de la présence de la soudure est étudié sur la base de plusieurs simulations sur conteneurs soumis à différentes conditions de chargement mécanique et à différentes vitesses de corrosion.

Mots clés : élastoplasticité, endommagement ductile, corrosion généralisée, DIC, expérimentations, simulations numériques.

1 Introduction

Les déchets radioactifs de Haute Activité (HA) sont conditionnés en colis constitués d'un conteneur en acier P285NH contenant une enveloppe en acier inoxydable dans laquelle le déchet vitrifié est préalablement coulé. Ces colis de déchets sont ensuite destinés à être stockés à l'intérieur d'alvéoles consistant en des micro-tunnels horizontaux équipés d'un chemisage en acier. Dans ce travail, le comportement de la soudure par faisceau d'électrons effectuée sur le conteneur en acier P285NH est étudié, Figure 1.

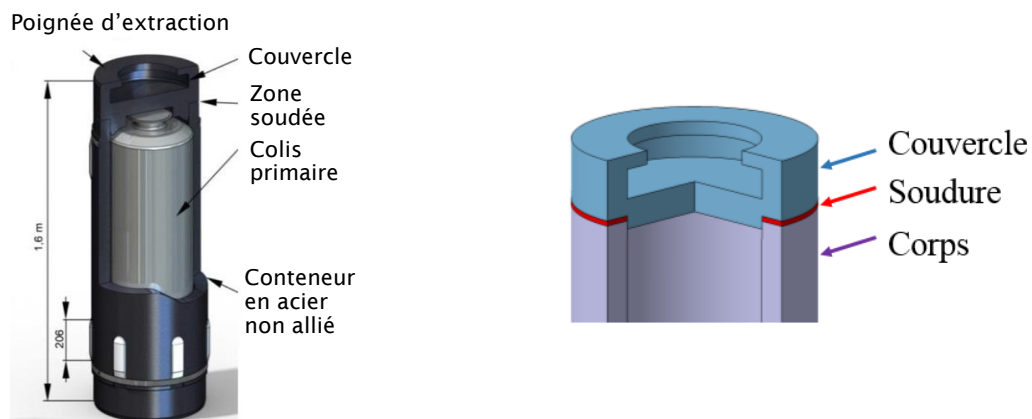


Figure 1: Conteneur et soudure

L'étude porte sur l'acier composant le conteneur et plus particulièrement la soudure qui est effectuée sans apport de matière. Le modèle élastoplastique fortement couplé avec l'endommagement mais faiblement couplé à la corrosion est formulé dans le cadre de la thermodynamique des processus irréversible avec variables d'état à l'échelle macroscopique. Les paramètres matériaux sont calibrés par comparaisons entre résultats expérimentaux et numériques avec des éprouvettes de traction issues du matériau de base (MB), de la zone fondue (ZF) ainsi que d'une zone matériau mixte comprenant MB, ZF et Zone Affectée Thermiquement (ZAT). Les essais de traction permettant d'obtenir des

informations sur les propriétés du matériau mais pas sur la géométrie des différentes zones matériau du joint soudé, des essais de micro-indentation sont alors effectués afin de caractériser précisément ces différentes zones.

Tout comme l'endommagement ductile, la corrosion permet de prendre en compte la dégradation des propriétés mécaniques des matériaux présents provoquant un adoucissement du comportement de l'acier. La cinétique d'évolution du front de corrosion dans la matière est imposée par une vitesse de corrosion (supposée constante dans le temps et l'espace en première approximation) dont la valeur est calibrée à partir des études de corrosion de l'acier P285NH réalisées par l'Andra. Le modèle a été implémenté dans ABAQUS/STANDARD pour réaliser toutes les simulations après l'identification des paramètres du modèle dans chacune des zones matériaux.

2 Modèle de comportement

Nous travaillons avec la mécanique de l'endommagement continue avec l'approche macroscopique phénoménologique, de sorte à rester à l'échelle macroscopique sans considérer directement et explicitement la microstructure granulaire du matériau. L'EVR est alors un point matériel homogène décrit par des variables d'état représentatives des divers phénomènes physiques agissant sur le matériau. La méthode de l'état local est employée dans le cadre de la thermodynamique des processus irréversibles afin de définir les équations d'état et les équations d'évolution des phénomènes dissipatifs à partir de potentiels d'états et des dissipations [1], [2], [3].

Dans cette transformation isotherme, un seul couple de variables d'état externe est utilisé: le tenseur des déformations totales associé au tenseur des contraintes de Cauchy $(\underline{\varepsilon}, \underline{\sigma})$. Cinq couples de variables d'états internes sont pris en compte (i) le tenseur des (petites) déformations élastiques représentant l'écoulement inélastique associé au tenseur des contraintes de Cauchy $(\underline{\varepsilon}^e, \underline{\sigma})$, les variables scalaires d'écrouissage isotrope (r, R) représentant la taille de la surface de charge dans l'espace des déformations (r) et dans l'espace des contraintes (R) , (iii) les tenseurs déviateurs liés à l'écrouissage cinématique $(\underline{\alpha}^i, \underline{X}^i)$ (avec $i=1,2$) décrivant le déplacement du centre de la surface de charge dans l'espace des déformations $(\underline{\alpha}^i)$ et dans l'espace des contraintes (\underline{X}^i) , (iv) les variables d'endommagement ductile isotrope (d_m, Y) , au sens de la mécanique de l'endommagements continue [3], [4].

La corrosion généralisée est le type de corrosion privilégié pour cet acier non allié (P285NH) dans les conditions de stockage. En effet, aucune fissuration par corrosion sous contrainte ni piqure par corrosion n'est attendu dans ces conditions [5]. Donc, la variable corrosion généralisée (ζ_{cor}) est considérée comme une partie de l'endommagement global (d) de sorte que :

$$d = d_m + \zeta_{cor} \quad \text{avec} \quad 0 \leq d \leq 1 \quad 1.$$

où l'évolution des variables d_m et ζ_{cor} sont définies ci-dessous.

Cette variable d'endommagement globale affecte le comportement mécanique du matériau via le couplage comportement-endommagement basé sur le concept des variables effectives [6] avec l'hypothèse de l'équivalence en énergie totale [5], [7]. Ceci conduit aux expressions suivantes des variables d'état effectives :

$$\underline{\tilde{\sigma}} = \frac{\underline{S}}{g_d(d)} + \frac{\sigma_H}{g_H(d)} \underline{I} \quad \text{et} \quad \underline{\tilde{\varepsilon}}^e = g_d(d) \underline{\tilde{\varepsilon}}_d^e + g_H(d) \varepsilon_H \underline{I} \quad 2.$$

$$\underline{\tilde{X}}^i = \frac{\underline{X}^i}{g_d(d)} \quad \text{et} \quad \underline{\tilde{\alpha}}^i = g_d(d) \underline{\alpha}^i \quad 3.$$

$$\tilde{R} = \frac{R}{g_r(d)} \quad \text{and} \quad \tilde{r} = g_r(d) r \quad 4.$$

Différentes fonctions de couplage $g_d(d)$, $g_H(d)$ et $g_r(d)$ permettent de définir les effets de l'endommagement ductile sur les différents phénomènes physiques.

$$g_d(d) = \sqrt{1-d} \quad 5.$$

$$g_r(d) = \sqrt{1-d^{\gamma_r}} \quad 6.$$

$$g_H(d) = \sqrt{1-H(\sigma_H)d^{\gamma_e}} \quad 7.$$

L'effet de l'endommagement sur la partie déviatorique ($\underline{S}, \underline{\varepsilon}_d^e$) et hydrostatique (σ_H, ε_H) des contraintes et déformations est différencié grâce au paramètre γ_e .

La fonction de Heaviside $H(\sigma_H)$ est introduite afin de gérer simplement les effets de fermeture des microfissures :

$$H(\sigma_H) = \begin{cases} 1 & \text{si } \sigma_H > 0 \\ 0 & \text{si } \sigma_H < 0 \end{cases} \quad 8.$$

Les variables d'état effectives sont utilisées dans le potentiel d'état $\rho\psi$, dans la fonction de charge f et dans le potentiel plastique F (formulation normale non associée) pour dériver l'ensemble des équations constitutives :

$$\rho\psi = \frac{1}{2} \underline{\underline{\tilde{\varepsilon}}}^e : \underline{\underline{\Lambda}}^e : \underline{\underline{\tilde{\varepsilon}}}^e + \sum_i \frac{4}{3} C_i \underline{\underline{\tilde{\alpha}}}^i : \underline{\underline{\tilde{\alpha}}}^i + \frac{1}{n+1} Q \tilde{r}^{n+1} \quad 9.$$

$$f = \frac{J_2(\underline{S} - \sum_i \underline{X}_i)}{g_d(d)} - \frac{R}{g_r(d)} - \sigma_y \quad 10.$$

$$F = f + \underbrace{\sum_i \frac{3 a_i}{4 C_i} \underline{\underline{\tilde{X}}}_i : \underline{\underline{\tilde{X}}}_i + \frac{b}{2Q} \tilde{R}^2}_{F_p} + \underbrace{\frac{1}{g_d(d)^\beta} \frac{S}{s+1} \left(\frac{Y - Y_0}{S} \right)^{s+1}}_{F_d} \quad 11.$$

où $\underline{\underline{\Lambda}}^e$ est le tenseur des propriétés d'élasticité, C_i sont les modules d'écrouissages cinématiques, Q est le module d'écrouissage isotrope, σ_y est la limite d'élasticité. Toutes les équations de comportement déduites de ces potentiels sont détaillées dans [8], nous allons uniquement donner ici l'équation d'évolution de l'endommagement isotrope ductile ([8], [9], [10],[11]):

$$\dot{d}_m = \lambda \frac{\partial F_d}{\partial Y} = \frac{\lambda}{g_d(d)^\beta} \left(\frac{Y - Y_0}{S} \right)^s \quad 12.$$

Y_0 est le taux de restitution d'énergie, S , s et β sont des paramètres d'endommagement, λ est le multiplicateur plastique, Y est la force thermodynamique associée à l'endommagement.

Comme déjà annoncé, la corrosion est supposée homogène, généralisée et à vitesse constante imposée. L'évolution de la corrosion dans le conteneur est donc une condition aux limites dépendante de la géométrie ainsi que de la vitesse de propagation du front de corrosion comme suit :

$$\zeta_{cor} = \begin{cases} 0 & \text{si } t \leq T_c^e \\ \frac{t - T_c^e}{T_u^e - T_c^e} & \text{si } T_c^e \leq t \leq T_u^e \\ 1 & \text{si } T_u^e \leq t \end{cases} \quad 13.$$

$$T_c^e = T_u^e - \frac{e_c}{V_c} \quad 14.$$

$$T_u^e = \frac{d_{sext}^e}{V_c} \quad 15.$$

Où t est l'instant courant.

La corrosion se propageant progressivement sur une épaisseur, on a alors T_c^e l'instant auquel la corrosion s'initie sur un point matériel, T_u^e est l'instant auquel le point matériel sera totalement corrodé, e_c est l'épaisseur du front de corrosion, V_c est la vitesse de corrosion imposée. d_{sext}^e représente la distance minimale entre le point matériel et la surface extérieure du conteneur. Par l'effet

du couplage de la variable $d = d_m + \zeta_{cor}$ sur l'ensemble des relations d'état, la corrosion affecte et adoucit les propriétés mécaniques du matériau.

3 Calibration du modèle

Avant d'étudier la soudure, les propriétés du matériau de base (MB) 'non corrodé' ainsi que celles de la zone fondue (ZF) ont été déterminées et leurs courbes force-déplacement ont été simulées par la modélisation proposée et comparées aux résultats expérimentaux (Figure 2). La soudure par faisceau d'électrons, sans apport de matière, affecte le matériau sur une zone très restreinte, la zone fondue est de seulement 4.0 mm de largeur, sur une profondeur de 55.0 mm. Les éprouvettes de traction classiques de 10.0 mm de diamètre utilisées pour le matériau de base étant alors impossible à utiliser, une autre géométrie cylindrique de 6.0 mm de diamètre, a été utilisée pour la ZF.

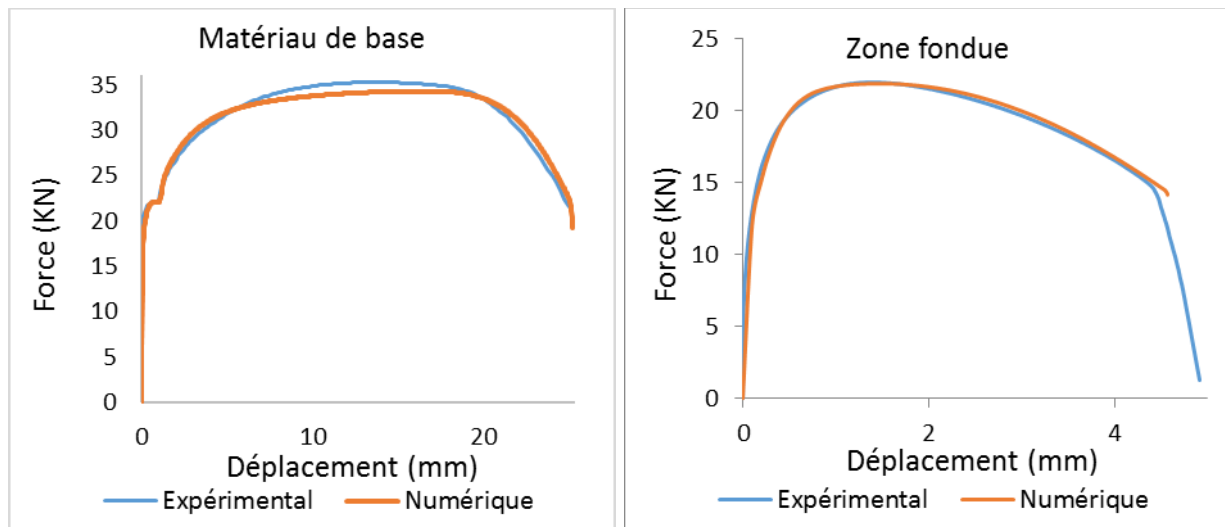


Figure 2: Caractérisation MB (à gauche) et ZF (à droite)

Les simulations des éprouvettes en MB et en ZF permettent de reproduire fidèlement le comportement de ces matériaux avec le modèle développé. Les simulations sont réalisées sur ABAQUS/STANDARD avec des éléments C3D8R de taille 0.5 mm^3 . Les paramètres identifiés pour ces matériaux sont présentés dans la Figure 3.

		MB	ZF			MB	ZF
Module d'Young (MPa)		192000	192000	Ecrouissage cinématique	C1 (MPa)	23000	38000
	Coefficient de poisson	0,3	0,3		a1	350	100
Limite d'élasticité (MPa)		220	360		C2 (MPa)	3500	900
					a2	43	11
Ecrouissage isotrope	Q (MPa)	550	360	Coefficients d'endommagement	S	12	15
	b	0	0,2		s	2	4
	n	0,75	0,7		β	0,7	0,5

Figure 3: Paramètres matériaux

La taille très réduite de la ZAT n'a pas permis le prélèvement d'éprouvettes pour caractériser son comportement mécanique. Les propriétés de la ZAT n'ont donc pas été déterminées dans cette étude. Les propriétés mécaniques de la ZF sont supérieures à celles de du MB.

3.1 Caractérisation de la soudure

Cinq éprouvettes sont prélevées à différents endroits de la soudure d'une maquette de conteneur afin de mesurer l'évolution de la dureté au sein de la soudure. Les éprouvettes ont été polies puis des essais de microdureté Vickers ont été réalisés. Afin d'obtenir suffisamment d'informations expérimentales, trois lignes d'indentation ont été réalisées pour chaque éprouvette (Figure 4b). Sur la Figure 4a, la zone fondue est en rouge, la ZAT en orange et l'éprouvette indentée en bleu.

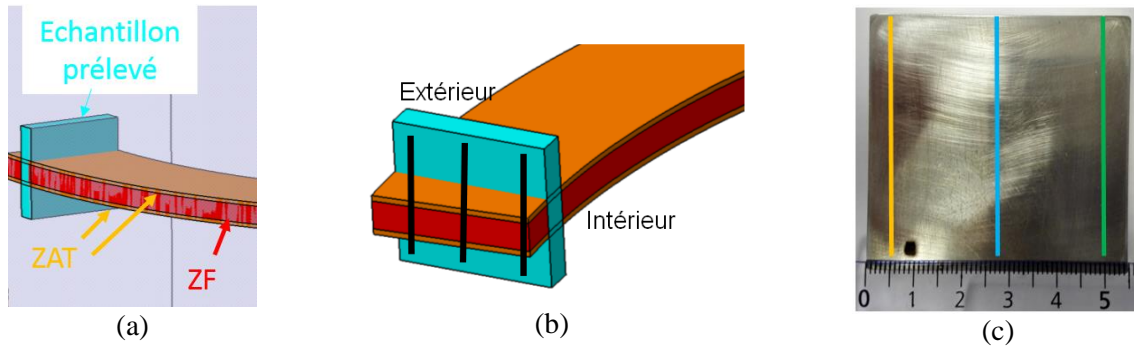


Figure 4: Zones matériau (gauche) et indentation (droite)

Le fait d'effectuer trois lignes d'indentation (Figure 4b) sur une même éprouvette, nous a permis de confirmer que la taille de la soudure reste identique que ce soit proche de la surface extérieure, centrale ou intérieure du conteneur. Les essais de micro-indentation permettent de mesurer la taille des différentes zones matériau. Trois lignes d'indentation sur cinq éprouvettes permettent d'obtenir l'évolution de la dureté Vickers sur quinze lignes (Figure 5). Une moyenne des duretés relevées par rapport au centre de la soudure est enfin effectuée afin d'obtenir les propriétés géométriques de la soudure (Figure 6).

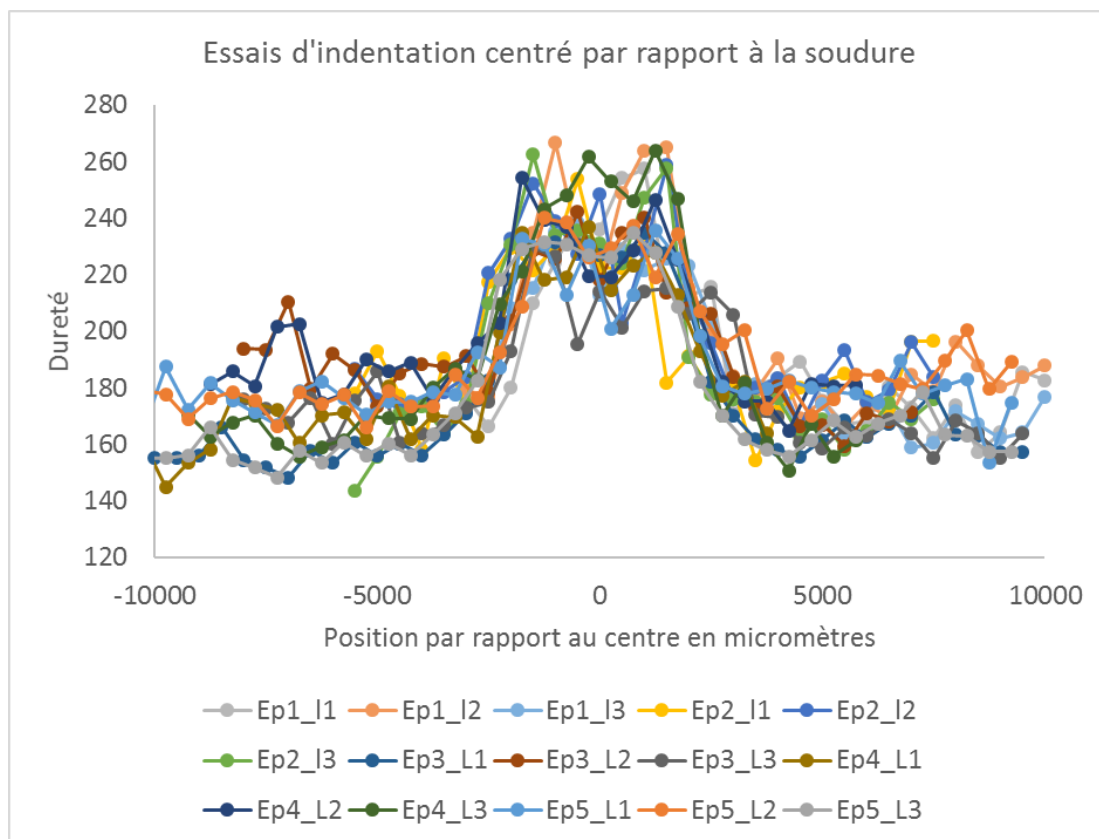


Figure 5: Micro-indentation sur soudure, ensemble des essais

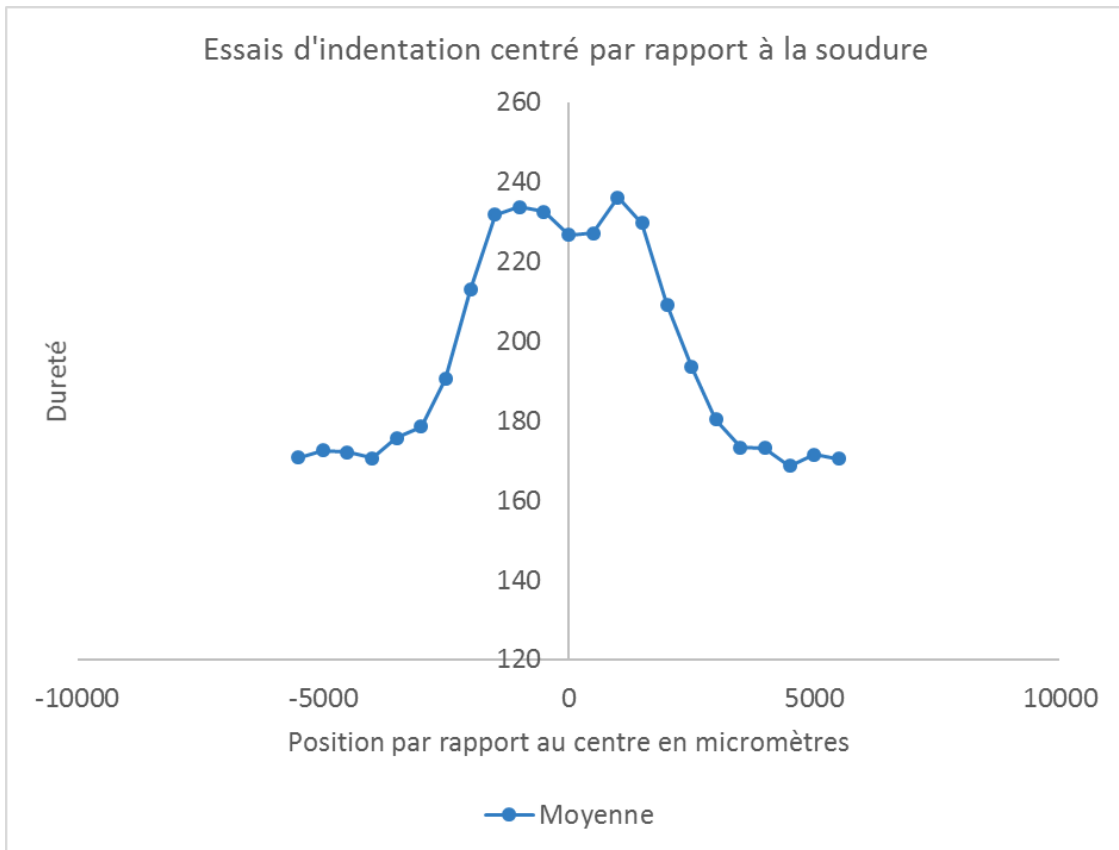


Figure 6: Micro-indentation sur soudure, moyenne

Les observations réalisées par micro-indentation ont été confirmées par microscopie optique, les zones MB/ZAT/ZF ont des microstructures différentes (Figure 7). Les observations ont été effectuées au microscope optique avec un zoom de X500. Sur les images obtenues, la ZF présente des grains aciculaires. La ZAT est constituée de grains de taille inférieure à ceux constituant le MB.

La ZAT étant très hétérogène, ses propriétés sont alors lissées par des fonctions continues dans les simulations sur éprouvettes contenant une soudure. Ceci permettra alors au niveau numérique une transition moins abrupte entre les propriétés du MB et de la ZF.

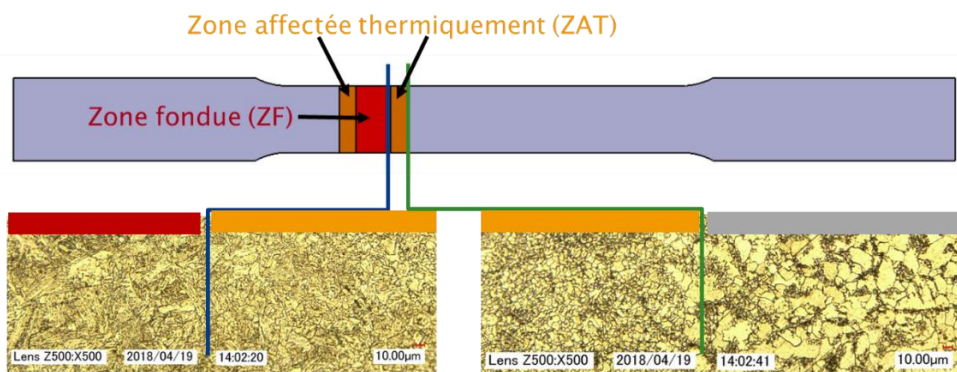


Figure 7: Microstructure et position de la soudure

3.2 Epruvettes lisses

Des essais de traction ont été réalisés sur 10 éprouvettes dont la géométrie est présentée en Figure 8. Les résultats étant homogènes, nous avons alors employé les méthodes de moyennes classiques afin de créer des matériaux fictifs ayant des propriétés dépendantes d'une fraction de MB et de ZF, la discrétisation de l'éprouvette est présentée Figure 8.

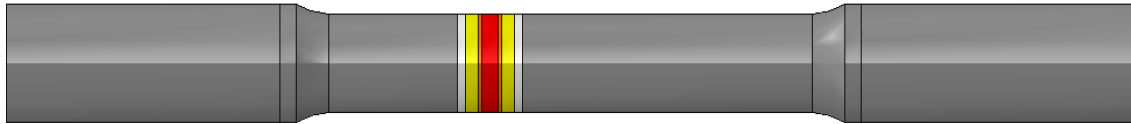


Figure 8: Position et composition de la soudure sur l'éprouvette

- Rouge: 100% ZF
- Orange: 75% ZF 25% MB
- Jaune: 50% ZF 50% MB
- Blanc: 25% ZF 75% MB
- Gris: 100% MB

La Figure 9 montre une bonne corrélation entre les courbes force-déplacement expérimentales et prédites par notre modélisation pour l'essai de traction.

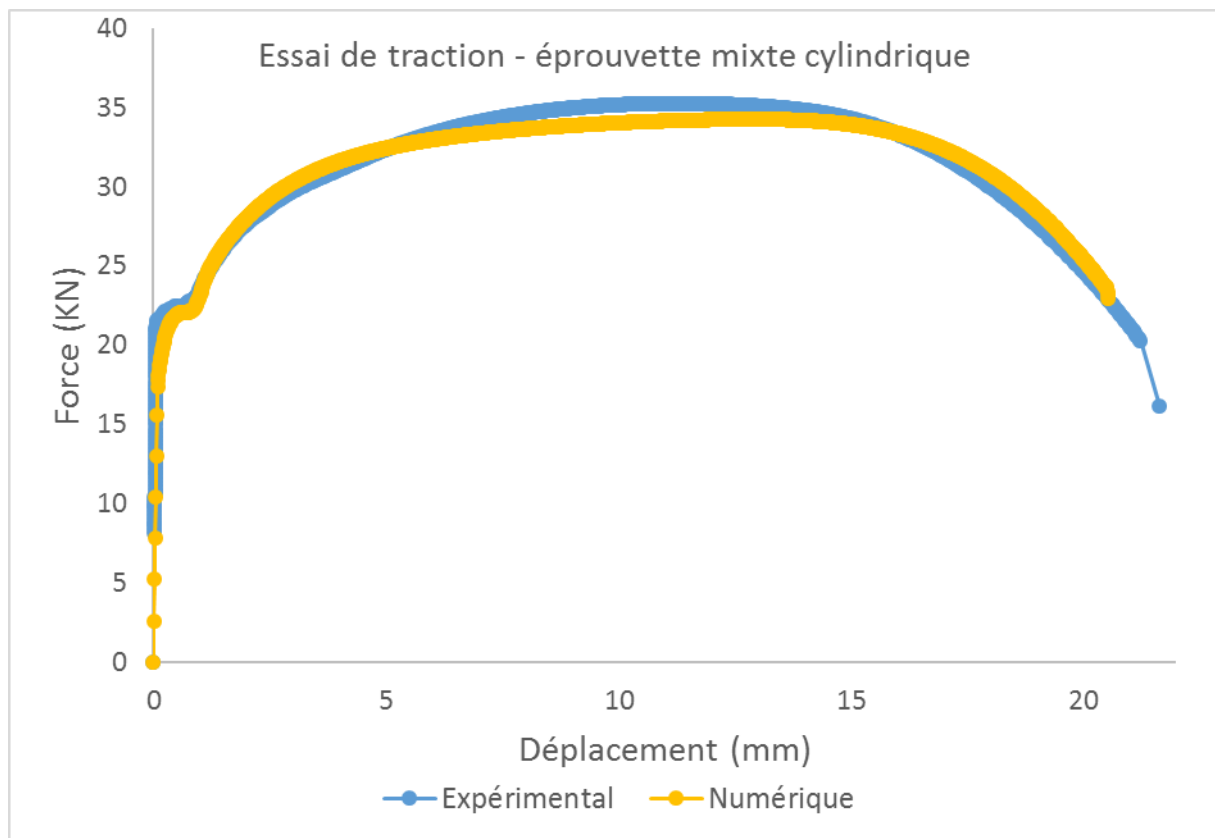


Figure 9: Essai de traction, éprouvette mixte

3.3 Eprouvettes plates

Afin de vérifier localement le comportement d'une soudure, cinq éprouvettes plates ont subi un essai de traction avec mesure des déplacements (déformations) par corrélation d'images [12]. La soudure étant la même que pour les éprouvettes cylindriques précédentes, les zones matériaux et les tailles sont alors identiques (Figure 10) : couleur rouge : 100% ZF, orange : 75% ZF 25% MB, jaune : 50% ZF 50% MB, blanche : 25% ZF 75% MB et grise : 100% MB.

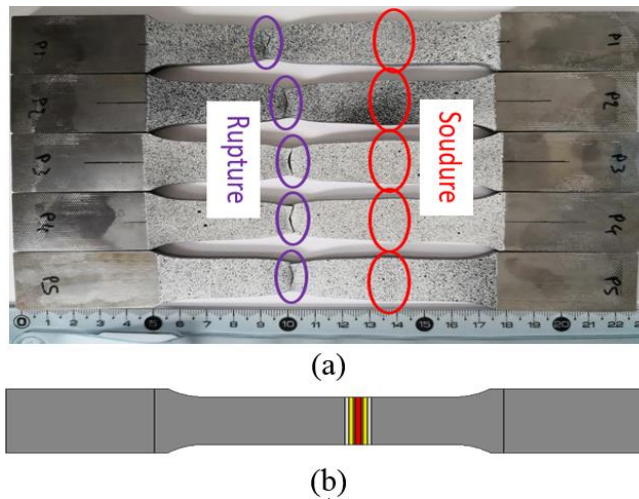


Figure 10: Position de la rupture et de la soudure sur cinq éprouvettes plates (a) et zones matériaux (b)

La courbe force-déplacement montre une bonne correspondance entre l'expérimental et le numérique comme on peut le voir sur la Figure 11, permettant d'être aussi confiant que pour les éprouvettes cylindriques au niveau macroscopique.

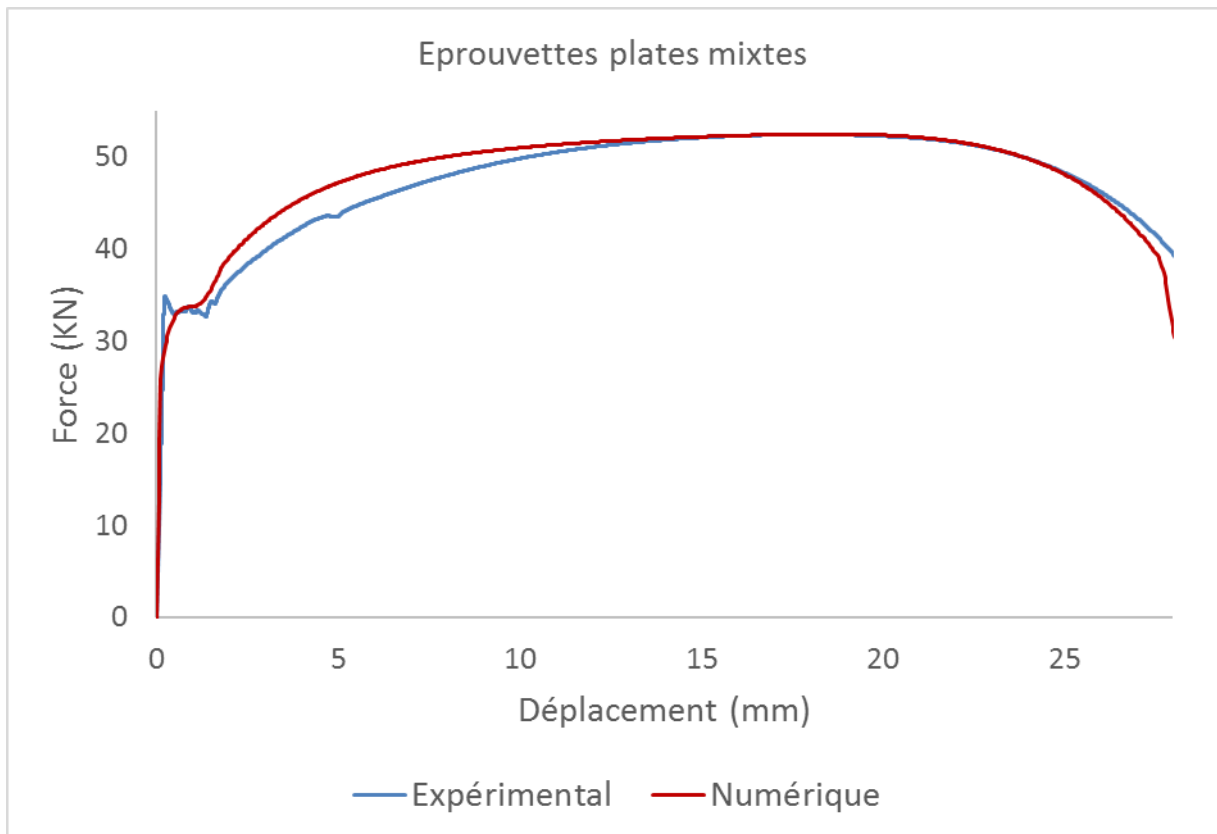


Figure 11: Comparaison éprouvettes plates soudées

Pendant les essais, l'éprouvette est encadrée au niveau du mors supérieur et le mors inférieur se déplace vers le bas avec une vitesse constante de 0.01 mm/s. La Figure 12 présente une comparaison calculs / essais du déplacement longitudinal à différents niveaux de déplacement.

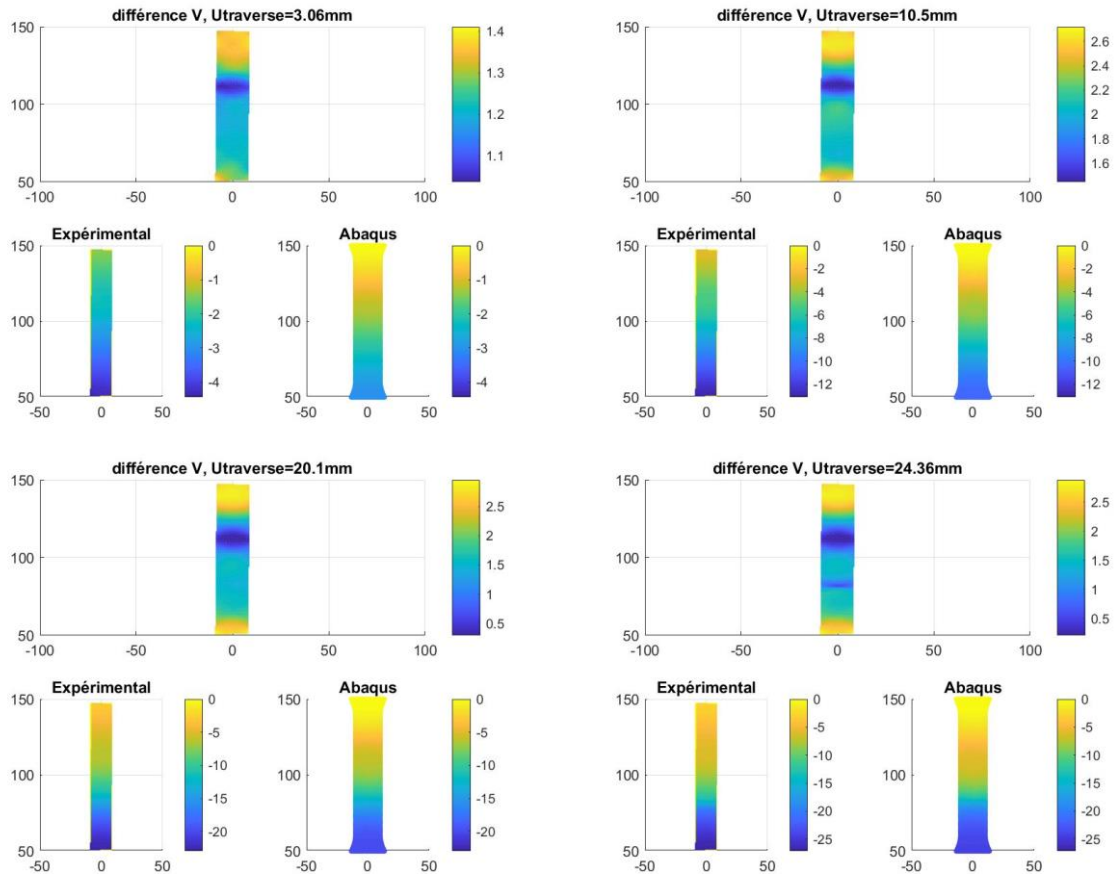


Figure 12: Résultats de corrélation d'image

Sur la première image, on voit un léger glissement de l'éprouvette expérimentale, les champs de déplacements sont moins francs que pour l'éprouvette numérique alors que l'allongement est identique. Sur la deuxième et troisième image, le glissement expérimental s'est stabilisé, les champs sont alors plus homogènes. La zone où la différence des déplacements (numérique et expérimental) est la plus faible correspond à la soudure.

Dans la quatrième image, qui correspond à l'instant précédent la rupture, deux zones où les différences des déplacements sont moins importantes correspondent, pour la partie supérieure à la soudure et pour la partie inférieure à la zone de striction puis de rupture. Ce qui signifie que les déformations subies par ces zones sont mieux reproduites que les déformations du reste de l'éprouvette. En effet, l'erreur entre les simulations et l'expérience est alors faible sur chacune des images pour la partie soudée de l'éprouvette montrant une bonne correspondance entre l'expérimental et le numérique.

4 Simulations sur conteneur

La moitié d'un conteneur simplifié de 1400.0 mm de longueur, avec un diamètre extérieur de 570.0 mm et une épaisseur de 65.0 mm, est ici modélisée avec 92058 éléments C3D8R issus d'ABAQUS.

Dans cette simulation, l'objectif est d'étudier l'impact de la soudure sur le comportement de la structure. Les conditions de chargement sont les suivantes (Figure 13) : le conteneur repose sur une surface rigide, de 0 à 100 ans aucun chargement n'est appliqué outre les effets de gravité, puis de 100 à 500 ans, une pression homogène allant de 0.0 à 5.0 MPa est appliquée sur toute la surface extérieure du conteneur (représentant la pression de l'eau/du gaz dans le micro-tunnel où sera stocké le conteneur dans les conditions de stockage, on néglige ici l'influence du transitoire thermique généré par les colis

de déchets). Après 500 ans, la pression de 5.0 MPa est toujours appliquée. De plus, un solide représentant le chemisage après flambement, comprime le conteneur avec une vitesse de déplacement appliqué de 6.0 mm/1000 ans à partir de 500 ans. Cette condition est appliquée selon la direction z sur la ligne supérieure du solide (en violet, Figure 13). La vitesse de déplacement a été choisie arbitrairement pour représenter des vitesses de convergence très faibles du terrain à long terme. Ce solide a des propriétés élastiques lui permettant de venir progressivement au contact de l'acier du conteneur de manière à rendre compte de l'extension progressive de la surface d'application de la pression de contact sur le conteneur dans les conditions de stockage. Le colis en verre est pris en compte comme un solide rigide. Outre le chargement mécanique, une corrosion homogène de 10.0 $\mu\text{m}/\text{an}$ de vitesse est appliquée depuis l'instant initial jusqu'à rupture, mécanique ou par corrosion totale. Nous avons traité cet exemple comme un procédé de mise en forme car le conteneur est sollicité dans des conditions assez identiques (compression par l'effet du contact avec le chemisage puis la roche après corrosion totale du chemisage, modélisés comme des outils, utilisation d'un modèle élastoplastique en grande transformation finie). Les zones cerclées en rouge sur la Figure 13 correspondent aux zones soudées. Deux configurations de simulations sont présentées, dans l'une les soudures sont présentes (affectation de la zone ZAT/ZF) et dans l'autre, le conteneur est seulement constitué de MB.

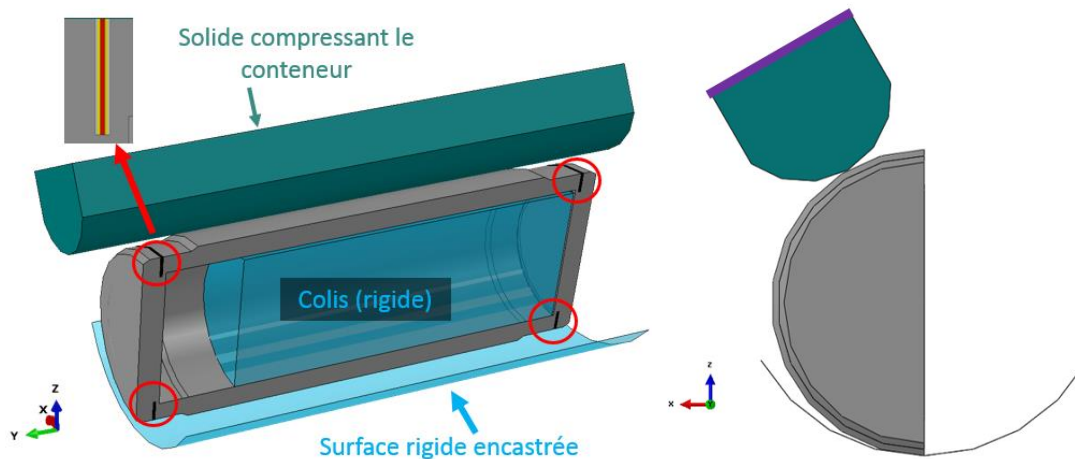


Figure 13: Conditions de simulation de la moitié du conteneur et emplacement des soudures

Les résultats sont présentés sur la Figure 14, en ayant masqué le colis primaire ainsi que les éléments totalement endommagés. A cet instant, l'épaisseur minimal d'acier est de seulement 5.0 mm dans les zones qui étaient initialement les moins épaisses. Il est visible sur cet acier très ductile que les extrémités inférieures à gauche et à droites sont très déformées par rapport au reste de la structure. C'est l'écrasement provoqué par l'outil qui l'induit. Les zones soudées ne font alors pas partie des zones les plus sollicitées. Il s'agit en effet des zones situées près des couvercles qui sont les plus contraintes.

De plus, une forte zone de concentration de contraintes correspond à l'extrémité du colis primaire reposant sur le conteneur. En effet, la zone sous le conteneur est contrainte par le poids du colis primaire alors que l'interstice entre le colis primaire et le couvercle de gauche n'est pas contraint d'où la déformation du conteneur à cet endroit.

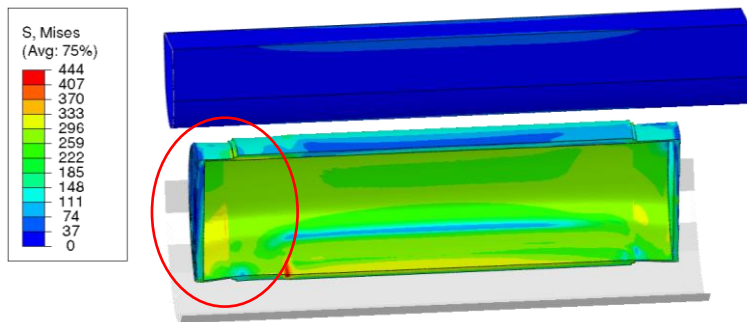


Figure 14: Contraintes de von Mises (en MPa) après 5000 ans, configuration avec soudure

La zone cerclée en rouge sur la Figure 14 concerne la soudure du couvercle de gauche, elle est montrée en détail sur la Figure 15. Les deux configurations de calculs sont présentées. Sur la Figure 15a la soudure est modélisée (présence de ZAT/ZF) mais pas sur la Figure 15b (MB uniquement).

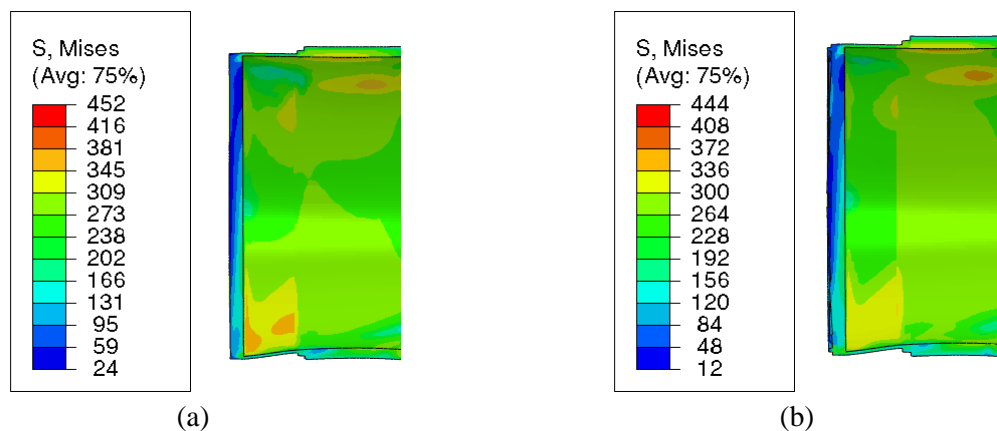


Figure 15: Contraintes de von Mises (en MPa) sur la partie gauche du conteneur, à gauche la configuration sans soudure, à droite avec soudure

La soudure rigidifiant localement les couvercles du conteneur, son influence sur la structure globale était à vérifier. Après 5000 ans, la plupart du matériau constituant les couvercles a été corrodé. Il ne reste alors qu'une partie constituée de la soudure et du MB. Aucune différence notable n'est visible sur les champs des contraintes de von Mises entre ces deux configurations. L'augmentation de la rigidité dû à la soudure n'est alors pas source d'hétérogénéités dans ce cas-ci. Quant à l'endommagement, bien qu'il soit encore faible, il est localisé sur les zones du conteneur les plus minces situées aux extrémités du conteneur, Figure 16. La répartition de l'endommagement semble identique à gauche et à droite du conteneur cependant, un zoom effectuée dans la zone cerclée en rouge permet de voir une zone où l'endommagement est supérieur, Figure 17.

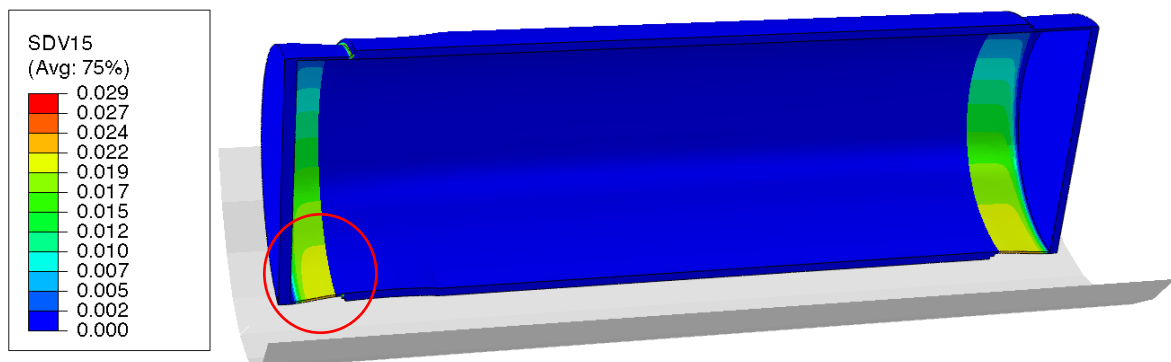


Figure 16: Endommagement sur le conteneur

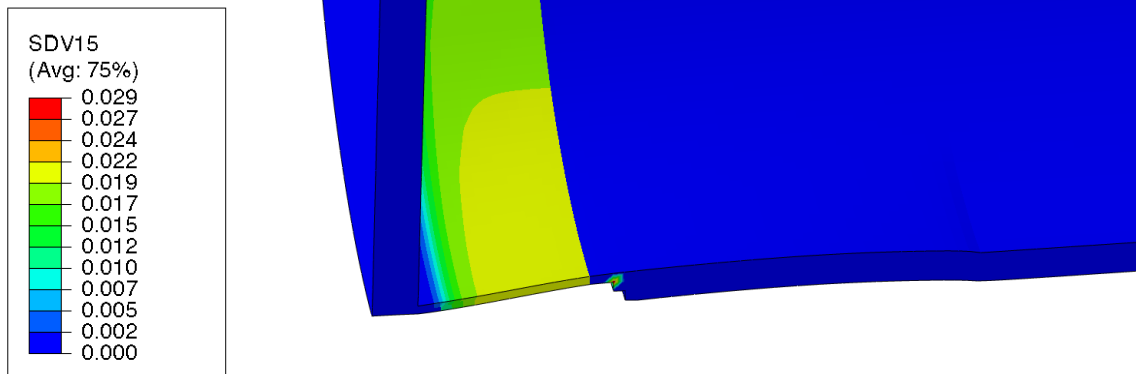


Figure 17: Endommagement maximum

Cette zone de concentration d'endommagement n'existe pas sur la partie de droite du conteneur. En effet, le colis en verre rigidifie la partie de droite du conteneur mais l'espace existant à gauche entre le couvercle et le colis entraîne cette hétérogénéité puisque le conteneur y est plus déformé qu'à droite.

Dans de futurs travaux, une vitesse de corrosion différente mais aussi un chargement plus localisé au niveau de la soudure seront étudiés.

5 Conclusions

Un modèle de comportement élastoplastique fortement couplé avec l'endommagement ductile a été utilisé pour simuler le comportement d'éprouvettes soudées. L'efficacité de ce modèle a été validée, notamment sur la base d'essais sur éprouvettes plates comprenant une soudure (comparaison du comportement macroscopique global et des déformations locales). Ensuite, la faisabilité d'utilisation de ce modèle sur un conteneur en acier P285NH a été vérifiée sur la base d'un cas de chargement modèle. Pour ce premier cas de chargement, aucune influence de la soudure sur l'endommagement n'a été observée.

Différents cas de chargement plausibles et/ou sévérés (aussi bien du point de vue de la corrosion que de celui des sollicitations mécaniques) seront testés dans la suite des travaux pour estimer une épaisseur critique de fissuration.

Références

- [1] P. Germain, *Cours de mécanique des milieux continus*, vol. 1. Masson, 1973.
- [2] J. Lemaitre, « A Continuous Damage Mechanics Model for Ductile Fracture », *J. Eng. Mater. Technol.*, vol. 107, n° 1, p. 83-89, janv. 1985.
- [3] J.-L. Chaboche, *Description thermodynamique et phénoménologique de la viscoplasticité cyclique avec endommagement*. ONÉRA, 1978.
- [4] L. M. Kachanov, « Time of the Rupture Process under Creep Conditions, Izy Akad », *Nank S. S. R. Otd Tech Nauk*, vol. 8, p. 26-31, 1958.
- [5] K. Saanouni, C. H. Forster, et F. B. Hatira, « On the Anelastic Flow with Damage », *International Journal of Damage Mechanics*, vol. 3, n° 2, p. 140-169, avr. 1994.
- [6] J. Besson, G. Cailletaud, J. L. Chaboche, et S. Forest, *Mécanique non linéaire des matériaux*. 2001.
- [7] J. P. Cordebois et F. Sidoroff, « Damage Induced Elastic Anisotropy », in *Mechanical Behavior of Anisotropic Solids / Comportement Mécanique des Solides Anisotropes*, 1982, p. 761-774.
- [8] K. Saanouni, *Damage Mechanics in Metal Forming: Advanced Modeling and Numerical Simulation*. London : Hoboken, NJ: ISTE Ltd., 2012.

- [9] J. L. Chaboche, « Continuum Damage Mechanics: Part II—Damage Growth, Crack Initiation, and Crack Growth », *J. Appl. Mech*, vol. 55, n° 1, p. 65-72, mars 1988.
- [10] K. Saanouni, « Sur l'analyse de la fissuration des milieux élasto-viscoplastiques par la théorie de l'endommagement continu », thesis, Compiègne, 1988.
- [11] S. Murakami, « Mechanical Modeling of Material Damage », *J. Appl. Mech*, vol. 55, n° 2, p. 280-286, juin 1988.
- [12] F. Hild, « Mesures de champs de déplacement par corrélation d'images et applications en mécanique des solides ». 2003.