

Etude du comportement mécanique de la zone fondue

4.3.1 Etude du comportement en traction de la zone fondue

Aucun essai de traction sur des éprouvettes prélevées en zone fondue, n'a été réalisé dans le cadre de cette étude. Cependant, des données ont été fournies par le laboratoire des Techniques d'Assemblage (LTA) et ont été reproduites ici avec son autorisation.

Des essais de traction ont été réalisés à 20 °C et 550 °C sur des éprouvettes prélevées dans le sens longitudinal des deux soudures, dans la zone fondue. Le diamètre des éprouvettes est de 4 mm et la longueur utile vaut 50 mm. L'épaisseur et la largeur d'une passe sont respectivement estimées à près de 2,5 mm et 5 mm dans la zone fondue du joint soudé avec produit d'apport P92IG et de 2 mm et de 5 mm dans le joint soudé avec produit d'apport Thermanit MTS 616. Au vu des dimensions des deux joints soudés et des dimensions des éprouvettes de traction, on considère que le volume testé est représentatif du comportement moyen de la zone fondue.

Les essais ont été menés pour une vitesse d'allongement relatif imposée de $1,667 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.

L'évolution à 20 °C et à 550 °C de l'allongement de ces éprouvettes prélevées dans les deux produits d'apport, en fonction de la contrainte nominale, est tracée sur la Figure 4-68 et la Figure 4-69.

Le Tableau 4-14 rassemble les paramètres tirés de ces essais de traction.

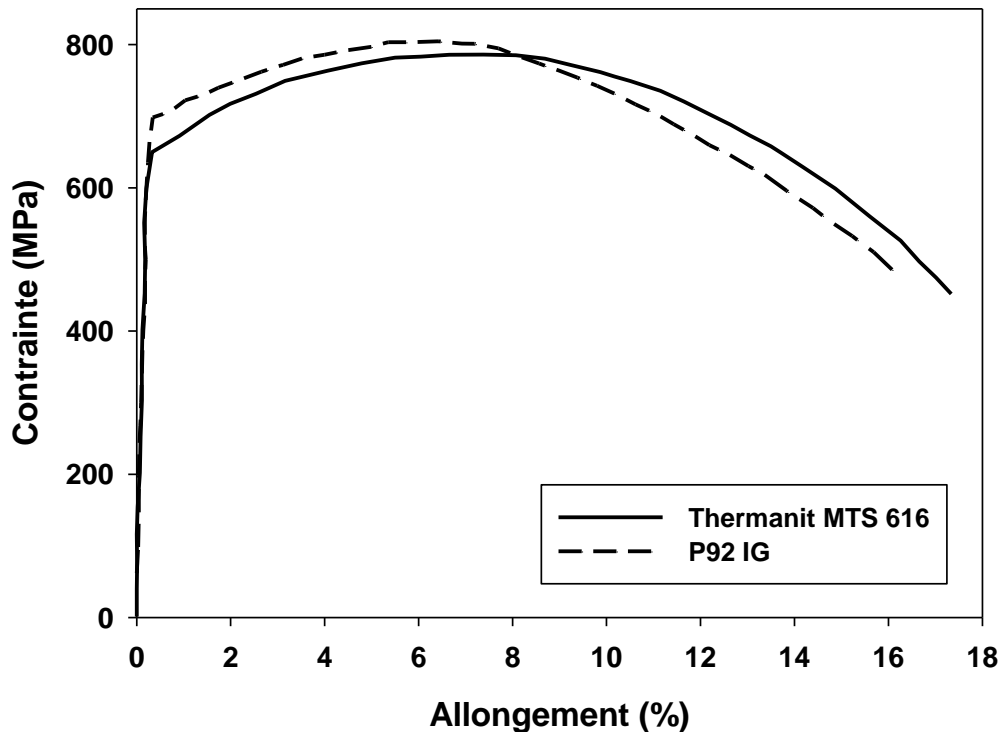


Figure 4-68 : évolution de l'allongement en fonction de la contrainte nominale d'éprouvettes prélevées en zone fondue des deux joints soudés. Les essais ont été réalisés à 20 °C et la vitesse d'allongement est de $1,667 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.

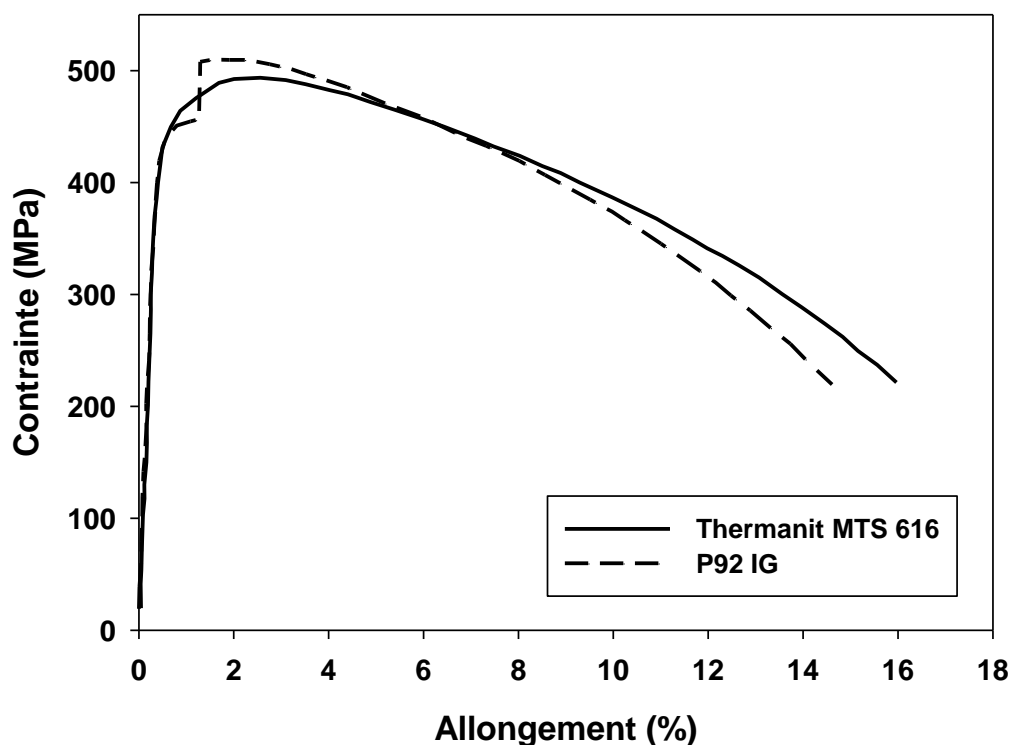


Figure 4-69 : évolution de l'allongement en fonction de la contrainte nominale d'éprouvettes prélevées en zone fondue des deux joints soudés. Les essais ont été réalisés à 550 °C et la vitesse d'allongement est de $1,667 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.

L'allure anormale de la courbe de traction à 550 °C de la zone fondue provenant du produit d'apport P92IG, est probablement liée à un problème d'extensométrie.

	Produit d'apport	Rp0,2 (MPa)	Rm (MPa)	Allongement maximal réparti (%)	Allongement à rupture (%)
20 °C	Thermanit MTS 616	656	789	7,3	17
550 °C	Thermanit MTS 616	441	495	2,5	16
20 °C	P92 IG	702	806	6,4	16
550 °C	P92 IG	439	510	1,74	15

Tableau 4-14 : propriétés en traction de la zone fondue obtenue avec les deux produits d'apport.

Les deux produits d'apport ont des comportements en traction similaires à 20 °C et à 550 °C. A 20 °C, le produit d'apport P92 IG présente une limite d'élasticité légèrement plus élevée.

En outre, on constate que l'allongement à rupture des deux zones fondues est proche.

Par ailleurs, la zone fondue présente un meilleur comportement en traction que le métal de base, aux deux températures considérées. A 20 °C, si l'on compare aux spécifications de l'acier Grade 92 (V&M, 2010), on constate que la contrainte maximale est de 30% supérieure à celle du métal de base et que la limite élastique est de 45% plus élevée. A 550 °C, les données sont comparées, pour une vitesse d'allongement de $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, aux résultats obtenus sur le métal de base non détensionné, présentés dans la partie I. La contrainte maximale est de 17 % plus grande en zone fondue et la limite

élastique est de 13 % plus élevée. On note également que l'écart des propriétés en traction entre les deux matériaux est inférieur à 550 °C comme on l'avait déjà constaté avec les essais de traction et corrélation d'images. La dureté en zone fondue varie entre 260 et 280 HV_{0,5} en fonction de la position dans la zone fondue. L'écart relatif de dureté entre le métal de base et la zone fondue est donc compris entre 13 et 21 %.

4.3.2 Comportement en fluage de la zone fondue

Les géométries des éprouvettes ont été dimensionnées et sont présentées dans le paragraphe 4.1.

Plusieurs essais ont été lancés à différents niveaux de contraintes. Les deux premiers essais ont été lancés à une contrainte appliquée de 250 MPa et de 215 MPa, afin d'obtenir des contraintes de von Mises respectivement de 240 MPa et de 205 MPa comme pour les autres zones testées. Cette étape est présentée dans le chapitre 4.1.6. Les contraintes réelles atteintes au niveau de l'entaille ont ensuite été recalculées lors de la procédure d'identification des paramètres de comportement viscoplastique de la zone fondue.

L'évolution de l'ouverture de l'entaille en fonction du temps est présentée pour chaque essai sur la Figure 4-70 et la Figure 4-71.

Les courbes de fluage ont révélé que la zone fondue était largement plus résistante en fluage par rapport au comportement attendu. Compte-tenu de l'avancement des essais, les éprouvettes n'auraient pas rompu suffisamment tôt pour que les résultats de ces essais puissent être exploités. L'obtention de données expérimentales étant nécessaire pour l'ajustement d'un modèle de comportement mécanique de la zone fondue, la campagne d'essais de fluage a été réorientée. Deux nouveaux essais ont été lancés. Ces essais ont été dimensionnés à l'aide de la loi de fluage de Panait [Panait, 2010] pour durer respectivement 100 h et 50 h.

Les résultats de ces essais sont donnés dans le Tableau 4-15. Les contraintes de von Mises réellement atteintes ont été recalculées à partir du modèle de comportement de la zone fondue, présenté ultérieurement. Les contraintes visées sont légèrement surestimées par rapport aux contraintes réellement atteintes. L'évolution des contraintes axiales et de von Mises le long de la section minimale de l'entaille a été recalculée et est comparée avec celle évaluée à l'aide de la loi de Panait [Panait, 2010]. Ces résultats sont présentés en annexe 7.4.1.1.

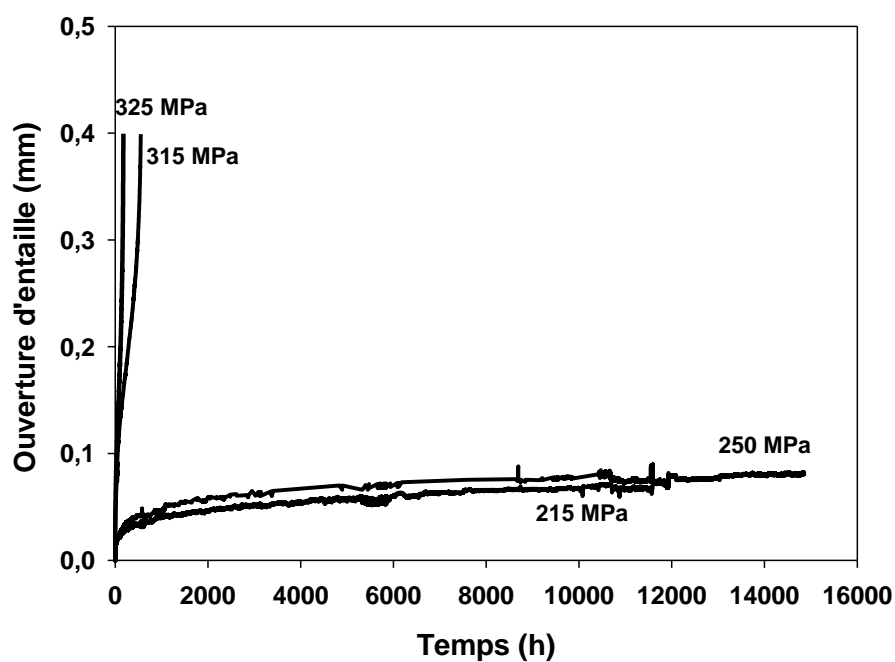


Figure 4-70 : courbes de fluage à 550 °C des essais sur éprouvettes entaillées en zone fondue. Les contraintes indiquées sont des contraintes nettes.

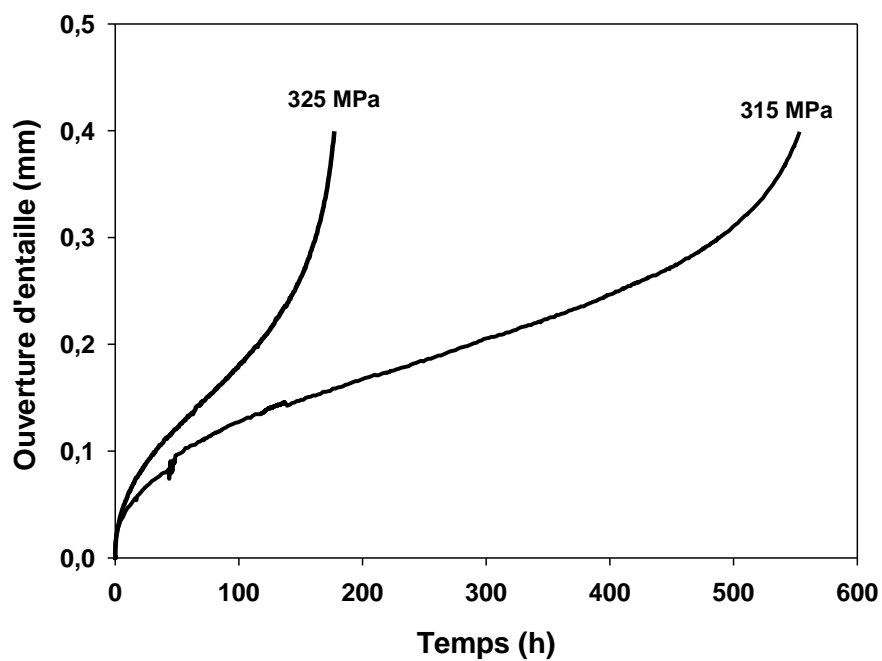


Figure 4-71 : courbes de fluage à 550 °C des essais court-terme sur éprouvettes entaillées en zone fondue. Les contraintes indiquées sont des contraintes nettes.

Contrainte nette (MPa)	Contrainte de von Mises visée (MPa)	Contraintes de von Mises recalculées (MPa)	Temps à rupture (h)
215	205	198	> 11567
250	240	232	> 14855
315	302	295	624
325	312	307	233

Tableau 4-15 : bilan des essais de fluage à 550 °C sur éprouvettes entaillées en zone fondue.

Les résultats des essais de fluage sur éprouvettes entaillées en zone fondue sont comparés aux résultats des essais de l'étude sur éprouvettes prélevées dans le métal de base et sur éprouvettes lisses prélevées travers joint. Les données sont comparées en termes de contrainte nette et en termes de contrainte de von Mises (recalculée), respectivement sur la Figure 4-72 et sur la Figure 4-73.

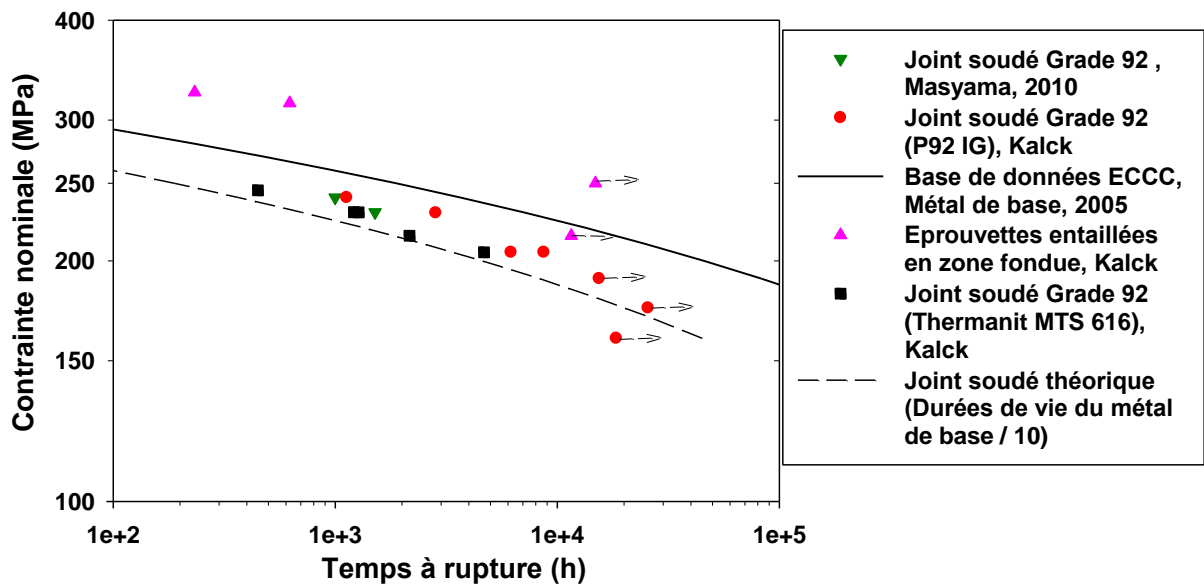


Figure 4-72 : courbes contrainte nette / temps à rupture : comparaison entre la zone fondue, le joint complet et le métal de base.

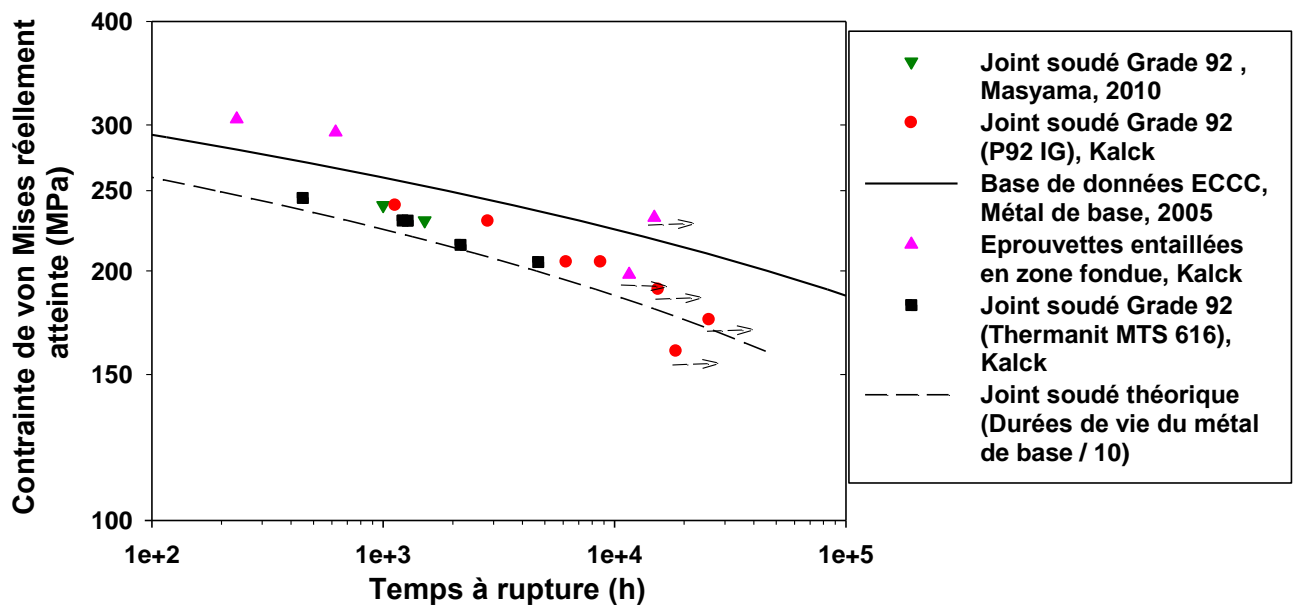


Figure 4-73 : courbes contrainte de von Mises (recalculées pour les éprouvettes entaillées) / temps à rupture : comparaison entre la zone fondue, le joint complet et le métal de base.

Les données de la Figure 4-72 indiquent que la zone fondue est très résistante au fluage à 550 °C. Les deux éprouvettes rompues (contraintes nettes de 315 MPa et 325 MPa) ont des durées de vie environ 11 fois supérieures aux données extrapolées à partir des essais sur métal de base pour des contraintes de von Mises similaires. L'éprouvette non rompue sollicitée à 250 MPa présente une durée de vie environ deux fois supérieure à celle du métal de base. L'essai a été interrompu en cours de fluage secondaire.

4.3.3 Conclusions

Les essais de fluage réalisés à 550 °C à des forts niveaux de contraintes sur les éprouvettes entaillées en zone fondue indiquent que la zone fondue présente des durées de vie 11 fois supérieures aux durées de vie du métal de base. Cette zone est donc nettement plus résistante en fluage à 550 °C par rapport au métal de base. Ce résultat est cohérent avec la dureté élevée et la résistance élevée à la traction (à 20 et 550°C) de la zone fondue mis en évidence dans les chapitres 3.2.1 et 4.2.1.

Les études menées sur des joints soudés en acier Grade 91 n'ont pas mis en avant une telle différence. A 625 °C, Gaffard [Gaffard, 2005] a constaté que la résistance au fluage de la zone fondue est proche de celle du métal de base. Le joint soudé de l'étude de Vivier [Vivier, 2007] rompt en fluage à 550 °C dans la zone fondue.

Ainsi, pour évaluer la tenue en fluage des assemblages soudés, il est essentiel de tenir compte de l'ensemble (matériau, procédé de soudage, température d'essai, géométrie...).

4.3.4 Comportement de la zone fondue

Pour modéliser le comportement en fluage du joint soudé, un modèle isotrope de von Mises a été choisi pour chaque zone modélisée. Il est donc important d'évaluer la pertinence du modèle pour la zone fondue, du fait de l'hétérogénéité microstructurale de celle-ci.

Pour rappel, la microstructure de la zone fondue est constituée à la fois d'anciens grains austénitiques de forme colonnaire, dont la croissance est liée au gradient thermique imposé par les conditions de soudage, et également d'anciens grains austénitiques équiaxes, issus de la recristallisation lors de l'application des passes consécutives.

Hyde et al. [Hyde et al., 2003] ont réalisé des essais de traction et de fluage uniaxial sur des éprouvettes prélevées dans le sens longitudinal et dans le sens transverse de la zone fondue d'un acier Grade 91. Les résultats de ces essais révèlent une anisotropie de comportement de la zone fondue.

Naumenko et Altenbach [Naumenko et Altenbach, 2005] ont établi un modèle phénoménologique de comportement anisotrope de la zone fondue. Les auteurs expliquent que le comportement macroscopique inélastique de la zone fondue est lié à la répartition spatiale de ces grains respectivement fins et plus gros. Ces microstructures présentent des comportements en fluage différents. Les auteurs ont, dans un premier temps, étudié la redistribution des contraintes et l'évolution de l'endommagement dans la zone fondue en utilisant un modèle de comportement uniaxial sur une structure de la zone fondue constituée de deux zones, l'une faite de grains fins, l'autre de gros grains, et de comportements en fluage différents. Leurs résultats indiquent que la redistribution des contraintes entre ces deux zones joue un rôle important sur le comportement résultant. Dans un deuxième temps, afin de prendre en compte les effets de structure, ils ont utilisé un modèle de comportement tenant compte de l'état de contraintes multiaxial de la zone fondue, lié à cette répartition spatiale.

Au cours de cette présente étude, l'anisotropie de comportement en traction et en fluage a été évaluée.

Les strictions et les faciès de rupture des éprouvettes entaillées rompues en fluage en régime de hautes contraintes ont été observés afin de détecter une anisotropie de déformation. Les faciès sont de forme circulaire. Ce constat suggère une isotropie de comportement pour des conditions des contraintes élevées et de grandes déformations.

D'autres indicateurs ont été utilisés pour évaluer l'anisotropie de comportement de la zone fondue pendant la déformation plastique.

Un coefficient d'anisotropie a été estimé dans chaque zone de joint soudé de l'éprouvette sollicitée en traction à 20°C. Ce coefficient correspond ici à la valeur absolue du rapport de la déformation dans la largeur de l'éprouvette ϵ_{11} par la déformation axiale ϵ_{22} .

La valeur de ce coefficient pour chaque zone et à une contrainte de 660 MPa, un peu avant la contrainte maximale, est présentée sur le graphique de la Figure 4-74. Pour chaque zone sont également indiquées les valeurs maximales et minimales afin d'évaluer les incertitudes apportées par la mesure.

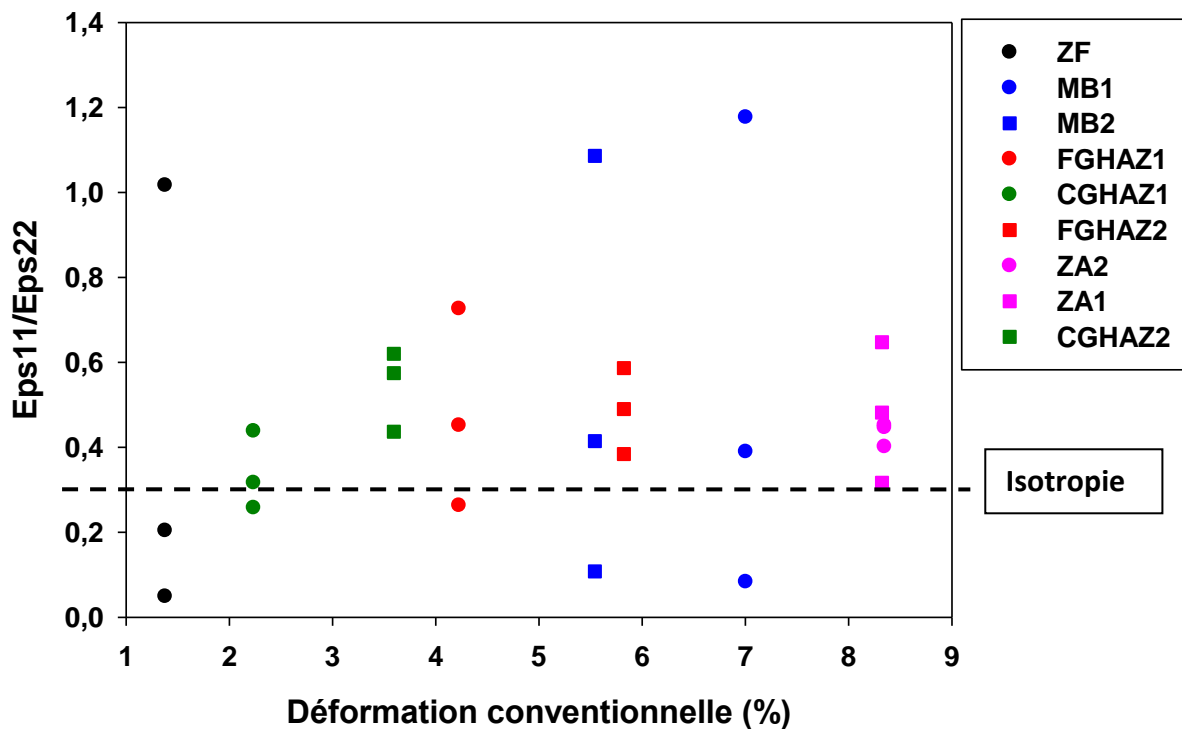


Figure 4-74 : évolution du coefficient d'anisotropie en fonction de la déformation conventionnelle, pour chaque zone du joint soudé de l'éprouvette sollicitée en traction à 20°C.

A ce niveau de contrainte, les coefficients d'anisotropie ont une valeur moyenne proche de 0,5, ce qui correspond à la valeur attendue pour un matériau isotrope et au cours d'une déformation plastique.

La valeur moyenne du coefficient en zone fondue est plus élevée, d'environ 0,2. Néanmoins, cette valeur est à relativiser compte-tenu des incertitudes liées à la mesure.

L'anisotropie du comportement en traction de la zone fondue n'est pas décelée dans cette étude. Les analyses ont été faites sur des éprouvettes sollicitées à des vitesses de déformation élevées. Au cours de tels essais, la déformation de la zone fondue est faible. Des examens de la zone fondue sollicitée à des vitesses de déformation plus faibles ou à des niveaux de chargement en fluage plus bas, doivent être réalisés afin d'évaluer l'anisotropie dans ces conditions particulières.

4.3.5 Modélisation du comportement en fluage de la zone fondue

L'objectif de cette partie est de déterminer le comportement en fluage à 550 °C de la zone fondue du joint soudé en acier Grade 92. Ce modèle sera ensuite utilisé pour réaliser des simulations par éléments finis du comportement en fluage du joint soudé complet.

4.3.5.1 Modèle de comportement en fluage

Le modèle utilisé est identique au modèle de comportement déterminé pour le métal de base et présenté précédemment dans le paragraphe 2.4.1. Les paramètres du modèle de comportement de la zone fondue sont optimisés à l'aide des courbes de fluage expérimentales provenant des essais sur éprouvettes entaillées en zone fondue. Seuls les deux essais terminés ont été exploités pour réaliser l'optimisation. Les deux autres essais ont néanmoins été simulés car ils sont plus représentatifs (en termes de contraintes) des essais réalisés sur joint complet.

4.3.5.2 Procédure de calculs par éléments finis

Le modèle a été implémenté dans le logiciel de calculs par éléments finis ZeBuLon (Besson and Foerch, 1997).

Les caractéristiques du maillage sont identiques à celles du maillage utilisé pour le dimensionnement des éprouvettes entaillées et décrites dans le chapitre 4.1.1. La taille de maille est considérée comme suffisamment fine pour décrire précisément les champs de contrainte et de déformation, sans sensibilité au maillage.

Les éprouvettes sont axisymétriques et le matériau est considéré comme homogène et isotrope. Comme cela a été évoqué précédemment, les faciès des éprouvettes de fluage entaillées ont été observés. Ceux-ci sont de forme circulaire, ce qui justifie cette hypothèse d'isotropie du comportement du matériau. La simulation et l'optimisation ont été réalisées sur un modèle en 2 dimensions incluant les conditions de symétrie.

Le modèle par éléments finis de l'éprouvette entaillée en zone fondue est rappelé sur la Figure 4-75.

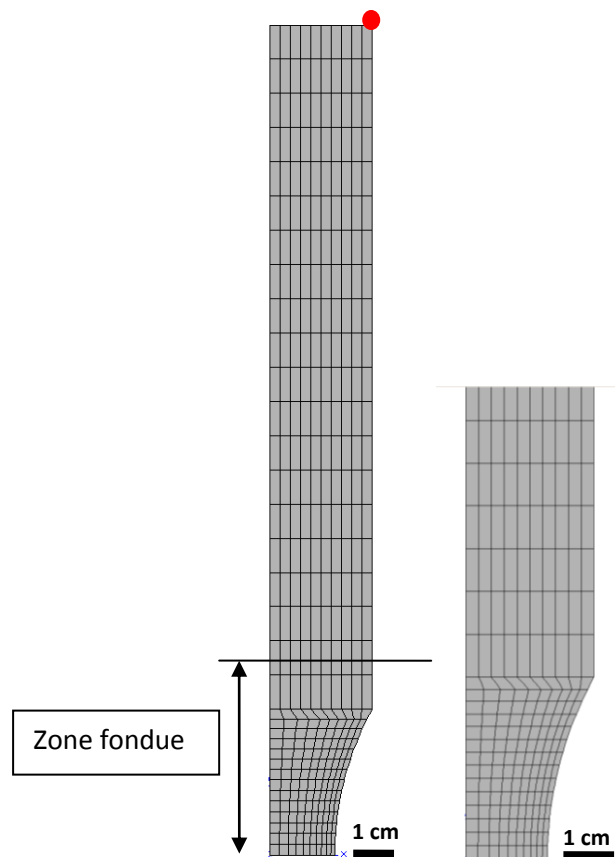


Figure 4-75 : modèle éléments finis de l'éprouvette entaillée en zone fondue. A droite, vue rapprochée de la zone proche de l'entaille.

La force a été appliquée au nœud situé sur la face supérieure de l'éprouvette et à l'extrémité (point rouge). Le modèle impose à tous les nœuds de la face supérieure un déplacement identique à celui auquel la force est appliquée.

4.3.5.3 Identification des paramètres des équations constitutives

Les paramètres du modèle ont été identifiés par comparaison avec les courbes de fluage expérimentales des essais sur éprouvettes entaillées en zone fondue. Pour la procédure d'optimisation, la pré-charge en fluage des courbes simulées a été retirée.

Ne disposant que de deux essais menés à rupture, pour un grand nombre de paramètres à optimiser, nous considérons que le mécanisme de déformation en fluage à 550 °C est identique à celui intervenant pour le métal de base. Ainsi, la valeur de n est conservée et est imposée à 13,75.

Les paramètres à optimiser sont donc Q_{Hs} , K_{Hs} et b .

Les paramètres du modèle finalement obtenus sont présentés dans le Tableau 4-16.

Propriétés élastiques	E (GPa)	130
	ν	0,3
Ecrouissage viscoplastique	R_{0Hs} (MPa)	0,001
	Q_{Hs} (MPa)	176
	b	288
Écoulement viscoplastique	K_{Hs} (h^{-1})	$6,19 \cdot 10^{-3}$
	n_{Hs}	13,75
	σ_{Hs} (MPa)	150

Tableau 4-16 : paramètres du modèle de comportement en fluage à 550 °C de la zone fondue du joint soudé en acier Grade 92.

4.3.5.4 Résultats des simulations

Les résultats des simulations sont comparés aux courbes de fluage expérimentales sur éprouvette entaillée en zone fondue (Figure 4-76 à Figure 4-79).

Pour le premier essai long-terme, à 250 MPa (Figure 4-76), le stade primaire est bien décrit. Pour le second essai long-terme (Figure 4-77), on constate que le stade primaire sature un peu plus tard. Néanmoins, il est difficile de conclure quant à la qualité du modèle, à partir de ces essais non terminés.

Les courbes des deux essais de fluage très court terme, dont les éprouvettes ont été sollicitées à des niveaux de contrainte nette relativement élevés (315 MPa et 325 MPa) (Figure 4-78 et Figure 4-79), sont correctement décrites par les simulations. Les stades primaires et secondaires des deux essais sont bien représentés. Les vitesses de fluage secondaire sont comparables. Les temps à rupture sont néanmoins sous-estimés. Ce constat est lié à un compromis fait au préalable concernant les paramètres du modèle et son aptitude à représenter l'écoulement ou le temps à rupture. Il a été choisi de représenter correctement l'écoulement en fluage au détriment du temps à rupture, puisque les éprouvettes en joint soudé n'ont pas présenté d'instabilité viscoplastique au niveau de la zone fondue.

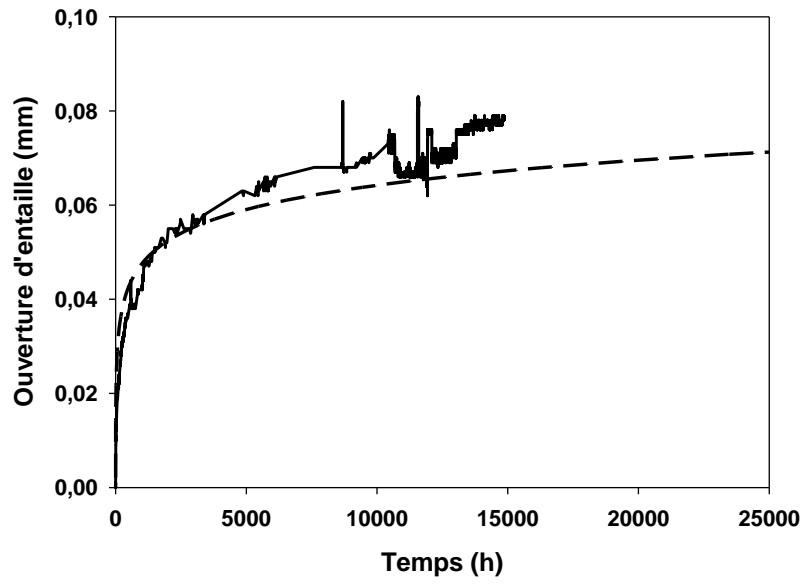


Figure 4-76 : courbe de fluage expérimentale (en trait plein) et courbe simulée (en pointillée) de l'essai à 250 MPa.

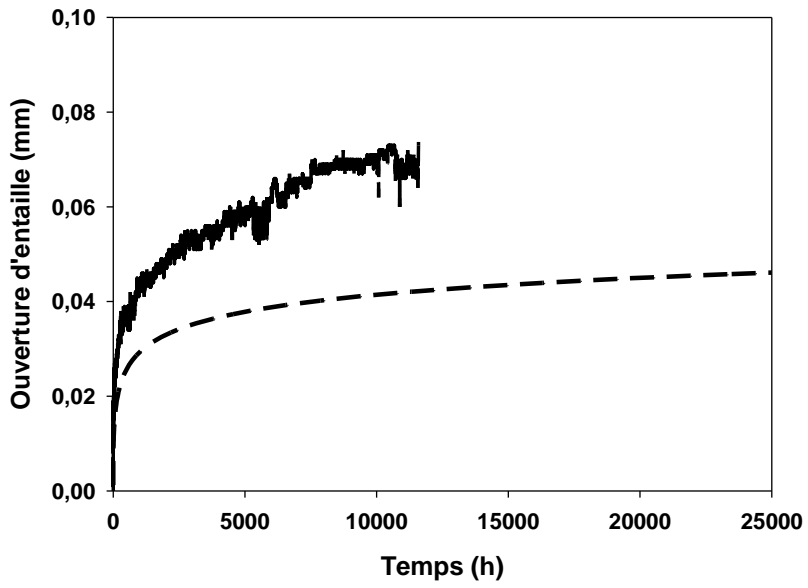


Figure 4-77 : courbe de fluage expérimentale (en trait plein) et courbe simulée (en pointillée) de l'essai à 215 MPa.

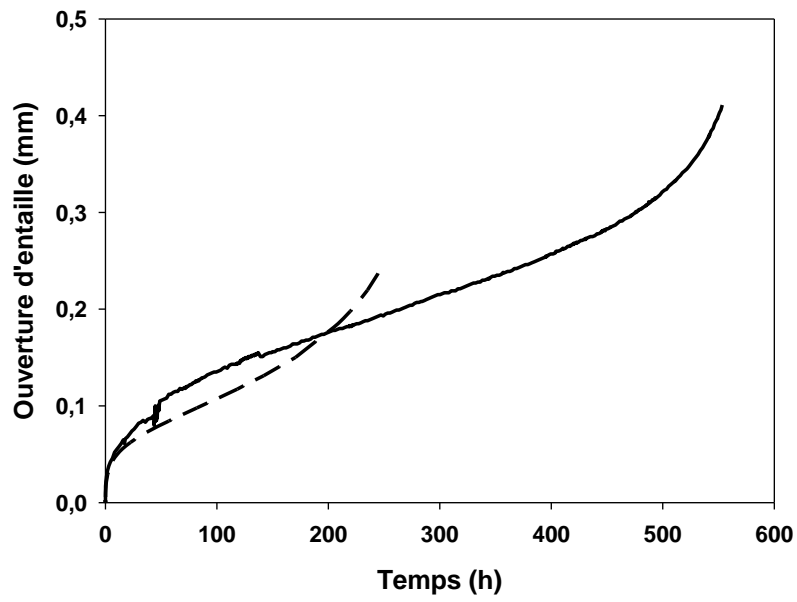


Figure 4-78 : courbe de fluage expérimentale (en trait plein) et courbe simulée (en pointillée) de l'essai à 315 MPa.

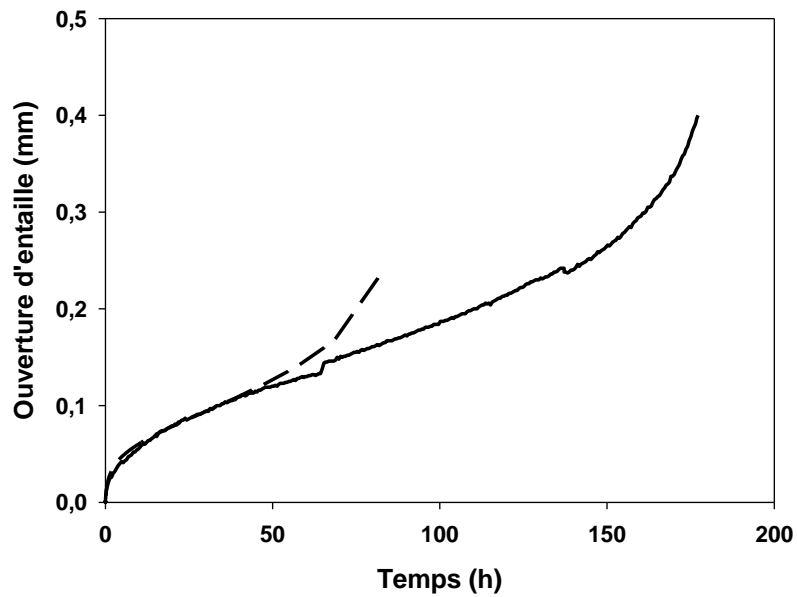


Figure 4-79 : courbe de fluage expérimentale (en trait plein) et courbe simulée (en pointillée) de l'essai à 325 MPa.

La Figure 4-80 compare les durées de vie des éprouvettes réelles avec la prédiction du modèle. Aux niveaux de contraintes élevés, les temps à rupture sont sous-estimés d'un facteur 3. A plus long terme, il est impossible de conclure sur les durées de vie prédites par le modèle.

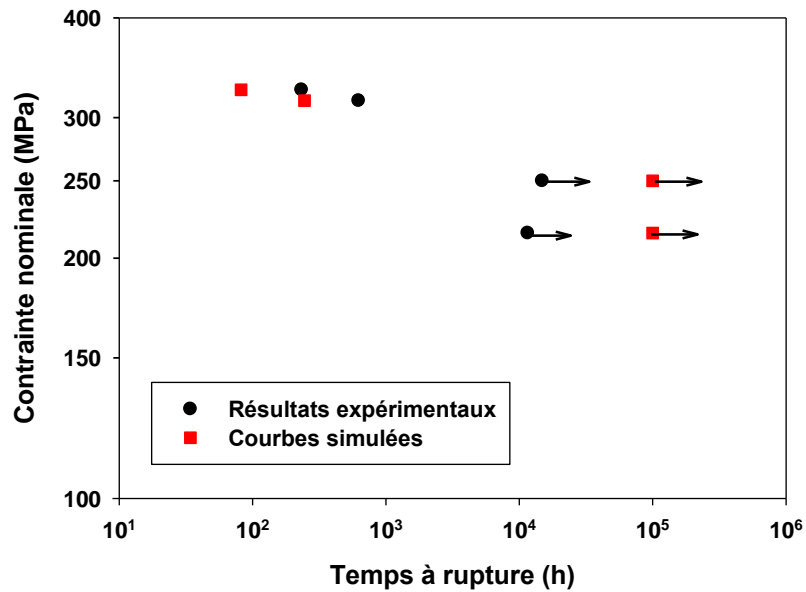


Figure 4-80 : données de fluage sur éprouvettes entaillées en zone fondue, comparées aux valeurs simulées.

La répartition des déformations viscoplastiques cumulées, ainsi que les champs de contraintes axiales et de von Mises dans l'éprouvette entaillée sollicitée avec la contrainte la plus élevée (325 MPa), sont présentées respectivement sur la Figure 4-81, la Figure 4-82 et la Figure 4-83. Les cartographies sont obtenues en milieu du stade secondaire de l'essai, à 57h.

D'après la Figure 4-81, on constate que les déformations viscoplastiques sont localisées au sein de la zone entaillée. En particulier, elles se concentrent au centre de l'éprouvette, au niveau de la section minimale.

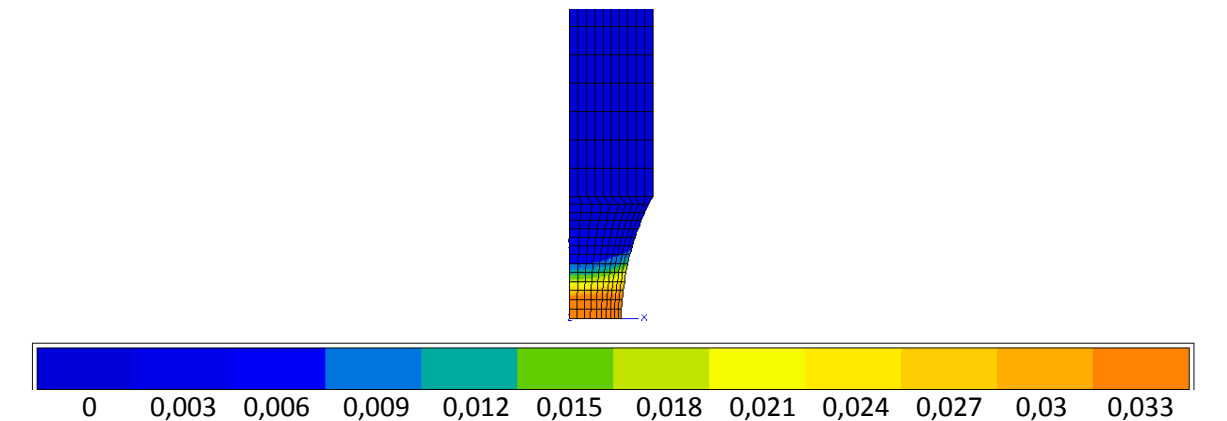


Figure 4-81 : répartition des déformations viscoplastiques cumulées dans l'éprouvette entaillée sollicitée à 325 MPa, à 47 h d'essai.

Les contraintes axiales se répartissent au niveau de la section entaillée et sont maximales au niveau de l'axe de l'éprouvette. Elles atteignent des valeurs proches de 400 MPa.

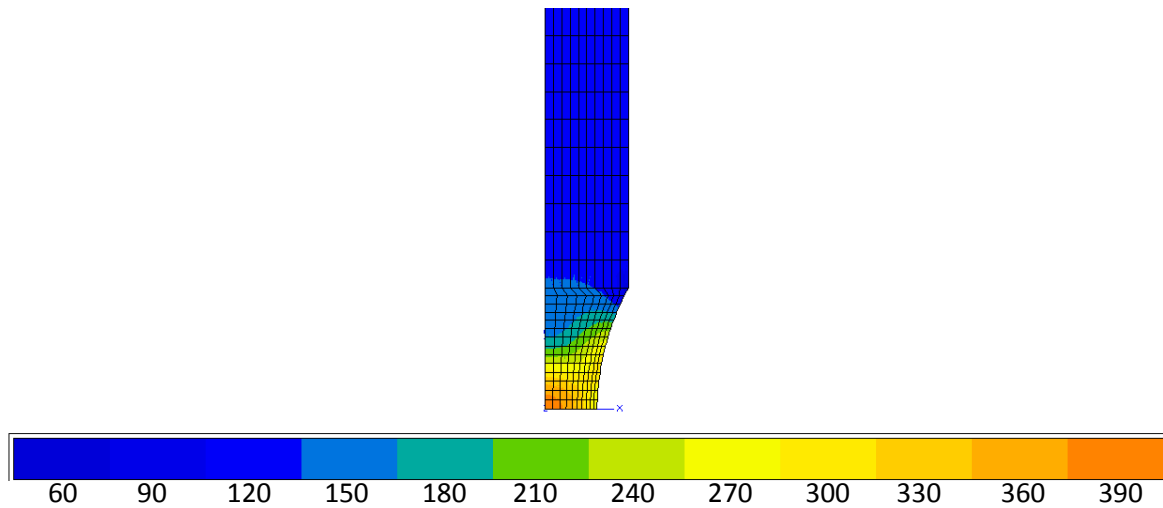


Figure 4-82 : champs de contraintes axiales dans l'éprouvette entaillée sollicitée à 325 MPa, à 40h d'essai.

Les contraintes de von Mises sont constantes près de la section minimale de l'entaille. Les valeurs atteintes sont de l'ordre de 285 MPa.

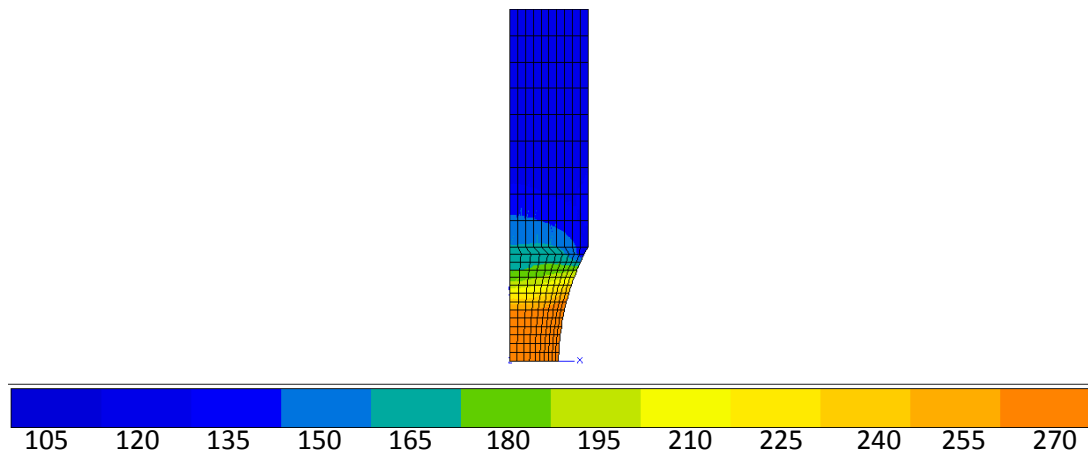


Figure 4-83 : champs de contraintes de von Mises dans l'éprouvette entaillée sollicitée à 325 MPa, à 40h d'essai.

La Figure 4-84 présente une cartographie de répartition du taux de triaxialité des contraintes dans l'éprouvette entaillée en zone fondue sollicitée à 325 MPa, en fin de stade secondaire. La Figure 4-85 présente l'évolution du taux de triaxialité des contraintes le long du demi-axe de l'ensemble des éprouvettes entaillées en zone fondue.

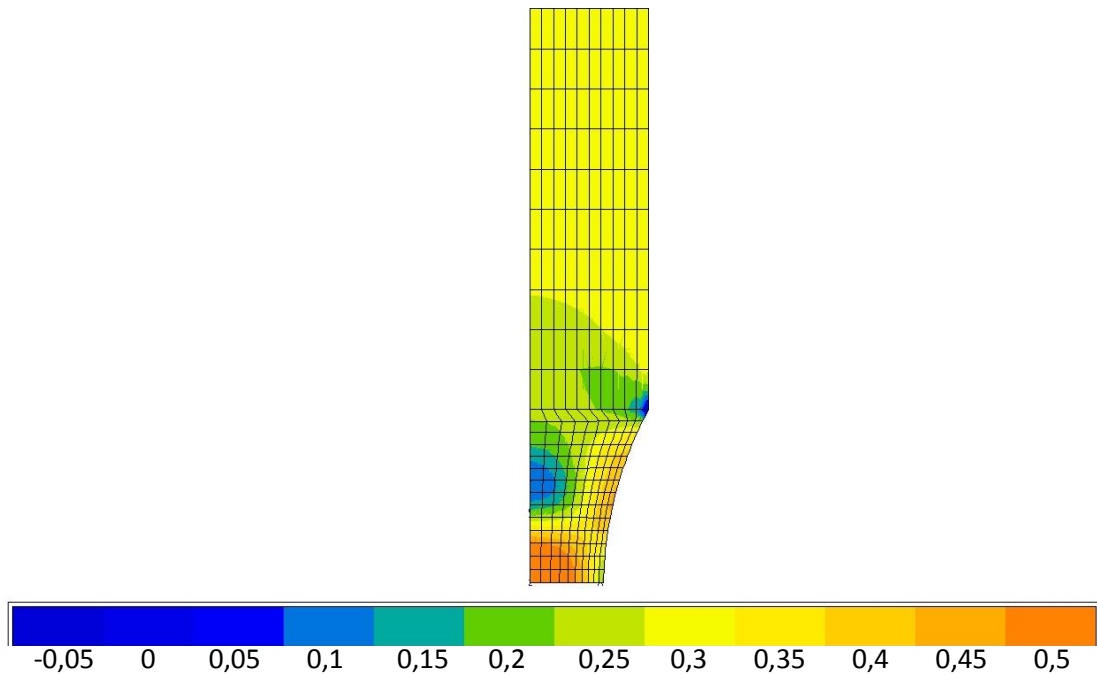


Figure 4-84 : répartition du taux de triaxialité des contraintes en fin de stade secondaire, dans l'éprouvette entaillée en zone fondue sollicitée à 325 MPa.

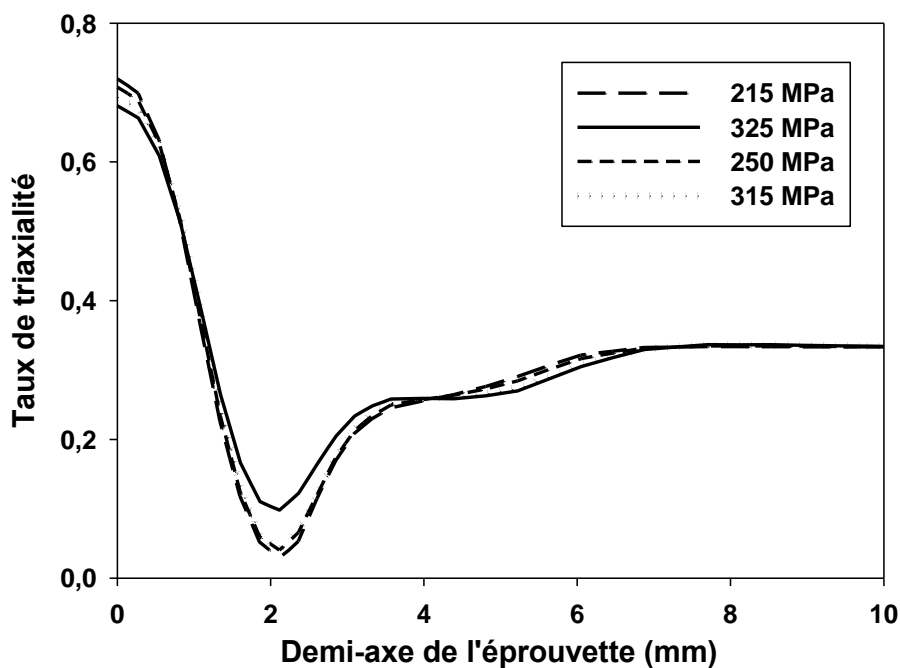


Figure 4-85 : évolution du taux de triaxialité le long de l'axe de l'ensemble des éprouvettes entaillées en zone fondue, en fin de secondaire.

En fin de stade secondaire, pour chaque essai, le taux de triaxialité est maximal au niveau de l'axe dans la section minimale de l'entaille. La valeur atteinte est proche de 0,7.

4.3.5.5 Conclusion

Le modèle de comportement en fluage introduit dans la partie I est utilisé et ses paramètres ont été optimisés pour décrire le comportement en fluage de la zone fondue. Les résultats d'essais sur éprouvettes entaillées en zone fondue ont été utilisés pour réaliser l'optimisation.

Les simulations décrivent le comportement en fluage de la zone fondue de manière satisfaisante même si les durées de vie prédites par la simulation sont sous-estimées aux niveaux de contraintes étudiés.