

Etude du comportement en fluage de la zone adoucie

Les géométries d'éprouvettes sont les mêmes pour les deux matériaux testés (zone adoucie réelle et microstructure de synthèse). Le dimensionnement des essais ainsi que les géométries des éprouvettes sont présentés dans le paragraphe 4.1. Les calculs préliminaires ont également permis de s'assurer que la zone déformée viscoplastiquement restait confinée entre les lèvres de l'entaille.

4.4.1 Résultats des essais de fluage sur éprouvette entaillée en zone adoucie réelle

Plusieurs essais de fluage ont été effectués, à des niveaux de contrainte nette variant de 335 à 390 MPa, ce qui correspond à des niveaux de contraintes de von Mises dans la section de l'entaille variant de 205 à 240 MPa, calculés avec le modèle de comportement de Panait, [Panait, 2010] (Partie 4.1.6). Les contraintes réellement atteintes ont été recalculées avec le modèle établi. Le Tableau 4-17 récapitule l'ensemble des essais de fluage menés sur éprouvettes entaillées en zone adoucie. Les contraintes réelles atteintes au niveau de l'entaille ont ensuite été recalculées.

L'évolution de l'ouverture de l'entaille en fonction du temps est présentée pour chaque essai sur la Figure 4-86.

Contrainte macroscopique (MPa)	Contrainte de von Mises visée (MPa) (loi de fluage de Panait [Panait, 2010])	Temps à rupture (h)
335	205	6186
350	215	2357
390	240	510
390	240	760

Tableau 4-17 : bilan des essais de fluage à 550 °C sur éprouvettes entaillées en zone adoucie réelle.

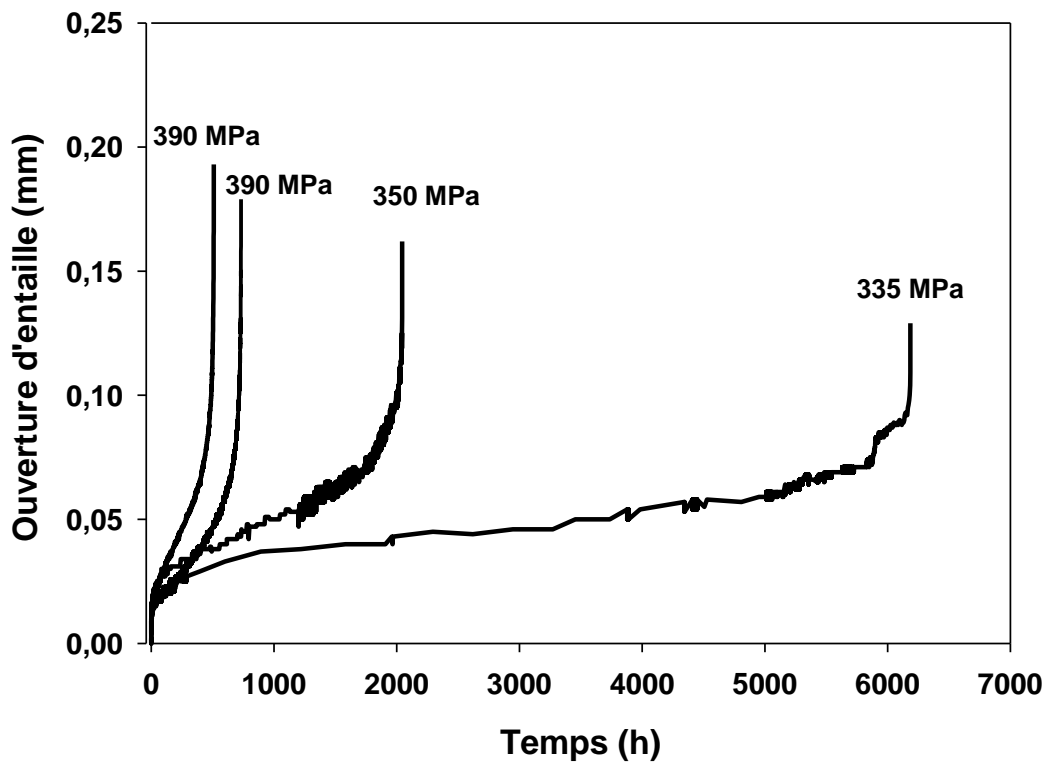


Figure 4-86 : courbes de fluage à 550 °C sur éprouvettes entaillées en zone adoucie réelle.

D'après ces courbes de fluage, le stade secondaire représente une fraction importante de la durée de l'essai. Ce constat est illustré sur la Figure 4-87, où sont tracées les évolutions des vitesses d'ouverture d'entaille en fonction du temps, pour chaque essai. La courbe de l'essai à 335 MPa présente un défaut d'acquisition.

Le stade tertiaire est relativement court, en particulier pour l'essai le plus long. Aucune fissuration intergranulaire n'a été détectée sur ce dernier.

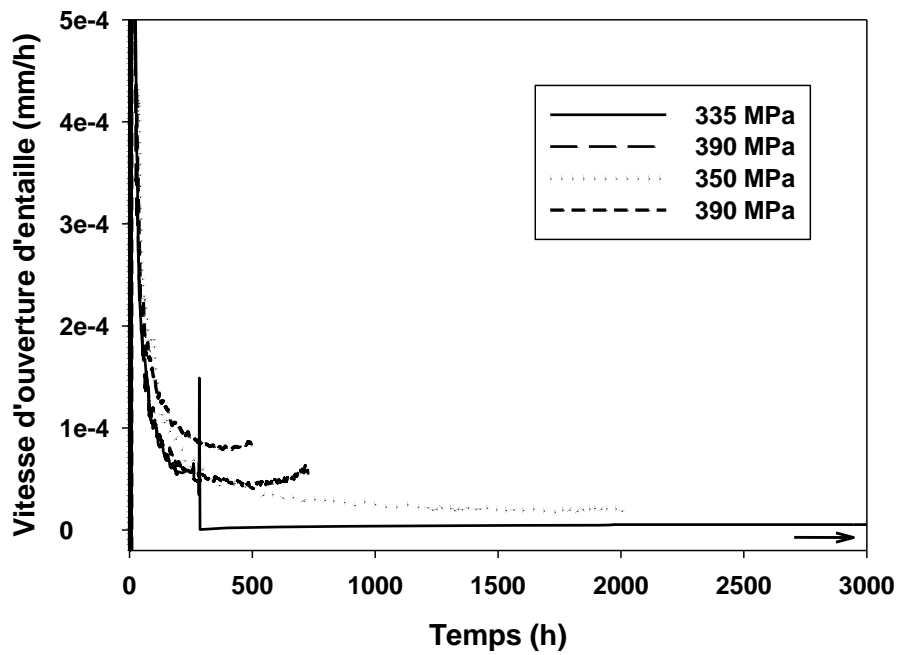


Figure 4-87 : évolution de la vitesse d'ouverture d'entaille en fonction du temps pour l'ensemble des éprouvettes entaillées en zone adoucies.

4.4.1.1 Expertise des éprouvettes

La Figure 4-88 présente une coupe longitudinale observée au MEB de l'éprouvette sollicitée au plus bas niveau de contrainte nette, 335 MPa, pendant plus de 6000h.

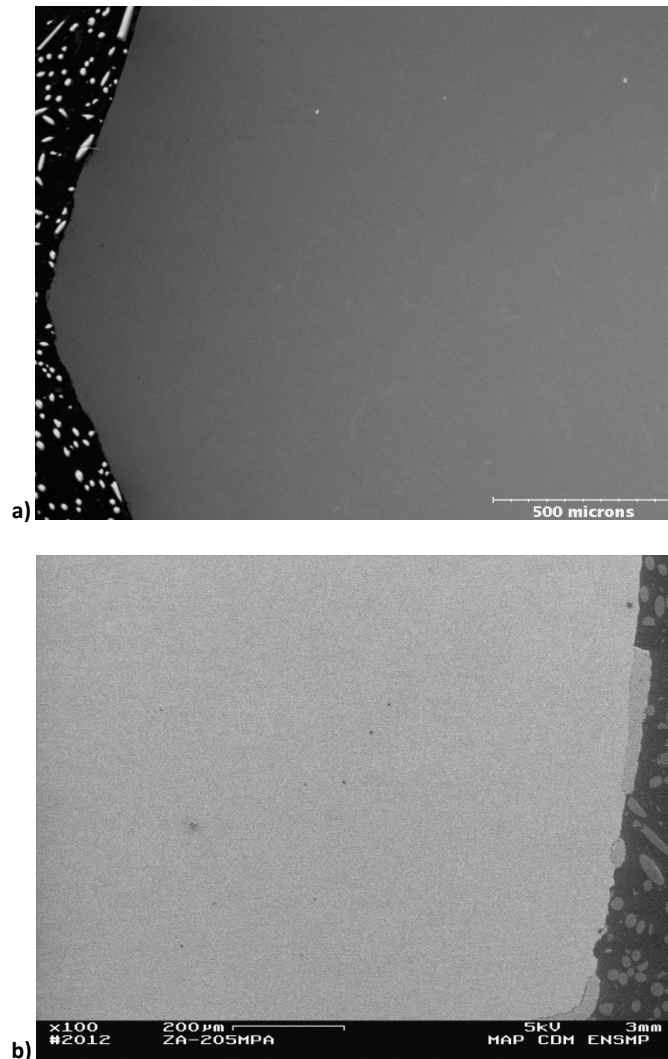


Figure 4-88 : micrographies réalisées au MEB d'une coupe longitudinale de l'éprouvette de fluage entaillée en zone adoucie, sollicitée sous une contrainte nette de 335 MPa (6186 h).

Les observations, faites jusqu'à un grandissement de 500, ne révèlent pas la présence d'endommagement. Seules quelques cavités sont observables au sein de la zone entaillée, près du faciès de rupture (Figure 4-88 b)). La présence de l'entaille n'a donc pas accéléré suffisamment l'endommagement pour faire apparaître les mécanismes attendus lors de la rupture à long-terme (cavités aux joints), du moins à fortes contraintes. Le fait que le stade tertiaire soit aussi court sur cette éprouvette pourrait provenir d'une forte instabilité viscoplastique ou d'une fissuration interne non détectée en coupe. Ce point reste cependant à vérifier. L'épaisseur de la couche d'oxyde au niveau du faciès a rendu difficile cet examen.

4.4.1.2 Résultats des essais de fluage sur éprouvettes en microstructure de la zone adoucie simulée

Les essais de fluage ont été réalisés sous des contraintes nettes choisies entre 335 MPa et 390 MPa, ce qui correspond à des contraintes de von Mises visées, dans la section entaillée, de 205 à 240 MPa, calculées avec la loi de Panait [Panait, 2010].

Contrainte macroscopique (MPa)	Contrainte de von Mises visée (MPa)	Temps à rupture (h)
335	205	6885 (interrompu)
350	215	6206 (interrompu)
350	215	5014 (interrompu)
375	230	910
390	240	760

Tableau 4-18 : bilan des essais de fluage à 550 °C sur éprouvettes entaillées en microstructure de synthèse.

Les trois essais à plus basses contraintes ont été interrompus. Ces essais étaient au stade secondaire de fluage et n'auraient pas donné lieu à rupture dans le temps imparti. Ils sont exploités en termes d'écoulement viscoplastique.

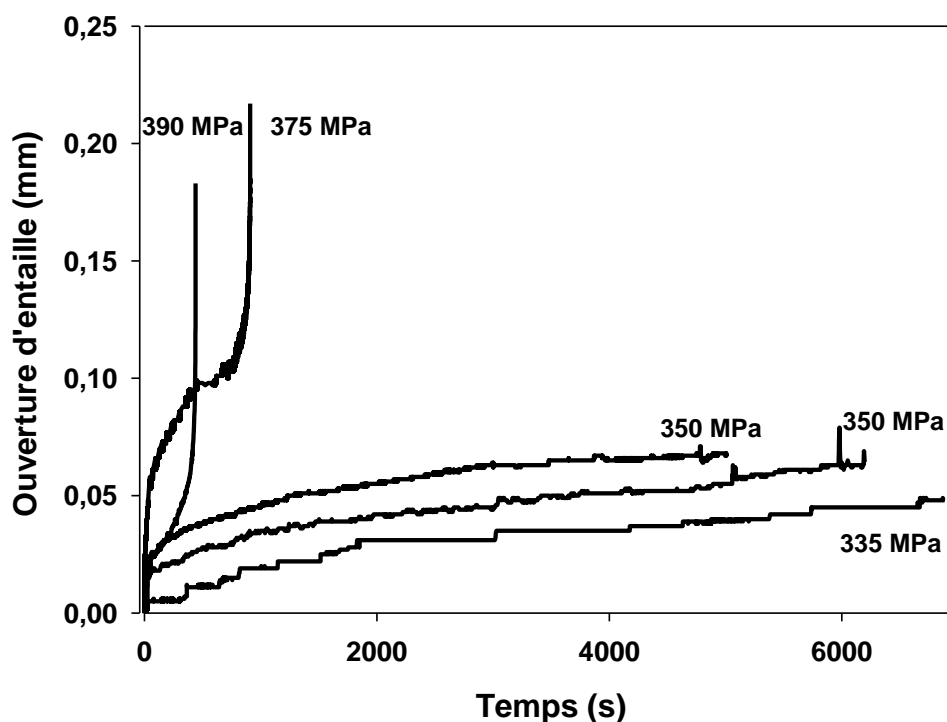


Figure 4-89 : courbes des essais de fluage à 550 °C sur des éprouvettes entaillées en microstructure de synthèse.

Le début de la courbe de l'essai à 390 MPa n'a pas pu être relevé en raison d'un problème d'extensométrie. La courbe est donc artificiellement au-dessous de celle à 375 MPa.

4.4.2 Comparaison des résultats en fluage sur la zone adoucie réelle, sur la zone adoucie simulée et sur le joint complet

Les données de fluage à 550 °C sur les éprouvettes entaillées en zone adoucie réelle et simulée, sont comparées aux données des essais sur joints soudés, en contraintes nominales et en contraintes de von Mises, respectivement sur la Figure 4-90 et la Figure 4-91. Les contraintes de von Mises correspondent aux valeurs recalculées à partir du modèle présenté dans la partie suivante.

L'évolution des contraintes de von Mises et axiales le long de la section minimale de l'entaille calculées avec le modèle obtenu, est présentée en annexe 7.4.1.1. Ces profils sont comparés à ceux obtenus à l'aide de la loi de Panait [Panait, 2010] (Paragraphe 7.3).

Le Tableau 4-19 compare les valeurs des contraintes initiales visées et les valeurs recalculées.

Contraintes nominales (MPa)	Contraintes visées (MPa)	Contraintes recalculées (MPa)
335	205	204
350	215	213
390	240	235

Tableau 4-19 : contraintes de von Mises visées et contraintes recalculées.

Les contraintes de von Mises estimées à l'aide de la loi de fluage de Panait [Panait, 2010] sont proches des valeurs recalculées. Le dimensionnement est donc satisfaisant. Les valeurs de contraintes restent comparables à celles imposées au métal de base.

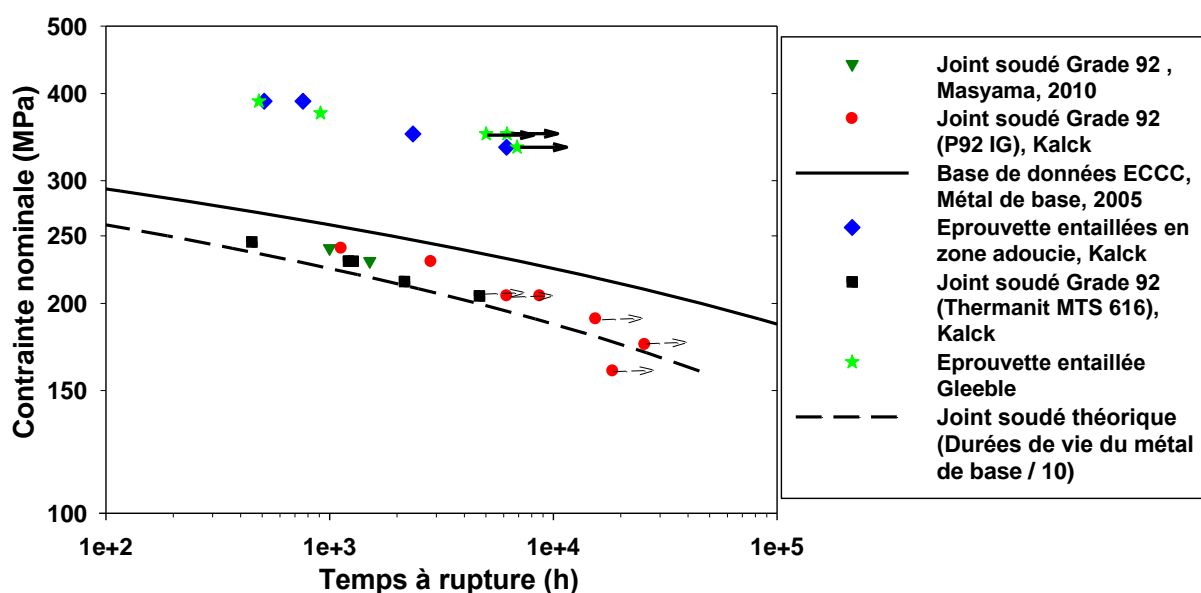


Figure 4-90 : courbes contrainte nette / temps à rupture pour la zone adoucie réelle, la zone adoucie de synthèse (« Gleeble »), le joint complet et le métal de base.

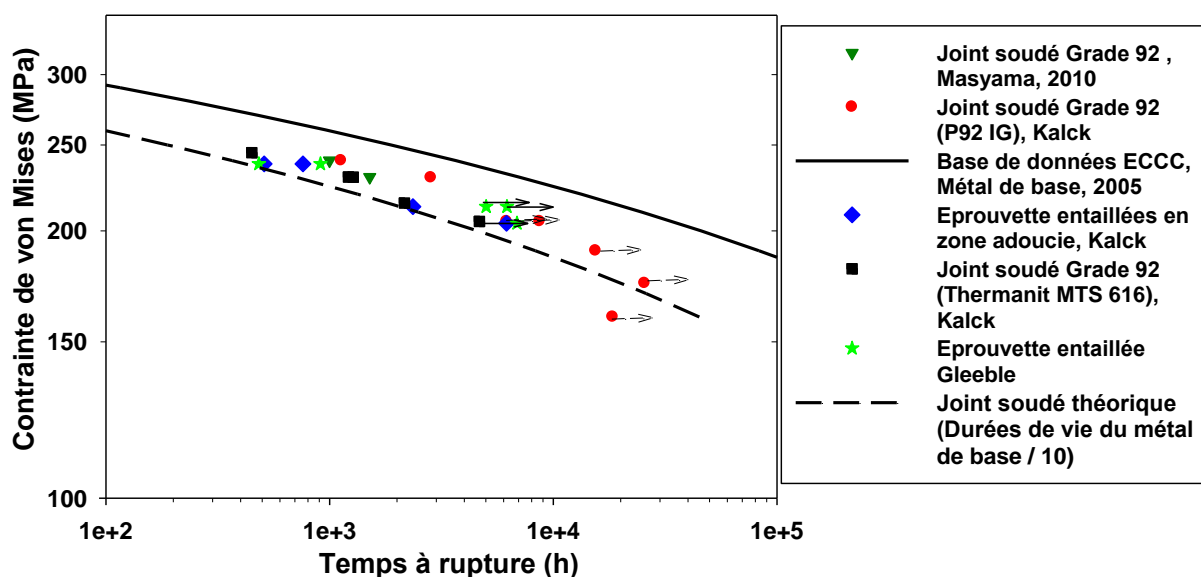


Figure 4-91 : courbes contrainte de von Mises (recalculée) / temps à rupture pour la zone adoucie réelle, la zone adoucie de synthèse (« Gleeble »), le joint complet et le métal de base.

A la plus forte contrainte de von Mises (240 MPa visée), les éprouvettes entaillées en zone adoucie ainsi que les éprouvettes en microstructure de synthèse, ont des durées de vie comparables aux éprouvettes prélevées dans le sens travers du joint soudé avec produit d'apport Thermanit. A ces niveaux de contraintes, le comportement en fluage du joint soudé semble gouverné par la zone adoucie réelle.

A 215 MPa, les temps à rupture du joint soudé et de l'éprouvette entaillée en zone adoucie sont proches. Néanmoins, les éprouvettes en microstructure de synthèse ont une durée de vie plus élevée. Les durées de vie des éprouvettes non rompues sont actuellement deux à trois fois supérieures au temps à rupture de l'éprouvette entaillée en zone adoucie réelle.

A 205 MPa, l'essai sur éprouvette travers joint sollicitée à 205 MPa a été interrompu au cours du stade secondaire. A ce niveau de contrainte, les éprouvettes entaillées en microstructure simulée sont nettement plus résistantes en fluage que les éprouvettes entaillées en zone adoucie.

En outre, le graphique de la Figure 4-91 confirme que les durées de vie en fluage des éprouvettes lisses travers joint et entaillées en zone adoucie réelle sont comparables en termes de contraintes de von Mises.

4.4.2.1 Conclusion

Ces résultats d'essais de fluage sur les deux types d'éprouvettes indiquent que la zone adoucie de synthèse est une bonne reproduction de la zone adoucie réelle pour des niveaux de contraintes élevés. Néanmoins, ce constat n'est pas valable pour des contraintes plus faibles, pour des durées de vie supérieures à 5000h ou 6000h. La démarche n'est pas conservatrice sur le long-terme dans le cas du joint soudé de l'étude, testé à 550 °C.

Deux phénomènes peuvent être à l'origine de cet écart. D'une part, cela peut être lié à une mauvaise reproduction de la microstructure de la zone adoucie, et en particulier à la température de détensionnement plus élevée qui a été employée pour satisfaire au critère de dureté après PWHT. D'autre part, la faible résistance de la zone adoucie peut être liée à un effet de structure. En effet, la zone adoucie réelle est confinée entre deux zones différentes (la zone fondue et le métal de base) présentant une meilleure tenue en fluage. Ce confinement modifie la répartition des contraintes et des déformations dans la structure. La zone adoucie de synthèse possède un volume plus important que la zone adoucie réelle et est confinée entre deux zones de même microstructure, celle du métal de base, moins résistantes que la zone fondue. La zone adoucie simulée est donc probablement moins confinée que la zone adoucie réelle.

Les examens métallurgiques et les mesures de dureté ont préalablement permis de supposer la représentativité de la zone adoucie simulée. Afin de confirmer cette représentativité, les distributions de tailles de sous-grains et les densités de dislocations vont être évaluées.

Des calculs par éléments finis sont réalisés afin d'étudier les effets de structure. Ils sont présentés dans la dernière partie de ce mémoire.

4.4.3 Modélisation du comportement en fluage de la zone adoucie.

L'objectif de cette partie est de déterminer un modèle de comportement en fluage à 550 °C de la zone adoucie. D'après ce qui précède, ces éprouvettes sont en effet considérées comme plus représentatives du joint soudé que celles en zone adoucie de synthèse. Ce modèle sera ensuite utilisé pour réaliser des simulations par éléments finis du comportement en fluage du joint soudé complet.

4.4.3.1 Equations constitutives

Le modèle utilisé pour réaliser les simulations et l'optimisation est le même que celui utilisé pour décrire le comportement en fluage du métal de base et présenté dans la partie 2.4.1. Les paramètres du modèle sont optimisés à l'aide des courbes expérimentales des essais de fluage sur des éprouvettes entaillées en zone adoucie réelle. Les résultats des simulations sont ensuite comparés aux courbes provenant des essais sur éprouvettes en microstructure de synthèse.

4.4.3.2 Procédure de calcul par éléments finis

Les caractéristiques du maillage sont proches de celles du maillage utilisé pour le dimensionnement et présentés dans le chapitre 4.1.1, à l'exception du nombre d'éléments. Afin d'accélérer la procédure d'optimisation, la taille de la tête d'éprouvette a été réduite. Le maillage comporte 1473 nœuds. La partie autour de l'entaille a en revanche été laissée telle quelle, avec un maillage suffisamment fin pour que les champs de contraintes et de déformation ne dépendent pas significativement de la taille de maille.

Les éprouvettes sont axisymétriques et le matériau est considéré comme homogène et isotrope. La simulation et l'optimisation ont été réalisées sur un modèle en 2 dimensions incluant les conditions de symétrie.

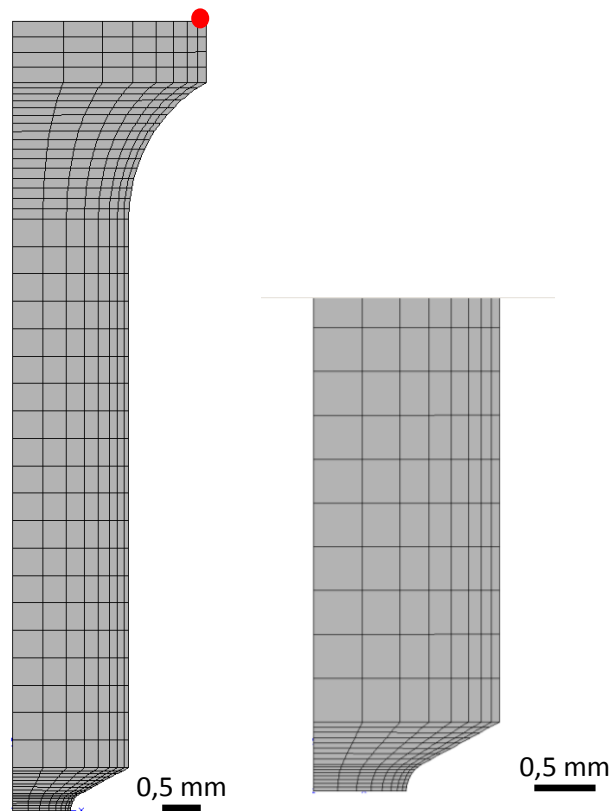


Figure 4-92 : modèle éléments finis de l'éprouvette entaillée en zone adoucie. A droite, vue rapprochée près de l'entaille.

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.

Le déplacement est mesuré au niveau de ce nœud, qui correspond à la position de l'extensomètre réel.

4.4.3.3 Procédure d'identification

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

Nous considérons que pour les niveaux de contrainte considérés, 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 imposée à 13,75.

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

Les paramètres du modèle obtenus après l'optimisation, sont présentés dans le Tableau 4-20.

Propriétés élastiques	E (GPa)	150
	ν	0,3
Ecrouissage viscoplastique	R_{0Hs} (MPa)	0,001
	Q_{Hs} (MPa)	116
	b	425
Ecoulement viscoplastique	K_{Hs} (h^{-1})	$1,37 \cdot 10^{-2}$
	n_{Hs}	13,75
	σ_{Hs} (MPa)	150

Tableau 4-20 : paramètres du modèle de comportement en fluage à 550 °C de la zone adoucie du joint soudé en acier Grade 92.

4.4.3.4 Résultats des simulations

Les résultats des simulations sont présentés sur les Figure 4-93 à Figure 4-99. Les simulations sont comparées aux courbes de fluage expérimentales des éprouvettes entaillées en zone adoucie et des éprouvettes entaillées en microstructures de synthèse.

Pour les trois essais de fluage simulés, le temps à rupture est sous-estimé. En particulier, l'essai à plus forte contrainte (390 MPa) est très court (50h).

La durée de vie de l'essai simulé à 350 MPa est plus courte d'un facteur deux par rapport à la durée de vie de l'éprouvette entaillée en zone adoucie, ce qui est acceptable au vue des incertitudes expérimentales. Les déformations au stade primaire sont inférieures à celles de l'essai sur éprouvette entaillée en zone adoucie. Ce stade primaire est comparable à l'un des essais sur éprouvette en microstructure de synthèse.

La courbe de la simulation sur éprouvette sollicitée à 335 MPa, présente une vitesse d'ouverture minimale comparable à l'essai sur éprouvette entaillée en zone adoucie et à l'éprouvette en microstructure de synthèse.

La sous-estimation systématique des durées de vie en fluage par le modèle est probablement liée à la valeur du paramètre du modèle b . La valeur élevée de ce coefficient est à l'origine de la saturation rapide de la courbe pendant le stade primaire, et donc de l'apparition prématurée du stade tertiaire.

Une valeur élevée de b a cependant été choisie afin de privilégier la représentation de la vitesse de fluage minimale au détriment du temps à rupture.

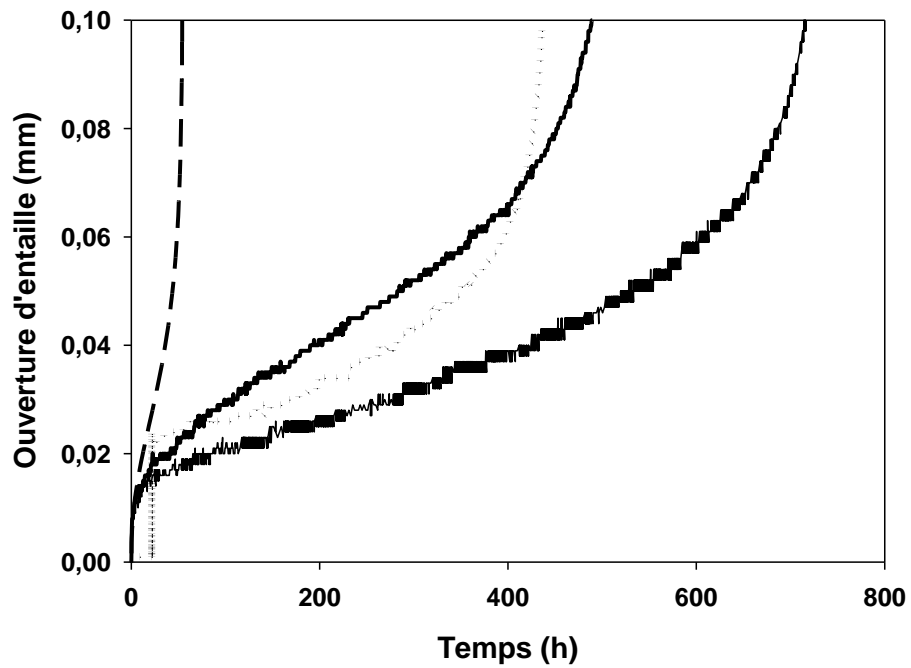


Figure 4-93 : courbes de fluage expérimentales (en trait plein : les essais sur éprouvettes entaillées en zone adoucie, en pointillé : l'essai sur éprouvette entaillée en microstructure de synthèse) et courbe de fluage simulée (tirets) de l'essai à 390 MPa (contrainte nette).

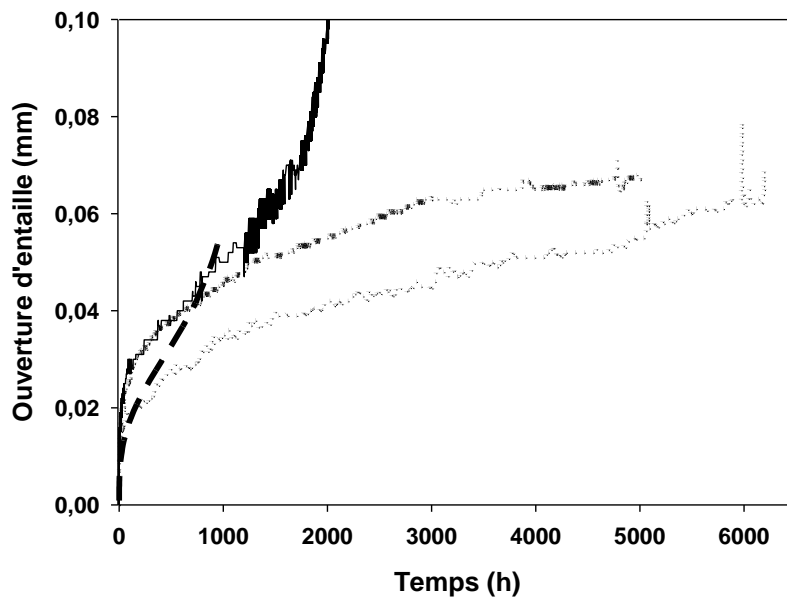


Figure 4-94 : courbes de fluage expérimentales (en trait plein : l'essai sur éprouvette entaillée en zone adoucie, en pointillé : les essais sur éprouvettes entaillées en microstructure de synthèse) et courbe de fluage simulée (tirets) de l'essai à 350 MPa (contrainte nette).

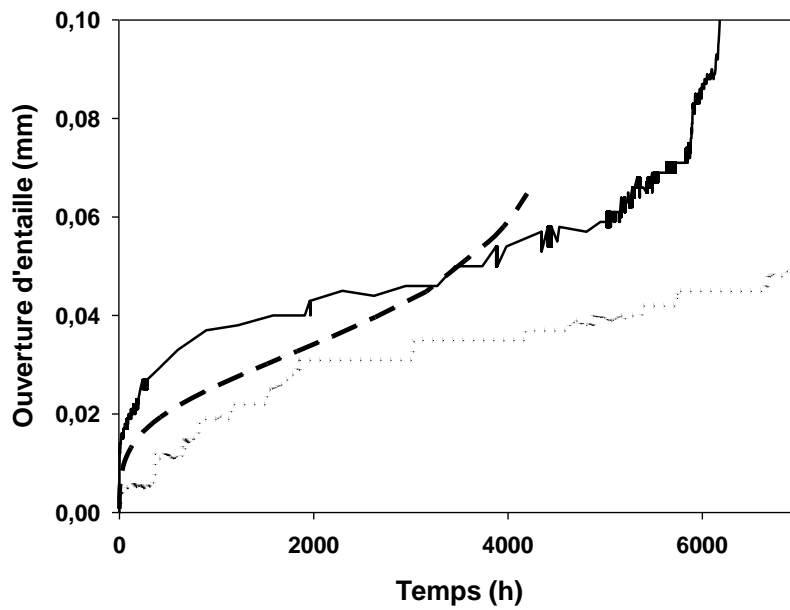


Figure 4-95 : courbes de fluage expérimentales (en trait plein : l'essai sur éprouvette entaillée en zone adoucie, en pointillé : l'essai sur éprouvette entaillée en microstructure de synthèse) et courbe de fluage simulée (tirets) de l'essai à 335 MPa (contrainte nette).

Les durées de vie de l'ensemble de ces essais sont comparées en fonction de la contrainte appliquée sur le graphique de la Figure 4-96. Les temps à rupture prédits par la simulation sont systématiquement sous-estimés. Par ailleurs, les durées de vie des éprouvettes entaillées en zone adoucie et des éprouvettes entaillées en microstructure de synthèse ne sont plus comparables pour des contraintes plus basses.

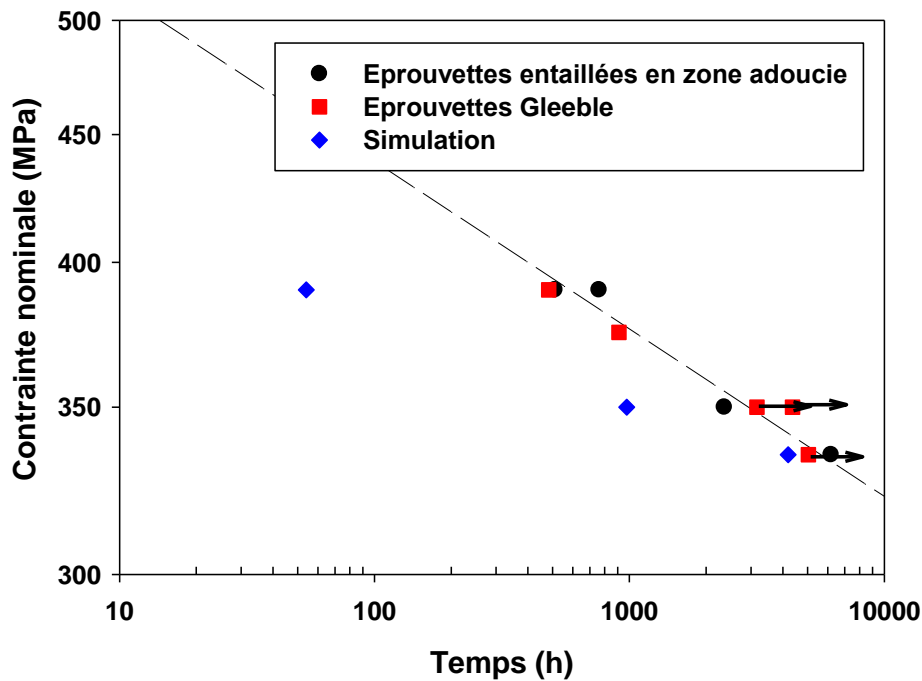


Figure 4-96 : données de fluage sur éprouvettes entaillées en zone adoucie réelle et simulée, comparées aux valeurs simulées.

Le modèle de comportement en fluage établi pour la zone adoucie n'est pas pleinement satisfaisant. L'écart entre les durées de vie réelles et prédites est au minimum d'un facteur 3. Ce modèle sera tout de même intégré dans la représentation du joint soudé complet.

L'interprétation d'essais de fluage sur éprouvettes entaillées n'est pas simple et directe puisque l'entaille introduit un état de contraintes multiaxial au sein de l'éprouvette.

La répartition des déformations viscoplastiques cumulées, des contraintes de von Mises et des contraintes axiales calculées en milieu du stade secondaire sur l'éprouvette entaillée sollicitée à 390 MPa (contrainte nette), sont présentées respectivement sur la Figure 4-97, la Figure 4-98 et la Figure 4-99.

Les déformations viscoplastiques sont localisées entre les lèvres de l'entaille et sont maximales à la pointe de l'entaille. La partie non entaillée de l'éprouvette n'est pas déformée viscoplastiquement.

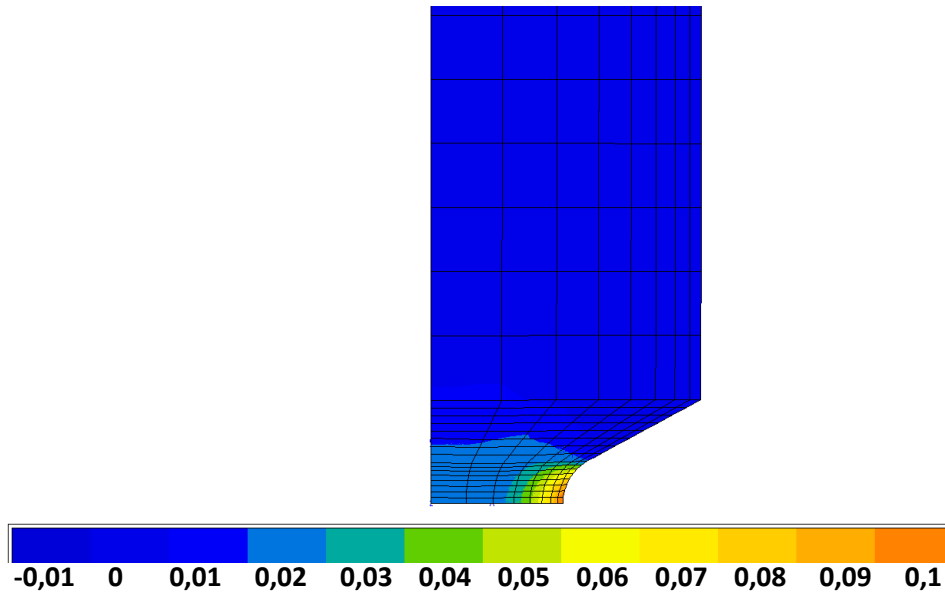


Figure 4-97 : répartition des déformations viscoplastiques cumulées dans l'éprouvette entaillée sollicitée à 390 MPa, au milieu du stade secondaire.

Les contraintes de von Mises sont maximales entre les bords de l'entaille et sont de l'ordre de 220 MPa à ce stade de l'essai. Les contraintes axiales sont maximales au droit de l'entaille, au niveau de l'axe de l'éprouvette. L'endommagement se développe en premier au niveau du maximum de contrainte axiale.

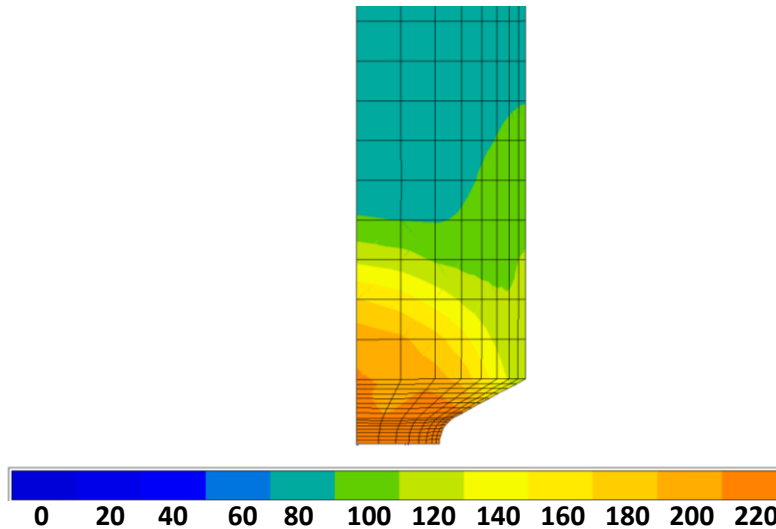


Figure 4-98 : champs de contraintes de von Mises (en MPa) dans l'éprouvette entaillée sollicitée à 390 MPa, au milieu du stade secondaire.

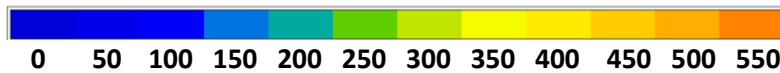
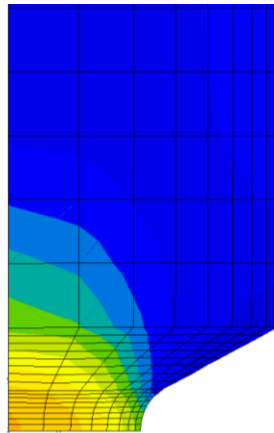


Figure 4-99 : champs de contraintes axiales (en MPa) dans l'éprouvette entaillée sollicitée à 390 MPa, au milieu du stade secondaire.

La Figure 4-100 présente une cartographie de répartition du taux de triaxialité des contraintes dans l'éprouvette entaillée en zone adoucie sollicitée à 390 MPa. La Figure 4-101 et la Figure 4-102 présentent l'évolution de la triaxialité des contraintes respectivement le long de la demi-section et le long du demi-axe de l'entaille, en fin du stade secondaire, pour l'essai à 390 MPa.

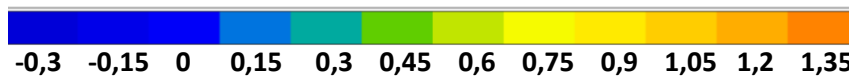
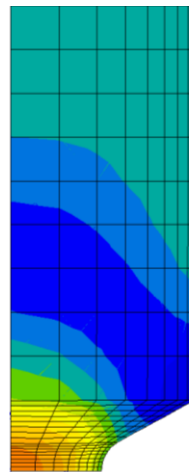


Figure 4-100 : évolution du taux de triaxialité des contraintes dans l'éprouvette entaillée sollicitée à 390 MPa, au milieu du stade secondaire.

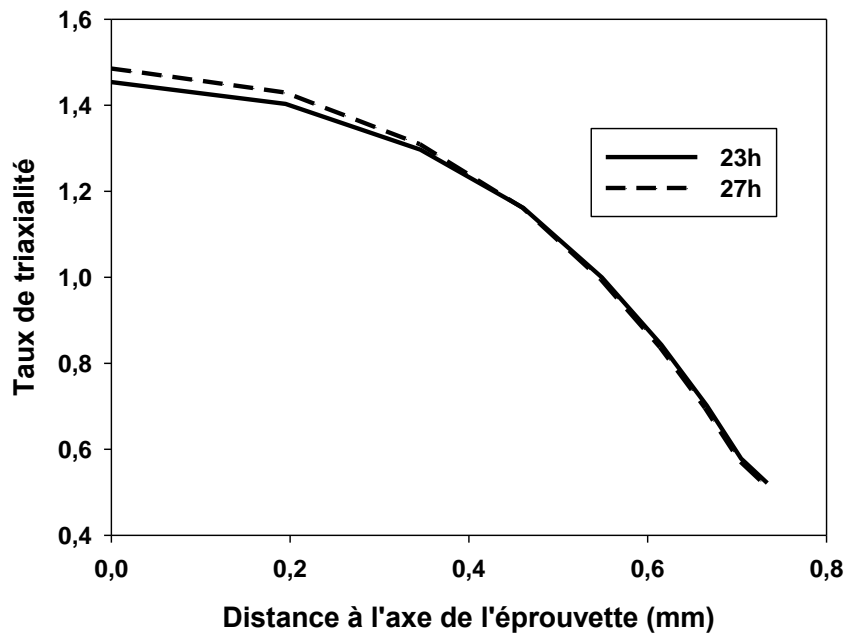


Figure 4-101 : évolution du taux de triaxialité le long de la section minimale de l'éprouvette.

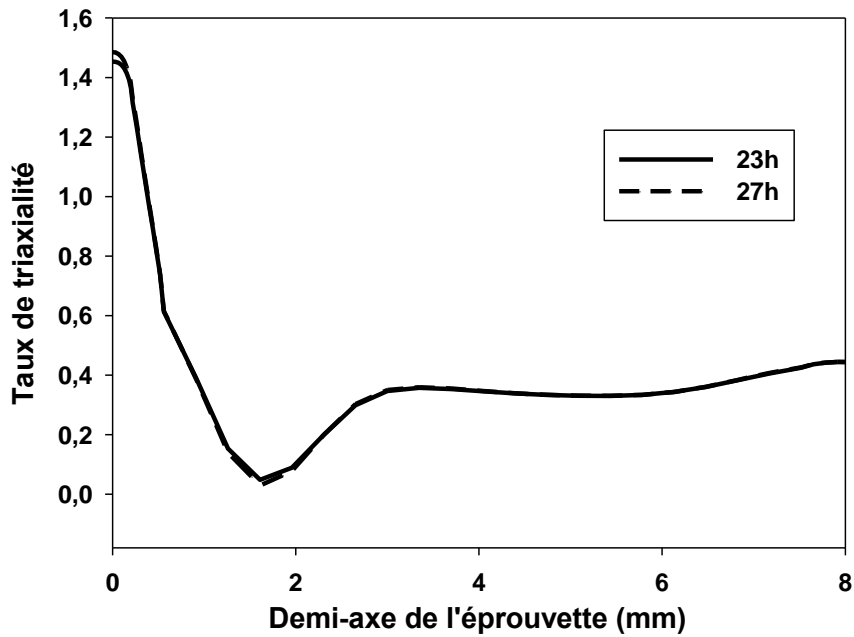


Figure 4-102 : évolution du taux de triaxialité le long de l'axe de l'éprouvette, en fin de stade secondaire. L'abscisse 0 correspond au droit de l'entaille.

Aux deux stades de l'essai considérés (23h et 27 h), les courbes de triaxialité sont confondues. Le taux de triaxialité atteint des valeurs maximales, de l'ordre de 1,4, au niveau de l'axe dans la section entaillée. En point d'entaille, il est de 0,5. La présence de l'entaille a donc fortement modifié l'état de contraintes dans la section minimale.

4.4.3.5 Conclusion

Le modèle de comportement en fluage introduit dans la partie I est utilisé pour reproduire le comportement en fluage de la zone adoucie. Les paramètres ont été optimisés à partir des résultats d'essais sur les éprouvettes entaillées en zone adoucie réelle.

Les durées de vie des éprouvettes prédites par les simulations sont sous-estimées par rapport aux durées de vie des éprouvettes entaillées en zone adoucie. Les paramètres ont été ajustés de manière à décrire correctement l'écoulement en fluage de la zone adoucie. Ce modèle de comportement en fluage de la zone adoucie à 550 °C établi n'est néanmoins pas pleinement satisfaisant mais sera intégré dans le modèle multi-matériaux du joint soudé complet. Une attention particulière devra être portée aux durées de vie du joint soudé prédites par les simulations.

Les paramètres des lois de comportement des trois zones considérées, le métal de base, la zone adoucie et la zone fondue, sont comparés dans le Tableau 4-21.

		Métal de base	Zone adoucie	Zone fondue
Propriétés élastiques	E (GPa)	130	130	130
	ν	0,3	0,3	0,3
Ecrouissage viscoplastique	R_{0H_s} (MPa)	0,001	0,001	0,001
	Q_{H_s} (MPa)	49,8	116	176
	b_1	336	425	288
Écoulement viscoplastique	$K_{H_s} (h^{-1})$	$8,33 \cdot 10^{-7}$	$1,37 \cdot 10^{-2}$	$6,19 \cdot 10^{-3}$
	n_{H_s}	13,75	13,75	13,75
	σ_{H_s} (MPa)	150	150	150

Tableau 4-21 : paramètres des modèles de comportement en fluage à 550 °C du métal de base, de la zone adoucie et de la zone fondue.

La contrainte interne Q_{H_s} la plus élevée est affectée à la zone fondue. Ce constat est cohérent avec la densité de dislocations élevée dans cette zone.

Le métal de base présente la contrainte interne la plus basse et inférieure à celle de la zone adoucie. Ceci n'est pas en accord avec les résultats expérimentaux mais cet effet est compensé par une valeur très basse de K_{H_s} .

La vitesse de déformation K_{H_s} pour une contrainte effective σ_{H_s} est la plus élevée pour la zone adoucie, ce qui en semble cohérent avec les résultats expérimentaux. La zone adoucie est la zone qui se déforme le plus vite en fluage.