Etude du comportement mécanique du joint soudé

4.2.1 Comportement mécanique en traction

Des essais de traction sur éprouvettes lisses prélevées dans le sens travers du joint soudé avec produit d'apport Thermanit MTS 616, ont été réalisés à 20°C et 550°C. Un dispositif de corrélation d'images a été utilisé afin d'évaluer les champs de déplacements et de déformations dans les différentes zones des joints soudés lors des essais. Un des objectifs de ces essais est d'analyser le comportement en traction de ce joint soudé à 550°C. En particulier, les différences de propriétés mécaniques entre les différentes zones du joint soudé sont examinées.

4.2.1.1 Dispositifs des essais

Les essais de traction avec corrélation d'images ont été réalisés à l'aide d'une machine de traction servohydraulique et d'un appareil photo Canon EOS 5D (Objectif MP-E 65mm) ou d'une caméra CCD 2 mega pixels (1600*1200).

Les essais ont été faits sur des éprouvettes plates, prélevées dans le sens travers du joint soudé Grade 92 et dans l'épaisseur du tube. Les éprouvettes sont de section rectangulaire de 6 mm par 8 mm (dans la partie utile) et de longueur utile 38 mm. Le plan des éprouvettes est donné sur le schéma de la Figure 4-23. Les plans d'éprouvettes sont repérés à l'aide des coordonnées (r, θ , z) du tube sur la Figure 4-23. Le plan de prélèvement est indiqué en annexe 7.7.



Figure 4-23 : plan des éprouvettes de traction. Les hachures correspondent à la position des ZAT.

La cellule de force utilisée a une capacité de 100 kN.

Les essais ont été réalisés à vitesse de déplacement du vérin constante valant 0,57 mm/min. La vitesse d'allongement relatif moyen de l'éprouvette imposée est de 2,5.10⁻⁴ s⁻¹.

Le déplacement du vérin est mesuré et enregistré en continu par un capteur LVDT placé sur le vérin.

Trois essais ont été réalisés, un essai à 20°C et deux essais à 550°C.

Les deux essais à 550 °C ont été effectués dans une enceinte climatique sous air. Le mode de chauffage est résistif. Une fois la température comprise dans un intervalle de +/- 1,5°C de la

température de consigne et stabilisée pendant environ 30 minutes, l'essai est lancé. La température de l'éprouvette est mesurée à l'aide d'un thermocouple positionné au milieu de l'éprouvette, en contact avec la surface. La précision de la mesure est de +/- 3°C. La cellule de charge est située à l'extérieur de l'enceinte. La Figure 4-24 présente le dispositif des essais à 550 °C. L'enceinte comporte un hublot à travers duquel la caméra prend les images de l'éprouvette à différents stades de l'essai. Deux lampes (de couleur bleu sur la Figure 4-24) sont orientées vers la zone utile de l'éprouvette.





4.2.1.2 Analyse du champ de déplacement par corrélation d'images

Cette méthode permet d'obtenir le champ des déformations locales d'un objet au cours d'une sollicitation, à travers la mesure du champ des déplacements à la surface de l'éprouvette (2D).

4.2.1.2.1 Principe

La méthode est basée sur la comparaison de deux images. Deux configurations sont possibles. La comparaison peut être faite soit entre l'image à l'état initial et l'image à l'instant étudié (à un stade donné du chargement) soit entre deux images successives. Il s'agit de faire coïncider un même point sur les deux images et d'en déduire le déplacement de l'image à l'état déformé. On suppose en outre

qu'il existe une correspondance entre les déformations de l'image enregistrée et les déformations de la surface de l'éprouvette.

L'appariement point par point des deux images grâce à des algorithmes numériques, permet d'obtenir les champs de déplacements. Plus précisément, la méthode consiste à associer des points homologues en maximisant une fonction de corrélation entre les deux images enregistrées par une caméra [Doumalin, 2000].

La mise en application de cette méthode nécessite en premier lieu d'avoir une surface munie soit de plusieurs motifs aléatoires avec un contraste de niveau de gris important, soit d'une grille. La technique de la corrélation d'images a été mise en application par Hild et al. [Hild et al., 2002] et Périé et al. [Périé et al., 2009]. Ces derniers ont utilisé la méthode dans le but de déterminer des lois d'endommagement anisotropes sur des matériaux composites. L'ensemble de ces chercheurs ont utilisé un mouchetis aléatoire.

Bornert et al. [M. Bornert et al., 2009] et Touboul et al.[Touboul et al., 2011] ont également utilisé la méthode mais ont appliqué une grille sur la surface de l'éprouvette pour déterminer le champ de déplacements.

En second lieu, il est essentiel que les moyens d'observation et de numérisation soient positionnés parallèlement à la surface de l'éprouvette.

4.2.1.2.2 Dispositif expérimental

Pour cette étude, le motif a été choisi aléatoire. Un mouchetis parfaitement aléatoire permet d'obtenir une surface constituée d'éléments non répétitifs, répartis de manière isotrope et avec un contraste élevé [Lecompte et al., 2006]. La présence d'un grand nombre de détails répartis de manière hétérogène à la surface de l'éprouvette facilite l'appariement des points homologues entre l'image initiale et l'image déformée [Bornert, 2009].

Pour les trois essais, on observe l'une des deux grandes faces des éprouvettes.

Pour l'essai à 20°C, le mouchetis a été fait avec une peinture à l'eau (peinture basse température). La zone utile de l'éprouvette a dans un premier temps été recouverte d'une couche de peinture blanche. Un mouchetis de peinture noire a été déposé dans un deuxième temps (Figure 4-25).



Figure 4-25 : photographie du mouchetis à l'état initial, pour l'essai à 20°C.

Pour les essais à 550°C, les mouchetis ont été faits avec une peinture haute température. Un premier essai en température avec un mouchetis similaire à celui de l'essai à 20°C, a montré que la peinture blanche s'écaillait rapidement, dès le début de la localisation de la déformation. Une autre méthode a donc été utilisée. Un mouchetis de peinture blanche a été déposé directement sur la zone utile de l'éprouvette. Le contraste a été amélioré grâce à l'oxydation de l'éprouvette au niveau de la zone d'étude. Le mouchetis obtenu est observable sur la Figure 4-26. Celui-ci comporte des taches plus larges que le mouchetis de l'essai à 20°C. Cela est lié à la peinture utilisée, qui présente des caractéristiques différentes de la peinture basse température.



Figure 4-26 : photographie du mouchetis pour les essais à 550°C.

Pour l'essai à 20°C, les images sont prises à l'aide de l'appareil photo. Pour les essais à 550°C, les images sont réalisées à l'aide de la caméra CCD.

Le dispositif de corrélation d'images est également constitué d'une chaîne d'acquisition numérique et d'un système d'éclairage. Le système d'éclairage est constitué de deux lampes orientées vers la zone utile de l'éprouvette dans le four (Figure 4-24). L'une est positionnée sous le hublot mais dirigée vers la zone utile de l'éprouvette, la seconde est située au-dessus du hublot mais également orientée vers la zone utile de l'éprouvette. Cette configuration permet d'éviter les effets d'ombres sur la partie de l'éprouvette observée. La qualité des images faites pendant l'essai à chaud n'a pas été affectée par la présence de la vitre du four et par les effets de convection.

Les images sont directement transférées dans la mémoire de l'ordinateur. La taille des pixels est de 0,35 mm, pour les trois essais.

Il est primordial que la surface de l'éprouvette soit parfaitement éclairée et nette, afin d'obtenir ensuite une bonne résolution sur les déplacements et les déformations.

Pour l'essai à 20 °C et pour le premier essai à 550 °C, la zone utile de l'éprouvette étudiée est centrée sur l'image faite par la caméra. La caméra est fixe au cours de l'essai. Il est donc nécessaire que la première prise de vue prenne en compte la déformation moyenne future de l'éprouvette afin que l'intégralité de la zone étudiée soit observable à la fin de l'essai. Pour le second essai à 550°C, le grandissement est ajusté de manière à ce que l'image ne comporte qu'une portion de la zone utile de l'éprouvette : la zone qui se sera le plus déformée lors de l'essai 1. Ce second essai permettra de compléter les résultats obtenus avec l'essai 1. Les mesures obtenues sur les zones observées seront plus précises.

Au cours de l'essai de traction, la caméra effectue des photographies successives dont une à l'état initial, qui sera considérée ensuite comme l'image de référence. Chaque photographie correspond à

une image de la surface à un instant de l'essai. La caméra prend une image toutes les 5 secondes, ce qui correspond à environ 125 images pour un allongement relatif de 0,5%.

4.2.1.3 Détermination du champ de déplacement et de déformation

Le logiciel de corrélation d'images utilisé est le logiciel CorrelManuV [M. Bornert, 2009].

La procédure se décompose en trois étapes :

- ✓ Définition de la zone d'étude (ROI « Region of Interest ») sur l'image de référence. Pour cette étude une zone de la partie utile de l'éprouvette, comprenant l'intégralité du joint soudé et une partie du métal de base, a été sélectionnée.
- ✓ Subdivision de cette zone en « imagettes » de forme carrée, appelées zones d'étude élémentaires (ZEE) ou zones d'intérêt (« Zones Of Interest », ZOI). L'ensemble des imagettes doivent recouvrir l'intégralité de la zone d'étude. Elles sont de l'ordre de quelques dixièmes de millimètres comportant de 4 à 16 pixels. Une ZOI doit comporter au moins un motif.
- Corrélation des ZOI, c'est-à-dire liaison de chaque ZOI de l'état initial à sa correspondante à l'état déformé.

La taille des ZOI est choisie en fonction de plusieurs critères, à savoir la taille des taches sur le mouchetis, ainsi que des gradients de déformation. Lecompte et al. [Lecompte et al., 2006] ont étudié l'influence de la taille moyenne des taches combinées à la taille des ZOI sur la précision des champs de déplacement et de déformation. Ils ont constaté que des mesures précises requièrent une taille de ZOI plutôt large. La Figure 4-27 présente, pour un champ de déformation hétérogène, les distributions de la différence entre les déplacements imposés et les déplacements mesurés par la corrélation d'image, pour différentes tailles de taches sur le mouchetis et différentes tailles de ZOI. Les distributions sont plus fines et centrées autour de la valeur nulle pour des tailles de ZOI plus larges. Néanmoins, les ZOI ne doivent pas être trop grandes pour ne pas dégrader la résolution spatiale et doivent tenir compte des gradients de déformation. En effet, dans le cas de gradients réel.



Figure 4-27 : distributions de la différence entre le déplacement imposé et le déplacement mesuré par la corrélation d'images, pour un champ de déformation hétérogène, en fonction de la taille des ZOI (« subsets ») et la tailles des taches du mouchetis (« speckles ») [Lecompte et al., 2006].

Pour cette étude, afin d'évaluer les déplacements et ainsi les déformations locales, les carrés de dimensions égales (les ZOI), ont été définis au moyen du logiciel CorrelManuV [M. Bornert, 2009].

Au cours de la dernière étape, le logiciel tente d'évaluer le déplacement de la ZOI transformée en cherchant, sur l'image au stade de l'essai étudié, le motif qui ressemble le plus au motif de la ZOI de l'image de référence. Le déplacement d'une ZOI entre les deux états correspond à un décalage spatial de l'intensité du signal numérisé par la caméra CCD. La corrélation est donc effectuée entre une image non déformée qui correspond à l'état initial et la succession d'images déformées à chaque instant. La corrélation peut également être faite entre deux images déformées à deux instants successifs. Cette technique a également été utilisée à un certain stade de l'essai 2 et sera illustrée par la suite.

Les ZOI sont repérées par les coordonnées de leur point central. Le champ de déplacement sur la région d'étude est déterminé en évaluant le déplacement de l'ensemble des centres de chaque ZOI. Dans le cas de CorrelManuV, la ZOI sur l'image déformée conserve sa forme initiale. Les déplacements de ces ZOI sont mesurés à chaque instant afin de fournir les champs de déplacements et de déformations finaux.

Les données obtenues sont post-traitées à l'aide d'un programme développé sous Matlab.

Ce post traitement fournit l'évolution des déformations moyennes par ligne et à chaque instant, ainsi que les courbes locales. Une ligne désigne un alignement horizontal de ZOI sur la largeur de la zone utile de l'éprouvette.

4.2.1.4 Résultats des essais de traction

4.2.1.4.1 Courbes globales

Les courbes de la Figure 4-28 présentent l'évolution de la charge en fonction du déplacement de la traverse pour chaque essai. Les flèches indiquent le stade de l'essai auquel la corrélation d'images a été arrêtée. Les propriétés mécaniques sont indiquées dans le Tableau 4-2.



Figure 4-28 : courbe d'évolution de la charge en fonction de l'allongement de la traverse, pour chaque essai de traction (un essai à 20°C, deux essais à 550°C).

Les courbes issues des deux essais à 550°C sont très proches l'une de l'autre quasiment jusqu'à rupture. Il n'y pas de dispersion notable dans les valeurs caractéristiques des deux essais relevés dans le Tableau 4-2.

L'analyse par corrélation d'images n'a pas pu être menée jusqu'à rupture. En effet, au cours de l'essai, les déformations augmentent fortement, ce qui entraîne une dégradation du mouchetis et une modification du contraste.

Ces courbes de traction sont comparées avec des courbes issues d'essais de traction sur éprouvettes travers joint, réalisés par la Laboratoire des Techniques d'Assemblage (LTA) au CEA. Les essais sont réalisés sur les deux joints soudés à 20 °C et à 550 °C. Les éprouvettes sont cylindriques, de 4 mm de rayon et de 28 mm de longueur.

Les courbes sont présentées sur la Figure 4-29 et la Figure 4-30. Les données chiffrées sont rassemblées dans le Tableau 4-2.



Figure 4-29 : courbes de traction à 20 °C sur éprouvettes travers joint. Cl indique qu'il s'agit de l'essai sur lequel est réalisée la corrélation d'images.



Figure 4-30 : courbes de traction à 550 °C sur éprouvettes travers joint. Cl indique qu'il s'agit de l'essai sur lequel est réalisée la corrélation d'images.

Pour l'essai à 20 °C, les courbes provenant des essais sur le joint soudé avec produit d'apport Thermanit sont superposées. On constate une légère dispersion sur l'allongement à rupture. La soudure P92-IG a un allongement moyen à rupture significativement plus bas : cela peut venir soit d'une ductilité intrinsèque plus faible, soit d'une zone molle plus petite qui s'écrouit plus rapidement que la soudure Thermanit.

Les valeurs de striction mesurées (Tableau 4-2) ne sont pas significativement différentes. Les ductilités intrinsèques des deux zones sont donc proches.

A 550 °C, on constate l'influence de la vitesse de déformation sur les propriétés mécaniques du matériau. Les valeurs de limites d'élasticité et de contrainte maximale augmentent avec la vitesse de sollicitation. Sur la Figure 4-30, le décalage de la courbe rouge de l'essai sur joint soudé avec produit d'apport P92IG est dû à un déplacement de l'extensomètre lors de l'essai.

| Essais de traction | Température | Vitesse de | E (GPa) | Rp _{0,2} | Rm | Z |
|--------------------|-------------|-------------------------|---------|-------------------|-------|-----|
| | | déformation | | (MPa) | (MPa) | (%) |
| | | (s-1) | | | | |
| Avec corrélation | 20 °C | 2,5. 10 ⁻⁴ | 218 | 420 | 680 | - |
| d'images : Produit | 550 °C | 2,5. 10 ⁻⁴ | 130 | 250 | 390 | - |
| d'apport Thermanit | 550 °C | 2,5. 10 ⁻⁴ | 121 | 250 | 395 | - |
| LTA : Produit | 20 °C | 1,667. 10 ⁻³ | 210 | 656 | 689 | 70 |
| d'apport Thermanit | 550°C | 1,667. 10 ⁻³ | 163 | 300 | 429 | 78 |
| LTA : Produit | 20°C | 1,667. 10 ⁻³ | 240 | 506 | 686 | 70 |
| d'apport P92IG | 550°C | 1,667. 10 ⁻³ | 177 | 300 | 423 | 76 |

Tableau 4-2 : propriétés mécaniques en traction.

Le module d'Young est indépendant de la microstructure du matériau [Eggeler et al., 1994]. Ainsi, les valeurs de modules d'Young sont considérées comme similaires pour toutes les zones du joint soudé. Les valeurs mesurées sont cohérentes avec celles obtenues pour le métal de base, présentées dans la partie 2.3.1 (201 MPa à 20 °C et 130 MPa à 550 °C).

Ces données sont comparables avec les propriétés en traction évaluées par Vallourec [V&M, 2000]. A température ambiante, sur un joint soudé fabriqué par procédé TIG, la contrainte maximale avant rupture est de 580 MPa. Les Rp_{0,2} sont difficiles à comparer puisque les géométries des éprouvettes considérées sont différentes.

4.2.2 Délimitation des différentes zones du joint

L'attribution d'un comportement en traction à chacune des zones suppose d'avoir délimité celles-ci préalablement à l'essai. En l'absence d'une attaque métallographique avant dépôt du mouchetis, une méthode par mesures de dureté a été utilisée ici. La Figure 4-31 présente une macrographie du joint soudé initial. La surface du joint à été attaquée au réactif de Villela. Une filiation de dureté a été réalisée sur une ligne située au milieu du joint et est superposée à la macrographie. Cette figure permet de localiser les différentes zones du joint soudé.





Les largeurs des différentes zones du joint soudé ont été mesurées à l'aide des filiations de dureté et d'observations macrographiques et micrographiques. Trois filiations ont été réalisées, une à chaque quart d'épaisseur. Seule la filiation à mi-épaisseur est présentée sur la Figure 4-31.

Comme cela a été présenté ci-dessus, les éprouvettes ont été prélevées à mi-épaisseur du joint soudé. Cependant, la corrélation n'a pas été faite sur les mêmes surfaces des éprouvettes.



Figure 4-32 : prélèvement de l'éprouvette dans le joint soudé.

Pour l'essai à 20 °C, la corrélation a été faite sur la surface de l'éprouvette où le cordon de soudure est le plus large (Figure 4-32). La démarche utilisée pour positionner chaque zone et estimer leur largeur comprend plusieurs étapes. Tout d'abord, la surface de l'éprouvette est positionnée par rapport à la filiation de dureté située à mi-épaisseur du joint. Puis la taille de la zone fondue a été estimée à l'aide de la macrographie de la Figure 4-32. Les épaisseurs des ZAT ont finalement été évaluées à l'aide des filiations de dureté situées au premier quart et au milieu de l'épaisseur du joint.

Pour les essais à 550 °C, la corrélation a été faite sur l'autre surface, où le cordon de soudure est le moins épais. La taille des différentes zones a été évaluée en utilisant la même démarche.

Ces mesures nous permettent de constater que les tailles des zones ne sont pas les mêmes pour les deux types d'essais. D'une part, la taille de la zone fondue est plus large pour l'essai à 20 °C. D'autre

part, la quantité de métal de base considérée pour cet essai à 20 °C est petite et inférieure à celle de l'autre essai. La présence des congés modifie également très probablement l'état de contraintes dans le métal de base et il est nécessaire d'en tenir compte lors de l'étude du comportement mécanique de cette zone.

4.2.2.1 Essai de traction à 20°C

Sur la Figure 4-33, la courbe rouge indique la moyenne des déformations axiales dans la partie utile de l'éprouvette (calculées grâce à la corrélation d'images) à différents niveaux de contraintes. Cette courbe se superpose à la courbe de traction macroscopique, pour laquelle la rigidité de la machine a été prise en compte. Ce résultat est lié au fait que le champ d'étude couvre la totalité de la zone utile de l'éprouvette.



Figure 4-33 : courbe de traction de l'essai à 20°C.

La corrélation a pu être faite jusqu'à 6,95 % de déformation de l'éprouvette, jusqu'au niveau de la contrainte maximale avant rupture. L'analyse du comportement en traction du joint au-delà de la contrainte maximale, qui correspond à l'apparition de la striction macroscopique, n'entre pas dans le cadre de cette étude.

Pour cet essai, la grille est constituée de 48 lignes de carrés (ZOI) sur l'axe de l'éprouvette en 14 colonnes sur la largeur. Les déplacements sont donc mesurés en 672 points. Les carrés ont une largeur de 0,7 mm. La résolution de la corrélation d'images est sub-pixel. La grille numérique (ensemble des ZOI) est visible sur la Figure 4-34.



Figure 4-34 : zone de corrélation d'images pour l'essai à 20°C.

96 photographies ont été utilisées pour cette analyse. La corrélation a été faite en comparant chaque image à l'image initiale.

La Figure 4-35 trace l'évolution des déformations conventionnelles par ligne, pour les 48 lignes et les 96 pas de temps analysés. On observe ainsi l'évolution des déformations le long de l'éprouvette à différents stades de l'essai. Les lignes délimitent les différentes zones du joint soudé. La ZAT est divisée en trois zones qui sont, en partant du métal de base, la zone adoucie, la FGHAZ et la CGHAZ. La TMAZ n'a pas été prise en compte dans cette partie de l'étude.



Figure 4-35 : profil des déformations (moyennes dans la largeur) le long de l'éprouvette à différents niveaux de contrainte macroscopique (en MPa dans la légende).

La déformation est très hétérogène dans le joint soudé.

Les déformations se localisent à deux endroits autour de 433 MPa (+/-13MPa) en contrainte macroscopique.

Les zones où se sont localisées les déformations sont les deux zones adoucies. La rupture s'est produite dans l'une de ces deux zones. Au dernier stade de l'essai étudié, l'une des deux zones adoucies s'est déformée de 18%.

La zone fondue se déforme très peu, d'environ 1,5% en fin de mesure.

On observe un fort gradient de déformation dans le métal de base. Les dimensions de la portion de métal de base incluse dans la longueur utile sont relativement faibles. La concentration de contraintes liées à la présence des congés influe probablement sur le comportement des portions de métal de base dans la longueur utile de l'éprouvette. Un calcul par éléments finis sur une éprouvette de même dimension et avec une loi de comportement du métal de base en traction permettrait d'évaluer l'influence de ces congés sur la structure.

Les profils de déformation indiquent que les deux zones où se localise la déformation sont symétriques.

Des gradients de déformation sont observables dans la CGHAZ et dans la FGHAZ. Dans ces zones, seules des moyennes de déformation (sur l'ensemble de chaque zone) seront considérées.

La surface de l'éprouvette observée par corrélation d'images a été attaquée *post-mortem* au réactif de Villela (Figure 5-37). La mise en parallèle de la surface de l'éprouvette attaquée avec la macrographie du joint soudé initiale de la Figure 4-31 avec la Figure 5-37 révèle que la rupture s'est produite dans l'ICHAZ ou dans la FGHAZ. D'après le profil de la Figure 4-36, on constate également que la section s'est réduite dans la seconde zone adoucie. Ce résultat confirme que la déformation s'est également localisée dans cette zone.



Longueur mesurée (mm)





Figure 4-37 : macrographie de la surface de l'éprouvette de traction provenant de l'essai à 20°C.

Des cartographies de déformation selon l'axe de l'éprouvette calculées aux différents stades de l'essai étudiés sur la Figure 4-33, sont observables sur la Figure 4-38. Les cartographies ont été calculées avec le logiciel CorrelManuV. L'échelle est fixe et varie de 0 à 9% de déformation.

Ces cartographies confirment que la déformation se localise à deux endroits symétriquement opposés, qui correspondent aux zones adoucies. La déformation se développe plus rapidement dans l'une des deux zones, qui coïncide avec le lieu de rupture.

Ces cartographies révèlent également que la zone fondue se déforme très peu. La déformation axiale dans cette zone ne dépasse pas 2%.

A ce stade de l'essai, au niveau de la contrainte maximale avant rupture, la zone adoucie se déforme en moyenne quatre fois plus que la zone fondue. Les profils de la Figure 4-35 indiquent même que la zone adoucie se déforme localement jusqu'à onze fois plus que la zone fondue.

Les cartographies aux derniers stades étudiés confirment le fort gradient de déformation dans le métal de base. Le métal de base se déforme de 3 % au niveau des bords jusqu'à 8 % à proximité de la zone adoucie.

Ces cartographies mettent en avant les hétérogénéités de déformation dans la largeur de l'éprouvette. Les déformations se localisent en premier au centre de l'éprouvette.



Figure 4-38 : champ de déformations à la surface de l'éprouvette testée à 20 °C.

La corrélation d'images permet de mesurer les déformations locales en chaque point au centre de chaque ZOI. En réalisant des moyennes des déformations par lignes et par zone, les courbes locales de chaque zone sont déterminées à l'aide d'une hypothèse de contrainte uniforme (et uniaxiale). Les

courbes décrivent l'évolution de la contrainte conventionnelle en fonction des déformations conventionnelles, Δ L/L0.

Les courbes de traction locales dans chaque zone sont présentées sur le graphique de la Figure 4-39. Les zones désignées par les termes ZA1, FGHAZ1, CGHAZ1 et MB1 sont localisées du côté du joint qui a rompu. Les autres sont situées dans la partie opposée du joint.



Figure 4-39 : courbes de traction locales (estimées avec une hypothèse de contrainte uniaxiale homogène) comparées à la courbe globale (en noir).

La ZA1 est la zone qui se déforme le plus. Elle se déforme en moyenne d'environ 14 % jusqu'à l'arrêt de la corrélation. La ZA2 se déforme ensuite jusqu'à 12 %.

La zone fondue et les CGHAZ se déforment très peu. La zone fondue se déforme d'environ 2%. La CGHAZ2 se déforme légèrement plus que la CGHAZ1 (respectivement de 4 % et de 2,5 %).

Les vitesses de déformation moyennes dans chaque zone ont été calculées et sont rassemblées dans le Tableau 4-3.

| Zones | Vitesse d'allongement relatif moven (%/s) |
|-------|--|
| MB1 | 2,5.10 ⁻² |
| MB2 | 1,9.10 ⁻² |
| ZA1 | 3.10 ⁻² |
| ZA2 | 2,9.10 ⁻² |
| FG1 | 1,5.10 ⁻² |
| FG2 | 2.10 ⁻² |
| CG1 | 7,3.10 ⁻³ |
| CG2 | 1,2.10-2 |
| ZF | 4,3.10 ⁻³ |

Tableau 4-3 : vitesses de déformations moyennes dans chaque zone.

On constate que la zone fondue se déforme beaucoup moins vite que les autres zones du joint soudé. Les zones adoucies se déforment 6 à 7 fois plus vite que la zone fondue.

Les valeurs de Rpo,2 dans chaque zone sont rassemblées dans le Tableau 4-4. Ces valeurs sont indicatives puisque l'état de contrainte n'est pas uniaxial dans toutes les zones du joint.

| Zone | Métal de base * | ICHAZ | FGHAZ | CGHAZ | Zone fondue | Joint soudé |
|-------------|--------------------|-------|-------|-------|----------------|----------------|
| Rp0,2 (MPa) | 460 | 470 | 470 | 555 | 575 | 475 |

 Tableau 4-4 : limites d'élasticité des différentes zones du joint soudé, d'après les essais de traction avec corrélation d'images.

Les limites d'élasticité du métal de base, de l'ICHAZ et de la FGHAZ sont très proches. Celle du métal de base est sans doute artificiellement trop basse, probablement à cause de la proximité des congés. La zone fondue et la CGHAZ présentent des limites d'élasticité beaucoup plus élevées que les autres zones. La zone fondue est très résistante en traction. Elle possède la limite d'élasticité la plus élevée.

Touboul et al. [Touboul et al., 2012] ont utilisé cette technique sur un joint soudé en acier Grade 91 (obtenu par soudage à l'arc submergé), l'énergie fournie est de 28,9 kJ/cm), afin de déterminer les paramètres associés aux lois de comportement de chaque zone. Les résultats de la modélisation du comportement en traction du joint est cohérente avec les résultats expérimentaux. Par ailleurs, la corrélation obtenue entre les champs de déformation des éprouvettes calculés par éléments finis et ceux calculés avec la corrélation d'image, est satisfaisante.

Les résultats de leurs essais à température ambiante indiquent que la déformation se localise en premier lieu dans le métal de base, zone dans laquelle la rupture se produit ensuite. Vivier [Vivier, 2009] (L'énergie de soudage est de 28,9 kJ/cm) et Watanabe et al., ont également constaté une rupture dans le métal de base sur des joints soudé en acier Grade 91. Ces auteurs ont également observé que le métal de base présente le comportement le plus ductile. La différence entre les lieux de rupture des joints ci-dessus et du joint étudié en Grade 92 est probablement liée aux différences de comportements intrinsèques des différentes zones et en particulier de la zone fondue, zone très dure et qui se déforme peu dans le joint de la présente étude. Par ailleurs, la largeur de la zone affectée thermiquement de l'étude de Vivier est de 3 mm. Elle est donc plus fine que la ZAT du joint de l'étude dont la largeur est de 5 mm.

Les essais réalisés à 625 °C par Touboul et al. [Touboul et al., 2012] et Gaffard [Gaffard, 2004] indiquent que la rupture se produit dans l'ICHAZ. Les résultats des essais menés par Touboul et al. sont rassemblés dans le Tableau 4-5.

| | Vitesse d'allongement relatif moyen (/s) | Rp0,2 (MPa) | Rm (MPa) |
|---------------|---|-------------|----------|
| Métal de base | 10 ⁻³ | 475 | 640 |
| ICHAZ | 10 ⁻³ | 420 | 640 |
| FGHAZ | 10 ⁻³ | 440 | 610 |
| CGHAZ | 10 ⁻³ | 450 | 600 |
| Joint soudé | 10 ⁻⁴ | 445 | 581 |
| Joint soudé | 10 ⁻⁵ | 448 | 583 |

 Tableau 4-5 : résultats d'essais de traction avec corrélation d'images menés à température ambiante par Touboul et al.

 [Touboul et al., 2012] sur un joint soudé en acier Grade 91.

Les limites d'élasticité de l'ICHAZ, de la FGHAZ et de la CGHAZ du joint soudé en acier Grade 92 sont supérieures à celles mesurées dans les mêmes zones de l'acier Grade 91.

En particulier, la CGHAZ possède une limité d'élasticité nettement plus grande dans l'acier Grade 92.

La limite d'élasticité du métal de base dans l'acier Grade 92, déterminée par l'essai avec corrélation d'images, est légèrement inférieure par rapport au Grade 91. A nouveau, ce résultat est probablement lié à l'état de contraintes multiaxial dans cette zone.

Le comportement mécanique de ces différentes zones peut être mis en parallèle avec des valeurs de dureté.

L'évolution des contraintes à 1,5% d'allongement relatif dans chaque zone est tracée en fonction de la dureté de la zone sur la Figure 4-40. Le choix de cette valeur d'allongement relatif est arbitraire.



Figure 4-40 : évolution de la contrainte à 1,5 % de déformation en fonction de la dureté.

On constate qu'à part pour le métal de base, il existe une corrélation entre les valeurs de contraintes à 1,5% d'allongement relatif et les valeurs de dureté.

La zone de plus grande résistance mécanique est la zone de plus grande dureté (environ 260 Hv0,5). Il s'agit de la zone fondue. Cette zone se déforme très peu.

Les contraintes à 1,5 % d'allongement relatif des deux CGHAZ sont ensuite les plus élevées. Ces zones possèdent des duretés moyennes élevées (environ 240 Hv0,5).

De même, les zones de plus faibles résistances mécaniques sont les zones de plus faible dureté. La dureté dans la zone adoucie vaut 200 Hv0,5.

Seules les contraintes mesurées dans le métal de base sont décalées par rapport à la tendance. A nouveau, ce résultat est à relativiser puisque les congés modifient l'état de contrainte dans la zone considérée.

Das et al. [Das et al., 2012] ont réalisé des essais de dureté instrumentés à température ambiante dans les différentes zones d'un joint soudé en acier Grade 91. La soudure a été réalisée par procédé TIG (L'énergie de soudage est de 16,07 kJ/cm). Les duretés sont données en Berkovich. Leur étude révèle les hétérogénéités de comportement mécaniques des différentes zones du joint soudé. Ces mesures leur ont permis d'accéder à différentes propriétés du matériau telles que la dureté, le module d'Young, le coefficient d'écrouissage, la sensibilité à la vitesse de déformation, le volume d'activation et les paramètres de fluage. Les résultats de ces essais indiquent une plus grande sensibilité à la vitesse de déformation pour la zone fondue et la CGHAZ par rapport à la FGHAZ et l'ICHAZ. Les volumes d'activation de ces dernières zones sont plus importants que ceux de la zone fondue et de la CGHAZ. Par ailleurs, la profondeur de pénétration dans l'ICHAZ est 16% plus grande que dans la zone fondue, ce qui indique que la déformation de l'ICHAZ est plus élevée. Ces résultats sont cohérents avec ceux de cette étude.

La méthode de la corrélation d'image présente l'avantage par rapport à la technique de la dureté instrumentée de pouvoir évaluer l'évolution de la déformation au cours d'un essai de traction. Les cartographies de déformation permettent de visualiser la localisation de la déformation ainsi que la répartition de la déformation dans l'éprouvette, à différents stades de l'essai.

Ce premier essai couplé à la corrélation d'images apporte beaucoup d'informations sur le comportement des différentes zones du joint soudé. Le comportement en traction dans les différentes zones a pu être estimé. Au cours de l'essai de traction à température ambiante, les déformations se sont localisées dans les zones adoucies et la rupture s'est produite dans l'une d'entre elles. La zone adoucie est localisée entre deux zones plus dures et plus résistantes à la déformation, la CGHAZ et la zone fondue d'une part et le métal de base d'autre part. Ce confinement favorise le développement d'un état de contraintes multiaxiales au niveau duquel la déformation se localise.

La mise en parallèle du comportement de chaque zone avec les mesures de dureté indique que ces grandeurs sont corrélées. Ainsi, grâce à des mesures de dureté, il est possible d'évaluer le comportement mécanique des différentes zones.

4.2.2.2 Essais à 550°C

Deux essais ont été réalisés à 550°C.

Ces essais à haute température ont deux objectifs. D'une part, ces essais permettent d'étudier le comportement en traction à 550°C du joint soudé de l'étude. D'autre part, une corrélation avec les valeurs de dureté va être entreprise. L'étude précédente à température ambiante a révélé que les propriétés en traction des différentes zones sont corrélées aux valeurs de dureté. La viscoplasticité

en régime rapide à haute température (ici à 550 °C) va maintenant être étudiée. Les résultats des essais seront également mis en parallèle avec les valeurs de dureté mesurées à la température ambiante.

Pour le premier essai, la corrélation d'images est réalisée sur toute la zone utile. Pour le second essai, la corrélation n'est faite que sur une partie localisée de la zone utile. Cette zone correspond à l'une des deux zones du joint soudé où se localise la déformation. La partie observée correspond environ à 20% de la longueur utile de l'éprouvette.

Le premier essai sera appelé essai 1 et le second essai 2.

Sur la Figure 4-41, la courbe rouge indique la moyenne des déformations dans toute l'éprouvette (calculées grâce à la corrélation d'images) à différents niveaux de contraintes de l'essai 1. Cette courbe se superpose à la courbe de traction macroscopique de l'essai. De même que pour l'essai à 20°C, cela est dû au fait que la corrélation a été réalisée sur l'ensemble de la zone utile.



Figure 4-41 : courbe de traction de l'essai à 550°C.

4.2.2.2.1 Conditions de dépouillement de l'essai 1.

Pour cet essai, la grille est constituée de 30 carrés (ZOI) sur l'axe de l'éprouvette et de 6 sur la largeur. Les carrés ont une largeur de 1,5 mm. Les déplacements sont donc mesurés en 180 points. Les carrés sont de dimensions supérieures par rapport à ceux de l'essai à 20°C en raison des tailles de taches plus importantes pour ce deuxième mouchetis. Néanmoins, cette taille de ZOI est suffisamment fine, compte-tenu des dimensions de l'éprouvette et des déplacements attendus, pour que les mesures des déformations obtenues soient précises.

La grille est représentée sur la Figure 4-42.



Figure 4-42 : zone de corrélation d'images pour l'essai 1 à 550°C.

De la même manière que pour l'essai à 20°C, la Figure 4-43 trace l'évolution des déformations conventionnelles par ligne, pour les 30 lignes à différents stades de l'essai. A nouveau, la ZAT se subdivise en trois domaines : la zone adoucie, la FGHAZ et la CGHAZ.



Figure 4-43 : profil des déformations le long de l'éprouvette à différents niveaux de contrainte macroscopique (en MPa dans la légende).

D'après ces profils, on constate qu'à environ 300 MPa, la déformation se localise dans les deux zones affectées thermiquement, en particulier dans les zones adoucies. Rapidement ensuite, la déformation se localise davantage dans l'une des deux zones, là où se produira la rupture. Cette zone se déforme jusqu'à 8 % au dernier stade de l'essai analysé.

On constate que la zone fondue se déforme très peu (moins de 0,5%), environ trois fois moins que le métal de base.

La surface de l'éprouvette a été attaquée au réactif de Villela. La mise en parallèle de la macrographie du joint soudé et du profil de dureté de la Figure 4-31 avec la macrographie de la Figure 5-44, indique que la rupture s'est produite dans l'ICHAZ.



Figure 4-44 : macrographie de la surface de l'éprouvette de traction provenant de l'essai à 20°C.

Des cartographies des déformations selon l'axe de l'éprouvette ont été calculées aux différents stades de l'essai considérés sur la Figure 4-43 (Figure 4-45). L'échelle est fixe et varie de 0 à 8% de déformation. Ces déformations sont calculées en déformations conventionnelles (Δ L/L0).

D'après ces cartographies, on constate que la déformation se localise dans deux zones symétriquement équivalentes. La déformation se localise rapidement dans la zone adoucie où se produira ensuite la rupture.

De même qu'à 20°C, la zone fondue se déforme très peu à 550°C. La déformation axiale dans cette zone reste partout inférieure à 1% jusqu'au dernier stade de l'essai étudié.

D'après les cartographies, le confinement de la déformation n'est pas tout à fait identique à l'essai à 20 °C. En premier lieu, comme cela a été évoqué précédemment, les ZOI sont plus larges donc la mesure est moins précise. En second lieu, la zone fondue est moins large donc la zone utile comporte une plus large portion de métal de base. L'effet des congés est alors probablement moins important.



Figure 4-45 : champ de déformations axiales dans l'éprouvette (Sur l'échelle, valeur minimale 0% et valeur maximale 8%).

De même que pour l'essai à 20°C, les courbes locales de chaque zone sont évaluées en réalisant des moyennes de déformations par ligne. Les courbes décrivent l'évolution de la contrainte macroscopique en fonction des déformations conventionnelles, $\Delta L/L_0$.

Les courbes de traction locales dans chaque zone sont présentées sur le graphique de la Figure 4-46. MB1, ZA1, FGHAZ1 et CGHAZ1 désignent le côté qui a rompu. Les autres zones appartiennent à l'autre partie symétriquement opposée du joint soudé.

On constate que ces courbes sont plus bruitées que pour l'essai à 20°C. Cela vient du fait que les tailles de ZOI créées pour la corrélation d'image de cet essai sont plus grandes que celles de l'essai à 20°C. L'écart entre deux mesures de déplacement et donc de déformation, soit l'écart entre deux lignes, est plus grand pour cet essai.



Figure 4-46 : courbes de traction locales à 550 °C.

La zone adoucie ZA1, où s'est produite la rupture, est la zone la plus déformée (7,5 %) au dernier stade de l'essai étudié. La FGHAZ1 s'est également beaucoup déformée (7 %). La seconde zone adoucie s'est déformée de 5,5 % à ce stade de l'essai.

La zone fondue se déforme très peu (environ 1 %). Cette zone est très résistante en traction à 550°C et présente les meilleures propriétés mécaniques.

Les limites élastiques dans les différentes zones du joint soudé ont été estimées et sont données dans le Tableau 4-6. Ces valeurs sont approximatives compte-tenu du bruit sur les courbes.

| Zone | Métal de base | ICHAZ | FGHAZ | CGHAZ | Zone fondue | Joint soudé |
|-------------|------------------|-------|-------|-------|----------------|----------------|
| Rp0,2 (MPa) | 300 | 250 | 250 | 290 | 350 | 300 |

Tableau 4-6 : limites d'élasticité des différentes zones du joint soudé, d'après les essais de traction avec corrélation d'images à 550 °C.

L'ICHAZ et la FGHAZ ont les limites d'élasticité les plus basses. La limite d'élasticité de la zone fondue est la plus élevée.

Les résultats des essais de traction avec corrélation d'images obtenus par Touboul et al. à 625 °C sont présentés dans le Tableau 4-7.

| | Vitesse d'allongement relatif moyen (/s) | Rp0,2 (MPa) | Rm (MPa) |
|-------------|---|-------------|----------|
| | 10 ⁻³ | 236 | 295 |
| Joint soudé | 10 ⁻⁴ | 230 | 240 |
| | 10 ⁻⁵ | 190 | 210 |

Tableau 4-7 : résultats d'essais de traction avec corrélation d'images menés à 625°C par Touboul et al. [Touboul et al.,2012] sur un joint soudé en acier Grade 91.

Les résultats de Touboul et al. à 625 °C confirment que les propriétés en traction sont dépendantes de la vitesse d'allongement relatif moyen.

Considérons cette fois les différentes courbes de comportement à environ 0,5 % de déformation. La valeur moyenne de la contrainte (supposée uniaxiale) dans chaque zone à ce niveau de déformation est tracée en fonction de la dureté à froid sur la Figure 4-47. Cette figure permet de constater que les niveaux de contraintes à 0,5 % d'allongement relatif dans chaque zone sont corrélés aux valeurs de dureté à froid.

La contrainte la plus élevée est atteinte par la zone fondue. Cette zone est également la zone la plus dure.

De même, les zones les moins résistantes sont les deux zones adoucies.

Les FGHAZ sont plus dures que les zone adoucies, probablement à cause d'un écrouissage différent ou d'un effet de confinement par la zone fondue proche.



Figure 4-47 : évolution de la contrainte à 0,5% de déformation en fonction de la dureté.

Ce résultat indique que la dureté des différentes zones du joint soudé à 20 °C est corrélée à leurs propriétés mécaniques à 550 °C.

Pour les deux essais et pour chaque zone, l'écart relatif du niveau de contraintes à 1,5 % d'allongement relatif (essai à 20 °C) et à 0,5 % d'allongement relatif (essai 1 à 550 °C) a été estimé

par rapport à cette même contrainte dans la zone fondue. Ces valeurs sont données dans le Tableau 4-8.

| | Métal de base/Zone Fondue | ZA/ Zone Fondue | FGHAZ/ Zone Fondue | CGHAZ/ Zone Fondue |
|----------------|---------------------------------|--------------------|--------------------------|--------------------------|
| Essai à 20 °C | 15% | 20% | 15% | 10% |
| Essai à 550 °C | 8% | 13% | 13% | 8% |

Tableau 4-8 : écart relatif en résistance, des différentes zones par rapport à la zone fondue, pour une déformation de1,5% à 20°C et de 0,5% à 550°C.

Ces données révèlent que les écarts relatifs de résistance mécanique sont différents à 20 °C et à 550 °C. L'écart est inférieur pour l'essai à 550 °C.

Les vitesses de déformation dans chaque zone ont été mesurées et sont données dans le Tableau 4-9.

| Zones | Vitesse d'allongement relatif moyen (%/s) |
|-------|--|
| MB1 | 1,84.10 ⁻² |
| MB2 | 1,27.10 ⁻² |
| ZA1 | 3,26.10 ⁻² |
| ZA2 | 2,29.10 ⁻² |
| FG1 | 3,02.10 ⁻² |
| FG2 | 1,93.10 ⁻² |
| CG1 | 1,84.10 ⁻³ |
| CG2 | 1,04.10-2 |
| ZF | 3,03.10-3 |

Tableau 4-9 : vitesses de déformations moyennes dans chaque zone.

Les zones adoucies se déforment 7 à 10 fois plus rapidement que la zone fondue. Les FGHAZ se déforment également beaucoup plus vite que la zone fondue (6 à 10 fois).

4.2.2.2.2 Conditions de l'essai 2

Un second essai de traction à 550 °C a donc été réalisé. Le grandissement de la caméra a été augmenté afin d'obtenir l'évolution des déplacements d'une portion de l'éprouvette. En particulier, la portion de l'éprouvette considérée est centrée sur la ZAT. La portion d'éprouvette comprise dans l'image comprend également une portion de métal de base et une portion de zone fondue. Les mesures de dureté ainsi que les positions des zones de striction et de rupture dans la zone utile de l'éprouvette de l'essai 1 ont permis de localiser précisément cette zone d'étude.

L'objectif est d'obtenir des données complémentaires sur le comportement en traction à 550 °C de la ZAT et en particulier de la zone de rupture, la zone adoucie. Les hétérogénéités de comportement dans la ZAT pourront être étudiées plus précisément.

Pour cet essai, la grille est constituée de 22 carrés (ZOI) sur l'axe de l'éprouvette et de 10 sur la largeur. Les carrés ont une largeur de 0,65 mm. Les déplacements sont donc mesurés en 220 points.

La grille est présentée sur la Figure 4-48.

L'évolution des déformations à différents stades de l'essai et à différentes positions dans la longueur de l'éprouvette observée, est présentée sur la Figure 4-49.



Figure 4-48 : zone de corrélation d'images pour l'essai 2 à 55





Les résultats de la corrélation sur ce second essai confirment que la déformation se localise dans la zone adoucie. La déformation est de 15% au dernier stade de l'essai étudié.

La zone fondue se déforme très peu par rapport aux autres zones (environ 2%).

Un gradient de déformation est constaté dans la FGHAZ et dans la CGHAZ.



Le métal de base se déforme jusqu'à 5%.

Figure 4-50 : courbes de traction locales des différentes zones pour l'essai 2.

Les courbes de comportement des différentes zones présentées sur la Figure 4-50, sont cohérentes avec celles obtenues grâce à l'essai 1.

Les courbes de traction locales calculées dans les trois zones de la ZAT ont été comparées avec les courbes obtenues à partir de l'essai 1 (Figure 4-51). L'indice numéro 3 indique qu'il s'agit de la courbe de l'essai 2.





Figure 4-51 : comparaisons des courbes de traction locales pour les deux essais à 550 °C a) de la zone adoucie, b) de la FGHAZ, c) de la CGHAZ et d) du métal de base.

On constate que les résultats de la corrélation d'images sur les deux essais sont cohérents. D'une part, les allongements relatifs moyens sont proches. D'autre part, les courbes sont très similaires. Les valeurs de limite d'élasticité et de contraintes maximales sont comparables. En outre, on remarque que les courbes locales obtenues avec l'essai 2 sont nettement moins irrégulières que les courbes

obtenues avec l'essai 1. Ce second essai est donc complémentaire à l'essai 1. L'exploitation des résultats est donc plus simple et les résultats obtenus sont plus précis.

4.2.2.3 Conclusion

La technique de la corrélation d'images semble être particulièrement adaptée à l'étude du comportement mécanique des différentes zones d'un joint soudé.

Les résultats de ces essais ont présenté l'intérêt des mesures de dureté pour l'estimation des propriétés en traction à température ambiante et à 550 °C d'un joint soudé, ainsi que pour l'évaluation des différences de propriétés mécaniques. En effet, une corrélation entre les propriétés mécaniques des différentes zones à 20 °C et à 550 °C et les valeurs de dureté a été constatée.

Ces essais ont montré que les différences de propriétés mécaniques observées à 20 °C sont cohérentes avec les différences des valeurs de dureté faites à température ambiante. L'écart de propriétés mécaniques observé à 550 °C est moins important par rapport à l'écart observé à 20 °C.

Ces essais de traction avec corrélation d'images peuvent également être utilisés pour modéliser le comportement en traction du joint soudé à température ambiante et à haute température.

Dans la présente étude, le régime quasi-plastique n'a pas été pris en compte dans la modélisation du comportement en fluage du joint soudé. Néanmoins, l'ensemble des données obtenues ici permettrait de déterminer les paramètres de ce régime. Les données auraient également pu être utilisées pour déterminer les paramètres associés à l'écrouissage, dans chacune des zones du joint soudé, à l'exception du métal de base, dont l'état de contraintes n'est pas uniaxial à cause de la présence des congés.

4.2.3 Comportement mécanique en fluage

Une campagne d'essais a été menée au sein du laboratoire de fluage du CEA afin d'étudier le comportement en fluage à 550 °C du joint soudé et de ses différentes zones.

Différentes géométries d'éprouvettes ont été utilisées.

Le comportement du métal de base a été préalablement déterminé à travers des essais sur éprouvettes lisses (Partie 2.3.2.1).

Le comportement de la soudure a ensuite été étudié à travers des essais sur éprouvettes lisses prélevées dans le sens travers du joint.

Des éprouvettes entaillées ont également été utilisées afin de déterminer le comportement en fluage de la zone adoucie et de la zone fondue. Ces éprouvettes ainsi que les entailles, ont été préalablement dimensionnées. Cette étape est présentée dans la partie 4.1.1.

Les courbes de fluage des essais sur éprouvettes lisses travers joint, sont présentées sur la Figure 4-52 et la Figure 4-53. Les courbes en traits pointillés correspondent aux essais sur joint soudé avec produit d'apport Thermanit et les courbes en traits continus aux essais sur joint soudé avec produit d'apport P92IG. Les courbes marquées d'une flèche sont les essais interrompus.

Les paramètres des essais de fluage ainsi que le lieu de rupture sont rassemblés dans le Tableau 4-10.



Figure 4-52 : ensemble des courbes de fluage sur éprouvettes travers joint à 550 °C (Traits pleins : produit d'apport P92IG, Traits pointillés : produit d'apport Thermanit MTS 616).



Figure 4-53 : courbes de fluage des essais court-terme sur éprouvettes travers joint à 550 °C (Traits pleins : produit d'apport P92IG, Traits pointillés : produit d'apport Thermanit MTS 616).

L'allongement correspond à :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} * 100$$

 L_0 est la longueur initiale de la zone utile et vaut 40 mm et ΔL correspond à l'allongement de la zone utile.

Les essais à plus basses contraintes n'ont pas pu être menés jusqu'à rupture dans le temps imparti.

| Produit d'apport | Contraintes (MPa) | Temps à rupture (h) | Lieu de rupture | Réduction d'aire à rupture (%) |
|-------------------|-------------------|------------------------|-----------------|--------------------------------------|
| Böhler P92IG | 160 | >18426 | - | - |
| Böhler P92IG | 175 | >25630 | - | - |
| Böhler P92IG | 190 | > 15447 | - | - |
| Böhler P92IG | 205 | 6187 | Zone adoucie | 68 |
| Böhler P92IG | 205 | >8700 | - | - |
| Böhler P92IG | 230 | 2837 | Zone adoucie | - |
| Böhler P92IG | 240 | 1127 | Zone adoucie | 77 |
| Thermanit MTS 616 | 205 | >4676 | - | - |
| Thermanit MTS 616 | 215 | 2160 | Zone adoucie | 72 |
| Thermanit MTS 616 | 230 | 1214 | Zone adoucie | 71 |
| Thermanit MTS 616 | 230 | 1276 | Zone adoucie | 70 |
| Thermanit MTS 616 | 245 | 449 | Zone adoucie | 70 |

Le stade tertiaire est relativement long et assez bien marqué.

Tableau 4-10 : récapitulatif des essais de fluage sur éprouvettes lisses prélevées travers joint, pour les deux joints utilisés.

Les réductions d'aire à rupture sont élevées, ce qui indique qu'une déformation viscoplastique importante s'est produite avant rupture.

D'après ces courbes, à plus fortes contraintes, les joints soudés avec produit d'apport P92IG semblent plus résistants en fluage que les joints soudés avec produit d'apport Thermanit.

A plus faibles contraintes et donc à plus long-terme, ce résultat n'est plus vérifié. En effet, les courbes à 205 MPa se superposent, même si deux des trois essais ont dû être interrompus. Leurs comportements en fluage des deux joints soudés deviennent donc semblables pour des niveaux de contraintes plus faibles (autour de 205 MPa). Cette différence est très probablement liée aux conditions de soudage et sera discutée ultérieurement.

Le graphique de la Figure 4-54 rassemble les valeurs de temps à rupture à 550°C du métal de base et des joints soudés Grade 92 issus de la présente étude et des données de l'ECCC [2005]. La courbe en pointillées indique les valeurs estimées en divisant par 10 les durées de vie du métal de base estimées par la courbe ECCC (facteur couramment utilisé en dimensionnement pour le Grade 91).

Les durées de vie en fluage des joints soudés sont réduites par rapports aux durées de vie du métal de base (d'un facteur 3). Du fait que le métal de base est légèrement moins résistant que l'estimation par la courbe ECCC, la courbe « ECCC modifiée » décrit bien le comportement du joint avec produit d'apport Thermanit MTS616, bien que l'abattement de durée de vie mesuré soit inférieur à celui estimé.



Figure 4-54 : contrainte appliquée en fonction du temps à rupture à 550 °C.

Les courbes de Monkman-Grant reliant la vitesse de fluage minimale au temps à rupture sont comparées pour le métal de base et différents joints soudés Grade 92 à différentes températures (Figure 4-55). La relation de Monkman-Grant est donnée par :

$$t_r \dot{\varepsilon}^n = C_{MG}$$

Où n est une constante du matériau proche de 1 et B une constante valable sur une gamme étendue de températures comme le montre les graphiques de la Figure 4-55 et de la Figure 4-56.

La vitesse de fluage minimale de ces courbes est une vitesse d'allongement relatif moyen. L'allongement relatif dépend de la largeur de chaque zone du joint, en particulier leur proportion relative dans la longueur utile de l'éprouvette. Il est important d'en tenir compte dans l'analyse des résultats d'essais de fluage. La Tableau 4-11 regroupe, pour un ensemble de données de fluage provenant de la littérature et présentées dans ce chapitre, les dimensions du joint soudé et des éprouvettes utilisées pour les essais de fluage.

| Auteurs | Matériaux | Procédé de soudage | PWHT | Dimensions de l'éprouvette | Taille de la zone fondue et des ZAT |
|--------------------------------|-----------|--|----------------------------|---|---|
| Watanabe et al., 2006 | Grade 91 | Soudage à l'arc TIG (GTAW) | 740°C pendant 8,5h | Lu = 100 mm Epaisseur = 17,5 mm Largeur = 5 mm | 25% de ZF 5% de ZAT 70 % de MB |
| Vivier, 2010 | Grade 91 | Soudage à l'arc submergé (SAW) | 750°C pendant 20h | Lu = 80 mm φ = 5 mm | 31% de ZF 20% de ZAT 48 % de MB |
| Gaffard, 2005 | Grade 91 | Soudage à l'arc (MIG et TIG) | 760°C pendant 2h | Lu = 36 mm φ = 5 mm | 56 % de ZF 22 % de ZAT 22 % de MB |
| Jandova et al., 2009 | Grade 91 | Soudage à l'arc TIG (GTAW) et SMAW | 740-760 °C pendant 2.5h | - | - |
| Pétry et Gariboldi, 2009 | Grade 92 | Soudage à l'arc SMAW | 760°C pendant 2h | Lu = 80 mm φ = 8 mm | 25 % de ZF 20 % de ZAT 55 % de MB |
| Kasl et al., 2009 | Grade 92 | Soudage à l'arc TIG (GTAW) et SMAW | 760°C pendant 2h | Lu = 92 mm φ = 8 mm | 22 % de ZF 17 % de ZAT 61 % de MB |
| Falat et al., 2009 | Grade 92 | Soudage TIG (GTAW) | 760°C pendant 4h | Lu = 40 mm φ = 5,5 mm | 50 % de ZF 15 % de ZAT 35 % de MB |
| Kim et al., 2008 | Grade 92 | Soudage TIG (GTAW) | 760°C pendant 2h | - | - |
| Tabuchi et al., | Grade 92 | Soudage à l'arc TIG (GTAW) | 740°C pendant 260 min | Lu = 30 mm φ = 6 mm | - |

| Kalck | Grade 92, Produit d'apport P92IG | Soudage à l'arc TIG (GTAW) | 760°C pendant 4h | Lu = 40 mm φ = 5 mm | 25 % de ZF 25 % de ZAT 50 % de MB |
|-------|---|-------------------------------|---------------------|------------------------|---|
| Kalck | Grade 92, Thermanit MTS616 | Soudage à l'arc TIG (GTAW) | 760°C pendant 6h | Lu = 40 mm φ = 5 mm | 25 % de ZF 25 % de ZAT 50 % de MB |

Tableau 4-11 : caractéristiques des joints soudés de la littérature citées dans cette partie Lu : longueur de la zone utile).



Figure 4-55 : vitesse de fluage minimale en fonction du temps à rupture entre 550°C et 625°C.

Les données d'essais de fluage sur le métal de base Grade 92 à 600 °C et à 550 °C [Ennis et al, 1997, Giroux, 2011] sont alignées.

Des résultats d'essais de fluage sur des joints soudés Grade 92 à différentes températures (550 °C, 575 °C et 625 °C) sont également présentés à titre de comparaison [Falat, 2009, Pétry et al.,]. Les données s'alignent également le long d'une même droite.

Les paramètres de Monkman-Grant sont donc valables pour toute une gamme de températures. Ce constat suggère que les mécanismes d'endommagement sont identiques entre 550°C et 600°C. Cependant, ce résultat est étonnant puisque des phases de Laves apparaissent lors des sollicitations à 600°C et sont connues pour être des sites préférentiels d'endommagement par fluage.

La Figure 4-56 compare l'ensemble des données précédentes sur l'acier Grade 92 à celle de joints soudés en acier Grade 91.

Le Tableau 4-12 compare les paramètres de Monkman-Grant pour l'ensemble des essais considérés.

| | m | C _{MG} |
|--|------|-------------------------|
| MB Grade 92, Kalck, | 0,83 | 0,04 h ^{-0,17} |
| JS Grade 92, Kalck, | 0,98 | 0,01 h ^{-0,02} |
| JS Grade 91, Gaffard, 2005 | 0,8 | 0,038 h ^{-0,2} |
| JS Grade 92, Falat et al., 2009 | 0,92 | 0,04 h ^{-0,08} |
| MB Grade 92, Ennis et al., 1997 | 1,26 | 0,03 h ^{0,26} |
| JS Grade 91, Vivier, 2007 | 0,77 | 0,22 h ^{-0,23} |
| JS Grade 92, Pétry et Gariboldi, 2009 | 0,55 | 1,41 h ^{-0,45} |

 Tableau 4-12 : paramètres de Monkman-Grant du métal de base et des joints soudés de l'étude et provenant d'autres

 études (MB : métal de base seul ; JS : essais travers joint).



Figure 4-56 : vitesse de fluage minimale en fonction du temps à rupture. Métal de base et joints soudés des Grades 91 et 92.

Pour des vitesses de fluage similaires, on constate un écart significatif entre les durées de vie des joints soudés en acier Grade 91 et ceux en acier Grade 92. Cet écart est estimé à un facteur 10 pour des durées de vie longues (10000h).

Les données sur les joints soudés Grade 92 s'alignent le long d'une même droite. Les différents points sont dispersés autour de cette droite. Cela vient du fait que les géométries des joints et des éprouvettes, ainsi que les températures, sont différentes d'une étude à l'autre (Tableau 4-11). La zone de plus faible dureté est confinée entre des zones plus résistantes et qui se déforment moins. Le confinement de la zone adoucie varie en fonction du rapport de son épaisseur sur son diamètre. Le comportement en fluage du joint soudé complet dépend donc de l'effet du confinement.

D'après le graphique de la Figure 4-56, on constate également que l'écart des données de fluage entre le métal de base Grade 92 et le joint soudé Grade 92 tend à augmenter pour des durées de vie plus longues.

La Figure 4-57 rassemble des données sur la vitesse minimale de fluage des joints soudés Grade 91 et Grade 92 à des températures entre 500 °C et 625 °C (les températures ne varient pas pendant un essai).

L'évolution des vitesses de déformation en fluage en fonction de la contrainte appliquée peut être modélisée par une loi de type Norton :

$$\dot{\varepsilon} = A\sigma^n$$

Où ε est la vitesse d'allongement relatif minimale, σ la contrainte appliquée et A et n sont des paramètres dépendant du matériau, de la température et de la géométrie de l'éprouvette. A et n sont des valeurs « apparentes » puisque le joint soudé est constitué de différents matériaux. L'alignement des points des joints soudés avec ceux du métal de base est donc fortuit.

Le paramètre n vaut 11 pour les joints soudés avec produit d'apport P92IG et 18 pour les joints soudés avec produit d'apport Thermanit MTS 616. Les paramètres n obtenus par Gaffard et Vivier [Gaffard, 2005, Vivier, 2009] sont respectivement 6 et 17,8. Dans le domaine de contraintes exploré, la déformation est donc contrôlée par le mouvement des dislocations sous ce régime de contraintes élevés. Ce mécanisme semble être le même aux différentes températures considérées (550, 600 et 625 °C).



Figure 4-57 : vitesse de fluage en fonction de la contrainte appliquée.

Le graphique de la Figure 4-58 compare pour le Grade 91 et le Grade 92 la frontière à partir de laquelle le lieu de rupture change, pour différentes conditions de fluage. Pour construire ce graphique, des données de la littérature, dont les caractéristiques des joints sont données dans le Tableau 4-11, ont été rassemblées et classées en fonction du lieu de rupture et des conditions d'essai (contrainte, température). La frontière a été positionnée à partir de ces données. Lorsque le changement de lieu de rupture n'est pas clairement précisé, des flèches indiquent que les bornes de

ces frontières ne sont pas fixées et dans quel sens cette frontière pourrait évoluer si l'on dispose de nouvelles données expérimentales.

On observe que les conditions de fluage (température et contraintes) à partir desquelles le mécanisme de rupture change, sont différentes pour les deux matériaux Grade 91 et Grade 92.



Figure 4-58 : comparaison du lieu de rupture entre le P91 et le P92 pour différents niveaux de contrainte et de température.

Cependant, si l'on considère la contrainte normalisée (Figure 4-59), qui tient compte des propriétés mécaniques du matériau, on constate que le changement de lieu de rupture se fait pour des conditions de températures et de contraintes proches.

Le Grade 91 et le Grade 92 n'ont pas les mêmes propriétés mécaniques et la même résistance au fluage. Les lieux de rupture sont donc comparés à l'aide de la contrainte normalisée de chaque essai tel que :

$$\sigma_{normalisée} = \frac{\sigma_{Aplliquée}\left(T\right)}{\sigma_{100000h}}$$

Où T désigne la température de l'essai et $\sigma_{100000h}$ la contrainte à 100 000h selon la norme ASTM.



Figure 4-59 : comparaison du lieu de rupture entre le P91 et le P92 pour différents niveaux de contrainte et de température.

Les mécanismes responsables du changement de mode de rupture sont identiques pour les deux matériaux, aux gammes de températures considérées et de temps à rupture (ou de niveaux de contraintes) considérés.

4.2.3.1 Expertise des éprouvettes rompues

La Figure 4-60 présente l'évolution du diamètre (mesuré après essai) le long de trois éprouvettes de fluage non rompues. Le diamètre initial de ces éprouvettes est de 5 mm. Le Tableau 4-13 indique les différents stades d'arrêt des essais. L'objectif de ces mesures est de connaître le stade de l'essai à partir duquel apparaît la localisation de déformation, à deux niveaux de contraintes différents.

| Eprouvette | Durée d'essai (h) | Stade de l'essai |
|-----------------------------------|-------------------|------------------|
| 160 MPa (produit d'apport P92 IG) | 18 426 | Primaire |
| 205 MPa (produit d'apport P92 IG) | 8 700 | Tertiaire |
| 205 MPa (produit Thermanit) | 4 770 | Secondaire |

Tableau 4-13 : stades d'arrêts des éprouvettes étudiées en profilométrie.



Figure 4-60 : évolution de la section le long de trois éprouvettes de fluage (travers joint) non rompues (550 °C).

La localisation de la déformation apparaît au niveau des ZAT. Pour l'éprouvette de joint Thermanit sollicitée sous 205 MPa, on constate en outre que cette localisation apparait d'un côté dès le stade secondaire. Par ailleurs, on constate que la zone fondue s'est très peu déformée.

Pour l'éprouvette sollicitée à 160 MPa, la déformation semble être homogène dans toute la zone utile de l'éprouvette. Néanmoins, il est impossible de prévoir les mécanismes responsables de la rupture de l'éprouvette à ce niveau de contraintes dès ce stade de l'essai.

Les éprouvettes sollicitées aux plus fortes contraintes (230 MPa et 240 MPa) ont été étudiées afin de déterminer le lieu de rupture. Les éprouvettes ont été découpées longitudinalement. La coupe longitudinale a été polie jusqu'à 3 µm puis a été attaquée au réactif Villela.

La Figure 5-61 présente une macrographie de la coupe longitudinale de l'éprouvette sollicitée à 230 MPa, à laquelle est superposée une filiation de dureté. Cette figure indique que la rupture s'est produite près de la zone de dureté minimale. La dureté augmente fortement dans la zone de striction en raison de l'importante déformation viscoplastique qui s'est produite en fin d'essai.



Distance de l'empreinte à partir de la première (mm)

Figure 4-61 : filiation de dureté réalisée sur une coupe longitudinale d'une éprouvette de fluage lisse travers joint (230 MPa, 550 °C), comparée à la macrographie de la coupe. La zone de rupture est tout à droite de la macrographie.

Quelques cavités sont observables près du faciès et dans la zone de striction (Figure 4-62). Très peu de cavités sont présentes loin de la zone de striction. Ce résultat suggère que la rupture de l'éprouvette s'est produite par instabilité viscoplastique.



Figure 4-62 : micrographies au MEB de la zone de striction l'éprouvette rompue à 2837 h (230 MPa, 550°C), a) dans la zone de striction, b) près du faciès.

Aucun endommagement n'a été constaté en zone fondue. Il est important de vérifier la présence de cavités dans cette zone, compte-tenu de la présence de zones de ferrite delta (Chapitre 3.5), sites potentiels de germination de cavités.

Les faciès de rupture présentent des cupules, révélateurs d'un mécanisme de rupture ductile (Figure 4-63).



Figure 4-63 : Faciès de rupture de l'éprouvette rompue à 2837 h (230 MPa, 550°C).

4.2.4 Evolutions microstructurales attendues

La microstructure du joint soudé peut être profondément modifiée au cours du fluage à températures élevées (de 500 à 650 °C).

De nombreuses études menées sur le métal de base et les joints soudés P91 [Jandova et al., 2009] et P92 [Kasl et al., 2009] montrent une évolution de la microstructure des différentes zones, caractérisée par un grossissement des carbures $M_{23}C_6$ [Das et al., 2008] et une restauration de la sous-structure de dislocations.

Les changements microstructuraux sont différents dans les différentes zones du joint soudé et sont liés aux microstructures initiales. Ils dépendent également de la température et de la durée des essais.

4.2.5 Evolution de la sous-structure

La sous-structure de la zone adoucie après sollicitation en fluage a été étudiée par microscopie électronique en transmission sur lames minces. L'éprouvette travers joint avec produit d'apport Thermanit MTS 616, sollicitée à la plus basse contrainte pour ce produit d'apport (205 MPa), a été expertisée. Cet essai a été interrompu en fin de stade secondaire. Les lames ont été prélevées dans la zone la plus strictionnée.

Les micrographies en champ clair de la Figure 4-64 présentent les microstructures de la zone adoucie à l'état initial et après sollicitation en fluage à 205 MPa, pendant plus de 4500h (L'essai a été interrompu avant rupture). On constate que les sous-grains dans la zone adoucie après fluage semblent majoritairement de forme polygonale, alors qu'à l'état initial, la zone adoucie présente une microstructure en lattes, subdivisées en sous-grains.



Figure 4-64 : micrographies en champ clair de la zone adoucie a) à l'état initial et b) après sollicitation en fluage pendant 4675 h (205 MPa, 550 °C).

La Figure 4-65 compare les distributions de tailles de sous-grains mesurées dans la zone adoucie, à l'état initial et après sollicitation en fluage, de l'éprouvette expertisée, sollicitée à 205 MPa. Les tailles de sous-grains ont été mesurées sur des clichés réalisés au MET. La méthode de mesure est la même que celle utilisée pour obtenir les distributions de taille de sous-grains dans le métal de base et dans la zone adoucie, décrite dans le chapitre 3.3.2.



Figure 4-65 : distributions de tailles de sous-grains dans la zone adoucie à l'état initial et la zone adoucie sollicitée en fluage pendant 4675 h (205 MPa, 550 °C).

On constate que les tailles de sous-grains mesurées dans la zone adoucie après sollicitation en fluage sont nettement plus grandes qu'à l'état initial. La valeur moyenne est de 0,39 µm avant fluage

(l'écart-type est de 0,18 μm) et de 0,88 μm après fluage (l'écart type est de 0,3 μm). L'écart entre la valeur maximale et la valeur minimale est également légèrement plus important après fluage, ce qui traduit l'hétérogénéité de la croissance des sous-grains lors du fluage.

Watanabe et al. [Watanabe et al., 2006] ont observé que le grossissement des carbures et la restauration de la structure de dislocations au cours du fluage sur joint soudé Grade 91 est plus marquée dans l'ICHAZ que dans les autres zones du joint soudé [Watanabe et al., 2006] (Figure 4-66).



Figure 4-66 : micrographies MET en champ clair de l'évolution de la microstructure d'un joint soudé Grade 91 après un essai de fluage à 600 °C, 80MPa: d) métal de base, e) ICHAZ, et f) métal fondu [Watanabe et al., 2006].

4.2.5.1 Evolution de l'état de précipitation

Jandova et al. [Jandova et al., 2009] ont réalisé des essais sur joint soudé P91. Le matériau de base a subi une austénitisation à 1050 °C pendant 1h30, une trempe à l'huile et un revenu à 750 °C pendant 3h30. A 575°C, pour des durées de fluage de l'ordre de 10000h (140 MPa) sur une éprouvette rompue dans la FGHAZ, Jandova et al.[Jandova et al., 2009] n'observent pas d'évolution en termes de tailles et de densité des grosses particules pour le métal de base, la CGHAZ et la zone fondue, par rapport aux conditions initiales.

Les tailles de précipités dans le joint soudé de cette étude après sollicitations en fluage n'ont pas été mesurées.

Néanmoins, les micrographies réalisées ainsi que certains résultats de la littérature obtenus sur des aciers Grade 91 à 600 °C, [Watanabe et al., 2006] indiquent que l'état de précipitation dans l'ICHAZ et dans la FGHAZ semble avoir évolué au cours du fluage.

A 550°C, suite à des durées de fluage longues (30000h, 160 MPa) sur une éprouvette rompue dans la ZAT, Jandova et al. [Jandova et al., 2009] ont identifié des grosses particules de phases de Laves riches en fer et en molybdène dans le métal fondu. Ces phases, constituées d'atomes présentant un numéro atomique élevé, sont généralement faciles à observer au MEB avec un détecteur d'électrons rétrodiffusés. Les micrographies réalisées sur les éprouvettes rompues n'ont pas révélé la présence de telles phases de Laves au cours de la présente étude.

Aucune différence notable n'est observée concernant les densités des fins précipités MX intragranulaires avant et après fluage.

4.2.5.2 Discussion

La tenue en fluage des joints soudés en acier Grade 92 est réduite d'un facteur 3 par rapport aux durées de vie du métal de base. La rupture se produit dans la zone adoucie, y compris pour les essais courts.

D'après les résultats de la présente étude et les données de la littérature, la perte de résistance au fluage semble liée à l'accélération de la dégradation de la microstructure de la zone adoucie. Les tailles de sous-grains ont augmenté de manière significative.

D'autres phénomènes peuvent cependant intervenir dans la perte de résistance mécanique des joints soudés par rapport au métal de base.

L'effet de confinement exercé sur l'ICHAZ ou la FGHAZ par le métal de base et le métal fondu, zones dures se déformant peu, favorise la dégradation de la microstructure et est à l'origine de la rupture de type IV dans certains joints soudés [Masatsugu et al., 2010, Bauer et al., 2010, Gaffard, 2005]. L'ICHAZ et la FGHAZ sont en effet soumises à des contraintes multiaxiales [Watanabe et al., 2006], ce qui n'est pas le cas du métal de base sur éprouvettes lisses.

Un autre phénomène, encore très peu étudié actuellement, pourrait expliquer la faible résistance en fluage de la zone adoucie : les déformations résiduelles liées au procédé de soudage.

Paddea et al. [Paddea et al., 2012] ont évalué les contraintes résiduelles dans une soudure en acier Grade 91, avant et après le traitement de détensionnement, et ont obtenu des cartographies de répartition des contraintes dans la soudure. Leur étude est réalisée sur deux joints soudés identiques, provenant de l'assemblage de deux tubes par procédé de soudage à l'arc (SAW), avec une énergie de soudage de 18 kJ/cm. La passe de racine est réalisée par procédé de soudage TIG, avec une énergie de 12 kJ/cm. Le premier joint n'a pas subi de traitement de détensionnement. Le second a subi un PWHT de 4h à 750°C. Les contraintes résiduelles ont été mesurées selon trois directions (radiale, orthoradiale et axiale) à l'aide de la diffraction des neutrons.

Les auteurs ont montré que les contraintes résiduelles de traction sont maximales à la frontière de la ZAT avec le métal de base. Les contraintes hydrostatiques sont également élevées et maximales dans cette zone. Le traitement de détensionnement consécutif réduit significativement les niveaux de contraintes résiduelles. Néanmoins, ces contraintes restent présentes et maximales près de la ZAT après PWHT. La Figure 4-67 présente les cartographies des contraintes résiduelles dans les directions circonférentielles, axiales et normales au tube.



Figure 4-67 : cartographie des contraintes résiduelles mesurées dans le sens a) circonférentiel, b) axial et c) normale du tube, après traitement post-soudage [Paddea et al., 2012]. Les lignes noires transversales délimitent la ZAT et les lignes du haut délimitent la dernière passe de soudage.

Des constats similaires ont été faits par Kim et al. [Kim et al., 2009] sur un joint soudé en acier Grade 91 (Procédé TIG avec une énergie de soudage 857 J/mm) à l'aide de mesures par diffraction aux neutrons. Les auteurs ont constaté que les contraintes résiduelles axiales sont en traction et plus élevées dans la ZAT et dans la zone fondue.

Au sein de la zone adoucie, les contraintes résiduelles sont donc relativement significatives et supérieures aux niveaux de contraintes dans les autres zones du joint soudé. L'impact de ces contraintes résiduelles sur les performances en fluage de la soudure et en particulier de la zone adoucie, n'a encore jamais été évalué ni même considéré en tant que tel.

Par ailleurs, les contraintes résiduelles sont localisées à la frontière entre la ZAT et le métal de base. La portion de métal de base désignée par TMAZ et mise en évidence dans la partie I semble donc présenter un niveau de contraintes résiduelles supérieur aux autres zones, ce qui renforce la présomption d'existence d'une telle TMAZ. D'une manière plus générale, on peut imaginer que les niveaux de contraintes résiduelles (et la déformation viscoplastique nécessaire à leur relaxation lors du PWHT, donc la sous-structure résultante) pourrait dépendre des conditions de bridage, donc à la fois de la géométrie, du procédé et des paramètres de soudage.

4.2.5.3 Conclusions

Les résultats de la campagne d'essais de fluage à 550 °C indiquent que la rupture des joints soudés étudiés est de type IV, même pour des durées d'essais courtes (ce qui est peu commun dans la littérature). L'examen des éprouvettes indique que la rupture s'est produite par instabilité viscoplastique.

L'essai de fluage sur une éprouvette travers joint avec produit d'apport Thermanit MTS 616 a été interrompu en fin de stade secondaire à plus de 4500 h d'essai et l'éprouvette a été expertisée. La taille moyenne de sous-grains dans la zone adoucie a pratiquement doublé après fluage. L'état de

précipitation n'a pas été examiné mais n'a probablement pas notablement évolué d'après les données fournies par la littérature.

Les durées de vie des joints soudés sont réduites par rapport aux durées de vie du métal de base. La déformation des éprouvettes se localisent au sein de la ZAT, en particulier dans la zone adoucie. Cette zone est confinée entre deux zones plus résistantes au fluage et qui se déforment moins vite. L'effet de structure lié à ce confinement est évalué par la suite à l'aide de simulations par éléments finis.