
ÉTUDE EXPERIMENTALE DU GRADIENT DE COMPORTEMENT MÉCANIQUE GÉNÉRÉ PAR LE PROCÉDÉ DE SOUDAGE FSW ET LIEN AVEC LA MICROSTRUCTURE

La méthode de corrélation d'images numériques a été utilisée pour caractériser, localement, le gradient de propriétés mécaniques observé sur des joints soudés soumis à des chargements monotones et cycliques, uniaxiaux et multi-axiaux. Ce deuxième chapitre, exclusivement expérimental, présente les résultats obtenus. En outre, nous tenterons de relier ce gradient de propriétés mécaniques à l'évolution de la précipitation durcissante au travers du joint soudé.

2.1 Démarche expérimentale

2.1.1 Présentation des essais uniaxiaux

Dans ces travaux, le gradient de comportement mécanique du joint soudé a été étudié et caractérisé en réalisant des essais mécaniques de traction monotone et des essais cycliques sous chargement symétrique.

Il y a deux sortes d'éprouvettes, illustrées sur la figure 2.1. L'une est prélevée dans la tôle avec un joint soudé (a), qui est centré et perpendiculaire à l'axe de chargement. Les éprouvettes sont prélevées dans trois directions, respectivement selon L, T et D (45°) des tôles. Les tôles ont été soudées selon ces trois directions (Figure 2.2). Les géométries de ces éprouvettes respectent la norme ASTM E-466-07 [59].

Une deuxième éprouvette contient un joint soudé centré et orienté à 45° par rapport à l'axe de chargement (b). Cette géométrie d'éprouvette doit permettre de solliciter le joint soudé en cisaillement.

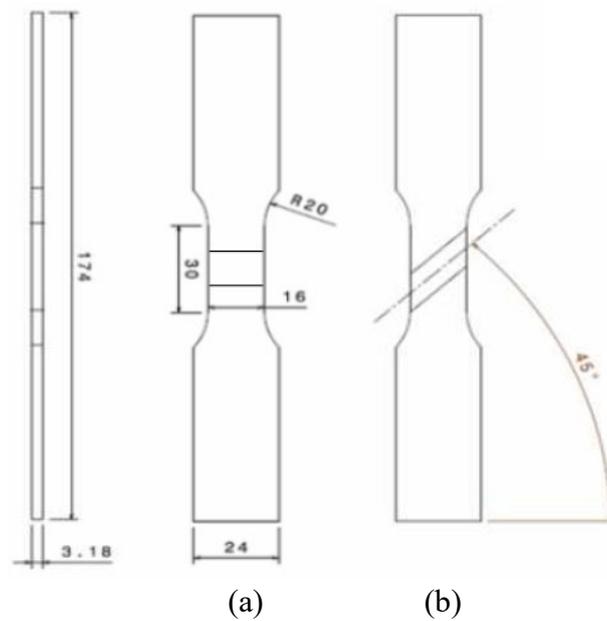


Figure 2.1 : Géométries des éprouvettes, joint soudé à 90° (a) et joint soudé à 45° (b).

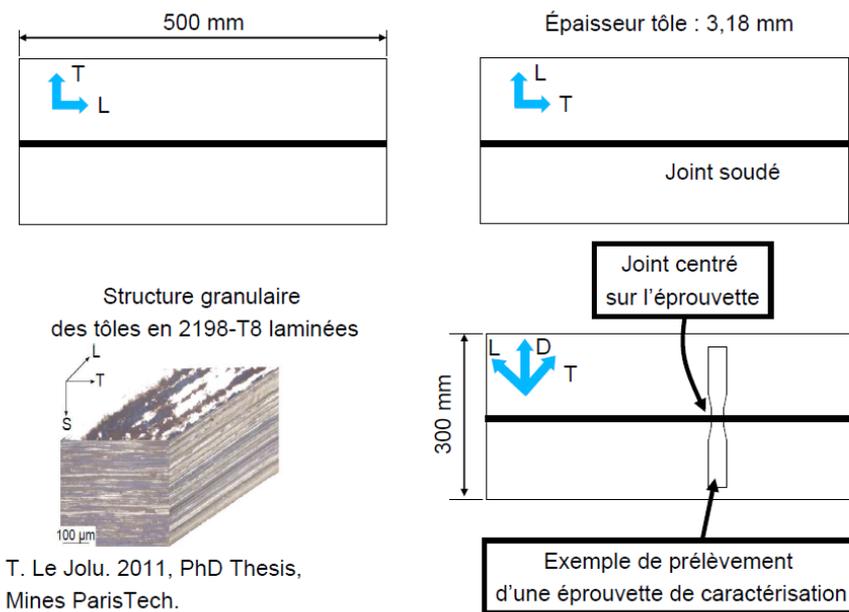


Figure 2.2 : Soudage réalisé selon trois directions de laminage différents de la tôle et exemple de prélèvement d'une éprouvette de caractérisation (+ image structure granulaire du métal de base [3]).

Dans la suite de ces travaux, les directions L, T et D correspondent à l'axe de sollicitation des éprouvettes.

Toutes les éprouvettes ont les mêmes dimensions, à savoir une longueur de 174 mm, une largeur de 24 mm dans les têtes et une largeur dans la zone utile de 16 mm. L'épaisseur est de

3,18 mm, c'est-à-dire que, dans le cas des éprouvettes avec un joint soudé, l'épaisseur n'est pas reprise après soudage. Les joints sont simplement ébavurés de façon à avoir une surface lisse. La zone utile a pour longueur 30 mm et les rayons des congés de raccordement sont de 20 mm.

Les essais de traction et cycliques sont pilotés en force avec une vitesse de pilotage de $0,2 \text{ kN.s}^{-1}$. Un essai de traction a été réalisé avec une vitesse de pilotage 100 fois plus faible ($0,002 \text{ kN.s}^{-1}$) afin de caractériser une éventuelle évolution du comportement en fonction du temps. Les essais cycliques ont été réalisés avec un rapport de charge symétrique à des niveaux de force croissants de 15,26kN, 16,28kN, 17,30kN et 18,32 kN. Ces niveaux de force correspondent, en considérant la section nominale utile de l'éprouvette, à des contraintes nominales d'environ 300MPa, 320MPa, 340MPa et 360MPa. Pour chaque niveau de force, un certain nombre de cycles est réalisé avant le passage au niveau supérieur (Figure 2.3). Le but est d'étudier le durcissement cyclique ou l'adoucissement cyclique du matériau.

L'ensemble des essais et des chargements sont regroupés dans les annexes 1.1 et 1.2.

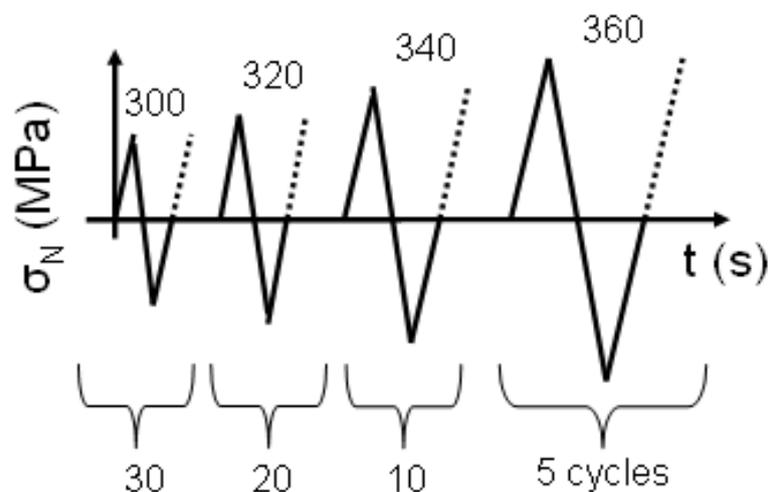


Figure 2.3 : Caractéristiques des essais cycliques à rapport de charge symétrique sur les joints soudés dans les directions T, L et D.

Lors de l'étude d'un matériau homogène, les essais sont généralement réalisés en déformation imposée [60].

Dans notre cas, les essais ont été réalisés en force imposée car les comportements mécaniques locaux des zones du joint sont très différents. Pour une déformation globale imposée à l'éprouvette, chacune des zones du joint soudé va connaître une évolution des déformations qui varie avec des durcissements différents rendant la méthode d'identification des paramètres mécaniques plus longue.

Tous les essais cycliques réalisés avec un chargement symétrique ($R_\sigma = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = -1$), sur le joint soudé, ont été rendus possibles grâce à un dispositif anti-flambage inspiré des travaux de Khan [60] (Figure 2.4). Il s'agit d'une cage en acier dans laquelle l'éprouvette peut tout de même glisser. En traction, cette cage n'a pas d'effet sur le comportement de l'éprouvette mais

pour la partie compression, il est possible qu'elle rigidifie la structure à cause de « l'effet Poisson ». Ces effets seront discutés lors de l'analyse des résultats.

La cage est dimensionnée avec deux ouvertures, sur la première face pour pouvoir réaliser la corrélation d'images au cours de l'essai et sur la deuxième face afin d'installer l'extensomètre permettant de capter le comportement global de l'éprouvette.

Les vis de cette cage sont serrées à la main arbitrairement de façon à laisser l'éprouvette libre de se déplacer, mais suffisamment serrées pour que la cage ne tombe pas lors de fortes déformations de l'éprouvette.

Les dimensions de cette cage sont présentées dans les annexes 1.3 et 1.4.

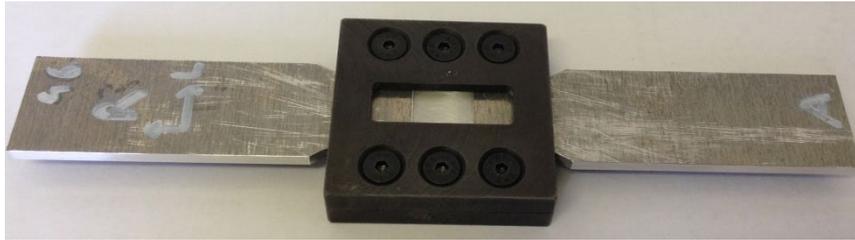


Figure 2.4 : Dispositif anti-flambage dimensionnée pour ces travaux.

Quelques essais de traction ont été réalisés sur le métal de base pour comparaison des résultats avec les essais sur joint soudé. Ils sont pilotés en déformations à l'aide de l'extensomètre mis en place sur la surface de l'éprouvette. Deux vitesses de pilotage différentes (10^{-3}s^{-1} et 10^{-5}s^{-1}) ont été imposées afin d'observer de possibles effets de viscosité sur le matériau.

Les essais réalisés dans les directions L, T et D sont pilotés jusqu'à 2% de déformation globale à une vitesse de 10^{-3}s^{-1} , puis de 2% à 4% de déformation à une vitesse de 10^{-5}s^{-1} et enfin de 4% à 6% à une vitesse de déformation de 10^{-3}s^{-1} .

2.1.2 Présentation des essais multiaxiaux

De nombreuses éprouvettes cruciformes ont été dimensionnées dans la littérature [58, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69]. La géométrie de ces éprouvettes dépend du matériau étudié, des conditions d'essais, des dimensions de la machine d'essais, ...

Dans notre étude, différentes contraintes ont conditionné la géométrie de l'éprouvette finale.

Premièrement, la machine utilisée et ses vérins hydrauliques imposent les dimensions maximales en tenant compte du jeu nécessaire lors de l'allongement du matériau.

Deuxièmement, l'épaisseur de la tôle de l'étude est initialement très faible (3,18 mm) et ne permet pas d'amincir de façon optimale l'éprouvette en son centre comme cela a pu être fait dans certains travaux [61, 62, 68].

Les premières éprouvettes dimensionnées permettaient de localiser un maximum de déformation en leur centre puisque la présence du joint soudé affaiblit la zone (Annexes 1.5 et 1.6).

Cependant, en fatigue, ces éprouvettes ont tendance à présenter une concentration importante des contraintes dans les rayons de raccordements conduisant à des amorçages de fissures dans ces zones.

Dans le but d'amorcer les fissures au centre de l'éprouvette, d'autres éprouvettes ont été testées en s'inspirant de plusieurs travaux [61, 70, 71, 72]. L'ajout de lumières dans les bras de l'éprouvette pour concentrer les efforts au centre a par exemple été essayé.

Les travaux de Mathieu [73], qui utilise une éprouvette cruciforme ont également été analysés. Une feuille de titane T35 est prise en sandwich dans l'éprouvette cruciforme. Cela permet d'obtenir un rapport entre l'épaisseur de tôle dans les mors et au centre de l'éprouvette plus important pour concentrer les contraintes. Néanmoins, cette technique s'applique plus facilement pour l'étude d'un matériau homogène sans la présence d'une soudure.

Finalement, une nouvelle géométrie d'éprouvette spécialement dimensionnée pour la fatigue a été imaginée et est présentée sur la figure 2.5 et en annexe 1.7.

Elle s'inspire de différents travaux dans lesquels l'épaisseur de l'éprouvette a été amincie en son centre [61, 63, 64, 65, 66, 67].

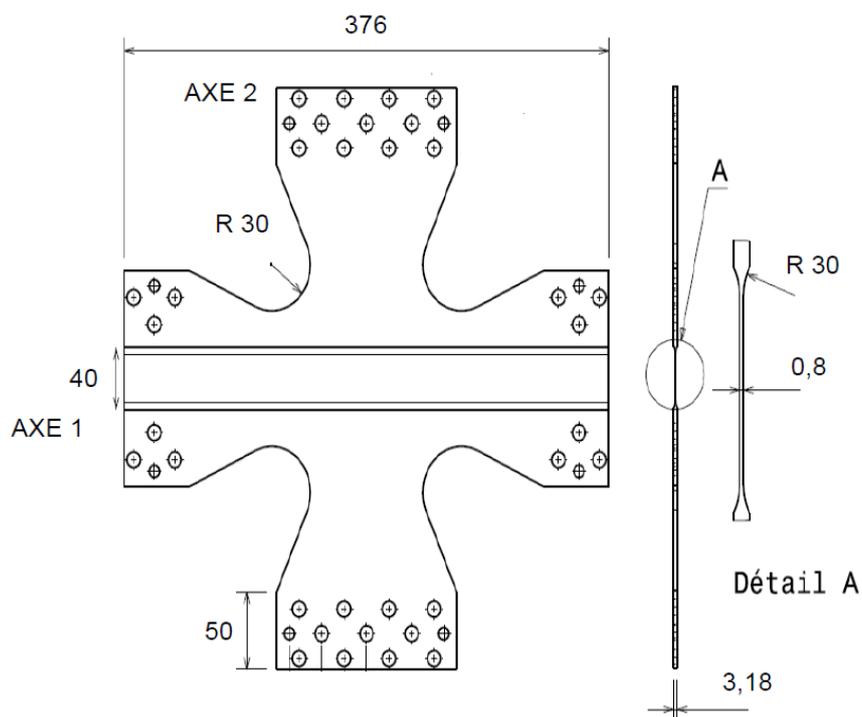


Figure 2.5 : Éprouvette cruciforme dimensionnée pour valider le modèle de comportement mécanique et étudier le joint soudé en fatigue multiaxiale.

L'épaisseur dans la zone centrale est ramenée à 0,8 mm (Figure 2.6).

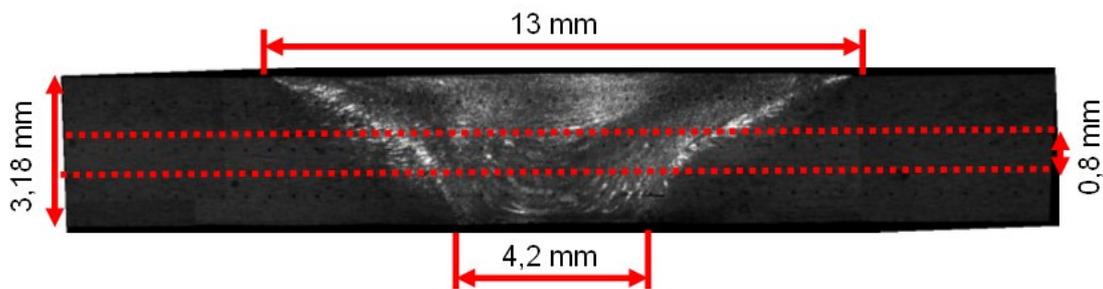


Figure 2.6 : Joint soudé par FSW observé dans l'épaisseur de la tôle par Microscope Optique.

Les conditions expérimentales des quatre essais réalisés en multiaxial sont illustrées par les figures 2.7 et 2.8. Pour chacun des essais, la courbe du haut représente les efforts imposés sur l'axe 2 (Cf. Figure 2.5) et la courbe du bas, les efforts imposés sur l'axe 1. Les essais sont tous réalisés en phase. Les types de chargements diffèrent afin d'avoir différents rapports de multiaxialité.

Afin de présenter rapidement les résultats expérimentaux, on utilise la « contrainte », qui correspond à la force imposée au loin de l'éprouvette divisée par la section initiale située dans la zone utile de l'éprouvette. La « déformation » correspond quant à elle à la moyenne de la déformation selon l'axe de chargement le long d'une ligne perpendiculaire au chargement. Cette technique est décrite dans le paragraphe 2.2.3.2 de ce chapitre (Figure 2.11).

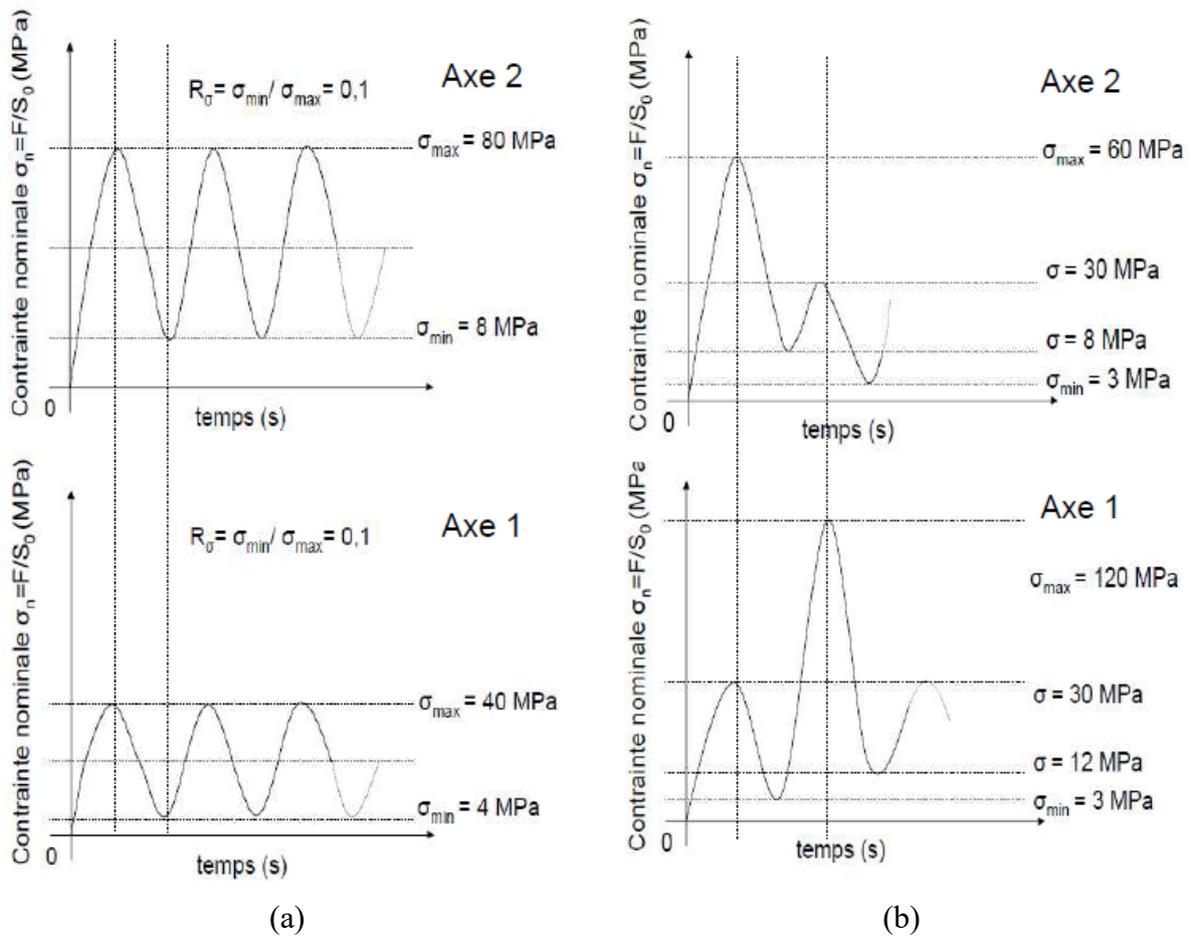


Figure 2.7 : Conditions d'efforts imposés sur les axes 1 et 2 pour les essais biaxiaux n°4 (a) et n°5 (b).

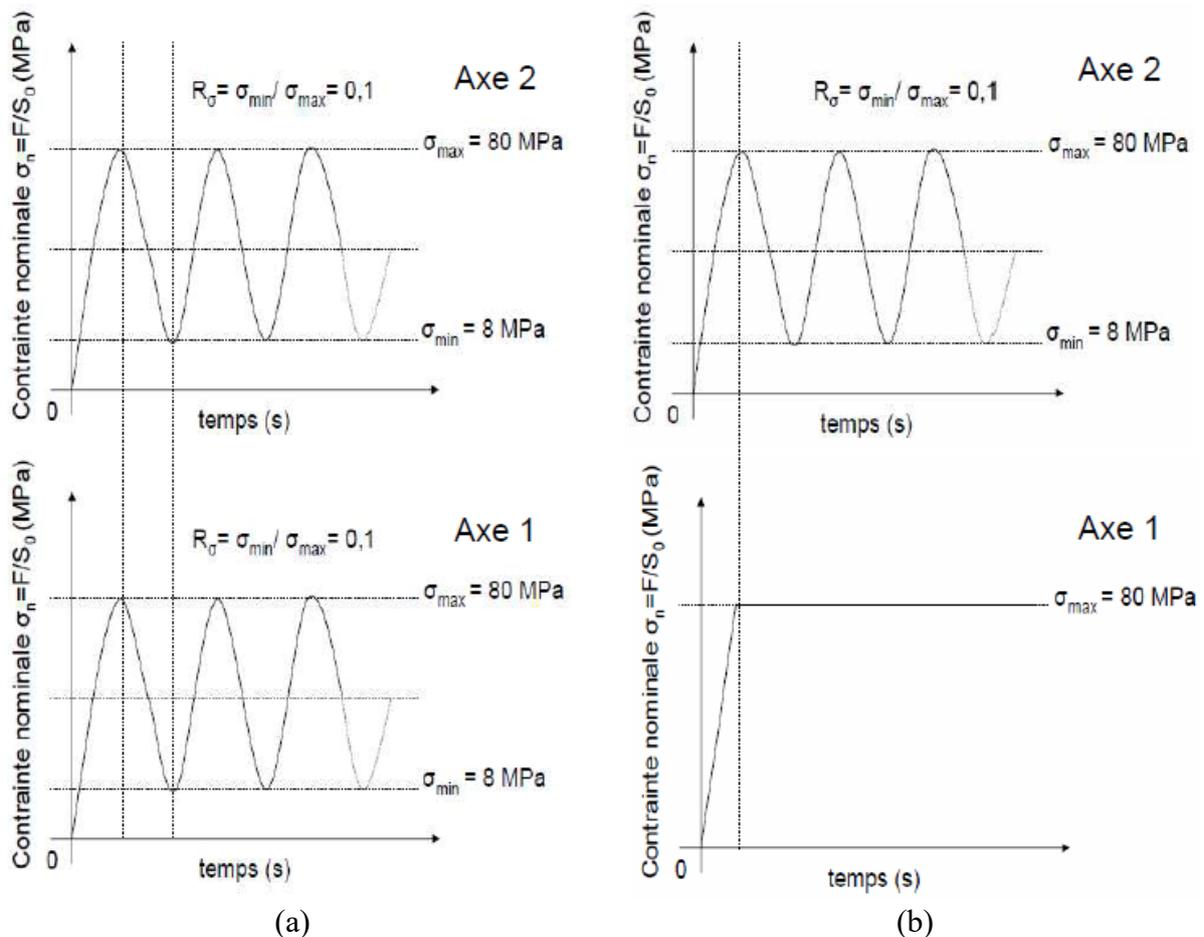


Figure 2.8 : Conditions d'efforts imposés sur les axes 1 et 2 pour les essais biaxiaux n°6 (a) et n°7 (b).

Pour l'essai n°4, un rapport d'efforts de 0,5 entre l'axe 1 (parallèle au joint soudé) et l'axe 2 (perpendiculaire au joint soudé). En effet, un chargement mécanique plus important est imposé dans l'axe 2 permettant l'ouverture du joint soudé. Pour chaque axe, les cycles ont un rapport de charge de 0,1. Il s'agit d'un essai typique des industriels qui se rapproche des sollicitations vues en service.

Pour l'essai n°5, réalisé dans le sens L, le chemin de chargement est plus complexe. Le premier cycle de cet essai est identique à celui de l'essai n°4 avec l'équivalent de 60 MPa dans l'axe 2 et 30 MPa dans l'axe 1. La deuxième partie de cet essai consiste à inverser les efforts en imposant un chargement plus important dans le sens du joint afin de le « refermer » après le premier cycle. Une contrainte en sortie de mors équivalente à 120 MPa est imposée dans l'axe 1 et de 30 MPa dans l'axe 1.

Les cycles ont également un rapport de charge de 0,1.

L'essai n°6, présenté sur la figure 2.8, est réalisé dans la direction T. Contrairement à l'essai n°4, cet essai propose un rapport de 1 entre les axes 1 et 2. L'objectif de cet essai est de comparer sa durée de vie en fatigue avec celle de l'essai n°4.

Enfin l'essai n°7 est réalisé dans la direction de sollicitation L. La spécificité de cet essai est d'imposer un chargement constant dans l'axe 1 afin d'empêcher l'ouverture du joint soudé par les chargements imposés dans l'axe 2. Il s'agit également de relier cet essai aux essais n°4 et n°5, en effet, seul le chargement sur l'axe 1 change entre ces trois cas.

Les essais n°4, n°6 et n°7 sont pilotés à la même vitesse ($0,8 \text{ kN.s}^{-1}$) tandis que pour l'essai n°5, il y a une variation des vitesses afin que les sommets des efforts maximaux et minimaux des axes 1 et 2 soient en phase. Les vitesses de pilotage ont été choisies afin de permettre au dispositif de corrélation d'images GOM d'enregistrer les images au cours des cinq premiers cycles. L'objectif est de visualiser le comportement mécanique du joint soudé et de pouvoir ensuite valider le modèle de comportement mis en place à l'aide des essais uniaxiaux.

2.2 Moyens d'essais expérimentaux

2.2.1 Machine de fatigue uniaxiale

Les essais sous chargement uniaxial ont été réalisés sur une machine servo-hydraulique LOS SYSTEM Losenhausen (Great Britain) Ltd de 100 kN à vérins hydrauliques MTS. Ils ont été effectués à température ambiante.

Un extensomètre à couteaux MTS de base 25 mm avec une plage de déformation de $\pm 15\%$ ($\pm 3,75 \text{ mm}$) est utilisé pour mesurer la déformation globale. Il est placé sur la face arrière de l'éprouvette (Figure 2.9). Tandis que sur la face avant, des caméras sont mises en place pour réaliser la stéréo corrélation d'images numériques.

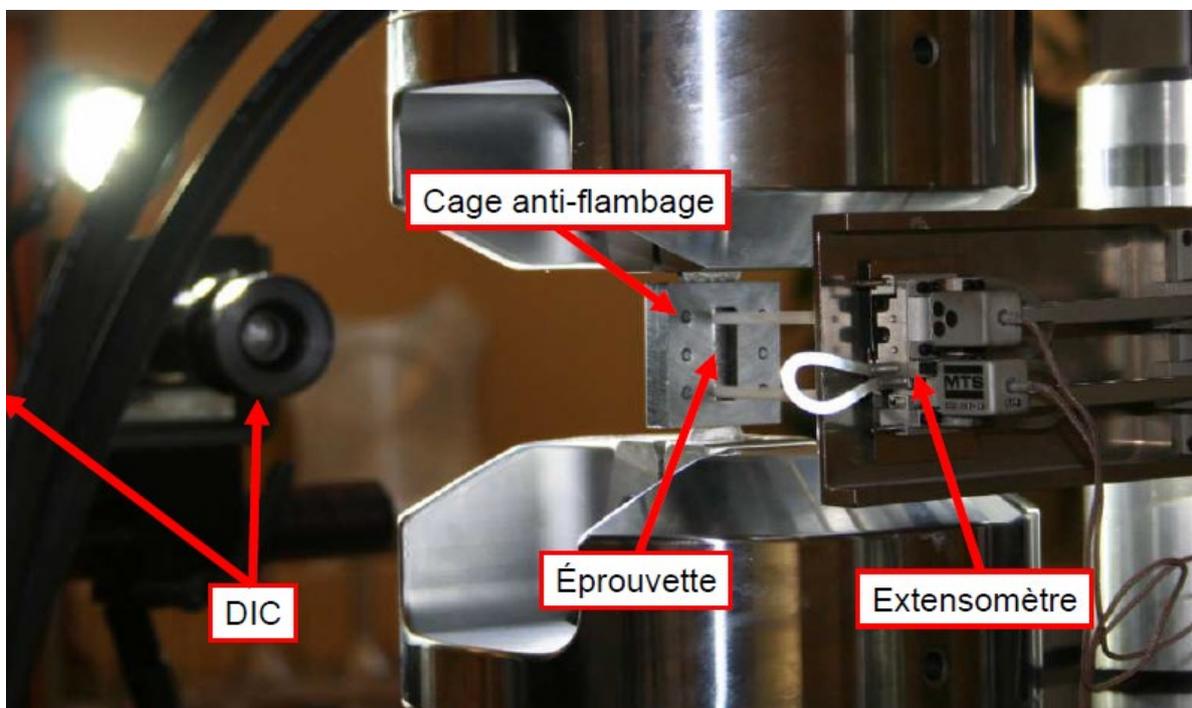


Figure 2.9 : Disposition de l'extensomètre et des caméras, pour la stéréo-corrélation, par rapport à l'éprouvette uniaxiale.

2.2.2 Machine de fatigue biaxiale

Les essais sous chargement biaxial ont été réalisés sur une machine propre à l'ONERA, composée d'un vérin hydraulique SCHENCK d'une capacité maximale en dynamique de 160 kN sur chaque axe, avec une course de 20 mm.

Les déplacements latéraux de l'éprouvette sont accommodés par des bras à lamelles souples. Des mors ont été spécialement conçus au cours de cette thèse pour accueillir les éprouvettes cruciformes.

2.2.3 Utilisation de la corrélation d'images numériques pour l'étude du comportement mécanique

2.2.3.1 Principe de base

Au cours des essais sous chargement uniaxial et multiaxial, la méthode de stéréo-corrélation d'images numériques est le principal outil utilisé pour capter les champs de déformations locaux à travers tout le joint soudé par FSW [77]. La technique est sans contact (Figure 2.10). Les images successives de la surface de l'éprouvette au cours de l'essai sont comparées entre elles, ce qui permet d'observer les déplacements au cours du temps. Il est ensuite possible en post-traitement, de calculer les déformations locales de l'éprouvette.

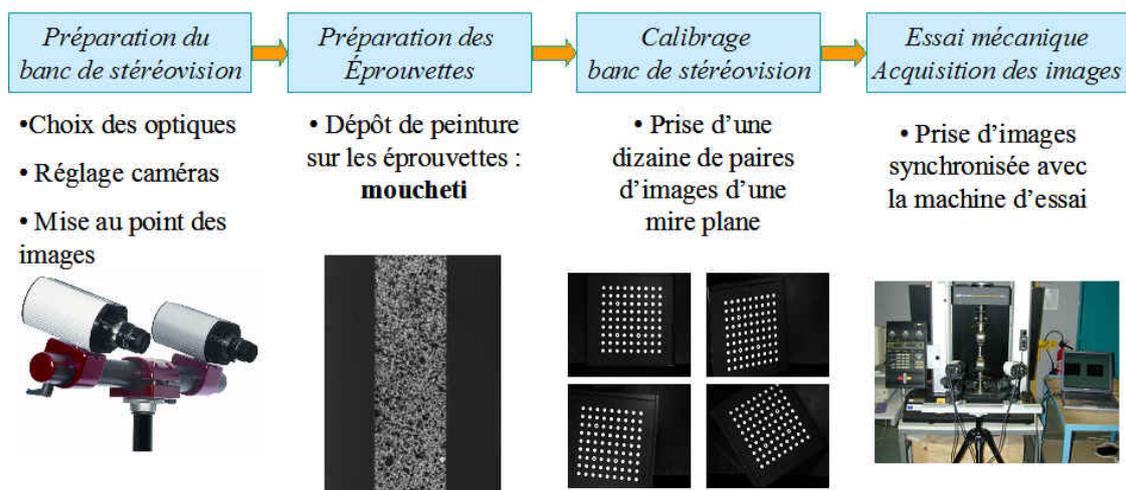


Figure 2.10 : Principe de base de la stéréo-corrélation d'images numériques [121].

Le logiciel utilisé en post-traitement permet d'analyser des images numériques pour lesquelles il va allouer à chaque pixel des coordonnées spatiales. La première image de l'étude est appelée image de référence et représente l'échantillon à l'état non déformé.

Au cours de la déformation de l'échantillon, une série d'images est enregistrée à l'aide de deux caméras CCD afin que le logiciel puisse, en post-traitement, comparer ces images numériques et calculer les champs de déplacement et de déformation sur la surface de l'échantillon.

La détermination du champ de déplacement est déterminée entre deux images à l'aide de « zones d'intérêts » ou motif (Figure 2.12). Ces zones sont comparées les unes aux autres et aussi entre elles d'une image de « référence » à une image « déformée ». La qualité du

mouchetis, des équipements de mesures (caméras, ...), de la luminosité et des résultats recherchés vont définir le nombre de zones à considérer et leur taille. Ces zones peuvent se chevaucher ou même être éloignées.

L'avantage de la corrélation d'images numériques est de pouvoir observer localement de faibles déplacements. L'inconvénient de cette méthode peut être le temps de post-traitement qui varie selon le nombre d'images à analyser.

Dans le cadre de cette étude, le système ARAMIS [78] est utilisé. La stéréo-corrélation permet de mesurer des champs de déplacement en 3D (Annexe 1.8).

De nombreux réglages ont été effectués concernant le nombre, tailles et positionnement des « zones d'intérêts » ou « pattern ». Différentes tailles de motif et différents espacements ont été testés. Les erreurs de calculs sont toujours inférieures à la taille du pixel. Le tableau 2.1 propose les résultats obtenus sur un test avec des « patterns » de taille 70x70 pixels. L'essai consiste à imposer un déplacement machine croissant et de réaliser en même temps la corrélation d'images sur l'éprouvette, d'un matériau homogène, sollicitée mécaniquement. Un déplacement moyen est calculé par le logiciel en fonction des images recueillis par les caméras. Une comparaison entre le déplacement calculé et celui imposé à la machine permet de mesurer l'erreur induite par la technique de corrélation d'images.

Tableau 2.1 : Comparaison des déplacements obtenus par la machine d'essai et la corrélation d'images numériques.

| Pattern (pixel) | Images | Déplacement moyen (mm) | Déplacement machine (mm) | Erreur systématique (mm) | Erreur en pixel |
|-----------------|--------|------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------|
| 70x70 | 2 | 0,194 | 0,2 | 0,006 | 0,3 |
| | 3 | 0,405 | 0,4 | 0,005 | 0,3 |
| | 4 | 0,611 | 0,6 | 0,011 | 0,6 |
| | 5 | 0,805 | 0,8 | 0,005 | 0,2 |
| | 6 | 1,006 | 1 | 0,006 | 0,3 |
| | 7 | 1,513 | 1,5 | 0,013 | 0,7 |
| | 8 | 2,017 | 2 | 0,017 | 0,9 |

2.2.3.2 Création d'un extensomètre virtuel et validation de la technique

La méthode est présentée sur la figure 2.11. Elle consiste à récupérer les déplacements obtenus par DIC à l'endroit où les couteaux de l'extensomètre sont posés sur l'éprouvette. Il importe de prendre la moyenne des mesures obtenues par DIC sur la ligne de contact. La longueur utilisée reste néanmoins inférieure à la largeur de l'éprouvette, afin d'éviter les perturbations à proximité des bords.

La comparaison entre les résultats obtenus par l'extensomètre et la DIC permet de valider l'utilisation de celle-ci pour l'étude du comportement mécanique global du joint soudé.

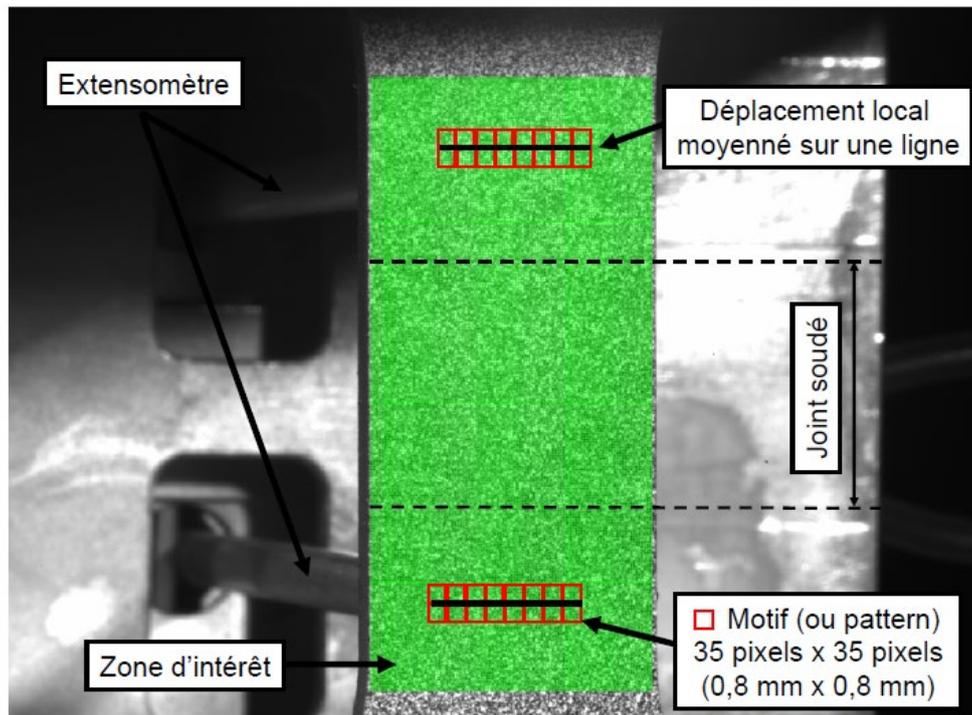


Figure 2.11 : Réalisation d'un extensomètre virtuel à l'aide de la méthode de corrélation d'images au cours d'un essai mécanique.

La courbe de traction, dans la direction L, est représentée sur la figure 2.12. Il y a un très bon accord entre la mesure obtenue à l'aide de l'extensomètre et le résultat de calcul de la corrélation d'images numériques (DIC) recréant un « extensomètre virtuel ».

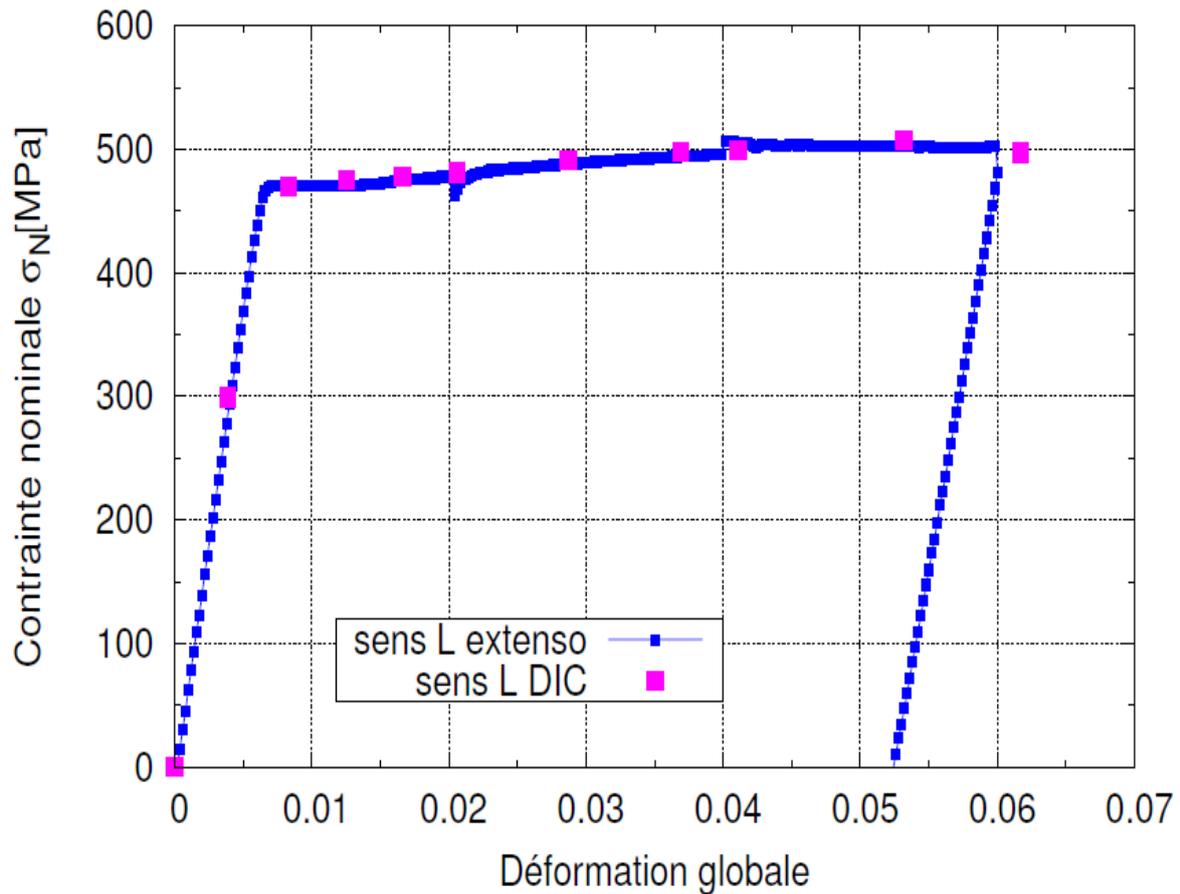


Figure 2.12 : Comparaison du comportement mécanique global de l'alliage d'aluminium 2198-T8, sollicité en traction, et obtenu par DIC et par un extensomètre.

De la même façon que sur le métal de base, la corrélation d'images numériques a été validée sur un matériau dont le comportement mécanique est hétérogène à travers l'éprouvette.

La figure 2.13 affiche la comparaison du comportement mécanique global entre les résultats obtenus par l'extensomètre et ceux obtenus avec la DIC dans la direction T, la soudure étant réalisée dans la direction de laminage de la tôle et le chargement se faisant perpendiculairement au joint.

Cet essai permet de valider l'utilisation de cette méthode pour un joint soudé.

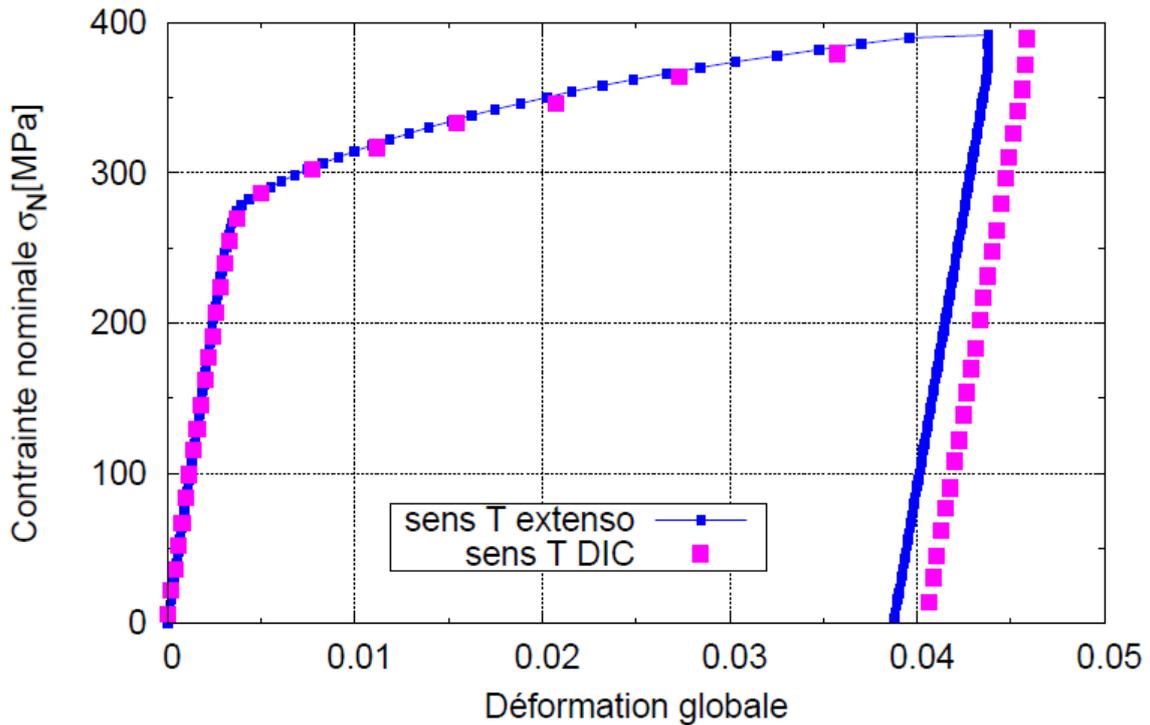


Figure 2.13 : Comparaison du comportement mécanique d'un joint soudé en 2198-T8, sollicité en traction, et obtenu par DIC et par un extensomètre.

Après validation de la méthode de corrélation d'images pour des essais de traction sur le métal de base seul et sur le joint soudé, la technique est appliquée sur le métal de base pour un essai cyclique à incrément croissant de déformation. La figure 2.14 affiche la comparaison entre les boucles d'hystérésis obtenues avec l'extensomètre et par DIC pour les quatre niveaux de déformations. Les résultats montrent que l'utilisation de la DIC permet de bien reproduire le comportement mécanique du matériau.

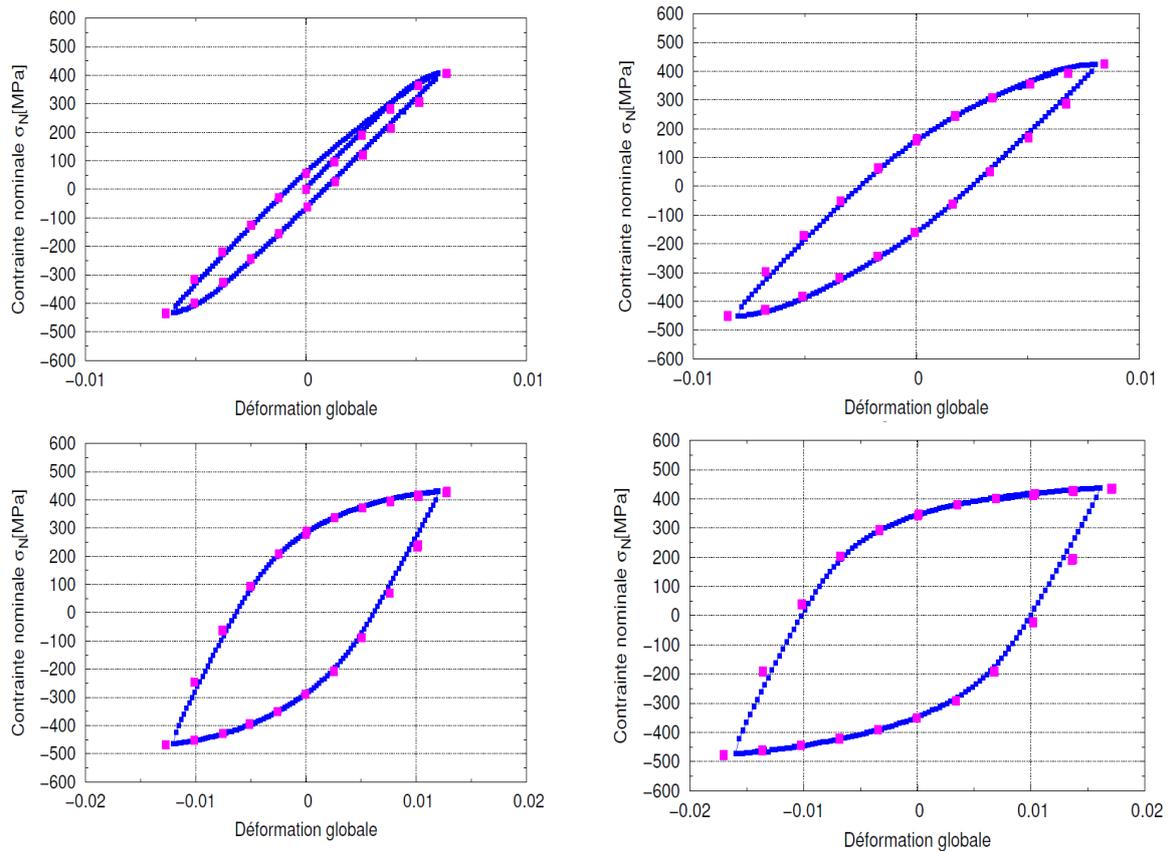


Figure 2.14 : Comparaison du comportement mécanique global obtenu par DIC et extensomètre, de l'alliage d'aluminium 2198-T8 dans la direction de laminage D, pour un essai cyclique à quatre niveaux d'incrément de déformations.

De même, la figure 2.15 propose la comparaison entre le comportement mécanique global d'un joint soudé, mesuré par un extensomètre et un extensomètre virtuel (corrélation d'images numériques). Seules la première boucle d'hystérésis et la dernière boucle (dite stabilisée) de l'essai sont proposées. Il s'agit d'un essai à force imposée avec une contrainte nominale de 300 MPa et avec un rapport de charge symétrique.

On observe une très grande similitude entre les deux techniques de mesure, ce qui confirme l'intérêt d'utiliser la méthode de corrélation pour obtenir les comportements mécaniques locaux des différentes zones du joint soudé.

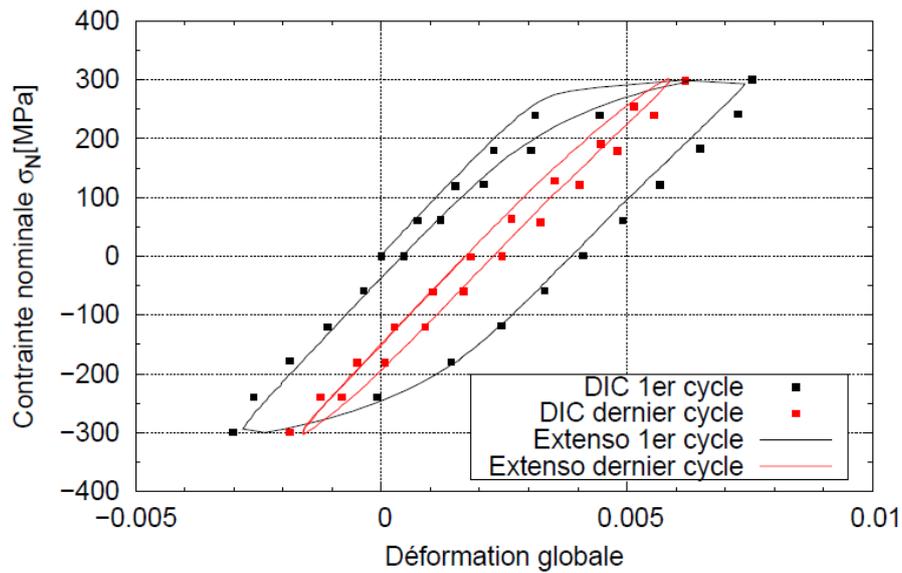


Figure 2.15 : Comparaison du comportement mécanique global obtenu par DIC et extensomètre, d'un joint en alliage d'aluminium 2198-T8 soudé par FSW (soudure dans la direction de laminage L).

2.3 Analyse des essais de traction monotone réalisés sur joints soudés

2.3.1 Étude de la réponse globale du joint soudé

Deux essais de traction ont été menés sur un joint soudé sollicité dans la direction T. Les vitesses de pilotage en force sont de $0,2 \text{ kN}\cdot\text{s}^{-1}$ pour l'un et $0,002 \text{ kN}\cdot\text{s}^{-1}$ pour l'autre. Les courbes « déformation globale – contrainte nominale » sont représentées sur la figure 2.16.

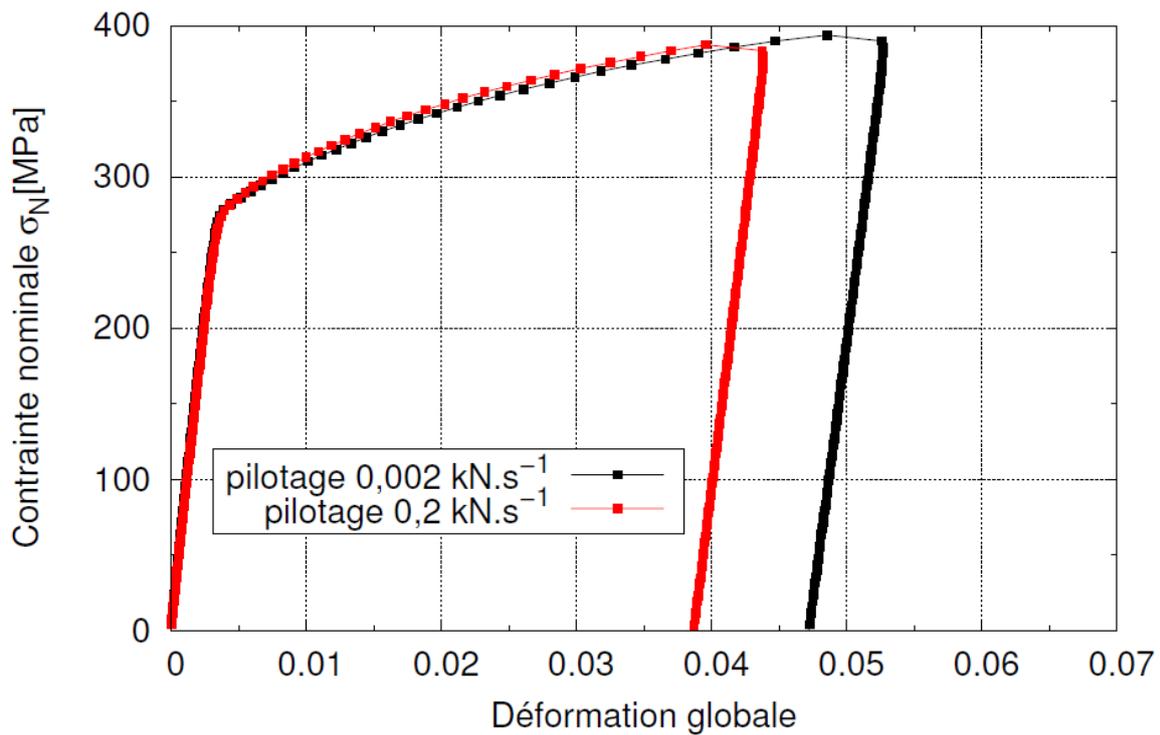


Figure 2.16 : Comparaison des comportements mécaniques globaux, obtenus par un extensomètre, d'un joint soudé en 2198-T8 pour deux essais de traction pilotés à deux vitesses différentes (0,2 kN.s⁻¹ et 0,002 kN.s⁻¹).

Ces résultats montrent qu'il n'y a pas d'effet de la vitesse de pilotage en force des essais. La différence d'allongement observée est due aux niveaux des contraintes maximales des deux essais qui ne sont pas identiquement les mêmes. Le comportement plastique de ce matériau ne présentant pas d'écrouissage, un faible ajout de contraintes conduit à une grande différence de déformation totale.

Après avoir observé le comportement mécanique du joint soudé dans la direction T, il est intéressant de le comparer avec les résultats obtenus dans les autres directions L et D (Figure 2.17).

Une variation d'environ 200 N, soit environ 4 MPa, peut modifier l'allongement du matériau de quelques pourcent. Cette variation provient de l'écart entre la consigne et la commande de la machine dont le PID est très sensible.

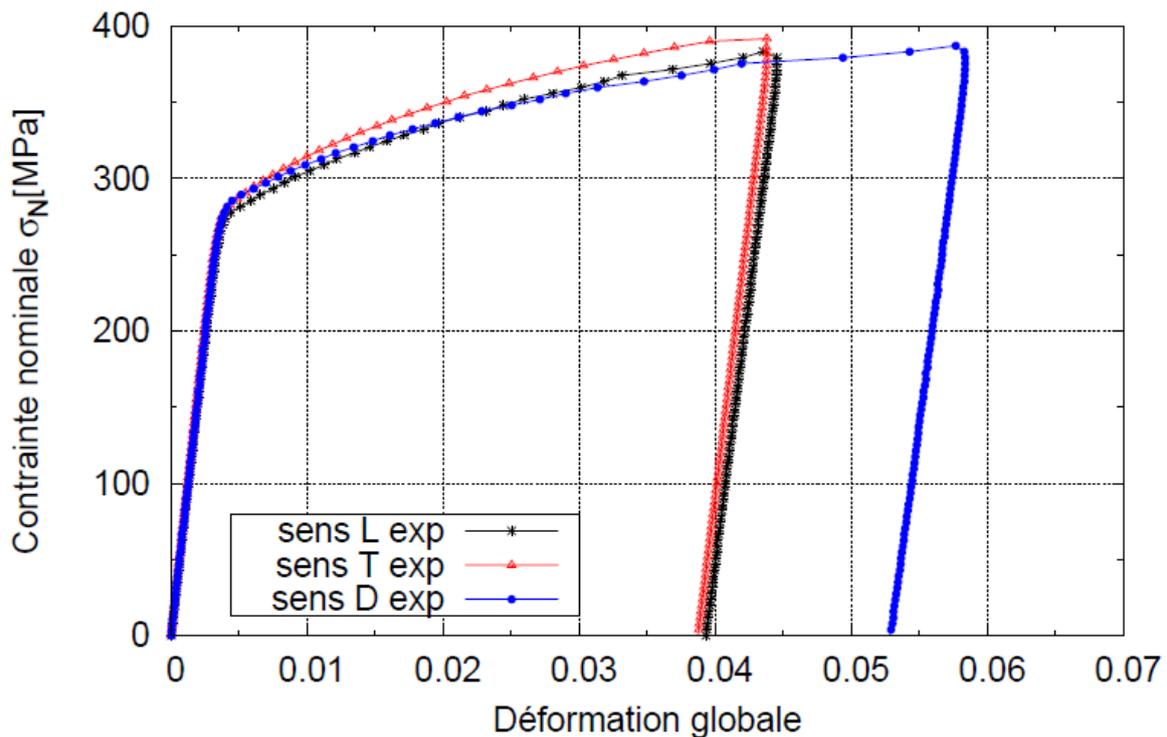


Figure 2.17 : Comparaison du comportement mécanique global de l'alliage d'aluminium 2198-T8 obtenus pour des soudures réalisées dans les directions de laminage L, T et D.

Une très légère différence est visible entre les trois éprouvettes. La limite d'élasticité de la structure est plus élevée lorsque le joint est soudé dans la direction du laminage (T) que dans les cas D et L. Dans l'ensemble, d'un point de vue macroscopique les résultats sont très proches, avec un comportement mécanique qui est quasiment isotrope.

Des essais de traction ont été menés sur le métal de base sur trois éprouvettes prélevées dans les directions de laminage L, T et à 45° (D). Les tractions dans les trois sens de laminage sont représentées sur la figure 2.18. Les résultats affichés ne montrent pas de changement du comportement du matériau en fonction du temps et pour les trois directions L, T et D à température ambiante.

On observe une évolution de la limite élastique selon la direction de laminage. Dans la direction L, l'alliage paraît être le plus résistant avec une limite élastique d'environ 470 MPa. Les travaux de Chen [20], Le Jolu [3] et Richard [8] affichent une limite élastique dans la direction L, respectivement, de 496 MPa, 490 MPa et 490 MPa.

Dans la direction T, la limite élastique se situe à environ 450 MPa, pour 473 MPa dans les travaux de Chen et pour 470 MPa dans les travaux de Le Jolu.

Dans la direction D, la limite élastique diminue fortement avec une valeur d'environ 380 MPa, c'est-à-dire une chute d'environ 20% par rapport à la direction L. Les travaux de Chen et Le Jolu donnent des valeurs respectivement de 414 MPa et de 400 MPa. Les matériaux de ces deux études ont des propriétés un peu plus élevées que celles de notre matériau. Cependant, les rapports entre les limites élastiques dans les trois directions restent quasi-identiques.

Enfin, cette différence de comportement selon la direction du laminage a également été observée sur un alliage 2195-T8 très semblable au matériau de notre étude [79]. Les limites élastiques mesurées sont de 550 MPa dans la direction L, 530 MPa dans la direction T et 470 MPa dans la direction D. Cela donne une diminution d'environ 14% à la direction D par rapport à la direction L ; ce résultat est très proche de celui observé sur la figure 2.18.

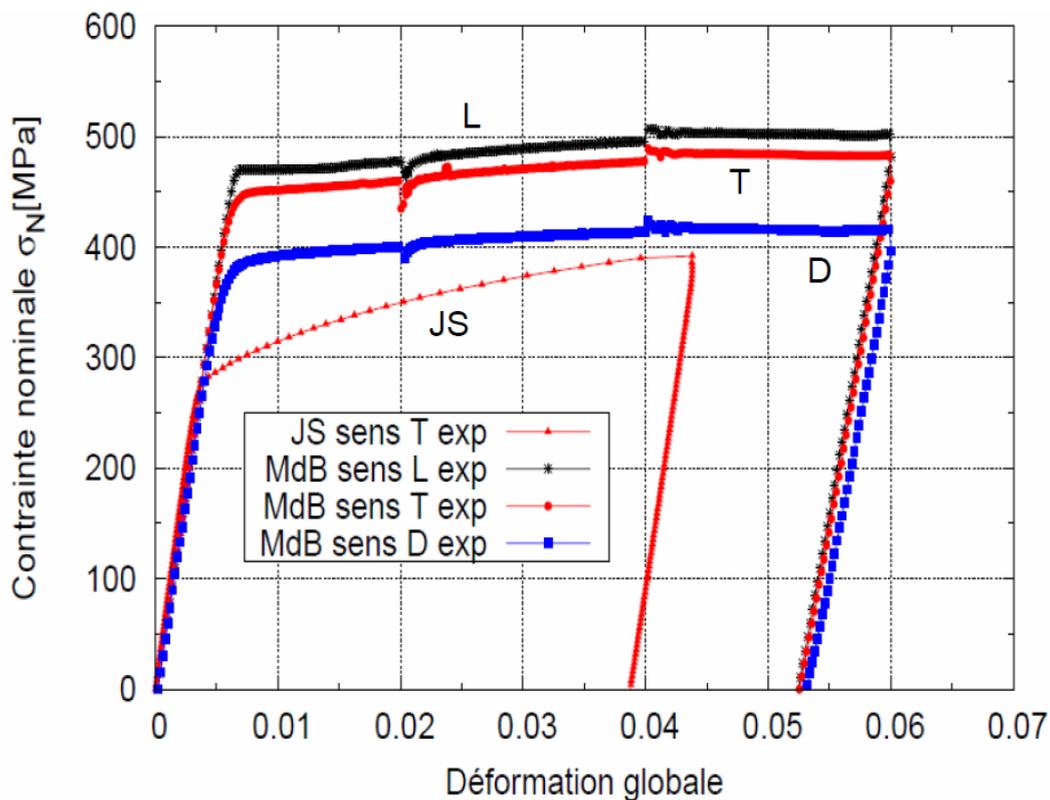


Figure 2.18 : Variation du comportement mécanique global de l'alliage d'aluminium 2198-T8, sollicité en traction, en fonction de la direction de laminage (L, T et D).

La comparaison des comportements mécaniques globaux entre le métal de base et le joint soudé pris dans la direction T permet de visualiser une forte différence de limite élastique entre les deux (Figure 2.18). En effet, le joint soudé semble avoir une limite élastique d'environ 280 MPa tandis que le métal de base, étudié précédemment, a une limite élastique s'approchant de 450 MPa. Il y a donc une diminution de la limite élastique de 40% après soudage.

Enfin, cette figure montre aussi que la contrainte à rupture du joint soudé tend vers une asymptote d'environ 400 MPa. À ce niveau de contrainte, on observe que le métal de base est encore à l'état élastique.

2.3.2 Analyse des champs de déformations locaux pour un joint soudé sollicité dans la direction T

On s'intéresse désormais à l'analyse des comportements mécaniques locaux sur un joint soudé par FSW. Le joint soudé étudié en priorité est celui sollicité dans la direction T, c'est-à-dire que la soudure est réalisée dans la direction du laminage de la tôle. En effet, il s'agit de la direction généralement choisi par les industriels.

L'analyse des champs de déformation expérimentaux permet d'observer l'évolution du comportement mécanique du joint soudé au cours de l'essai de traction (Figure 2.19).

Pour une contrainte nominale de 180 MPa, le comportement mécanique global du joint soudé est élastique. De même, localement, la déformation est homogène dans toute la section utile de l'éprouvette. Pour une contrainte de 290 MPa, une forte localisation de la déformation se forme au centre du joint soudé. Localement, les déformations maximales atteignent un niveau de 1,8% dans le Noyau Soudé, tandis que globalement, le joint ne se déforme que d'environ 0,75%. Enfin, pour une contrainte nominale de 380 MPa, le maximum de la traction est atteint. La déformation globale mesurée est de 4,4%. Un important gradient de déformation est observé localement avec un maximum de 11,5% dans le Noyau Soudé.

Des lignes d'iso-valeurs sont ajoutées aux champs de la figure 2.19. Il n'existe pas de dissymétrie marquée sur les champs de déformation entre l'Advancing Side (AS) et le Retreating Side (RS).

Lorsque le joint commence à se déformer plastiquement, on remarque qu'une frontière abrupte se crée entre le joint soudé et le métal de base, ce phénomène s'accompagnant d'une striction.

La zone déformée s'agrandit au cours du chargement de traction pour atteindre une largeur maximale d'environ 17 mm. Cela correspond approximativement à la largeur de l'épaulement de l'outil de soudage.

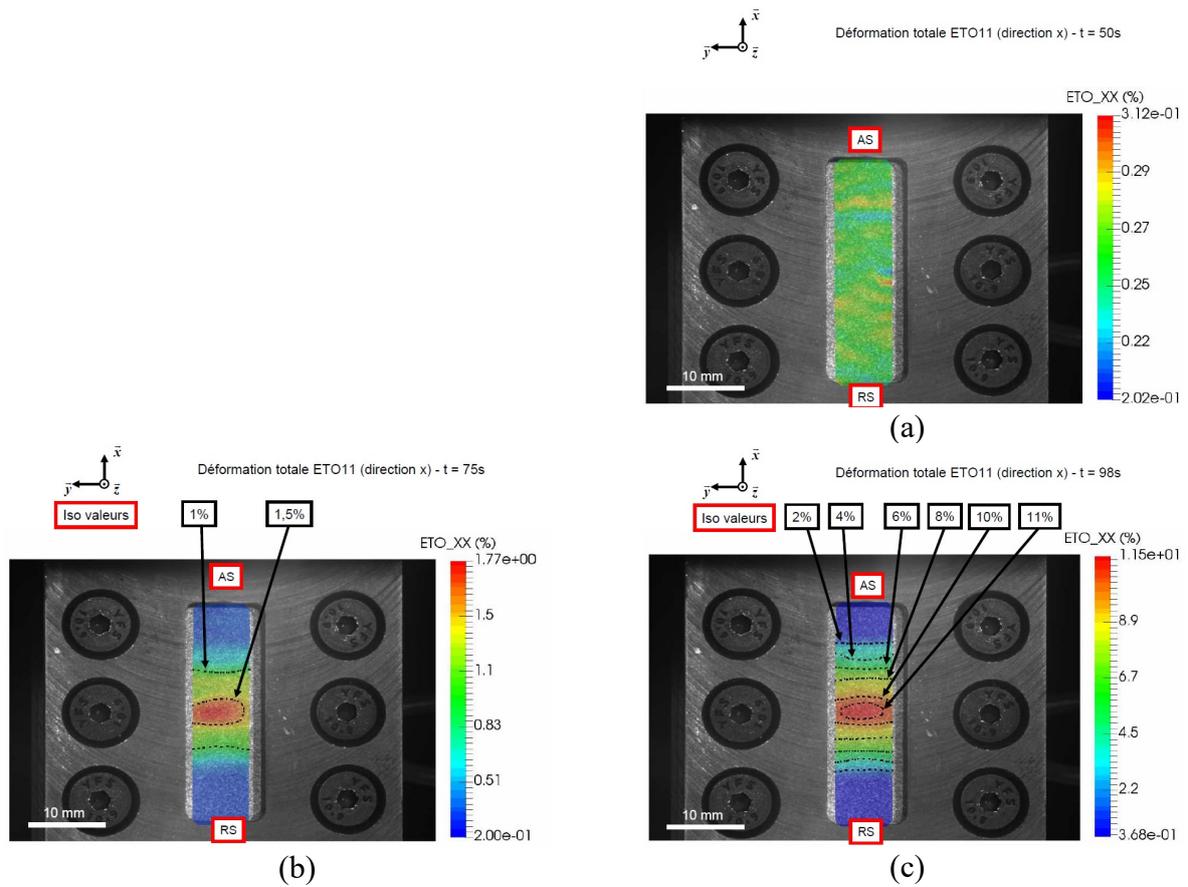


Figure 2.19 : Champs de déformation expérimentaux selon l'axe x à trois niveaux de contrainte d'un essai de traction sur un joint soudé dans la direction du laminage de la tôle (direction T) – a : 180 MPa – b : 290 MPa – c : 380 MPa (l'axe de traction est verticale sur la figure).

L'évolution de la déformation en fonction du temps est extraite de ces champs de déformation en différentes zones d'intérêts (voir procédure détaillée plus haut). Ces zones sont spécifiques et choisies en fonction de la microstructure du joint soudé (Figure 2.20).

La figure 2.21 illustre les zones étudiées par DIC pour extraire les courbes « déformation locale – temps ».

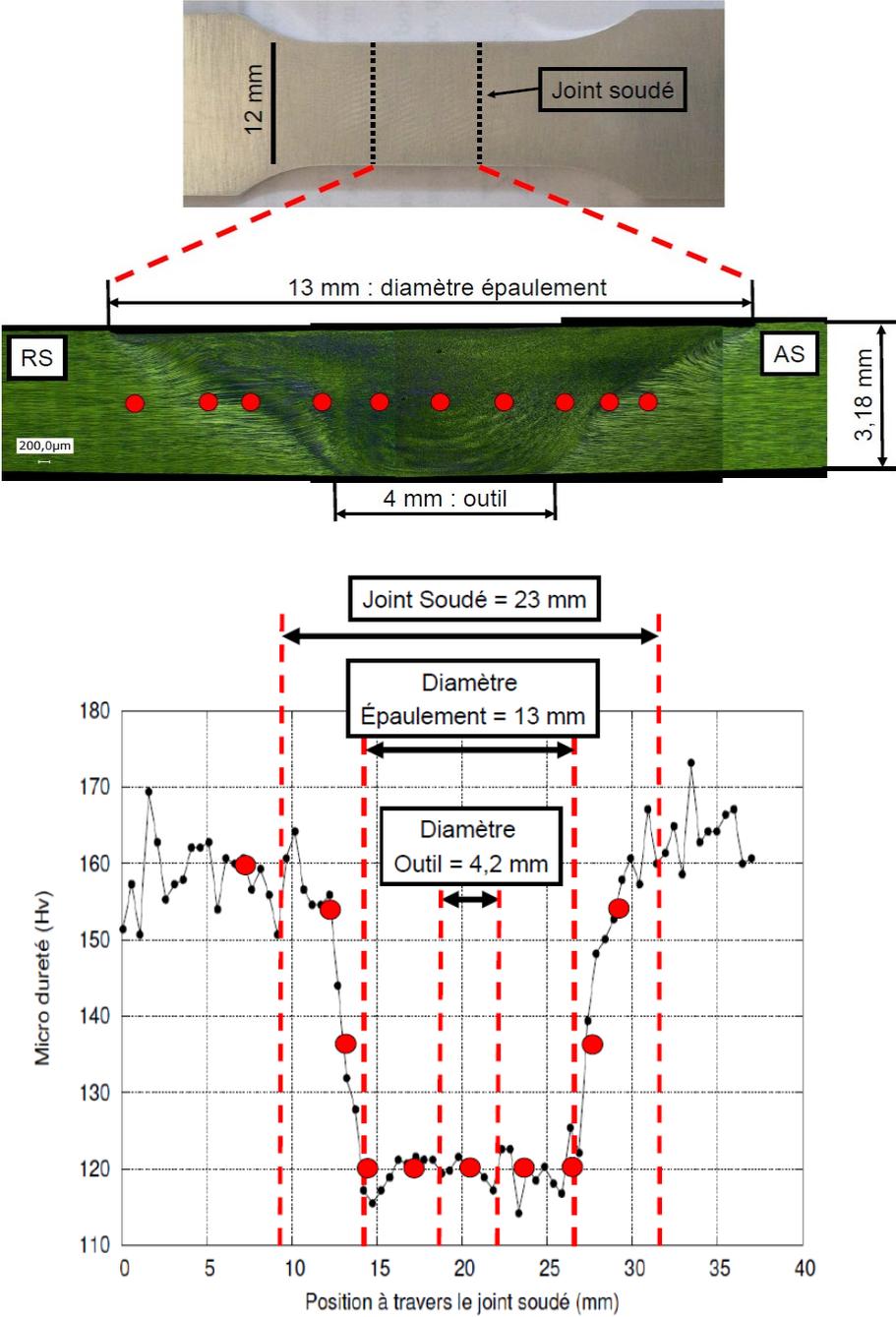


Figure 2.20 : Microdureté à travers le joint soudé (à mi-épaisseur du joint).

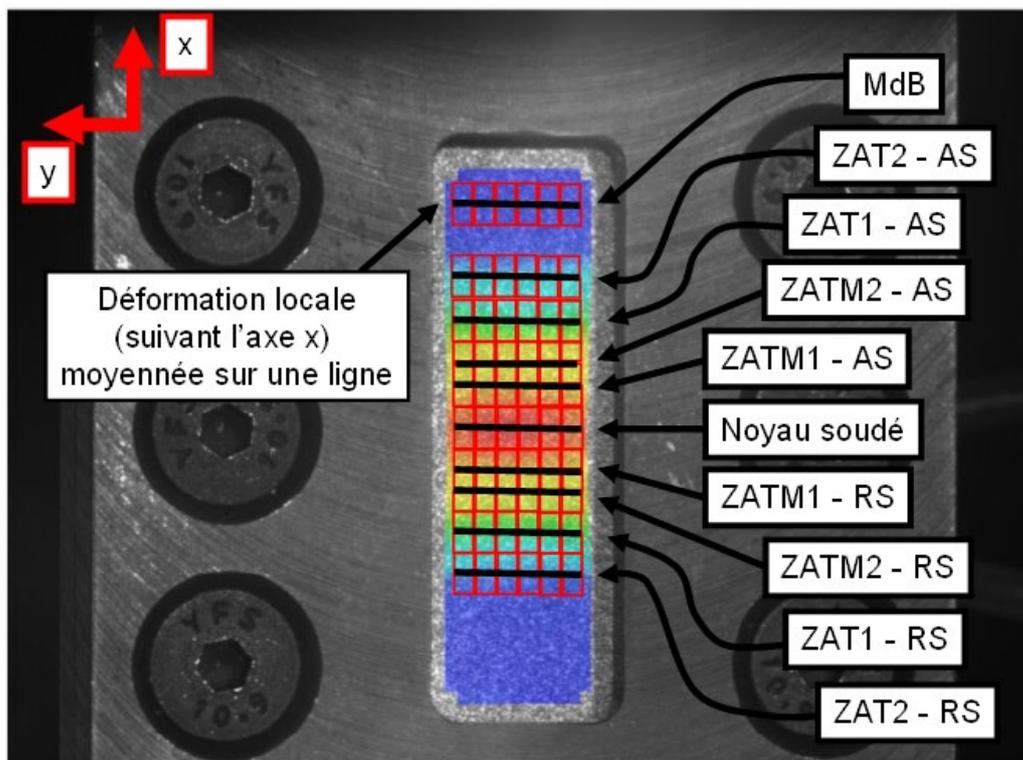


Figure 2.21 : Déformations locales (ϵ_{xx}) moyennées sur une ligne (suivant l'axe x) pour chaque zones du joint soudé étudiées.

La figure 2.22 représente les courbes « déformation locale – contrainte nominale » pour six zones du joint soudé côté Advancing Side (AS), du métal de base (MdB) jusqu'au centre du joint dans le noyau soudé (NS).

L'analyse de la micro-dureté à travers le joint soudé (Figure 2.20) et la figure 2.19 ne révèlent pas de différences entre les côtés Advancing Side (AS) et Retreating Side (RS). Cela est aussi vérifié sur les courbes « déformation locale – contrainte nominale ».

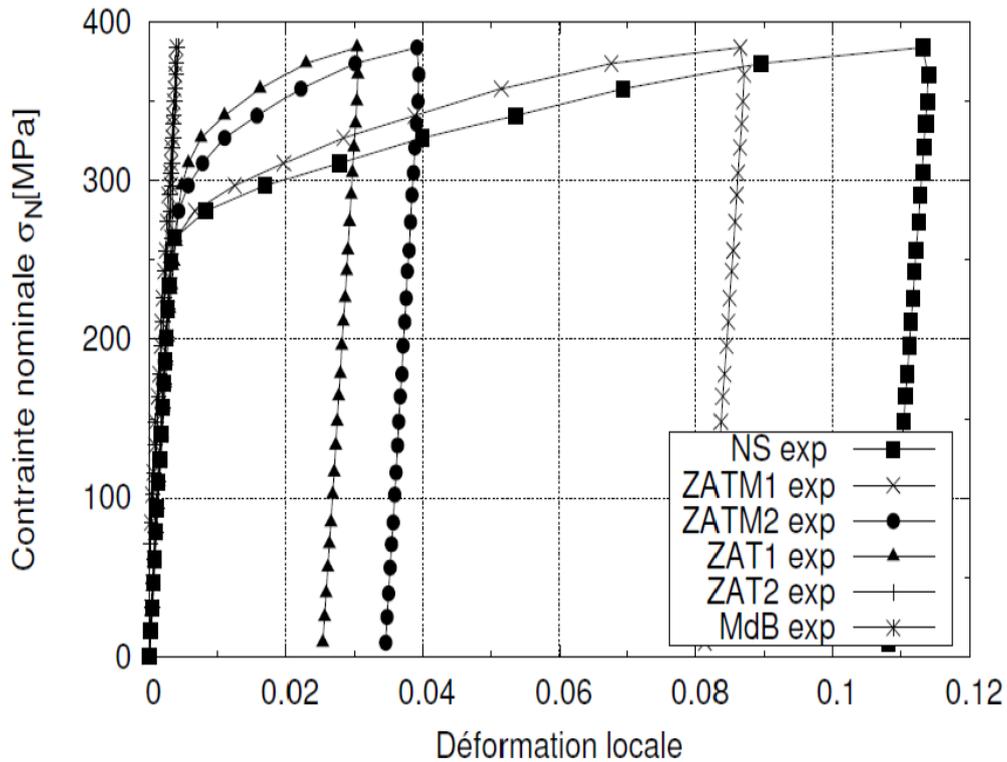


Figure 2.22 : Comportements mécaniques locaux des différentes zones du joint soudé, sollicité en traction, pour la direction T (côté AS).

Ces résultats montrent qu'un maximum de déformation de 11,5% est obtenu dans le noyau soudé (NS) tandis que pour un même niveau de contrainte, le métal de base (MdB) et la ZAT2 sont élastiques. Entre ces deux zones, on observe un gradient de comportement mécanique avec des déformations maximales d'environ 8,7% pour la ZATM1, de 4% pour la ZATM2 et de 3% pour la ZAT1. Enfin, la plastification apparaît au même instant dans chacune de ces zones.

2.3.3 Étude de l'anisotropie des champs de déformations locaux

Après avoir observé les comportements mécaniques locaux pour un joint sollicité dans la direction T, on va maintenant s'intéresser aux directions L et D pour étudier les effets d'anisotropie selon les différentes zones du joint soudé.

L'analyse du comportement mécanique global du joint soudé a mis en avant un très léger effet d'anisotropie entre les directions L, T et D. Il est intéressant de voir comment ces effets se traduisent localement pour différentes zones du joint soudé.

Les champs de déformation ont été extraits par corrélation d'images numériques pour des essais de traction réalisés suivant les directions L et D du laminage des tôles.

Les champs de déformation expérimentaux obtenus dans les directions L et D, pour une contrainte nominale de 290 MPa, sont montrés sur les figures 2.23 et 2.24.

De façon générale, de nouveau, une bonne symétrie du joint soudé entre les côtés AS et RS est observée.

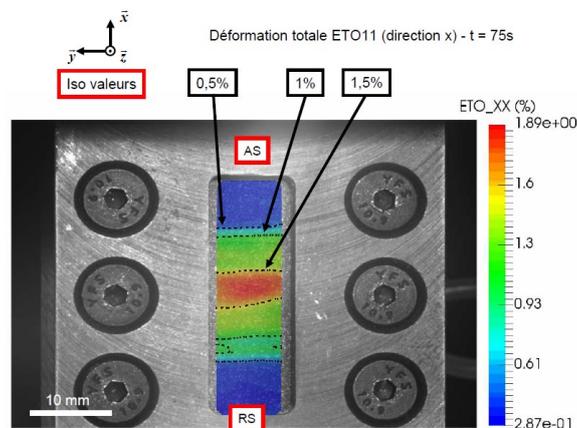


Figure 2.23 : Champ de déformation expérimental selon l'axe x d'un essai de traction (contrainte nominale de 290 MPa) sur un joint soudé perpendiculairement à la direction du laminage de la tôle (direction L – la direction de sollicitation est verticale sur la figure).

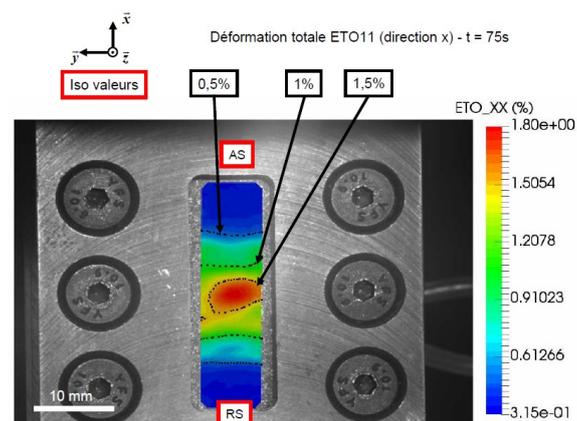


Figure 2.24 : Champ de déformation expérimental selon l'axe x d'un essai de traction (contrainte nominale de 290 MPa) sur un joint soudé à 45° par rapport à la direction du laminage de la tôle (direction D – la direction de sollicitation est verticale sur la figure).

On va chercher désormais à extraire les courbes « contraintes nominales – déformations locales » pour chaque zone et étudier l'anisotropie du matériau. Les figures 2.25 et 2.26 proposent la comparaison des essais de traction dans les trois sens pour la zone du noyau soudé (NS) et celle de la ZATM1. Aucune différence n'est visible entre ces trois courbes sur la limite élastique, ces zones étant entièrement recristallisées au cours du procédé de soudage. Le matériau dans ces zones se comporte comme un matériau isotrope.

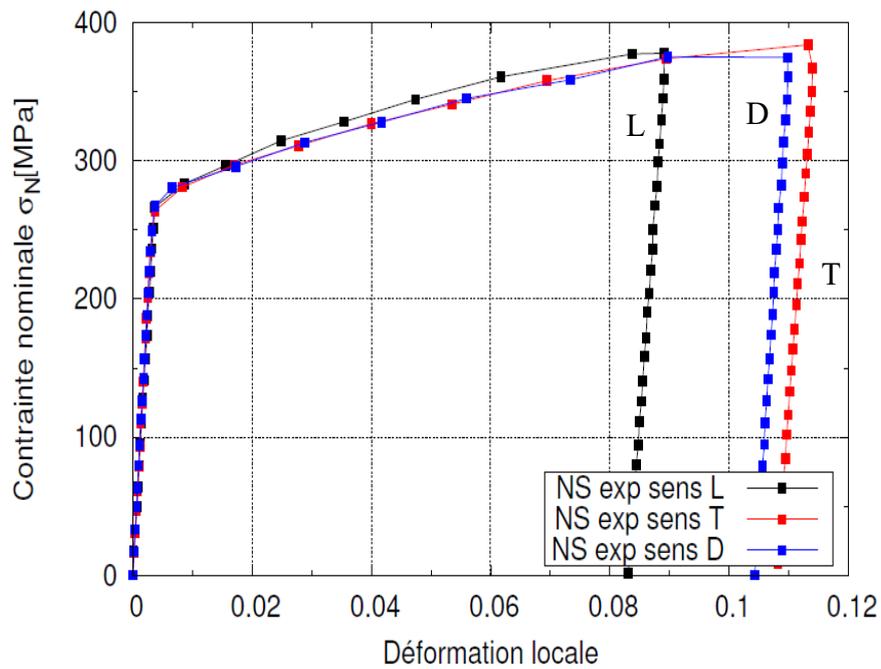


Figure 2.25 : Comportements mécaniques locaux extraits par DIC dans le Noyau Soudé pour un joint soudé sollicité en traction dans les directions L, T et D.

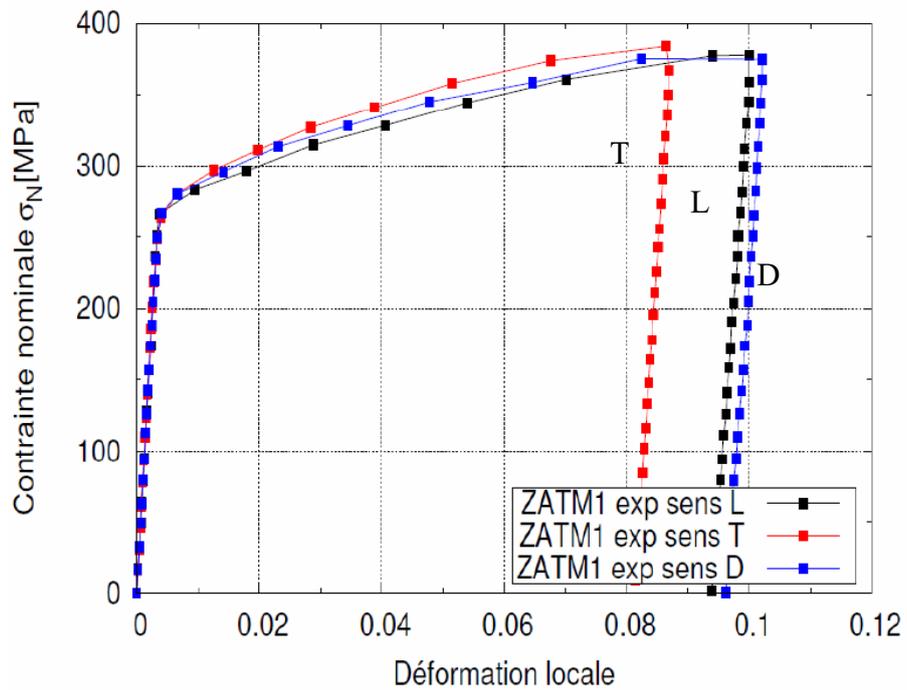


Figure 2.26 : Comportements mécaniques locaux extraits par DIC dans la ZATM1 pour un joint soudé sollicité en traction dans les directions L, T et D.

Les figures 2.27 et 2.28 présentent la comparaison des courbes de traction dans la ZATM2 et la ZAT1. Pour ces deux zones d'intérêt, la limite d'élasticité apparente du matériau semble être indépendante du sens de sollicitation. Par contre, l'érouissage du matériau lui diffère. Les éprouvettes sollicitées dans la direction T sont plus résistantes que celles sollicitées dans la direction D qui sont, elles aussi, plus résistantes que celles sollicitées dans la direction L.

Si on analyse finement les résultats des courbes de traction globales présentés sur la figure 2.17, il est intéressant de souligner que nous retrouvons cette hiérarchisation de la résistance du matériau en fonction de la direction de sollicitation.

Nous pouvons aussi remarquer que le comportement mécanique anisotrope de ces zones est très différent du comportement anisotrope du métal de base (Figure 2.18).

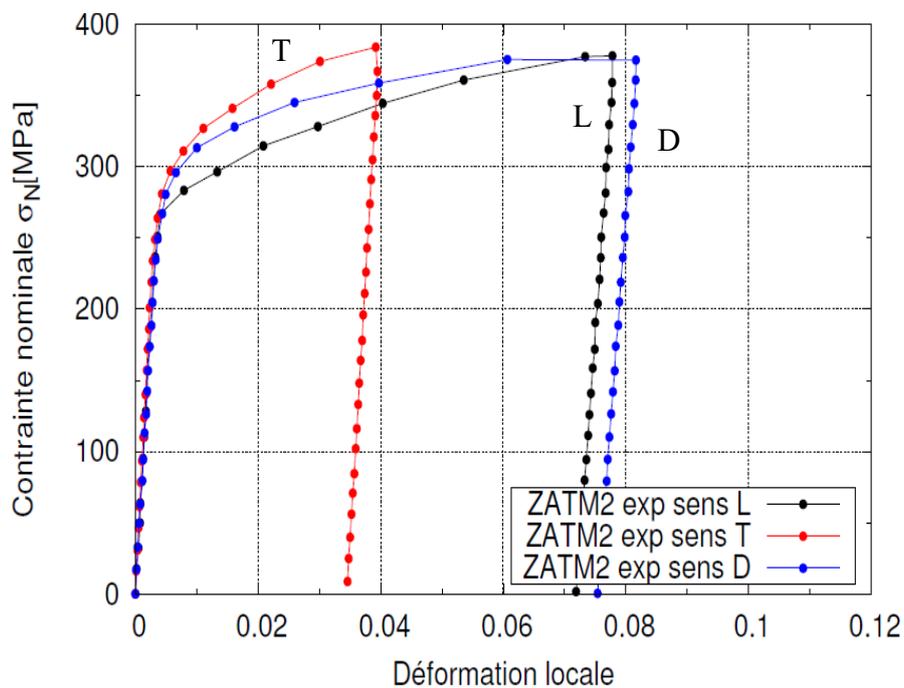


Figure 2.27 : Comportements mécaniques locaux extraits par DIC dans la ZATM2 pour un joint soudé sollicité en traction dans les directions L, T et D.

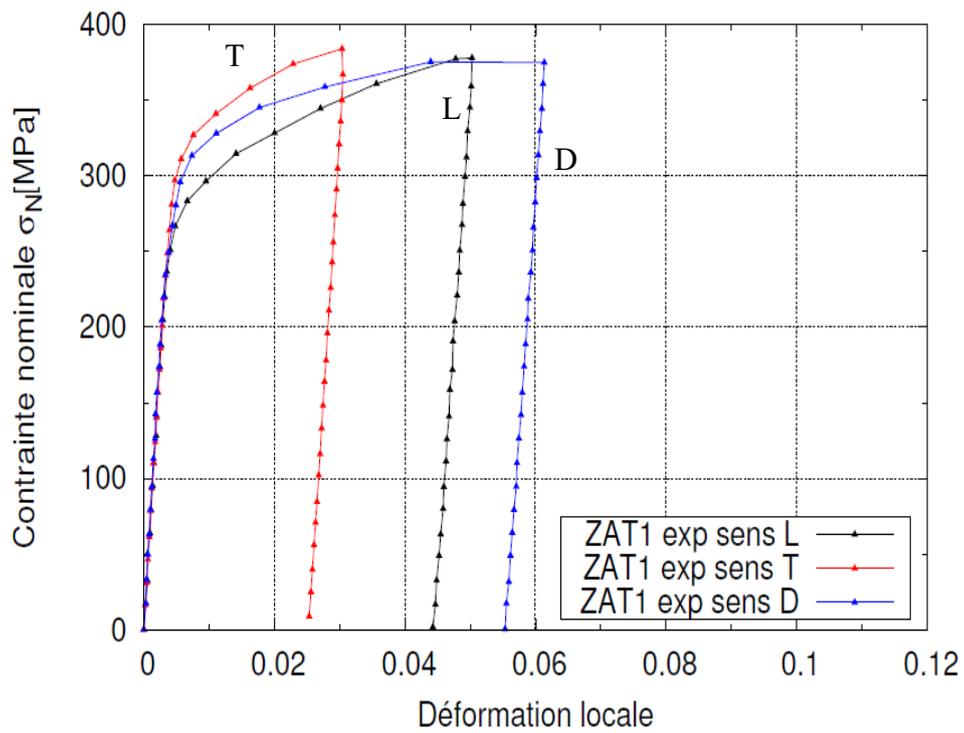


Figure 2.28 : Comportements mécaniques locaux extraits par DIC dans la ZAT1 pour un joint soudé sollicité en traction dans les directions L, T et D.

Enfin, la figure 2.29 montre les courbes de traction pour la ZAT2. Cette zone ne se déforme presque pas puisque le noyau soudé concentre un maximum de déformation plastique, mais on peut constater que le comportement mécanique dans la direction D est plus faible que pour les directions L et T.

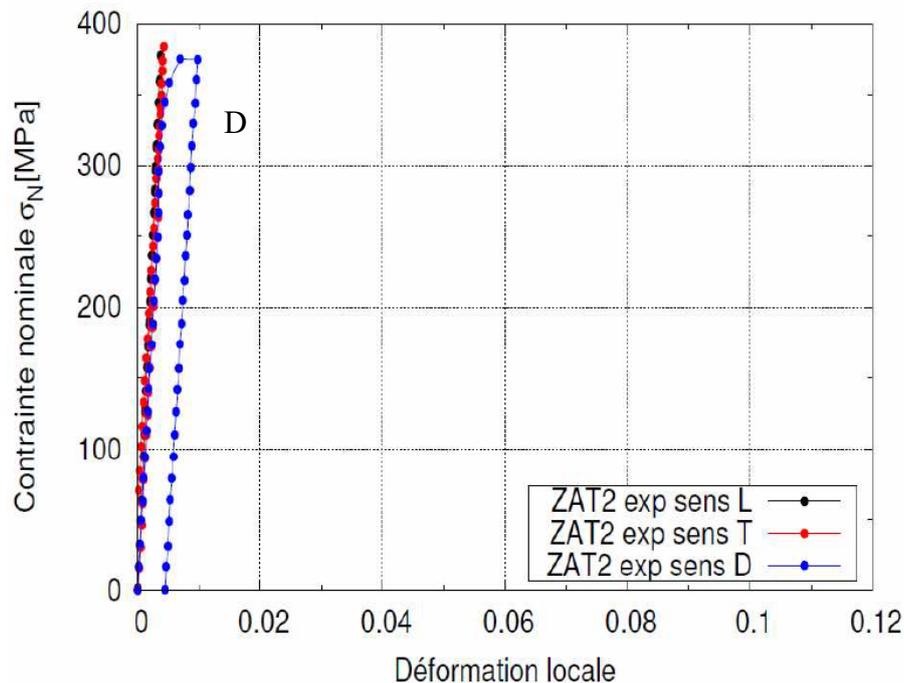


Figure 2.29 : Comportements mécaniques locaux extraits par DIC dans la ZAT2 pour un joint soudé sollicité en traction dans les directions L, T et D.

En conclusion, le comportement mécanique global de la structure soudée est isotrope mais localement une légère anisotropie des zones intermédiaires est visible jusqu'au métal de base, dont le comportement mécanique est entièrement anisotrope.

Cette analyse ne prend pas en compte la multiaxialité des contraintes, en particulier le fait que l'hétérogénéité de l'écoulement plastique engendre des contraintes normales perpendiculaires à la direction du chargement. Ce point sera étudié plus loin (§3.4.3.1).

2.4 Analyse des essais cycliques réalisés sur joints soudés

2.4.1 Influence de la cage anti-flambement

La cage anti-flambage a été dimensionnée pour éviter le flambement des éprouvettes lors des essais cycliques sous chargement symétriques. La figure 2.30 montre la comparaison entre des essais de traction réalisés avec ou sans la cage. Les résultats montrent qu'il n'y a pas d'effet sur la montée en charge. La courbe cyclique affiche aussi la même montée en charge que les essais de traction sans présenter de modifications liées à la cage.

Cependant, rien ne permet de vérifier le comportement du matériau lors de la phase de compression. Les essais cycliques réalisés sans cage ont systématiquement conduit à la rupture des éprouvettes par flambement. L'utilisation de ce dispositif était donc nécessaire afin d'obtenir une certaine ouverture des boucles d'hystérésis dans l'objectif d'identification d'un modèle de comportement mécanique

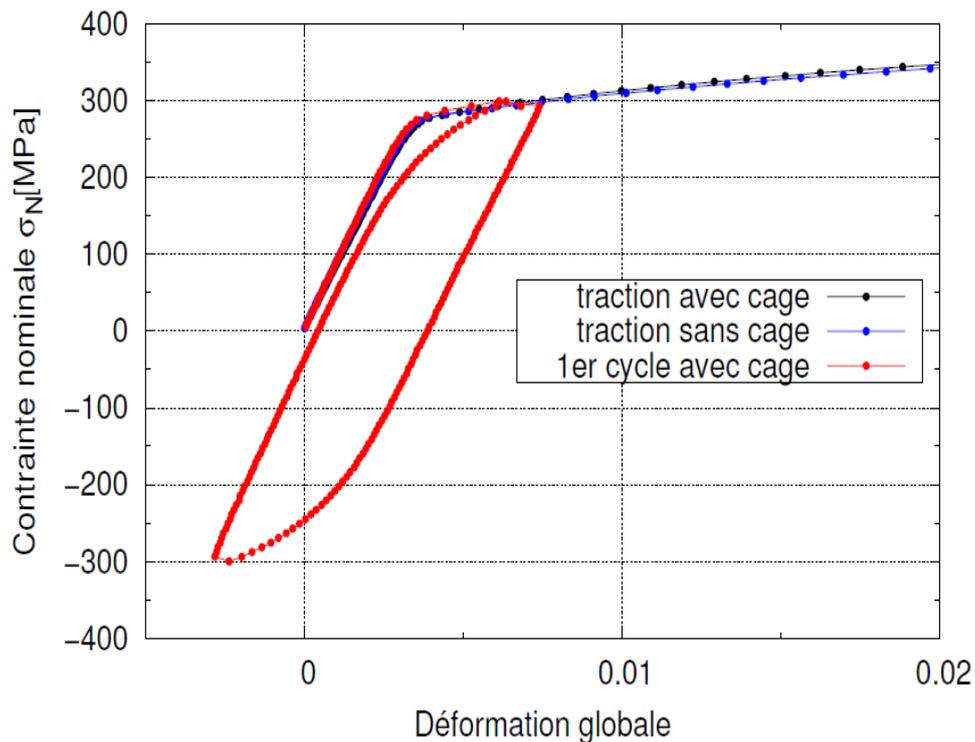


Figure 2.30 : Effet de la cage anti-flambage – comparaison d’essais de traction avec et sans cage et de la première boucle d’hystérésis d’un essai cyclique avec la cage.

2.4.2 Étude de la réponse globale du joint soudé

Les comportements mécaniques globaux obtenus par extensomètre sur des joints soudés dans les directions T, L et D sont présentés respectivement en figures 2.32, 2.33 et 2.34.

On remarque que la forme des boucles d’hystérésis est très semblable pour les trois directions. Néanmoins, la largeur de ces boucles est plus importante dans la direction D que dans les directions T et L, avec un allongement plus important. Les niveaux de déformation atteints au maximum de la traction sont supérieurs à 1,2% dans la direction D, de l’ordre de 1,2% dans la direction L et inférieur à 0,9% pour la direction T. Ces écarts entre les trois directions restent identiques quel que soit le niveau de chargement imposé.

Ces résultats d’essais cycliques confirment le comportement mécanique anisotrope observé sur les essais de traction, avec notamment, un effet anisotrope particulier dans le sens à 45° (D), dont le comportement mécanique est plus faible que pour les directions L et T.

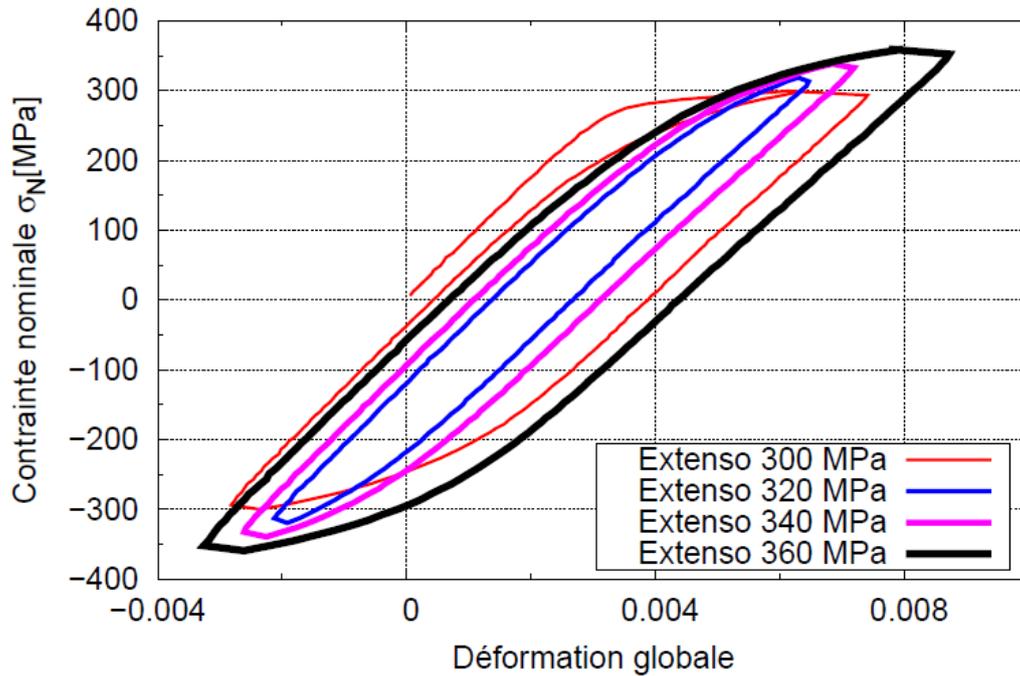


Figure 2.32 : Comportement mécanique global obtenu par extensomètre de l'alliage d'aluminium 2198-T8 dans la direction de laminage T, pour les quatre niveaux de déformation.

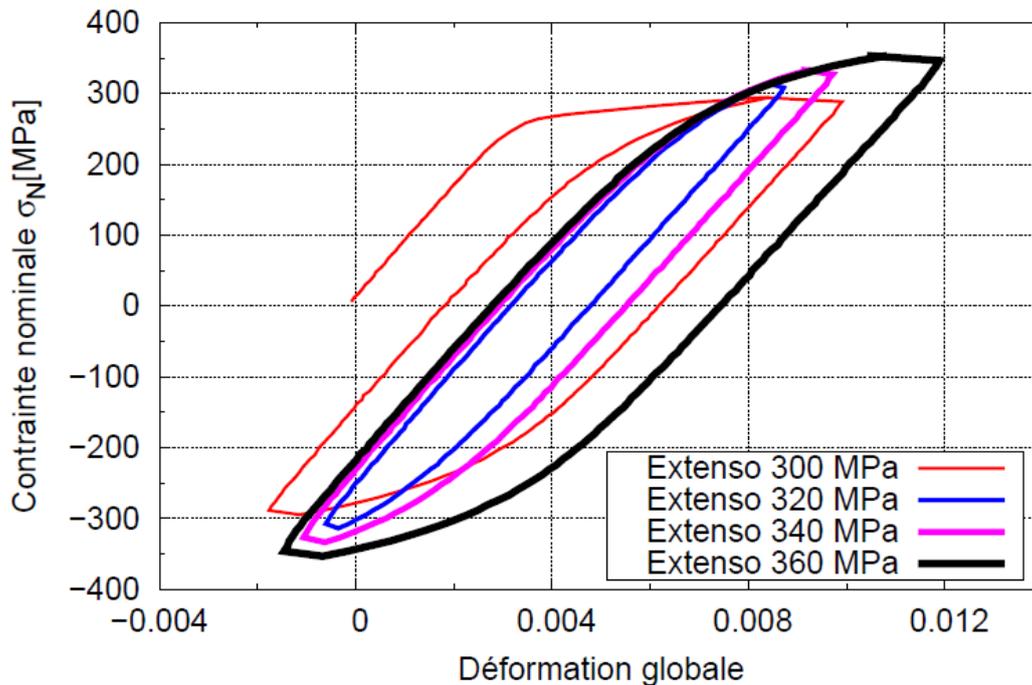


Figure 2.33 : Comportement mécanique global obtenu par extensomètre de l'alliage d'aluminium 2198-T8 dans la direction de laminage L, pour les quatre niveaux de déformation.

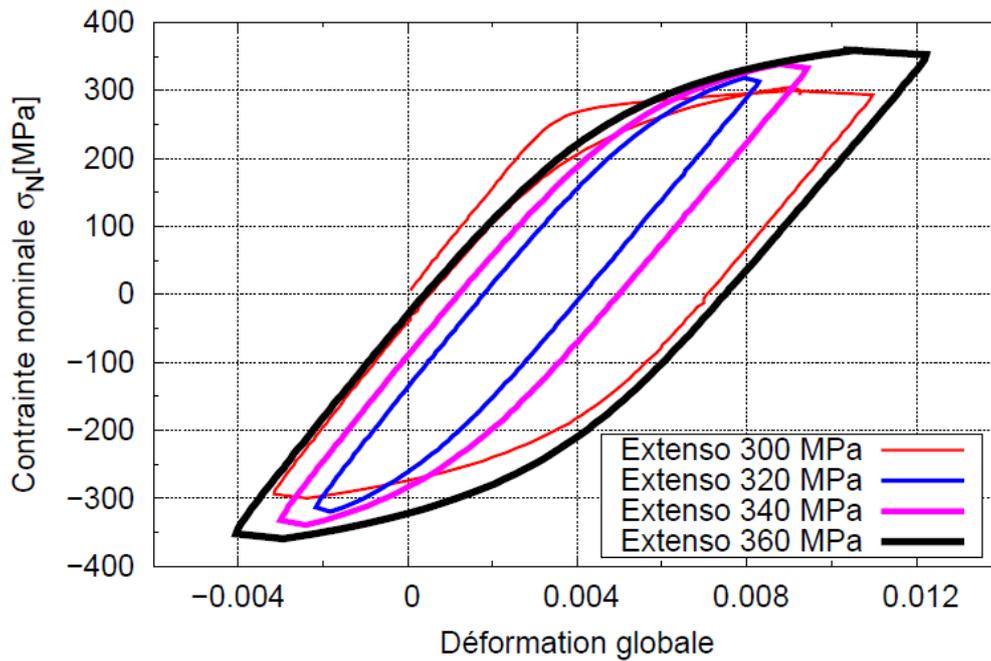


Figure 2.34 : Comportement mécanique global obtenu par extensomètre de l'alliage d'aluminium 2198-T8 dans la direction de laminage D, pour les quatre niveaux de déformation.

2.4.3 Analyse des champs de déformations locaux pour un joint soudé sollicité dans la direction T

Afin d'illustrer les résultats obtenus, on analyse les champs de déformation à deux instants différents après l'ensemble des cycles (Figure 2.36). Le premier correspond au maximum de la dernière montée en charge et le deuxième temps, au minimum lors de la dernière descente en compression.

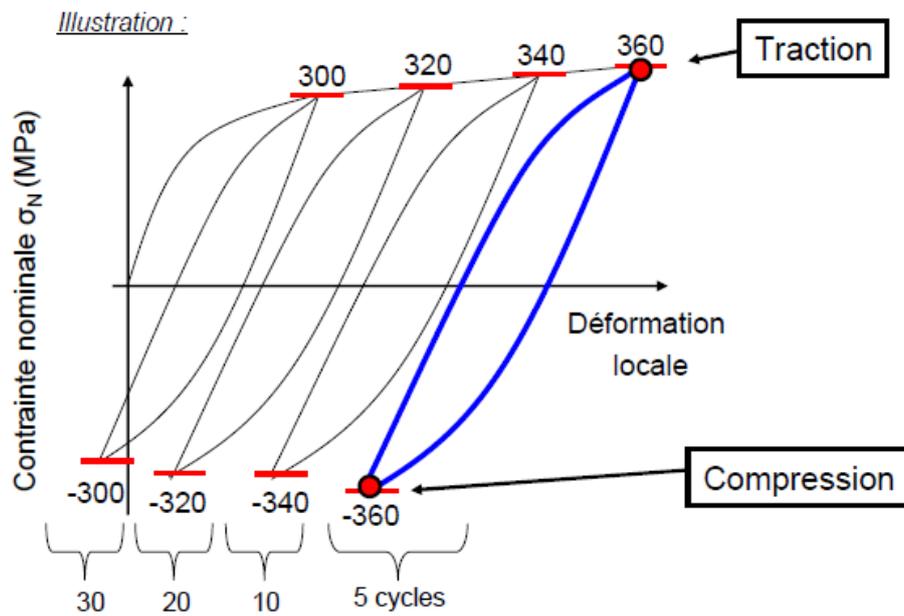


Figure 2.36 : Boucles « contrainte nominale – déformation » lors d'un essai cyclique à incréments croissants de contrainte et report des deux instants sélectionnés pour comparer les résultats expérimentaux et numériques.

Les résultats expérimentaux pour la direction T sont présentés en figure 2.37. Au sommet de la traction du dernier cycle, le maximum de déformation selon l'axe x est localisé au centre de l'éprouvette.

Au maximum du chargement en compression du dernier cycle, le noyau soudé est toujours en traction alors que les ZAT sont en compression.

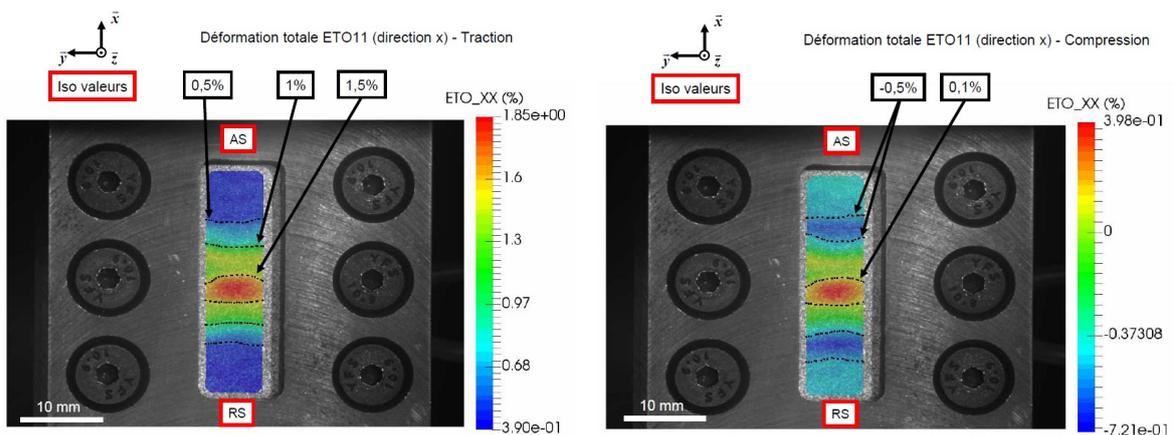


Figure 2.37 : Champs de déformations expérimentaux selon l'axe x à deux temps (traction et compression) sur un joint soudé dans la direction du laminage de la tôle (direction T).

Dans chaque cas, le champ de déformation est symétrique. Il n'y a pas de différence entre les côtés AS et RS.

Les figures 2.38 à 2.42 présentent les courbes cycliques extraites localement à partir de la corrélation d'images pour les cinq zones d'intérêts définies précédemment, à savoir, le noyau soudé, la ZATM1, la ZATM2, la ZAT1 et la ZAT2. Le premier cycle et le cycle stabilisé pour deux niveaux de chargement (300 et 360 MPa) sont superposés. Tout d'abord, les niveaux de déformations atteints dans le noyau soudé sont beaucoup plus importants que dans les autres zones du joint soudé. De plus, le durcissement du matériau est très fort et rapide lors du premier niveau de chargement avec des boucles qui se referment au cours des cycles. Ce durcissement diminue au cours du chargement.

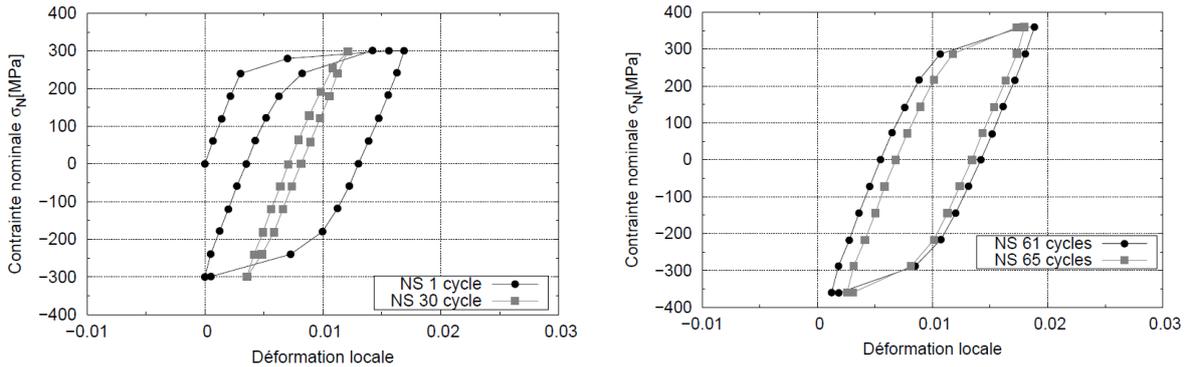


Figure 2.38 : Première et dernière boucle d'hystérésis pour deux niveaux de chargements imposés sur le Noyau Soudé (direction T).

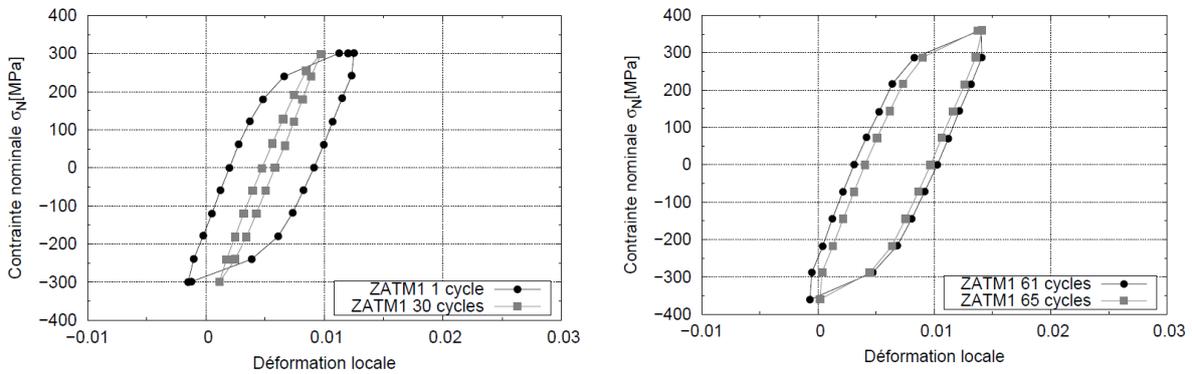


Figure 2.39 : Première et dernière boucle d'hystérésis pour deux niveaux de chargements imposés sur la ZATM1 (direction T).

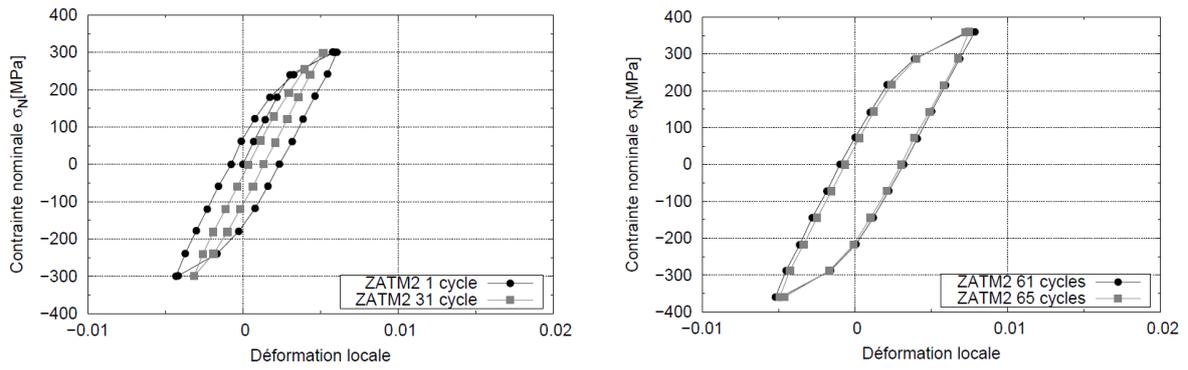


Figure 2.40 : Première et dernière boucle d'hystérésis pour deux niveaux de chargements imposés sur la ZATM2 (direction T).

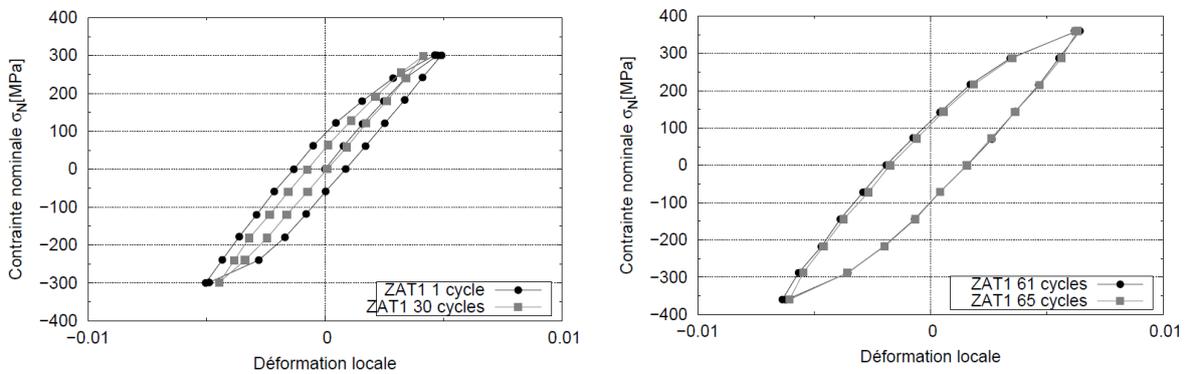


Figure 2.41 : Première et dernière boucle d'hystérésis pour deux niveaux de chargements imposés sur la ZAT1 (direction T).

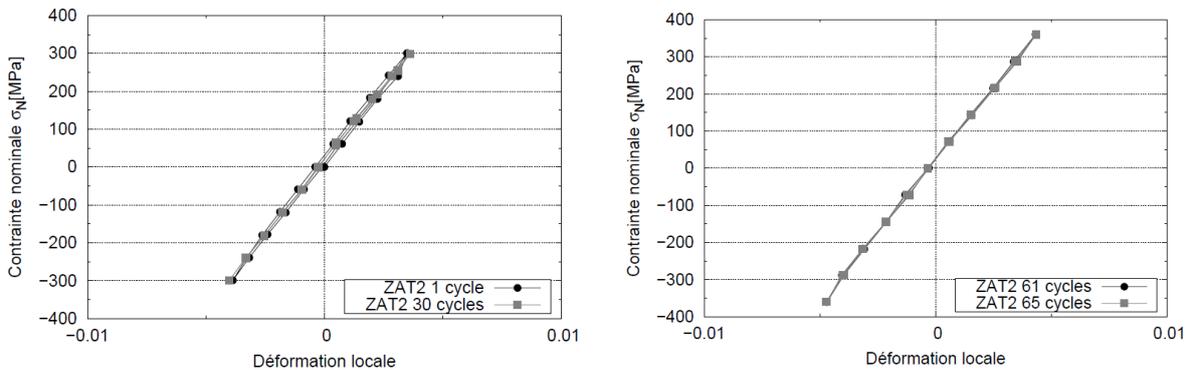


Figure 2.42 : Première et dernière boucle d'hystérésis pour deux niveaux de chargements imposés sur la ZAT2 (direction T).

La figure 2.43 permet de mieux visualiser cet effet de durcissement du matériau en fonction du nombre de cycle et des niveaux de chargement. Lors des 30 premiers cycles, un chargement symétrique de 300 MPa est imposé dans la section utile de l'éprouvette. Pour les 20 cycles suivants, une contrainte de 320 MPa est imposée. Puis, la structure est soumise à une contrainte de 340 MPa lors des 10 cycles suivants. Lors des 5 derniers cycles, une contrainte de 360 MPa est imposée.

La variation d'amplitude de déformation permet de constater le fort durcissement qui a lieu au premier niveau de contrainte et après 30 cycles de chargements. Le durcissement cyclique s'observe pour toutes les zones du joint soudé. Néanmoins, le noyau soudé présente clairement un durcissement beaucoup plus important que les autres zones d'intérêt.

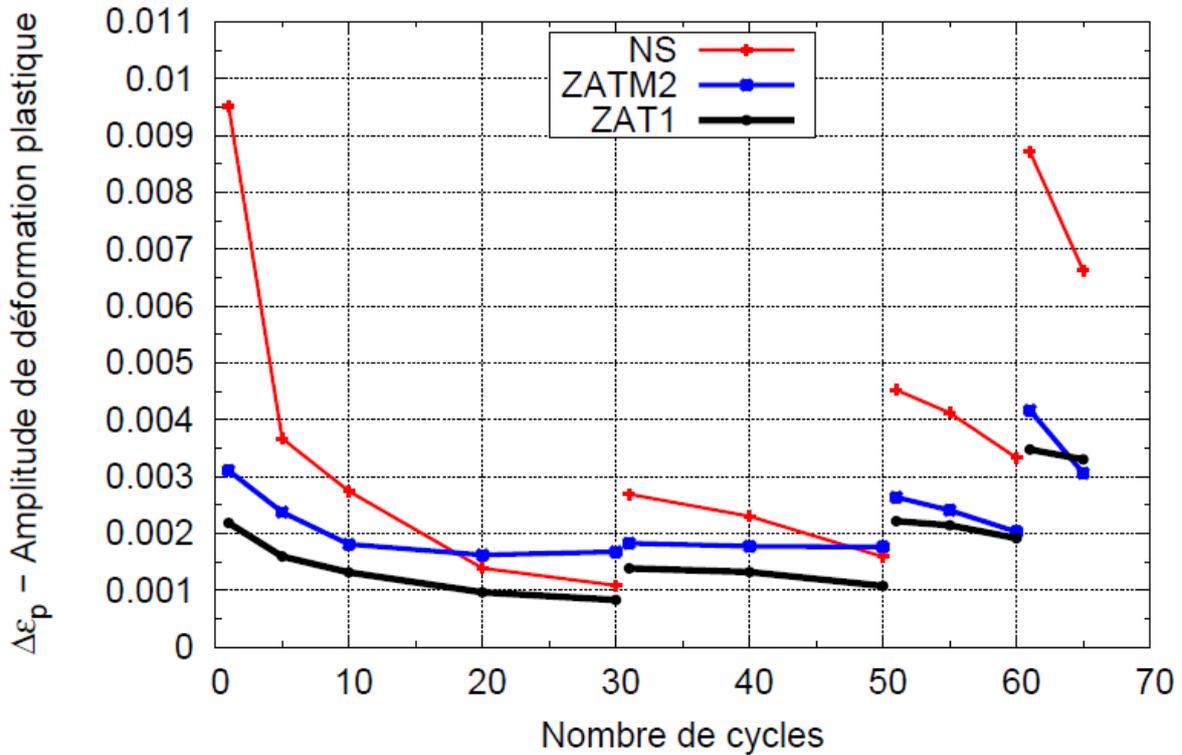


Figure 2.43 : Comparaison de l'évolution de l'amplitude de déformation dans les différentes zones du joint soudé en fonction du nombre de cycles. (direction T).

2.4.4 Étude de l'anisotropie des champs de déformations locaux

Les champs de déformation pour les directions L et D sont présentés en figures 2.44 et 2.45. Globalement, de nouveau, on a un résultat symétrique des deux côtés AS et RS, avec à la décharge le noyau soudé en état de traction et la ZAT en état de compression. On retrouve ce que l'on a vu pour la direction T.

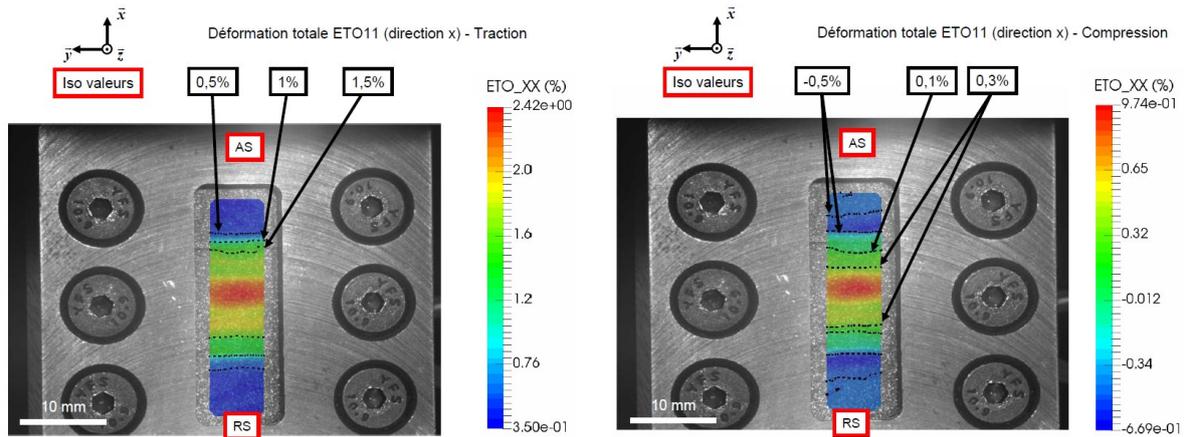


Figure 2.44 : Champs de déformation expérimentaux selon l'axe x à deux instants (traction et compression) sur un joint soudé sollicité dans la direction L.

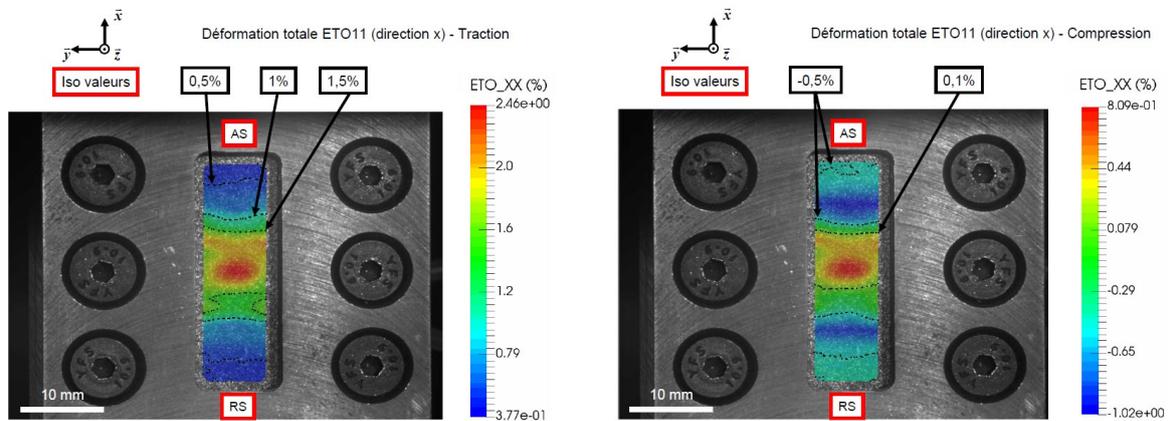


Figure 2.45 : Champs de déformation expérimentaux selon l'axe x à deux instants (traction et compression) sur un joint soudé sollicité dans la direction D.

Les figures 2.46 à 2.50 montrent des boucles d'hystérésis extraites, dans chaque zone d'intérêt, à partir des champs de déformation obtenus par corrélation d'images pour l'essai cyclique sollicité dans la direction L. Le même effet de durcissement est observé lors des cycles que pour la direction T. On constate aussi que le durcissement est moins important sur le quatrième niveau de chargement avec des boucles d'hystérésis qui ne varient plus.

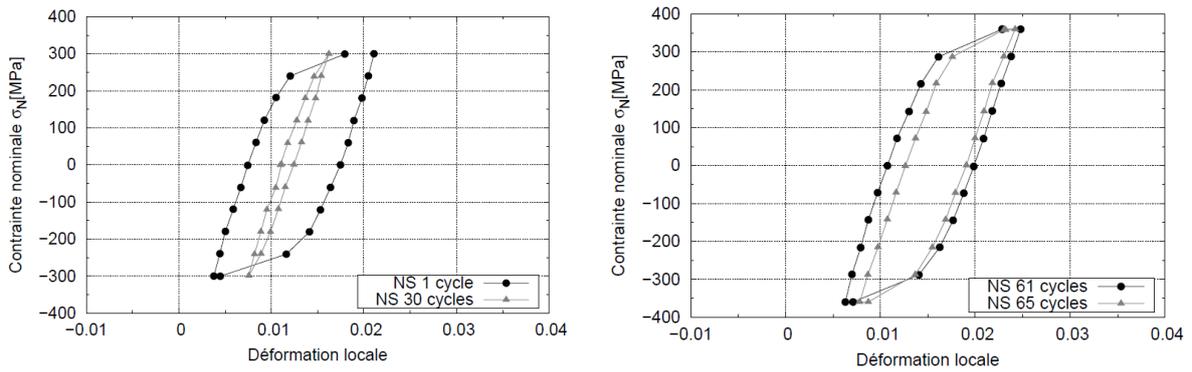


Figure 2.46 : Première et dernière boucle d'hystérésis pour deux niveaux de chargements imposés sur le noyau soudé (direction L).

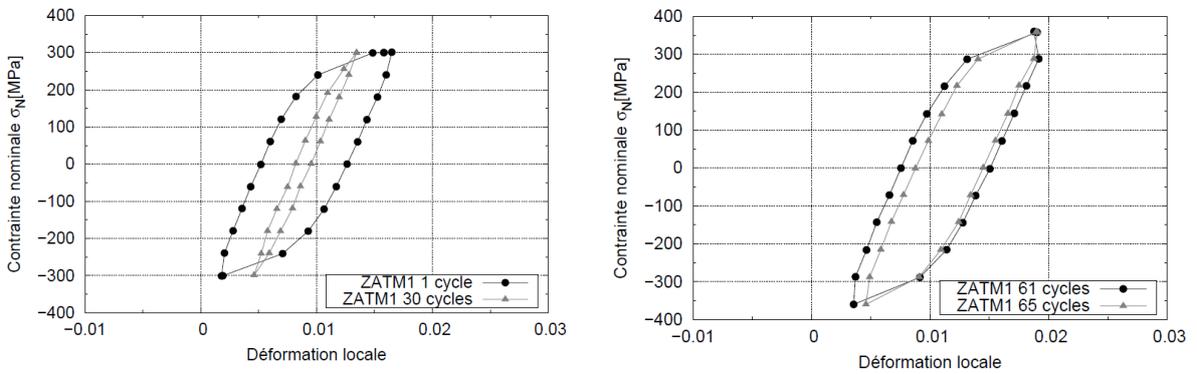


Figure 2.47 : Première et dernière boucle d'hystérésis pour deux niveaux de chargements imposés sur la ZATM1 (direction L).

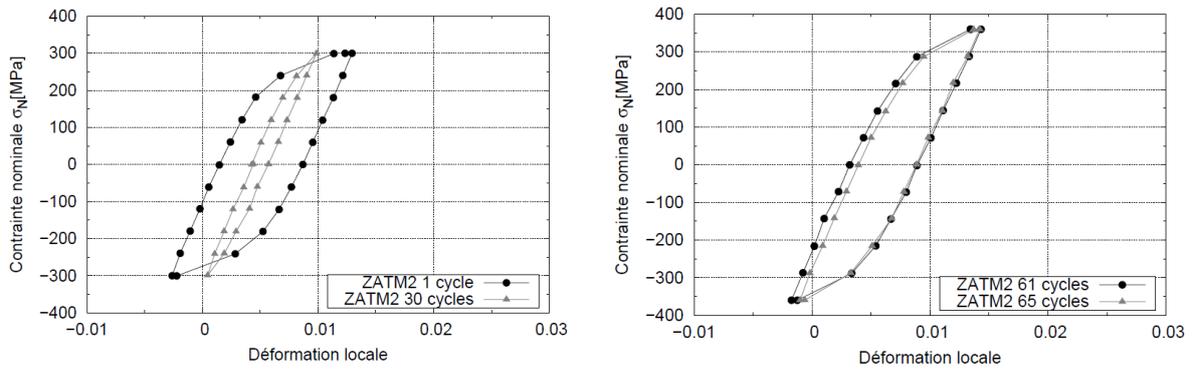


Figure 2.48 : Première et dernière boucle d'hystérésis pour deux niveaux de chargements imposés sur la ZATM2 (direction L).

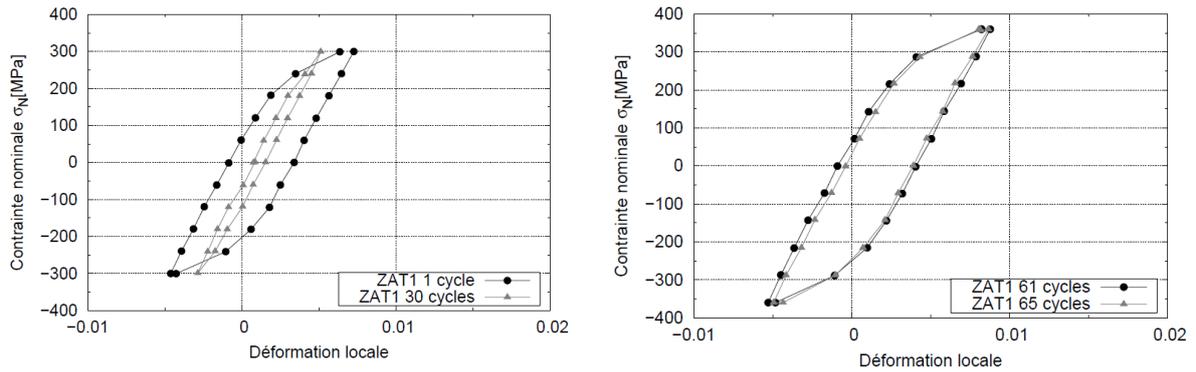


Figure 2.49 : Première et dernière boucle d'hystérésis pour deux niveaux de chargements imposés sur la ZAT1 (direction L).

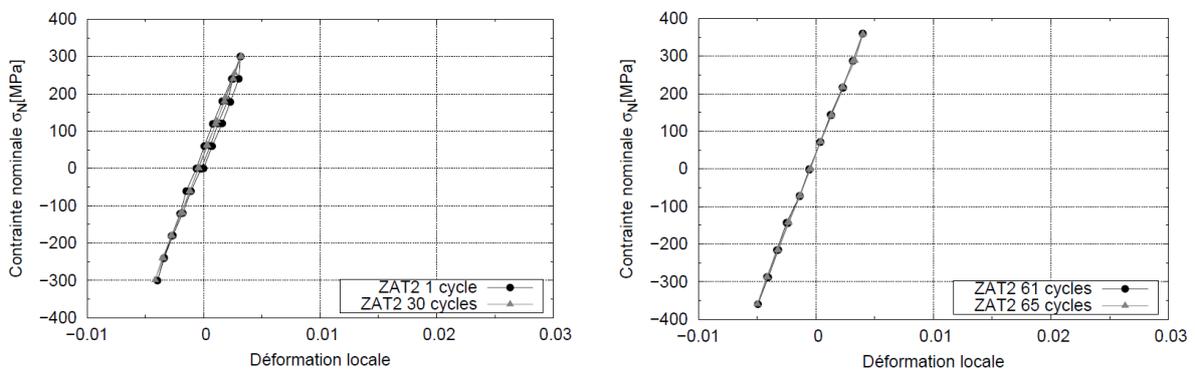


Figure 2.50 : Première et dernière boucle d'hystérésis pour deux niveaux de chargements imposés sur la ZAT2 (direction L).

Les figures 2.51 à 2.55 montrent les boucles d'hystérésis extraites, dans chaque zone d'intérêt, à partir des champs de déformations obtenus par corrélation d'images pour l'essai cyclique sollicité dans la direction D. Les mêmes observations sont faites pour la direction D que pour les directions L et T.

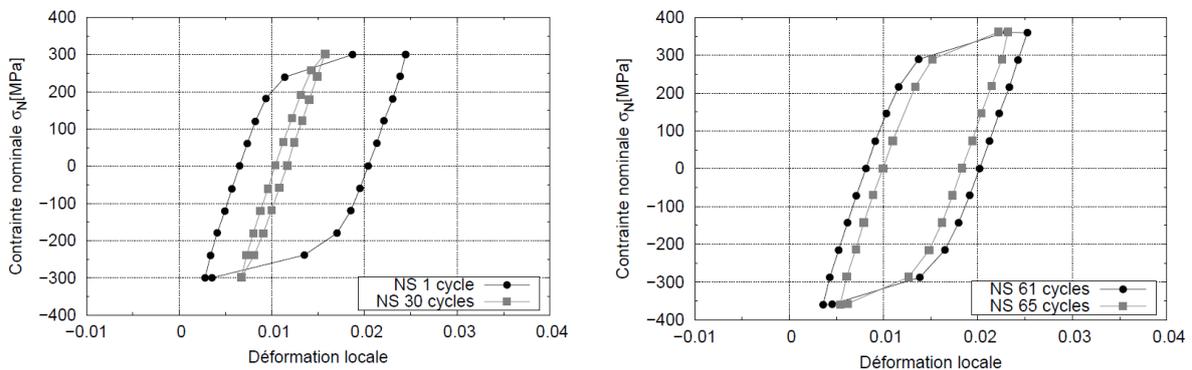


Figure 2.51 : Première et dernière boucle d'hystérésis pour deux niveaux de chargements imposés sur le noyau soudé (direction D).

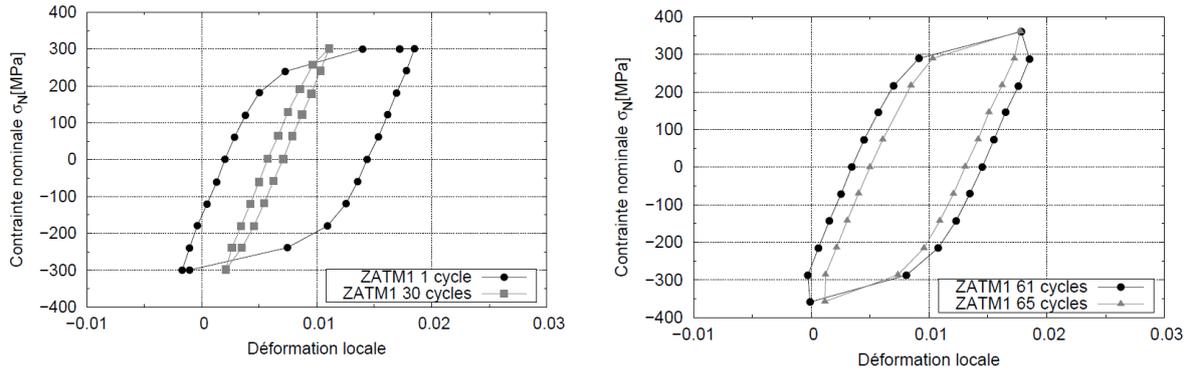


Figure 2.52 : Première et dernière boucle d'hystérésis pour deux niveaux de chargements imposés sur la ZATM1 (direction D).

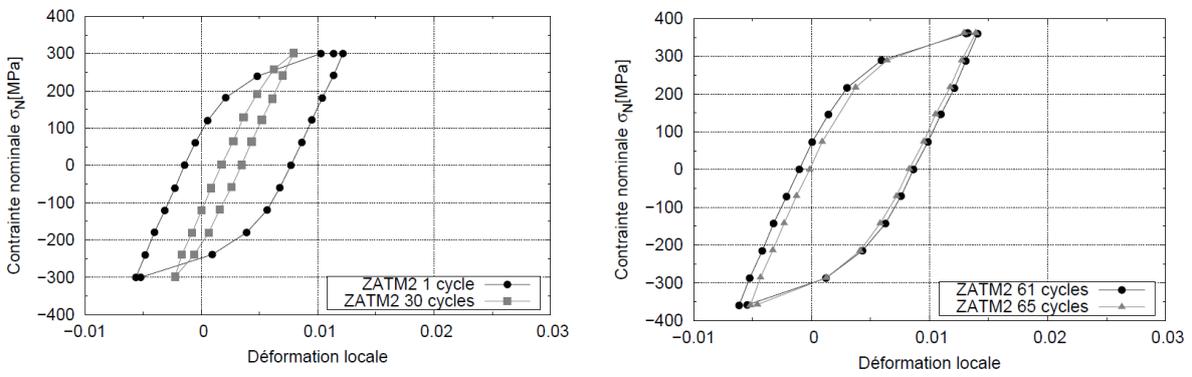


Figure 2.53 : Première et dernière boucle d'hystérésis pour deux niveaux de chargements imposés sur la ZATM2 (direction D).

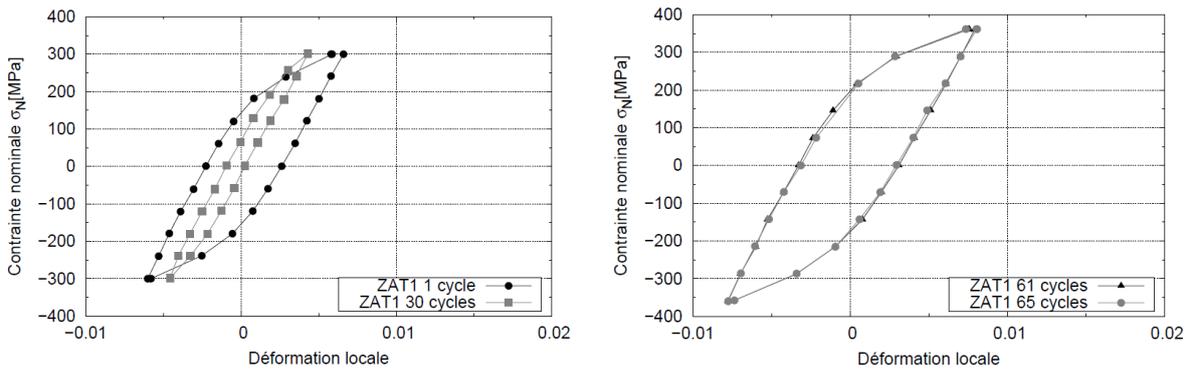


Figure 2.54 : Première et dernière boucle d'hystérésis pour deux niveaux de chargements imposés sur la ZAT1 (direction D).

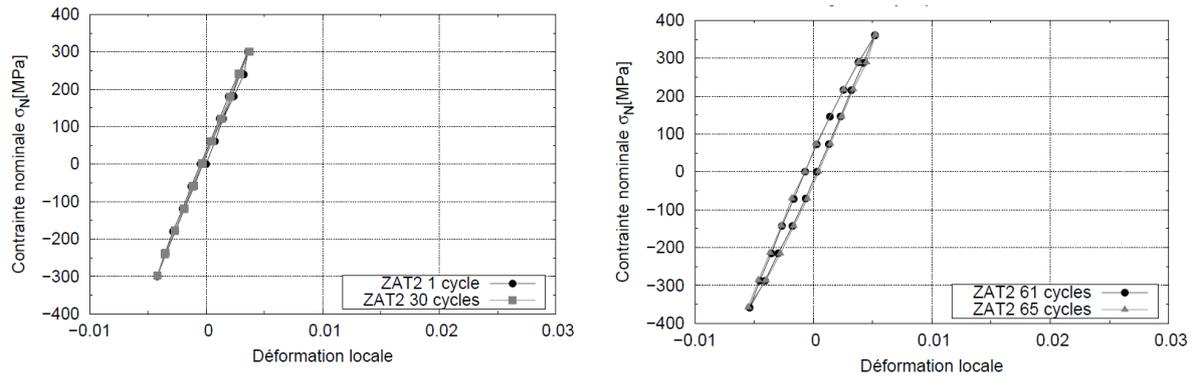


Figure 2.55 : Première et dernière boucle d'hystérésis pour deux niveaux de chargements imposés sur la ZAT2 (direction D).

L'évolution en fonction du nombre de cycles des amplitudes de déformation dans les directions L et D sont présentées respectivement sur les figures 2.56 et 2.57. Lors des 30 premiers cycles, un chargement symétrique de 300 MPa est imposé sur la section utile de l'éprouvette. La suite du chargement consiste à 20 cycles à 320 MPa, 10 cycles à 340 MPa, et 5 cycles à 360 MPa.

Le fort durcissement qui a lieu au premier niveau de contrainte et après 30 cycles de chargements se manifeste par une importante diminution de l'amplitude de déformation. Ces courbes montrent, comme pour la direction T, que les niveaux de déformations diminuent du noyau soudé vers le métal de base. En effet, le centre du joint soudé concentre le maximum de déformation au cours des essais tandis que le comportement mécanique du métal de base reste élastique comme le montre les champs de déformations (Figures 2.44 et 2.45).

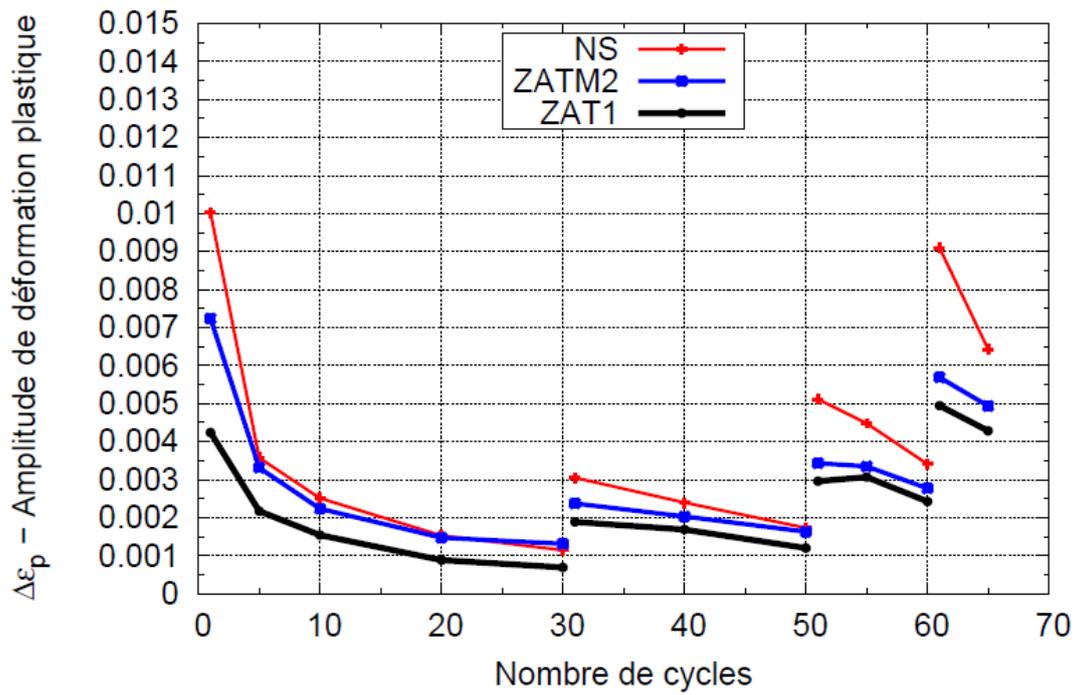


Figure 2.56 : Comparaison de l'évolution de l'amplitude de déformation dans les différentes zones du joint soudé en fonction du nombre de cycles. (direction L)

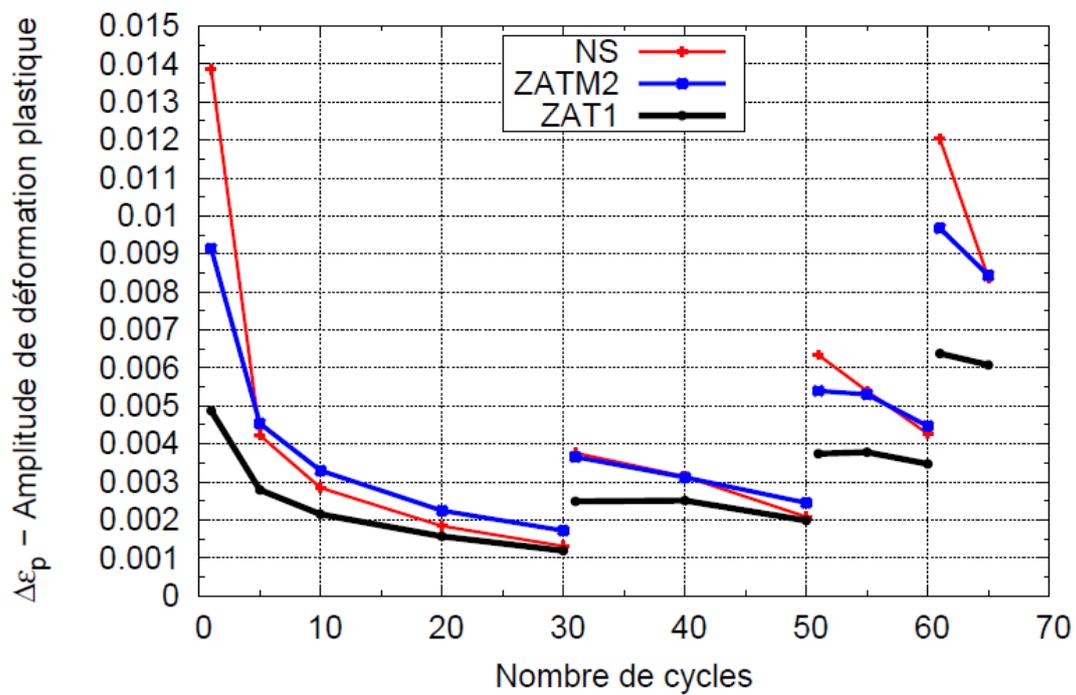


Figure 2.57 : Comparaison de l'évolution de l'amplitude de déformation dans les différentes zones du joint soudé en fonction du nombre de cycles. (direction D)

Une légère différence entre les directions L, T et D est visible pour ce qui concerne le niveau de déformation atteint lors de la première montée en traction. Du fait du comportement mécanique très « plat » du matériau et le pilotage en force de l'essai, une faible variation du niveau de contraintes peut engendrer un allongement plus ou moins important.

On note tout de même que la première boucle d'hystérésis est plus ouverte dans la direction D avec une amplitude de déformation qui atteint 1,5% contre 1% dans les directions L et T. Enfin, les boucles d'hystérésis sont plus larges pour les niveaux de contraintes plus élevés. Ces résultats montrent un comportement mécanique légèrement plus faible dans la direction D que dans les directions L et T.

2.5 Analyse des essais de comportement réalisés sur machine biaxiale

2.5.1 Essai n°4

Ce premier essai est l'essai typique des industriels, avec une sollicitation dans la direction T et un rapport de charge entre chaque axe de 0,5. Ces sollicitations se rapprochent du type de sollicitations vues en service.

La particularité de cet essai est de solliciter le joint soudé avec des efforts mécaniques plus importants dans l'axe perpendiculaire à la soudure que dans l'autre axe. Les efforts imposés sur l'axe y permettent de générer la déformation plastique du joint soudé. À l'inverse, les efforts selon l'axe x ont tendance à retenir l'ouverture du joint soudé et limiter la déformation plastique.

Les figures 2.58 montrent les résultats expérimentaux au maximum de chargement ($t = 12s$) et au minimum ($t = 24s$). La corrélation d'images permet de visualiser la localisation et le niveau de la déformation principale selon l'axe y. Des lignes d'iso-valeurs ont été ajoutées pour mieux visualiser les dimensions des zones de déformation.

Pour cet essai n°4, dont la contrainte en sortie de mors de l'axe y est deux fois supérieure à celle dans l'axe x, une importante plastification du joint soudé se crée selon l'axe y. Les déformations totales atteignent 1,4% dans le noyau soudé. La ligne d'iso-valeur à 0,5% permet de mesurer une auréole de déformations d'environ 100 mm de longueur sur l'axe x. Et une largeur d'environ 12 mm correspondant approximativement au diamètre de l'outil de soudage.

Au minimum de contrainte imposé dans les mors, les déformations totales restent élevées avec un maximum de 1,2% dans le noyau soudé.

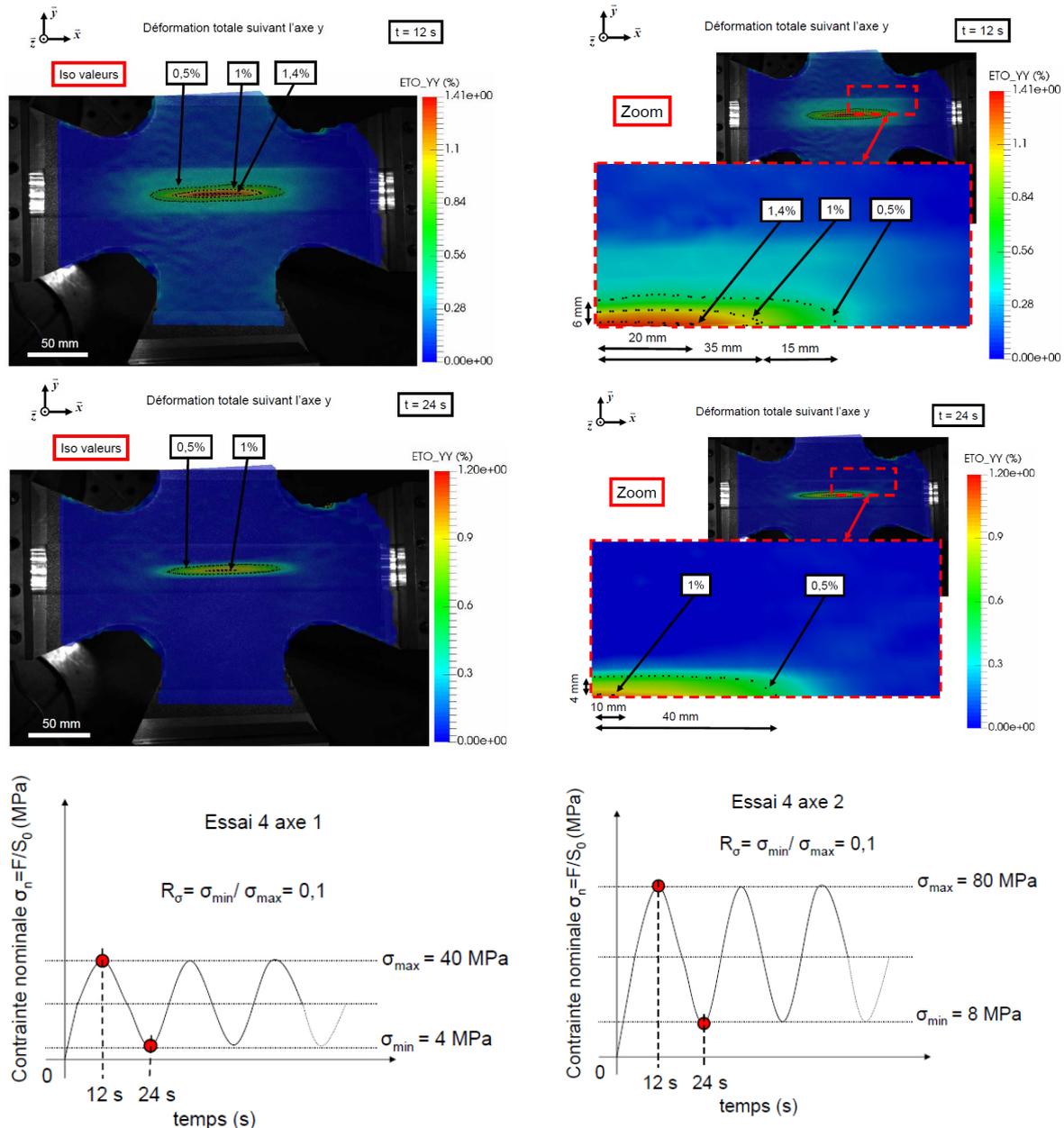


Figure 2.58 : Champs de déformation selon l'axe y (axe 2) expérimentaux étudiés pour deux instants différents pour l'essai n°4.

2.5.2 Essai n°5

Les champs de déformation selon l'axe y sont présentés en figure 2.59. Un chargement plus important sur l'axe y est imposé lors de la première montée en charge qui permet une légère « ouverture » des déformations du joint soudé. Puis, lors du troisième quart du cycle, le chargement est plus important sur l'axe x, ce qui va tendre à « refermer » le joint soudé. Les niveaux de contrainte sont plus faibles lors de la première montée en traction que pour l'essai n°4. Un maximum de déformation ETO_YY d'environ 0,6% est atteint dans le Noyau Soudé. La ligne d'iso-valeur à 0,5% s'étend à ± 3 mm en +Y par rapport au centre de

l'éprouvette, ce qui correspond à la ZATM1. Le comportement mécanique des autres zones du joint reste à l'état élastique.

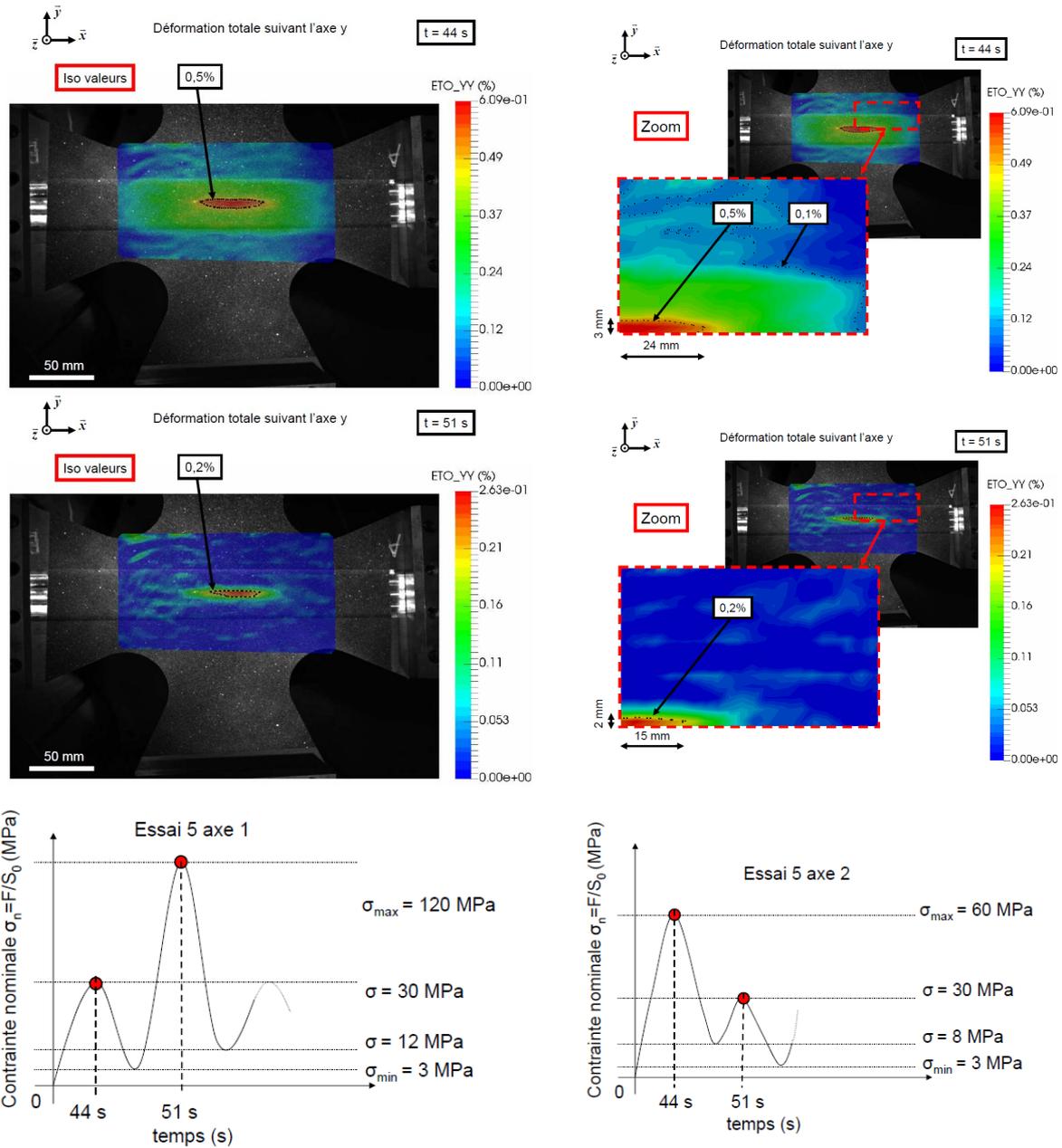


Figure 2.59 : Champs de déformation selon l'axe y (axe 2) expérimentaux étudiés pour deux instants différents pour l'essai n°5.

Lors de la deuxième phase de l'essai où le chargement est plus important sur l'axe x, on remarque que les déformations totales sont très faibles avec un maximum d'environ 0,26% dans le noyau soudé. Aucune déformation négative n'est observée à travers le joint.

2.5.3 Essai n°6

Les champs de déformation sont présentés pour deux instants différents en figure 2.60. Les contraintes imposées en sortie de mors sur l'axe y sont identiques à celles imposées pour l'essai n°4. Cependant, les mêmes contraintes sont imposées sur l'axe x avec un maximum de 80 MPa, tandis que pour l'essai n°4 le maximum imposé est de 40 MPa. Il s'agit donc d'un essai purement biaxial en phase. À $t = 12s$, le chargement plus important sur l'axe x empêche le joint soudé de se déformer autant que pour l'essai n°4. En effet, le maximum atteint au centre de l'éprouvette est d'environ 0,45% contre 1,4% pour l'essai n°4. À l'instant $t = 24s$, le maximum de déformation est approximativement de 0,15% au centre et pour le reste de la surface, ces déformations sont quasi nulles.

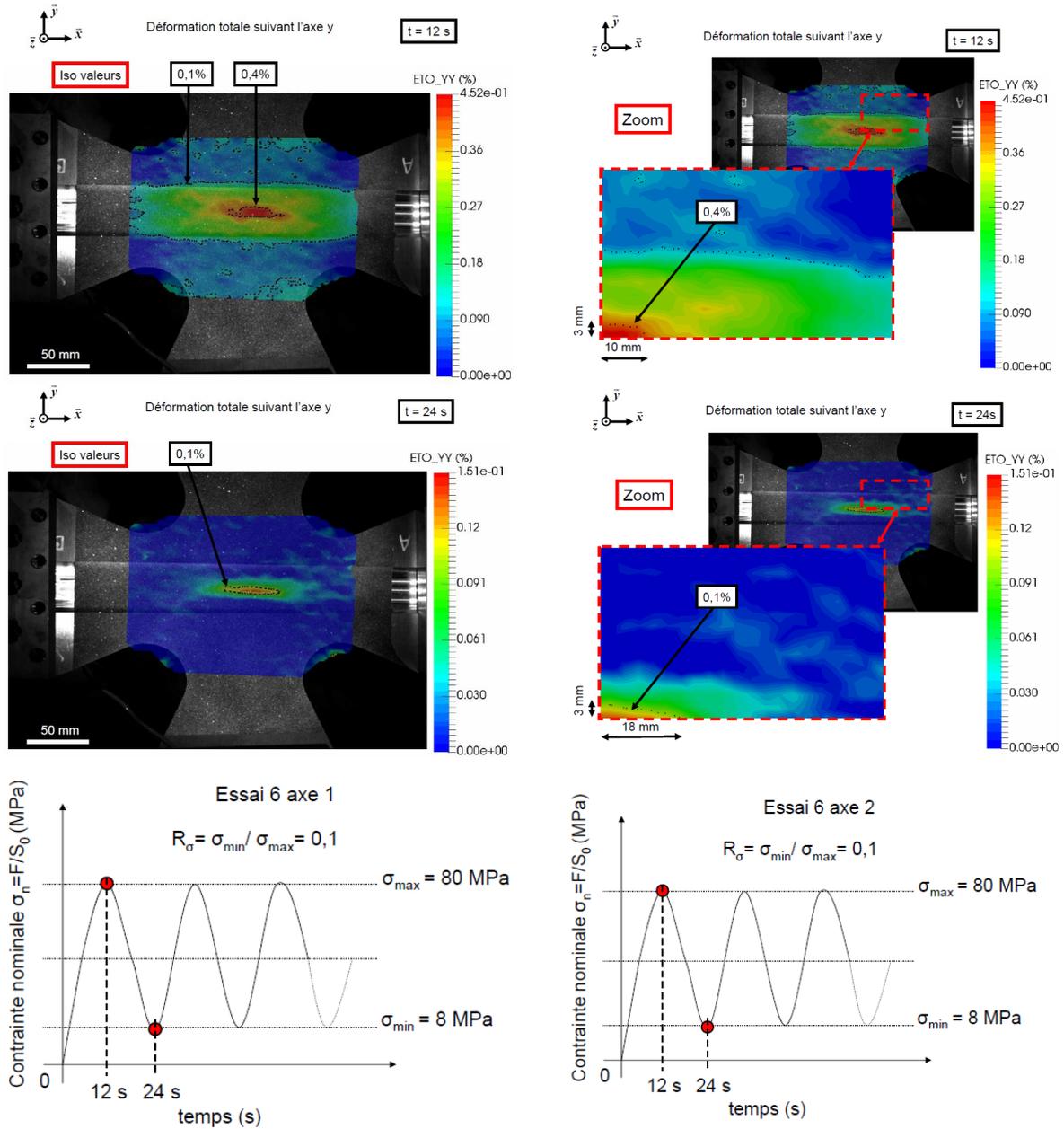


Figure 2.60 : Champs de déformation selon l'axe y (axe 2) expérimentaux étudiés pour deux instants différents pour l'essai n°6.

2.6 Origine de la chute de propriétés mécaniques dans le joint soudé

La résistance mécanique de l'alliage d'aluminium Al-Cu-Li 2198 est attribuée à la précipitation de la phase durcissante T_1 [120] [122]. L'objectif de cette partie est donc d'étudier l'évolution spatiale de la précipitation durcissante T_1 au travers du joint et de voir de quelle manière celle-ci peut influencer les propriétés mécaniques des différentes zones du joint soudé.

2.6.1 Étude microstructurale de l'alliage d'aluminium 2198-T8 soudé par FSW

Afin d'observer la précipitation de la phase T_1 au travers du joint soudé, des observations par microscopie électronique en transmission (MET) ont été réalisées avec l'aide du Pr. Ivan Guillot de l'Institut de Chimie et des Matériaux Paris-Est (UMR 7182). En effet, cette phase est très petite, de l'ordre de quelques nanomètres [9] [120] [122].

Ces travaux se sont concentrés principalement sur la quantification des précipités durcissants T_1 (Al_2CuLi) puisqu'ils jouent un rôle majeur sur le durcissement du matériau ([80], [119] et [120]).

Des échantillons d'épaisseur 750 μm ont été prélevés dans plusieurs zones du joint soudé (Figure 2.61). Puis, ces échantillons ont été polis mécaniquement afin d'obtenir des disques de diamètres 3 mm et d'épaisseur 100 μm . Les lames minces sont obtenues par amincissement électrolytique par double jet jusqu'au perçage du centre de l'échantillon. Le jet utilise une solution composée de 25% d'acide nitrique (HNO_3) et de 75% de méthanol (CH_3OH). Ce perçage se réalise à une température de $-30^\circ C$ et sous une tension de 12V. Finalement, les lames minces ont été observées à l'aide d'un microscope JEOL 2000EX.

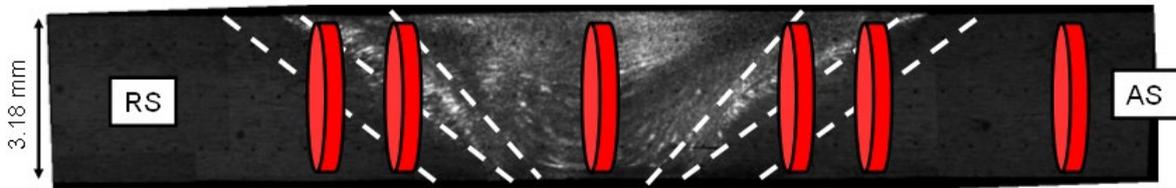


Figure 2.61 : Plan de prélèvement des lames minces dans différentes zones du joint.

La figure 2.62 présente des images MET obtenues en Champ Sombre dans le métal de base (à gauche) et dans la ZAT 2 (à droite). Les précipités sont observés dans le plan de glissement $\{111\}$.

La densité des précipités semble identique dans les deux zones. Les précipités observés dans ce plan sont très longs et très fins, comparables à des aiguilles.

À la même échelle, les précipités montrent des dimensions géométriques très semblables.

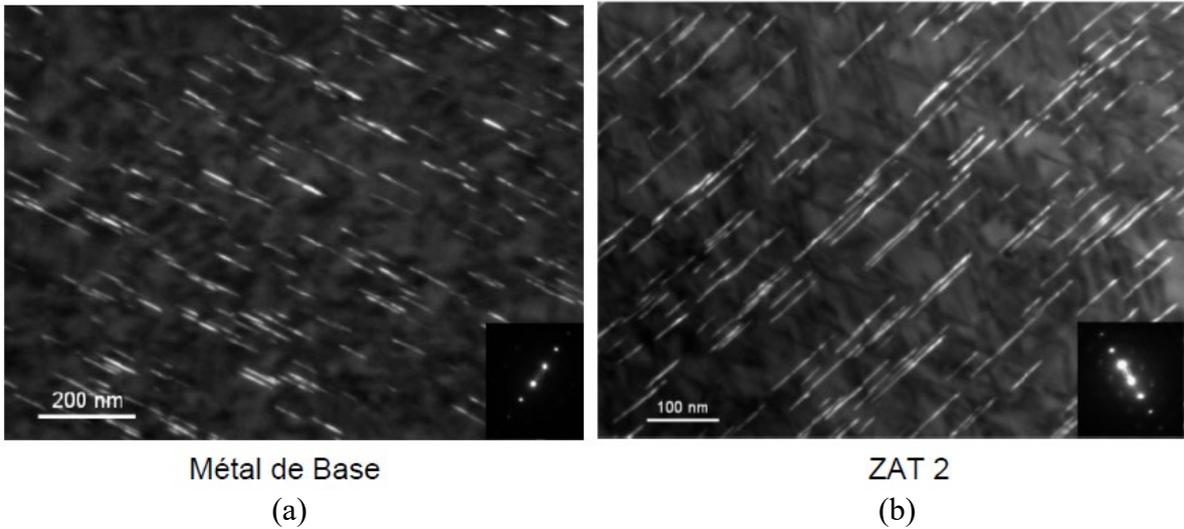
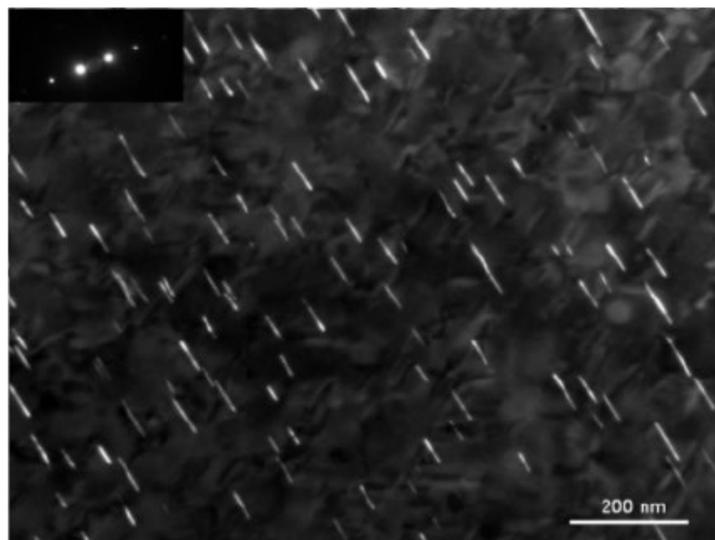


Figure 2.62 : Précipitation durcissante T_1 (Al_2CuLi) observée au MET dans le métal de base (a) et dans la ZAT 2 (b), dans le plan $\{111\}$ d'une structure en alliage d'aluminium 2198-T8 soudée par FSW.

Les observations ont aussi été réalisées dans la ZAT 1 et sont présentées sur la figure 2.63. Contrairement au métal de base et à la ZAT 2, les précipités sont moins longs, plus épais et leur densité a diminué. Les effets thermiques subis par cette zone lors du soudage ont modifié la morphologie et la densité des précipités T_1 .



ZAT 1

Figure 2.63 : Précipitation durcissante T_1 (Al_2CuLi) observée au MET dans la ZAT 1, dans le plan $\{111\}$, d'une structure en alliage d'aluminium 2198-T8 soudée par FSW.

Suivant l'orientation du cristal, les précipités apparaissent sous forme d'aiguilles ou de plaquettes. La figure 2.64 montre les précipités T_1 dans le plan $\{100\}$ sous forme de plaquettes. On peut observer la présence de dislocations qui sont en train de contourner ou de cisiller ces précipités T_1 .

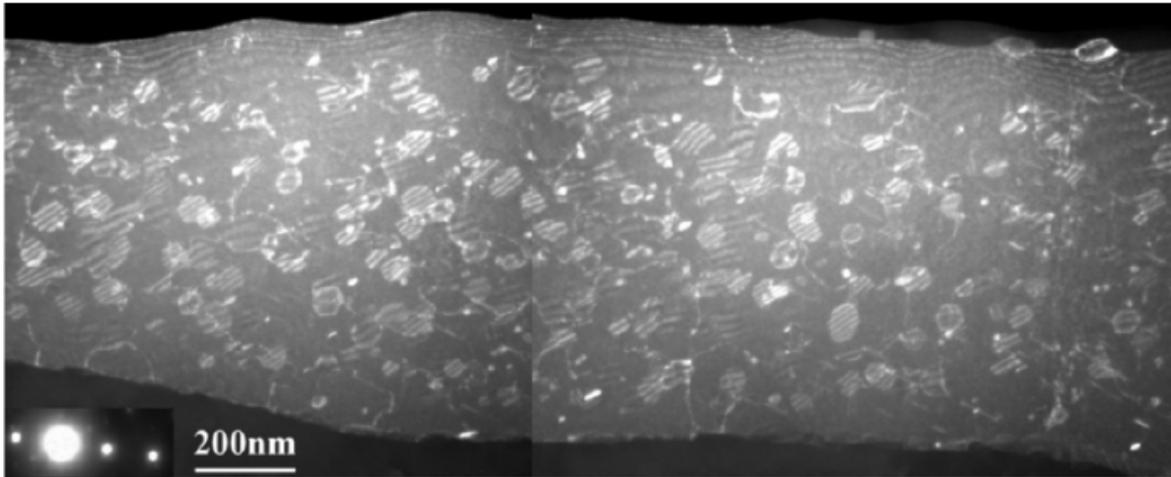
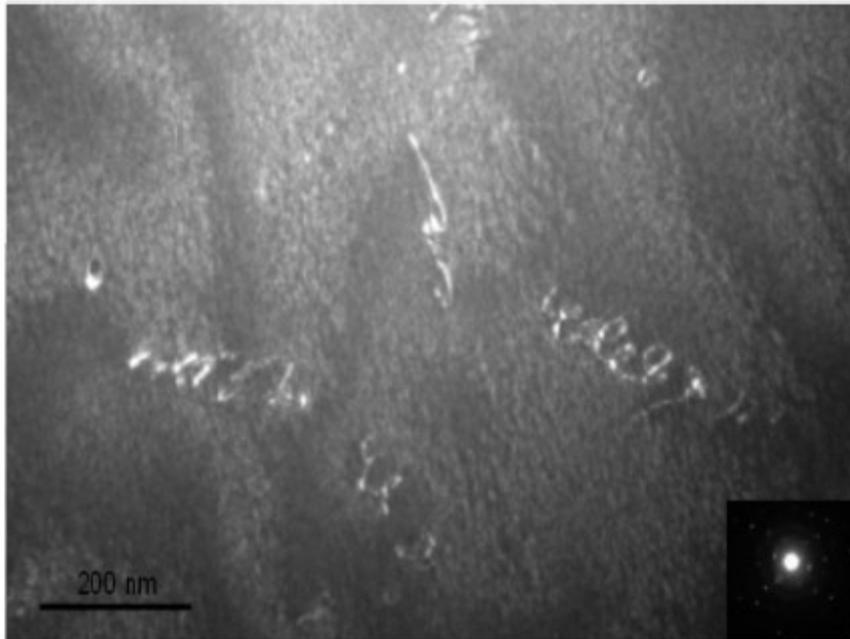


Figure 2.64 : Précipitation durcissante T_1 (Al_2CuLi) observée au MET dans la ZAT 1, dans le plan $\{100\}$, d'une structure en alliage d'aluminium 2198-T8 soudée par FSW.

La figure 2.64 montre l'absence totale de ces précipités T_1 dans le noyau soudé. Quelques dislocations apparaissent mais leur densité est faible.



Noyau Soudé

Figure 2.64 : Dislocations observées au MET dans le noyau soudé, dans le plan $\{111\}$, d'une structure en alliage d'aluminium 2198-T8 soudée par FSW.

Pour quantifier la fraction surfacique de précipités T_1 dans chaque zone d'intérêt du joint soudé, une dizaine d'images prises a été prise puis ces images ont été analysées à l'aide du logiciel Fiji [81]. La figure 2.65 affiche un exemple du traitement d'images à l'aide de filtres présents dans le logiciel Fiji.

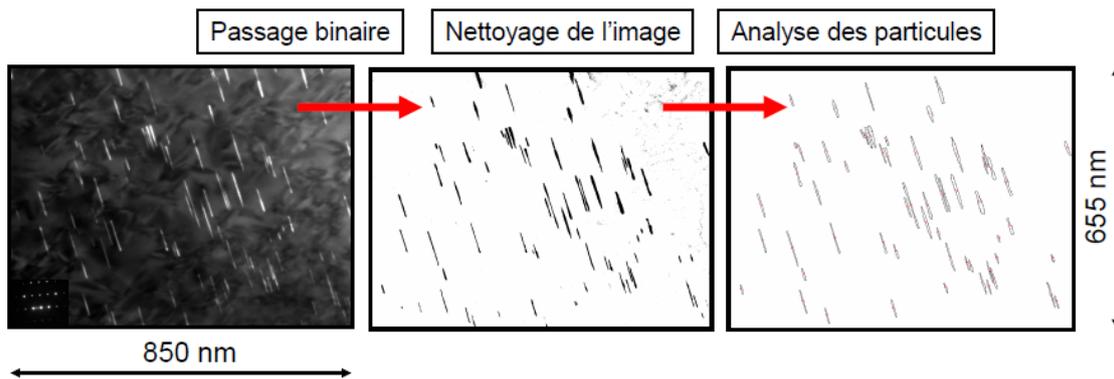


Figure 2.65 : Exemple de traitement d'une image obtenue par MET pour quantifier les précipités durcissants T_1 (Al_2CuLi).

Le traitement des images a permis d'estimer les caractéristiques moyennes des précipités T_1 dans différentes zones à travers le joint soudé. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Caractéristiques des précipités T_1 (Al_2CuLi) moyennées dans différentes zones du joint en alliage d'aluminium 2198-T8 soudé par FSW.

| | MdB (Max, Min, Ecart- type) | ZAT 2 A (Max, Min, Ecart- type) | ZAT 1 A (Max, Min, Ecart- type) | Noyau Soudé | ZAT 1 R (Max, Min, Ecart- type) | ZAT 2 R (Max, Min, Ecart- type) |
|------------------------------|---|---|---|----------------|---|---|
| Épaisseur moyenne (nm) | 3,5 (7,4 ; 1,3 ; 1,2) | 3,5 (8,6 ; 1,6 ; 1,1) | 4,7 (36,6 ; 0,53 ; 4,3) | 0 | 3,8 (21,4 ; 0,62 ; 2,6) | 3,6 (9,3 ; 0,97 ; 1,35) |
| Longueur moyenne (nm) | 58,0 (197 ; 13,9 ; 25,6) | 58,0 (173,6 ; 14,8 ; 24,4) | 48,6 (125,9 ; 14,2 ; 18,1) | 0 | 50,5 (132,4 ; 15,1 ; 19,6) | 53,7 (158,7 ; 15,4 ; 23,2) |
| Fraction volumique fv (%) | 6,9 | 5,0 | 2,7 | 0 | 2,3 | 4,5 |

Les tendances observées entre les différentes zones montrent une évolution des longueurs des précipités décroissante du métal de base vers le noyau soudé.

L'épaisseur moyenne des précipités augmente dans les zones affectées thermiquement par le procédé de soudage jusqu'au noyau soudé où les précipités sont entièrement dissous. Inversement, la longueur moyenne des précipités diminue dans ces zones.

Finalement, c'est la fraction surfacique des précipités dans ces zones qui montre un réel changement. La différence entre la ZAT2 et le MdB est essentiellement visible sur la densité de particules. La fraction surfacique estimée pour le MdB est de 6,9%. Elle est proche de celle obtenue dans les travaux de Gao [82] qui est de 4,9%. Les longueurs moyennes mesurées pour les précipités T_1 dans les travaux de Gao [82] sur le 2198-T8 ou ceux de Qin [83] sur le 2195-T8, sont approximativement de 50 nm ce qui est très proche de nos résultats.

Les fractions surfaciques estimées dans les ZAT du côté Advancing Side et du côté Retreating Side sont respectivement de 5% et de 4,5%. De même, pour les ZATM elles sont de 2,7% du côté Advancing Side et de 2,3% du côté Retreating Side.

Le peu de différence entre les deux côtés du joint soudé permet de considérer que le joint est symétrique.

2.6.2 Lien microstructure – propriétés mécaniques

Suite à ces observations expérimentales, nous avons cherché à comprendre le lien entre les propriétés mécaniques et précipitation de la phase T_1 .

Une relation, largement utilisée dans la littérature, permet de relier la limite d'élasticité des alliages d'aluminium à différentes contributions liées à la microstructure [82] :

$$\Delta\sigma_{\text{exp}}(\sigma_y) = \Delta\sigma_{\text{dis}} + \Delta\sigma_{H-P} + \Delta\sigma_{ss} + \sigma_l + \Delta\sigma_p \quad (2.1)$$

$\Delta\sigma_{dis}$ est reliée aux densités de dislocation présentes dans le matériau. Elle est déterminée à l'aide de l'équation de Taylor [84] :

$$\Delta\sigma_{dis} = M\alpha\mu b\rho^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

La formule fait intervenir un facteur géométrique α , qui vaut entre 0,2 et 0,3 pour un aluminium polycristallin [97], le facteur de Taylor M , le module de cisaillement μ de l'aluminium étudié, le vecteur de Burgers b et la densité de dislocations ρ , qui peut être mesurée, comme cela a été fait dans les travaux de Gao [82], à l'aide des profils de spectrométrie obtenus aux rayons X.

$\Delta\sigma_{H-P}$ est liée à la taille de grains.

Elle est calculée à l'aide de la relation de Hall-Petch [85] :

$$\Delta\sigma_{H-P} = \frac{K_y}{\sqrt{D}} \quad (2.3)$$

Cette relation prend en compte une constante K_y [84] et D qui est le diamètre moyen des grains dans chaque zone du joint soudé. Plus le diamètre des grains est petit, plus la contrainte sera grande. Dans le cas particulier des joints soudés par FSW, cette contribution est estimée principalement dans le noyau soudé où les grains sont équiaxiaux et très petits (quelques micromètres). Dans les zones autour du noyau soudé, les grains ont une forme plus allongée et la valeur calculée reste faible.

σ_f est la contrainte de friction de réseau qui est constante à température ambiante. Elle a été estimée par Peierls-Nabarro [82] [89] [90].

$\Delta\sigma_p$ est la contribution liée au durcissement par la précipitation durcissante. Ce durcissement est créé par l'interaction entre les dislocations et les obstacles présents dans le matériau.

Pour le métal 2198-T8, la plus grande part du durcissement est faite par les précipités T_1 (Al_2CuLi) qui peuvent être soit contournés soit cisailés.

Des modèles sont présentés dans la littérature pour calculer, à partir de ces précipités, une contrainte mécanique [91] [92] [93] [94].

Ces modèles tiennent compte des mécanismes de contournement ou de cisaillement que subissent les précipités T_1 selon leurs dimensions et leur densité. Les équations proposées sont des évolutions de l'équation de base d'Orowan [95].

Pour un rayon en dessous du rayon critique, les précipités seront cisailés par les dislocations. Au-dessus de ce rayon, les précipités seront contournés (Figure 2.66).

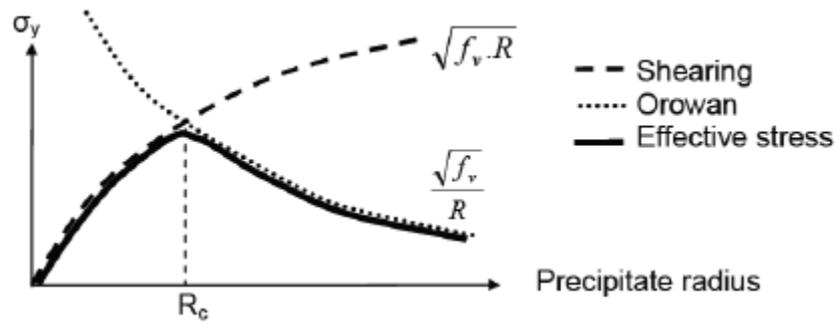


Figure 2.66 : Evolution de la limite élastique en fonction du rayon du précipité [95].

Des travaux proposent des équations pour calculer la contribution des précipités durcissants à la limite élastique du matériau. C'est le cas des équations proposées par Starink et al. [92] et Seidman et al. [93].

$$\Delta\sigma_{p,sh} = M \frac{\gamma_{apb}}{2b} \sqrt{\frac{3\pi^2 \gamma_{apb} f_v \bar{r}}{32\Gamma}} \quad (2.4)$$

$$\Delta\sigma_{p,by} = 0.81M \frac{\gamma_{apb}}{2b} \sqrt{\frac{3\pi f_v}{8}} \quad (2.5)$$

La différence entre les deux équations dépend de la taille des précipités. Dans le cas où le rayon moyen des précipités est plus petit qu'un rayon critique défini, d'après le mécanisme d'Orowan (Figure 2.66), ces précipités sont susceptibles d'être cisailés par les dislocations. La première équation permet de calculer la contribution de ces précipités. Dans le cas inverse, les précipités sont plus grands et sont contournés par les dislocations. C'est la deuxième équation qui est utilisée.

Ces équations font intervenir le facteur de Taylor M [93], l'énergie surfacique de la paroi d'anti-phase γ_{apb} [84], le vecteur de Burgers b [96], la fraction volumique des précipités f_v , le rayon moyen des précipités \bar{r} et la tension de ligne des dislocations Γ [97].

Le rayon critique R_c qui marque la transition entre les mécanismes de cisaillement et de contournement est obtenu lorsque $\Delta\sigma_{p,sh} = \Delta\sigma_{p,by}$, soit :

$$R_c = \bar{r} = 2,62 \frac{\Gamma}{\gamma_{apb}} \quad (2.6)$$

Finalement, la contribution de la précipitation durcissante à la limite d'élasticité est donnée par :

$$\Delta\sigma_p = \text{Min}\{\Delta\sigma_{p,sh}, \Delta\sigma_{p,by}\} \quad (2.7)$$

$\Delta\sigma_{ss}$ est reliée au durcissement par solution solide. Plusieurs équations existent pour estimer cette contribution (équation de Fleischer et Labusch [86] [87] et travaux de Genevois [88]) :

$$\Delta\sigma_{ss} = \sum_i k_i C_i^{\frac{2}{3}} \quad (2.8)$$

Cette équation lie le durcissement à \mathbf{C} , qui correspond aux concentrations atomique de chaque élément présent en solution et de \mathbf{k} une constante.

Une technique pour déterminer ces concentrations ainsi que les constantes est décrite dans les travaux de Genevois [88]. De façon générale, la contribution liée au durcissement par solution solide est très difficile à déterminer. Dans la littérature, elle est généralement déduite à partir de la limite d'élasticité mesurée à laquelle on a soustrait les autres contributions.

Le graphe de la figure 2.67 montre les résultats obtenus dans les travaux de Gao [82] où il a cherché à comparer le cumul des contributions liées à la microstructure aux limites élastiques mesurées expérimentalement sur des micro-éprouvettes prélevées dans différentes zones d'un joint soudé par FSW en 2198 et sollicitées en traction.

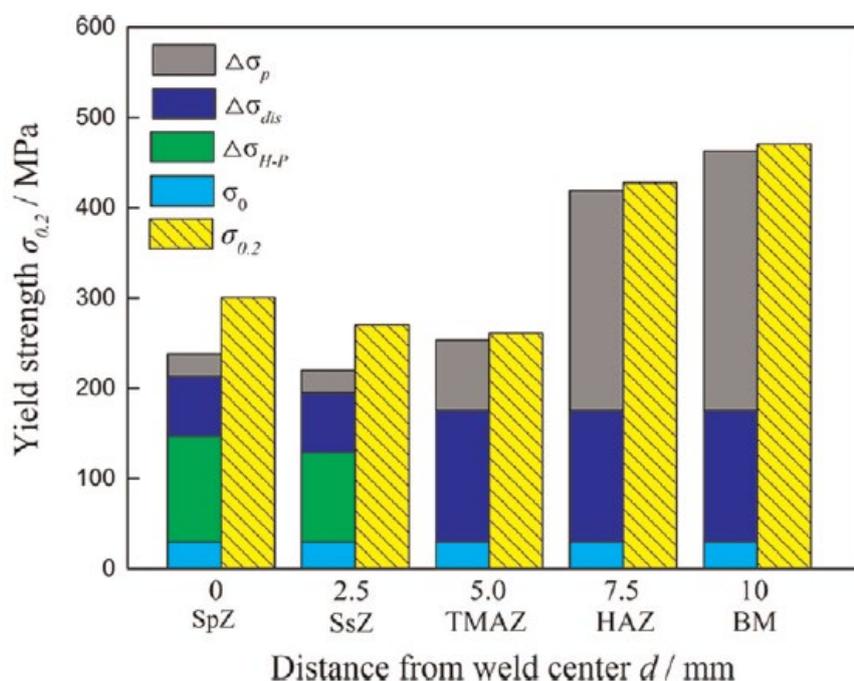


Figure 2.67 : Comparaison entre les limites élastiques mesurées expérimentalement ($\sigma_{0,2}$) et les différentes contributions mécaniques calculées selon la microstructure présente à travers le joint d'un alliage d'aluminium 2198-T8 soudé par FSW [82].

Ces résultats montrent qu'une grande partie de la chute de propriétés mécaniques dans le joint soudé est bien liée à la dissolution de la phase durcissante T_1 .

Il est intéressant de noter que pour la ZATM, la contribution due à l'effet des dislocations est supérieure à l'apport des précipités. Enfin, l'absence des précipités durcissants T_1 dans la zone du joint soudé montre que la limite élastique est liée principalement à la géométrie des grains et aux densités de dislocations.

Pour notre joint soudé, la contribution au durcissement, liée aux précipités T_1 , calculée pour le métal de base est de 210 MPa, 179 MPa pour la ZAT 2, et 131 MPa pour la ZAT 1.

Ces valeurs sont en accord avec celles qui sont calculées par Gao. Notre étude doit désormais être complétée pour calculer les autres contributions évoquées ci-dessus pour relier celles-ci à l'évolution de la limite d'élasticité dans le joint soudé.

2.7 Synthèse des résultats expérimentaux

Des essais mécaniques de caractérisation ont été menés sur des joints soudés par FSW.

Tout d'abord, le fibrage créé lors du laminage des tôles est à l'origine d'une très forte anisotropie du matériau de base. Cependant, l'opération de soudage entraîne une recristallisation complète de la microstructure du noyau soudé qui engendre un comportement mécanique quasiment isotrope de la structure (éprouvette contenant le joint soudé). Le noyau soudé concentre le maximum de déformation plastique au cours des essais. En outre, les essais cycliques à incréments croissants de contrainte ont permis de mettre en avant un fort durcissement cyclique de l'assemblage.

La corrélation d'images numériques (DIC) a été utilisée pour observer les comportements mécaniques locaux du joint soudé. L'analyse des résultats permet de confirmer le comportement mécanique isotrope du noyau soudé. Par contre, les zones du joint soudé affectées thermiquement et thermomécaniquement, présentent, elles, une certaine anisotropie de comportement, différente de celle du métal de base. Lors des essais cycliques, toutes les zones d'intérêt du joint soudé durcissent cycliquement.

Enfin, en parallèle des essais mécaniques, l'analyse de la microstructure a montré une dissolution complète des précipités durcissants T_1 dans le noyau soudé qui explique l'origine de la localisation de la déformation dans cette zone.
