



HAL
open science

Caractérisation mécanique locale d'un point soudé d'acier à très haute résistance

Rémi Lacroix, Arnaud Lens, Guillaume Kermouche, Jean-Michel Bergheau,
Helmut Klöcker

► **To cite this version:**

Rémi Lacroix, Arnaud Lens, Guillaume Kermouche, Jean-Michel Bergheau, Helmut Klöcker. Caractérisation mécanique locale d'un point soudé d'acier à très haute résistance. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. hal-03391241

HAL Id: hal-03391241

<https://hal.science/hal-03391241>

Submitted on 21 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Caractérisation mécanique locale d'un point soudé d'acier à Très Haute Résistance

R. Lacroix^a, A. Lens^b, G. Kermouche^c, J.M Bergheau^c, H. Klöcker^a

a. Ecole des Mines de Saint Etienne, 158 cours Fauriel, 42023 Saint Etienne

b. ArcelorMittal Maizières Voie Romaine, BP30320, 57283 Maizières-les-Metz,

c. Ecole Nationale d'Ingénieurs de Saint Etienne, 58 rue Jean Parot, 42100 Saint Etienne

Résumé :

La compréhension des modes de rupture des points soudés d'aciers à Très Haute Résistance (THR) est un enjeu industriel important. Des essais de caractérisation locale sont développés, ainsi que l'observation in situ de la rupture d'un point soudé. La quantification du comportement et de la rupture des différentes zones d'un point soudé devra permettre une meilleure compréhension de la soudabilité des aciers THR.

Abstract :

Understanding the weld failure modes of Advanced High Strength Steels (AHSS) is a main industrial issue. In present work, local mechanical tests are developed, as well as in situ observation of crack formation and propagation in a spot weld. Quantifying the behaviour and the failure of the various zones constituting a weld allow a better understanding of the AHSS spot weldability.

Mots clefs : soudage par point, comportement mécanique local, observations *in situ*

1 Introduction

Dans le but de diminuer le poids des voitures, la tenue mécanique des aciers automobiles a été fortement améliorée ces dernières années. Ces aciers sont principalement assemblés par soudage par point. Dans les aciers doux la tenue mécanique des soudures par point augmente proportionnellement à la résistance des matériaux de base. La tenue mécanique des points soudés peut être caractérisée par l'essai de traction en croix. La figure 1.a représente schématiquement cet essai. La valeur maximale de la force (CTS) caractérise la tenue mécanique du joint soudé. Actuellement, dans la gamme des aciers à Très Haute Résistance, ou THR, (Dual Phase, TRIP), plusieurs questions se posent:

- une amélioration de la tenue mécanique des matériaux de base ne conduit pas forcément à une augmentation de la tenue des points soudés en traction en croix [1];
- les critères actuels d'acceptabilité des points soudés basés sur la taille du bouton (Figure 1.c) après traction en croix ne s'appliquent pas aux aciers THR [2]. En effet, pour une même taille de bouton, des valeurs de tenue mécanique très différentes peuvent être observées expérimentalement.

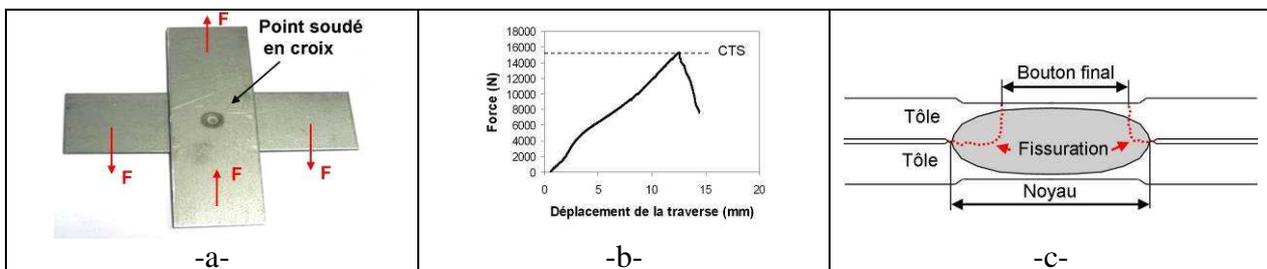


FIG. 1 – Essai de traction en croix. (a) Schéma de principe de l'essai, (b) Courbe force –déplacement obtenue sur un point soudé d'acier DP780, (c) Schéma de principe de fissuration et de création d'un bouton.

- inversement une tenue mécanique identique peut correspondre à des diamètres de noyau fondu très différents. La modélisation mécanique est alors essentielle à la compréhension de l'essai.

Les modèles actuels de tenue mécanique de point soudés en traction en croix peuvent être classés en deux groupes :

- Modèles basés sur la résistance des matériaux. Ces modèles relient la tenue et le mode de rupture au diamètre de la zone fondue et à la dureté relative entre le matériau de base et la zone fondue [3],
- Modèles basés sur une approche par éléments finis. Ces modèles relient des paramètres de rupture locaux (déformation à rupture, [4], en intégrale J, [5], zones cohésives, [6],...) sur un chemin de fissuration à des mesures de courbes force-déplacement d'essais de traction en croix.

Des méthodes basées sur des observations *in situ* se développent, comme les travaux de Sutton [7] sur la mesure d'ouverture de fissures durant le chargement de joints par friction malaxage. Ces travaux recherchent la détermination par l'observation directe de paramètres contrôlant l'endommagement d'une soudure.

Naït Oultit et al. [8] ont analysé phénoménologiquement les mécanismes de fissuration dans le point soudé. La figure 2.a montre une coupe d'un point soudé révélant les différentes zones par une attaque Picral+Nital : zone fondue (ZF), la Zone Affectée Thermiquement (ZAT) à gros grains (ZATGG), la ZAT à grains fin (ZATGF), la zone intercritique et le matériau de base). La figure 2.b montre schématiquement les microstructures typiques de ces zones contrôlant entre autres les mécanismes d'endommagement local lors de l'essai de traction en croix. Le tableau 1 détaille ces mécanismes de rupture locaux ainsi que les paramètres associés. Ces travaux ont de plus abouti à une nouvelle méthode d'analyse de l'endommagement lors de l'essai de traction en croix, la méthode DCM (Damage Contribution Methodology).

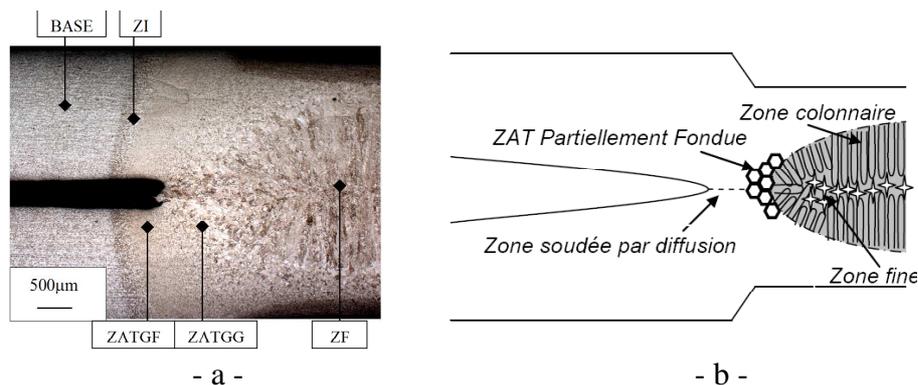


FIG. 2 – Les zones d'intérêt d'un point soudé a) Coupe d'un point soudé DP780 attaquée au Picral+Nital, et les zones d'intérêt pour la caractérisation mécanique. b) Schématisation des zones d'intérêt pour la rupture d'un point soudé d'après les travaux de Naït Oultit[9].

	Zone Partiellement Fondue	Zone Fondue
Mécanisme de rupture local	Décohésion entre lattes et /ou dendrites	Trans- ou intergranulaire avec déviation possible sur des lattes et ou des variants de martensite ou des dendrites
Paramètre recherché	Contrainte critique	Contrainte critique/ déformation critique

D'après les observations de Naït Oultit et al., l'endommagement est piloté à la fois par l'état de chargement (piloté par l'essai et géométrie de l'échantillon), la composition et la microstructure locaux. Ce travail s'efforce à *mesurer* les paramètres de chargement locaux caractéristiques de l'endommagement local. Pour cela, il faut à la fois observer l'état d'endommagement local et connaître avec précision les champs de déformation et de contrainte locaux.

Un nouvel essai de chargement de point soudé est développé, plus adapté à une analyse locale de l'endommagement que l'essai de traction en croix: l'essai d'enfoncement de coin (EEC). Cet essai permet l'observation *in situ* de la propagation de fissures dans un point soudé, ainsi qu'un plus grand contrôle de l'état de chargement local.

La connaissance des champs de contraintes locaux lors du chargement passe par un couplage de l'essai avec une simulation mécanique. La connaissance précise des lois de comportement et de l'anisotropie des différentes zones (Figure 2.a) est fondamentale pour ce couplage. De plus, l'endommagement d'un matériau

dépendant de son état de chargement, il est jugé plus pertinent de connaître le comportement du matériau *non endommagé*, et à grands niveaux de déformations. Ainsi, la démarche suivante est adoptée :

- *Caractérisation indépendante du comportement sain des différentes zones du point soudé,*
- *observation in situ de la propagation de fissures et de la rupture d'un point soudé par EEC,*
- *prédiction des contraintes locales par simulation mécanique (éléments finis).*

2 Méthodes expérimentales

2.1 Soudage par résistance

Le procédé de soudage est réalisé par une machine 50Hz selon la norme EN ISO 18278-2. Des tôles de 2 mm d'acier DP780 étudié (Tableau 2) sont soudées avec des électrodes de 8 mm de diamètre et un effort aux électrodes de 500 daN. Le cycle de soudage comprend 4 pulses de 9 périodes chaudes et 2 périodes froides, suivis d'un temps de maintien en charge de 20 périodes.

C	Mn	Si	Re	Rm	A% unif.	A% Totale
130	1940	290	493 MPa	800 MPa	12,9	20,3

TAB. 2: Principales caractéristiques mécaniques et chimiques ($\times 10^{-3}$ wt%) de l'acier DP780 étudié.

2.2 Comportement du matériau sain

Dans le soudage par point, les essais d'indentions sont les plus répandues pour la caractérisation mécanique locale [5,6,10,11]. Toutefois deux limitations peuvent être formulées quant à leur application dans le cadre de cette étude :

- peu d'informations sur l'anisotropie locale,
- un niveau de déformation limité.

Des méthodes de caractérisation micromécaniques basées sur la mesure de champs se développent dans le domaine du soudage, menant à des caractérisations beaucoup plus fines [12,13]. Ces techniques sont très intéressantes pour la caractérisation de l'endommagement. Cependant en sollicitant le matériau en traction, elles ne donnent pas le comportement du matériau sain.

Dans le présent travail, le comportement local *non endommagé* des matériaux des différentes zones constituant un point soudé (Figure 2) est caractérisé en compression. La compression de tous les échantillons est lubrifiée par deux couches de film téflon de 0,075 mm d'épaisseur, et est menée à une vitesse constante de $0,01\text{s}^{-1}$.

2.2.1 Comportement sain de la zone fondue

La zone fondue est caractérisée en compression uniaxiale. Des échantillons cylindriques sont extraits de la zone fondue, dans les directions de laminage (DL) et normale (DN) des tôles soudées. Les échantillons ont une hauteur de 3 mm, et un diamètre de 3,5 mm (DL) ou 4,4 mm (DN).

2.2.2 Comportement sain des différentes ZATs et du métal de base du matériau

Les ZATs (gros grains et grains fins) et le métal de base sont caractérisés en compression plane. Le métal de base est disponible sous forme de tôles de 2 mm d'épaisseur. Les ZATs sont caractérisées par l'intermédiaire d'échantillons obtenus sur machine Gleeble. Les cycles thermiques de deux zones caractérisant les ZATs à gros grains et à grains fins sont appliqués sur des tôles de matériau de base, et génèrent une microstructure quasi-homogène sur une zone de $25 \times 12 \times 2$ mm. Des échantillons adaptés à la compression plane, de dimensions $10 \times 9 \times 7$ mm, sont construits à partir des tôles [14].

2.3 Fissuration du point soudé : essai d'Enfoncement de Coin (EEC)

La rupture d'un demi-point soudé est analysée, la face libre médiane permettant l'observation *in situ* est préparée pour la mesure de champs. Un coin transmet la charge entre les deux tôles soudées, provoquant leur pliage, et l'ouverture de l'entaille. Un effort normal est alors appliqué sur le joint soudé, ainsi qu'un effort orthogonal à son axe. L'essai fait suite aux travaux d'études de [15], et est illustré en figure 3.

Cet essai permet un contrôle de l'état de chargement du point soudé. En effet, le rapport entre largeur et longueur des tôles contrôle la rigidité s'opposant au pliage et ainsi l'effort normal appliqué sur la soudure.

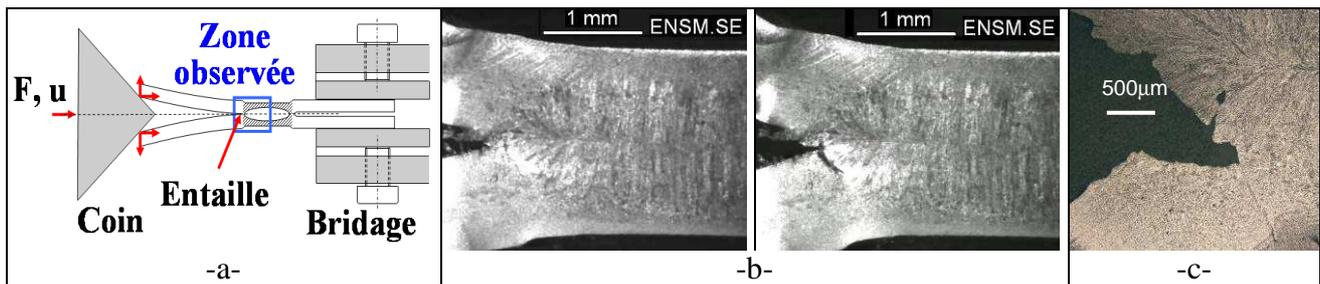


FIG.3 – L'EEC. a) Principe. b) Exemple de propagation de fissure enregistrée durant la charge d'un point soudé d'acier Dual Phase DP780, la surface observée est attaquée au Nital. c) Observation optique de la fissuration après essai.

L'observation de la propagation de fissures dans le point soudé est réalisée par une caméra enregistrant une image par 0.005 mm d'avance du coin. La résolution des images est de 1280x1024 pixels. Une zone d'environ 5x4 mm est couverte par l'observation, sur laquelle figurent le fond d'entaille ainsi que la moitié du point soudé. Les grandeurs de force et de déplacement sont respectivement enregistrées par une cellule de force de calibre 10kN réalisée au laboratoire, et un capteur LVDT de 0.01 mm et d'indépendance linéaire de $\pm 0.05\%$. Ces différentes acquisitions sont synchronisées.

La mesure de champs de déplacement *in situ* est réalisée par l'enregistrement de la déformation de micro-grilles de pas de 30 μ m collées sur la surface observée. Le traitement de la séquence d'image acquise lors de la déformation de la micro-grille permet la détermination du champ de déplacement au cours de la charge, d'après les travaux de Surrel [16].

3 Résultats

3.1 Comportement local des matériaux sains

La figure 4 illustre le résultat d'une compression uniaxiale d'un échantillon extrait d'une zone fondue de point soudé d'acier DP780, dans la direction normale aux tôles.

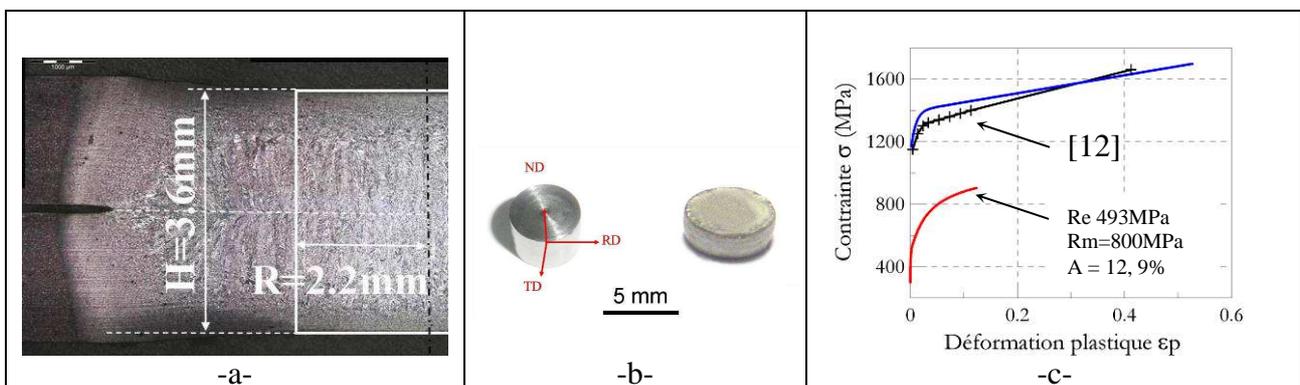


FIG. 4 – Compression uniaxiale d'une éprouvette prélevée dans un point soudé d'acier DP780. a) Echantillon extrait dans la zone fondue. b) Echantillon initial et déformé. c) Loi de comportement obtenue (bleue, supérieure), travaux de [12] (noire) et courbe de traction du matériau de base (rouge, inférieure).

La figure 4.c compare ce résultat aux travaux de Tong [12] portant sur une zone fondue de point soudé d'acier DP600, estimant le comportement sain du matériau par mesure de déformations locales sur un mini-essai de traction. Les résultats de cette caractérisation indiquent un niveau de contrainte d'écoulement dans la zone fondue nettement supérieure au matériau de base. De plus, le traitement de cette loi de comportement révèle une déformation à striction de 0.03, nettement inférieure à celle du matériau de base, de 0.13. Ces résultats sont en accord avec [12].

3.2 Fissuration du point soudé : essai d'Enfoncement de Coin (EEC)

L'EEC permet l'observation de ruptures de points soudés similaires à l'essai de traction en croix : rupture interfaciale, partielle, ou en bouton, selon la localisation de la déviation de la fissure dans l'épaisseur de la tôle. La figure 5.a montre un échantillon présentant une rupture dans l'interface après chargement par EEC. La figure 5.b présente la courbe force-déplacement de l'essai. L'observation du faciès de rupture d'un point soudé rompu par EEC révèle toutefois un artefact lié à l'EEC: la face observée est en état de contrainte plane, modifiant ainsi l'état de chargement proche de la surface. Une rupture ductile est observée sur une profondeur d'environ 500 μ m par rapport à la face libre, tandis que le reste du point soudé rompt de façon majoritairement fragile, avec des îlots de plasticité.

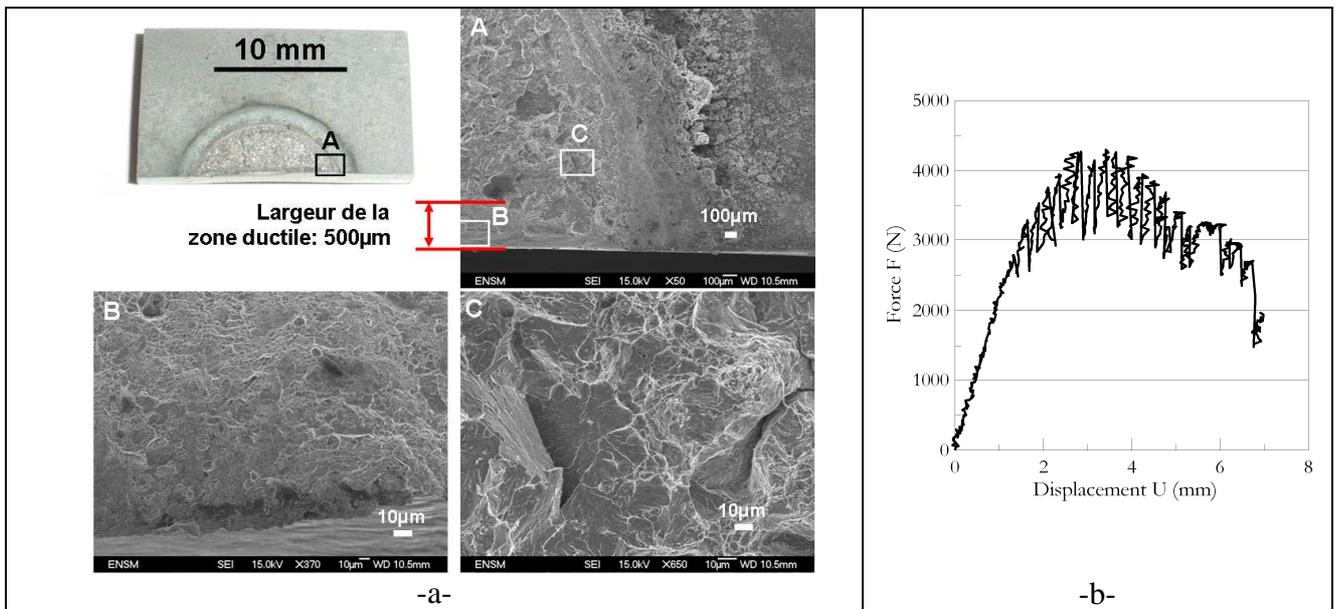


FIG. 5 – Exemple de résultats d'EEC sur un point soudé d'acier DP780, présentant une rupture en plan de joint. a) échantillon découpé après chargement, et observation des faciès de rupture avec zone ductile (B) et zone fragile (C). b) Courbe force-déplacement enregistrée.

La courbe force-déplacement de l'essai présente l'effort nécessaire au pliage des tôles. Une géométrie suffisamment rigide provoque la propagation de fissures sous faible déformation des tôles.

4 Simulations Eléments Finis

Le couplage de l'EEC avec la simulation est réalisé avec le code de calcul commercial AbaqusTM Standard. La figure 6 montre un exemple de couplage d'un EEC. La figure 6.a montre un point soudé après enfoncement du coin de 16 mm, avec une rupture de type partielle. Le couplage est basé sur le comportement non endommagé d'une zone fondue de 10 mm de diamètre, et de celui du métal de base, sans modèle de fissuration. La figure 6.b illustre le résultat de la simulation après 8 mm d'enfoncement du coin. Cette simulation surestime l'effort d'enfoncement du coin car le comportement inconnu des ZAT est approché par celui de la zone fondue. Une telle simulation permet toutefois une quantification de l'état de chargement local. Le champ de triaxialité dans le plan de joint de la soudure au même instant est illustré en figure 6.c.

Perspectives

Le matériau de la zone fondu et le matériau de base ont été caractérisés de façon très précise en grande déformation. Les ZATs simulées doivent être caractérisés finement. Une comparaison entre ZATs simulées et ZATs réelles doit permettre de juger de la pertinence des lois de comportement issues de ZATs simulées. Pour cela des essais d'indentations sont développés afin de reconstruire la loi de comportement de ZATs.

Les caractérisations mécaniques locales constituent une première base du couplage de l'EEC avec la simulation. L'ensemble des données extraites de l'essai, c'est-à-dire les mesures de force, de déplacement, de champ de déplacement, du chemin de fissuration, ainsi que des mesures de la pièce déformée, doivent elles aussi contribuer à ce couplage. Ainsi, les niveaux de déformations et de contraintes locales à rupture

pourront être estimés. Ces informations permettront une meilleure compréhension de la tenue mécanique de points soudés en traction en croix, en rendant possible la comparaison de paramètres caractéristiques de l'endommagement local entre différents points soudés.

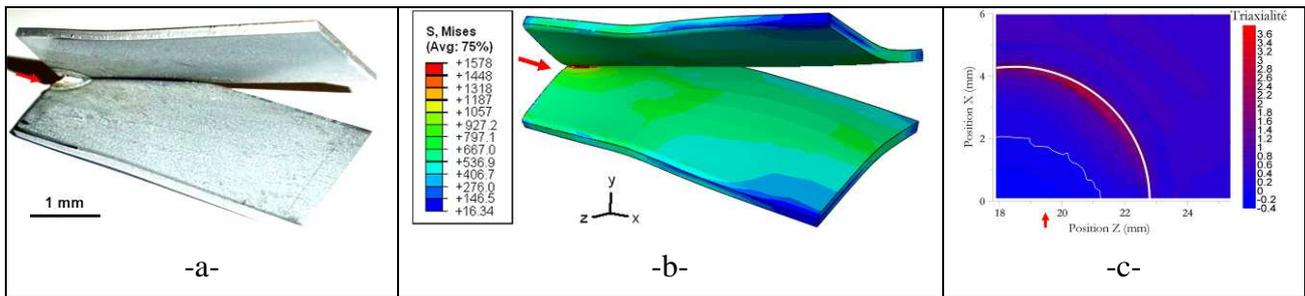


FIG. 6 – Couplage de l'EEC par simulation (observation sur la face indiquée par la flèche rouge). a) Echantillon chargé par EEC. b) Simulation de l'essai. c) Champ de triaxialité dans le plan de joint de la soudure (fond d'entaille en blanc).

Discussions

L'EEC développé lors de ces travaux permet l'observation *in situ* de la propagation de fissures dans un point soudé, les mécanismes de rupture dans le point soudé présentent toutefois un artefact lié à l'essai : une zone ductile proche de la face libre, tandis que le reste de la zone fondue rompt de façon majoritairement fragile. La simulation de l'essai montre d'ors et déjà une triaxialité des contraintes plus faibles proche de la surface que sur le reste du fond d'entaille.

L'EEC permet d'obtenir des fissures en plan de joints sous faible déformation des tôles. Ainsi, l'énergie dissipée durant l'EEC est consommée plus largement par la rupture du point soudé que par le pliage des tôles, par rapport au cas de la traction en croix.

Remerciements

Les auteurs sont reconnaissants envers le professeur Dave Embury pour sa contribution scientifique à ces travaux, ainsi qu'à Joël Monatte pour son implication dans la réalisation technique des essais.

Références

- [1] Oikawa H. et al., *Nippon Steel Technical Report No. 95 January 2007*.
- [2] AHSS Application Guidelines - Version 3, World Steel Association - September 2006.
- [3] Radakovic D.J., Tumuluru M., *Welding Journal* 87, pp 96s-104-s, avril 2008.
- [4] Dancette S. et al., *New Developments on Metallurgy and Applications of High Strength Steels Buenos Aires (2008)*, Paper 58.
- [5] Lee H., Choi J., *Mechanics of Materials* 37, pp. 19–32, 2005.
- [6] Cavalli M.N. et al., *Fatigue Fract Engng Mater Struct* 28, Issue: 10, pp.861-874, Oct. 2005.
- [7] Sutton. M.A, et al., *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 70, Issue 15, pp. 2215-2234, October 2003.
- [8] B. Naït Oulit, A. Lens, H. Klöcker, *Sheet Metal Welding Conference XIII, AWS Detroit Section, 2008*.
- [9] B. Naït Oulit, *Manuscrit de Thèse de l'Ecole des Mines de Saint Etienne, soutenue le 13 novembre 2008*.
- [10] Tabor D., *Hardness of Metals*, Clarendon Press, Oxford, U.K, 1951.
- [11] Kermouche G. et al., *Mechanics of Materials* 40, pp. 271–283, 2008.
- [12] Sutton M. A. et al., *Experimental Mechanics*, Vol. 48, N. 4, pp. 451-464, August 2008.
- [13] Tong W. et al., *Metallurgical and Materials Transactions A*, Volume 36a, pp2651-2669, October 2005.
- [14] Bacha A et al., *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 35, Issue 2, pp 157-166, mars 2007.
- [15] Payen G., *Thèse de Master Recherche, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne, 2006*.
- [16] Surrel Y. – cours d'optique (images optiques; mesures 2D et 3D) du CNAM – 2002/2003.