



**HAL**  
open science

# Caractérisation par mesure de champ de l'hétérogénéité de comportement de cordon de soudure en alliage P91 et identification des paramètres de loi de comportement

Mathieu Touboul, Jérôme Crépin, Gilles Rousselier, C. Petry, Félix Latourte

## ► To cite this version:

Mathieu Touboul, Jérôme Crépin, Gilles Rousselier, C. Petry, Félix Latourte. Caractérisation par mesure de champ de l'hétérogénéité de comportement de cordon de soudure en alliage P91 et identification des paramètres de loi de comportement. Matériaux 2010, Oct 2010, Nantes, France. 11 p. hal-00572502

**HAL Id: hal-00572502**

**<https://minesparis-psl.hal.science/hal-00572502>**

Submitted on 1 Mar 2011

**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 par mesure de champ de l'hétérogénéité de comportement de cordon de soudure en alliage P91 et identification des paramètres de loi de comportement

M. TOUBOUL<sup>a,1</sup>, J. CREPIN<sup>a</sup>, G. ROUSSELIER<sup>a</sup>, C. PETRY<sup>b</sup>, F. LATOURTE<sup>b,2</sup>

<sup>a</sup> Mines ParisTech, Centre des Matériaux, UMR CNRS 7633, 10 rue Henri Desbrières 91003 Evry Cedex France

<sup>b</sup> EDF R&D, Département Matériaux et Mécanique des Composants, Les Renardières, 77818 Moret sur Loing Cedex,  
1 : mathieu.touboul@mines-paristech.fr, 2 : felix.latourte@edf.fr

---

### RESUME:

*Ce premier travail s'inscrit dans le cadre du développement d'une méthodologie basée sur l'identification des mécanismes élémentaires, responsables de la déformation et de l'endommagement par fluage de matériaux polycristallins en relation avec leurs hétérogénéités microstructurales. Cette étude concerne l'acier P91, matériau potentiellement utilisé dans des applications de tenue mécanique à chaud dans le cadre des centrales thermiques à flamme et dans les centrales nucléaires de 4ème génération. Cette méthodologie repose sur l'utilisation de techniques de mesure de champs cinématiques par corrélation d'images, couplées à des simulations numériques par éléments finis afin d'optimiser des paramètres de lois de comportement de matériaux. La première application concerne l'étude de structures soudées en P91 sollicitées en traction uniaxiale, afin de caractériser le comportement du cordon de soudure à l'échelle macroscopique où le gradient des propriétés mécaniques dû au soudage est observable. Une technique de microlithographie sera ensuite mise en œuvre pour caractériser les mécanismes de glissement intergranulaire lors d'essai de fluage, en différentes zones du joint soudé.*

**MOTS-CLES :** joint soudé, acier P91, corrélation d'images, mesures de champs, identification de paramètres de loi de comportement

---

### 1) Etude de la microstructure des joints soudés en acier P91

Un joint soudé peut être décomposé en 3 zones : le métal de base, la ZAT (Zone Affectée Thermiquement) qui peut elle-même être divisée en 3 zones : ICHAZ (Zone Affectée Thermiquement intercritique), FGHAZ (Zone Affectée Thermiquement à grains fins), CGHAZ (Zone Affectée Thermiquement à grains grossiers) et le métal d'apport (cf. figure 1).

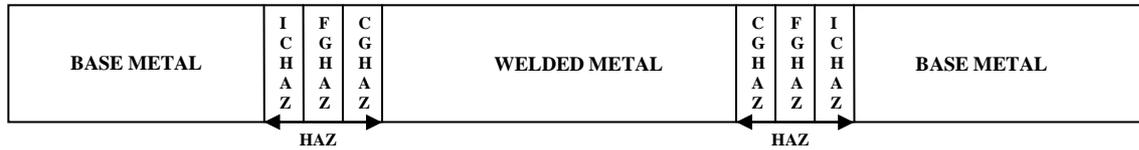


Figure 1: répartition de chaque zone dans un joint soudé d'acier P91

La microstructure du joint soudé P91 a été étudiée à l'aide de microscopie optique, de microscopie électronique à balayage (MEB), et de diffraction électronique (EBSD). Le métal de base a une microstructure martensitique (structure cubique centrée) se présentant sous la forme de lattes arrangées en blocs (au sein desquels la désorientation inter lattes est faible) qui sont eux même structurés en paquets de dimension comprise entre 10 $\mu$ m et 20 $\mu$ m dans des anciens grains d'austénites de 40 $\mu$ m en moyenne (cf. figure 2).

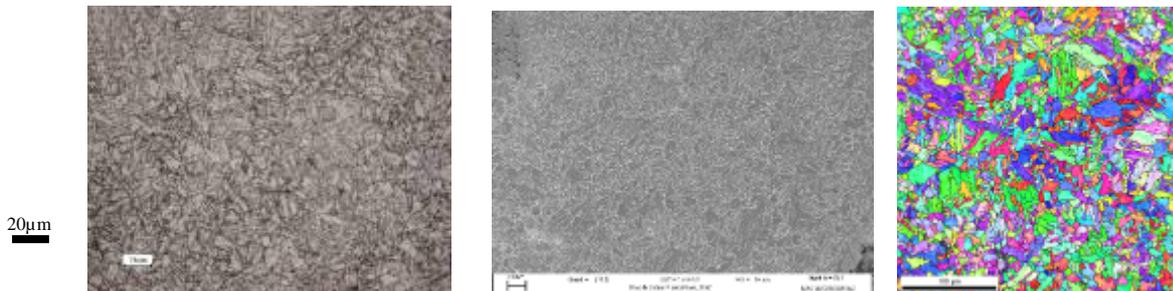


Figure 2 : microscopie optique (à gauche), image MEB (au centre), cliché EBSD (à droite) du métal de base. L'échelle est elle vraiment la même pour ces trois figures ?

Dans l'ICHAZ, la martensite ne se présente plus sous forme de lattes mais sous forme équiaxée d'environ 10 $\mu$ m de diamètre (figure 3).

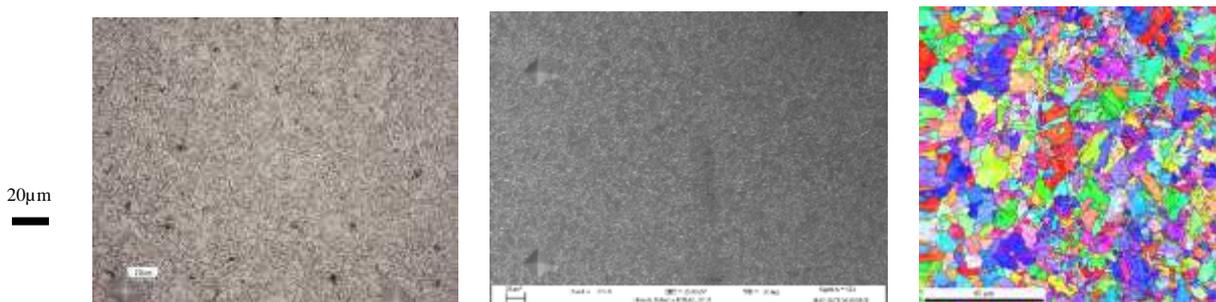


Figure 3 : ICHAZ vue au microscope optique (à gauche), au MEB (au centre) et cliché EBSD (à droite)

La FGHAZ se présente également sous forme de grains fins de martensite équiaxés d'environ 10 $\mu$ m de diamètre (figure 4).

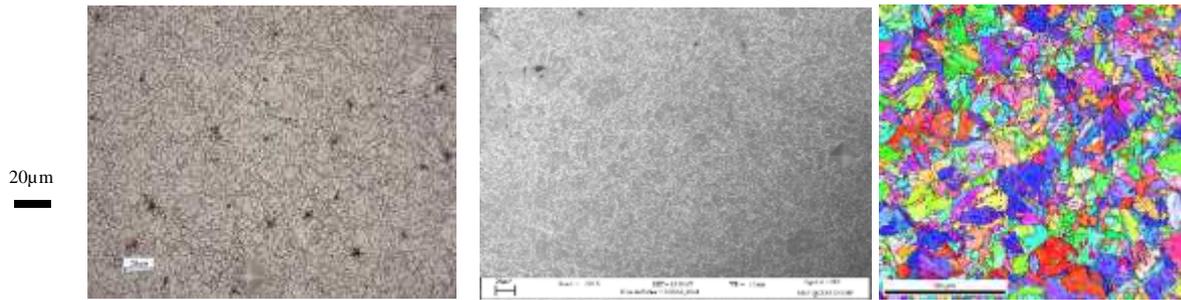


Figure 4 : microscopie optique (à gauche), au MEB (au centre) et cliché EBSD (à droite) de la FGHAZ

Enfin, la microstructure de la CGHAZ est sous forme de gros grains d'austénite d'environ 60µm (figure 5).

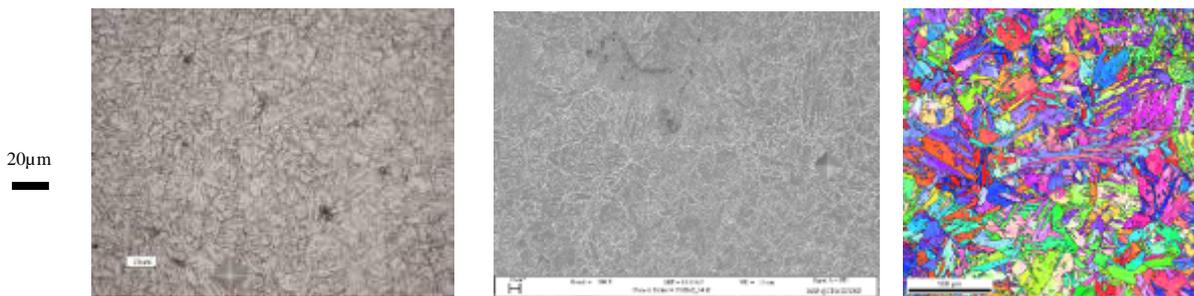


Figure 5 : microscopie optique (à gauche), au MEB (au centre) et cliché EBSD (à droite) de la CGHAZ

Le métal d'apport présente, quant à lui, une microstructure proche, en termes de structure (présence de lattes), de celle du métal de base. Il existe, toutefois, deux types de microstructures qui correspondent au passage des passes de soudure. La première présente une taille de grains (ancien grain austénitique) de 80µm (figure 6) et la seconde est composée de grains millimétriques.

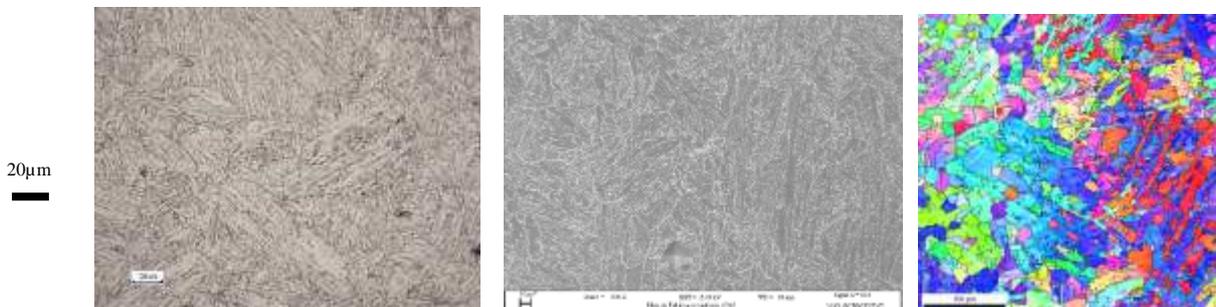


Figure 6 : microscopie optique (à gauche), au MEB (au centre) et cliché EBSD (à droite) de la zone à petit grain du métal d'apport

L'analyse métallographique ci-dessus (figures 2 à 6) est conforme à celle présentée par F. Vivier [1]. Dans toutes les zones du joint soudé, la texture est peu marquée et présente peu d'évolution entre les zones avec cependant une légère concentration des directions  $\langle 001 \rangle$ , respectivement  $\langle 110 \rangle$ , suivant la direction normale, respectivement direction de laminage, de la tôle

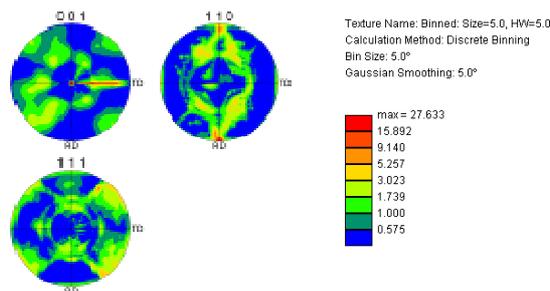


Figure 7 : figure de pôle du métal de base

La composition chimique du matériau a été déterminée par analyse WDS (wavelength dispersive X-ray spectroscopy) et est récapitulée dans le tableau 1.

	Si	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Nb	Mo
Metal de base	0.21	0.2	9.43	0.34	90.12	0.09	0.08	0.02	0.98
Zone soudée	0.14	0.2	8.8	1.53	87.06	0.62	0.02	0.03	0.86

Tableau 1: composition chimique de l'acier P91 étudié (%massique)

La composition du métal de base (cf. tableau 1) est conforme à celle fournie par AREVA [2]. La zone soudée correspondant à la fusion entre le métal d'apport et le métal de base présente quand à elle une composition légèrement modifiée. (cf. tableau 1)

## 2) Elaboration de microgrilles en or pour la caractérisation cinématique.

Pour permettre l'étude de l'hétérogénéité des déformations intragranulaires et la contribution du glissement intergranulaire, des microgrilles de pas commensurable avec la taille de la microstructure ont été réalisées. Dans un premier temps les grilles ont été fabriquées par déposition d'une couche d'or. Ces dernières seront placées au sein de l'ICHAZ, puisque cette zone est réputée la plus sensible au fluage dans ce type d'acier [3] [4]). La première étape de cette étude a concerné l'identification d'un jeu optimal de paramètres d'irradiation de la résine pour obtenir des tailles de barreaux d'une épaisseur définie comme acceptable (figure 8) lorsque située dans l'intervalle de 300 à 400 nanomètres.

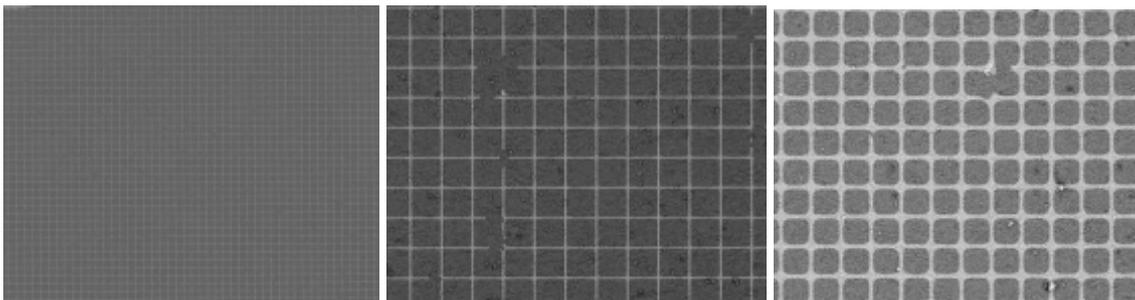


Figure 8 : grille en or avec barreaux trop fin (à gauche), d'épaisseur correcte (au milieu), barreaux trop épais (à droite) [le pas des grilles sur les images est de 4µm]

Un test de résistance de ces grilles à l'oxydation et à la température a ensuite été conduit. Des échantillons ont été placés à 625°C pendant 11 jours, soit sous vide primaire (quelques  $10^{-3}$  mbar) soit sous air (figure 9).

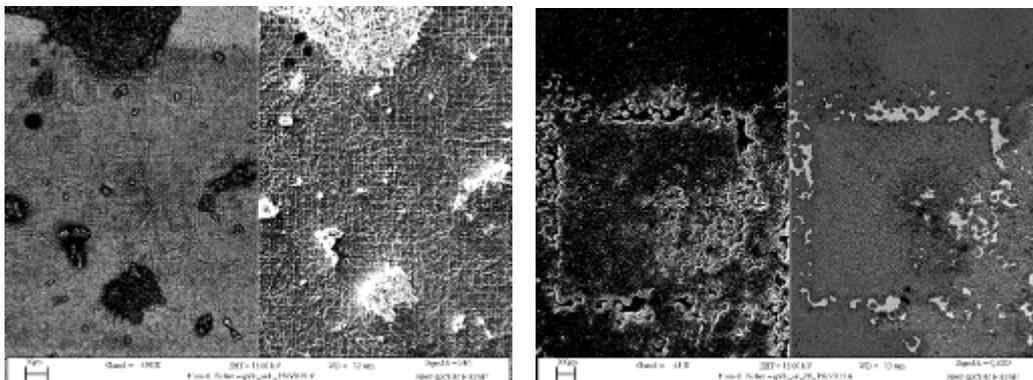


Figure 9 : grille après 11 jours à 625°C dans four sous vide primaire (à gauche) et sous air (à droite) [le pas des grilles sur les images est de 4µm]

On constate alors que sous air il est impossible de distinguer la grille et que sous vide primaire la grille n'est déjà plus continue au bout de 11 jours, l'or ayant diffusé au sein du matériau (figure 10).

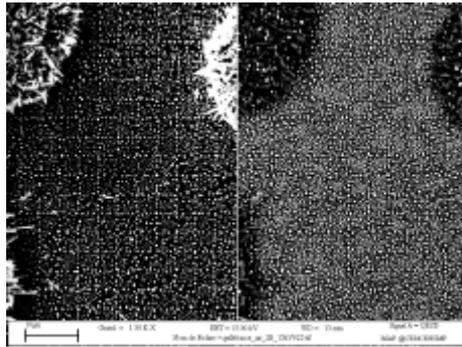


Figure 10 : grille en or, observation de la modification de la grille du à la diffusion de l'or [le pas des grilles sur les images est de 4 $\mu$ m]

Ces résultats confirment ceux obtenus par A. Soula [5] ou N. Rupin [6] lors de précédentes études. A. Soula préconise l'utilisation de grilles en oxyde d'hafnium ou en tungstène qui présentent une meilleure résistance à la température et offrent un meilleur contraste sous MEB. Notre choix s'est porté sur le tungstène.

### 3) Essais mécaniques

Nous nous intéresserons dans cette partie à la caractérisation des gradients de propriétés associés aux gradients microstructuraux. Cette caractérisation sera effectuée au moyen d'une technique de mesure de champs (suivi de marqueur). Afin de valider la démarche, les premiers essais instrumentés de la sorte concernent des essais de traction réalisés à la température ambiante

#### Essais de traction à température ambiante

Ces essais sont réalisés à l'aide d'une machine servo-hydraulique et d'une caméra CCD 2000\*2000 pixels couplée à un objectif de longueur focale 340 mm. Pour obtenir les déformations dans chacune des zones du joint soudé, la méthode du suivi de marqueur a été utilisée. Cette dernière consiste à définir une base extensométrique pertinente (couple d'images de corrélation) associée à chaque zone de la microstructure. Cette technique permet d'estimer la déformation moyenne de chaque zone prédéfinie du joint soudé, et offre une alternative intéressante à la technique de Gleeble utilisée par V. Gaffard [3]. La technique de Gleeble pose en effet des difficultés de mise en œuvre du fait du traitement thermique à réaliser. Notons de plus que le comportement mécanique d'une éprouvette volumique ainsi obtenue, si elle est représentative en termes de morphologie microstructurale (ICHAZ, FGHAZ, CGHAZ...) ne l'est pas forcément en termes de comportement mécanique à l'échelle de la structure (hétérogénéité de répartition d'éléments d'addition, etc...). La figure 11 présente les courbes de traction obtenues pour chacune des zones du joint soudé pour une vitesse de déformation de 10<sup>-4</sup> s<sup>-1</sup>.

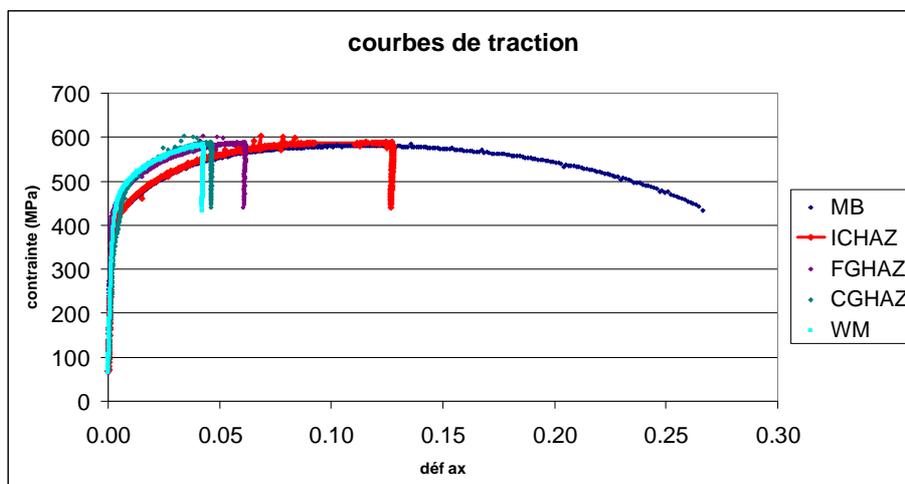


Figure 11 : courbes de traction des différentes zones du joint soudé (MB = métal de base et WM = métal d'apport)

L'obtention au cours d'un même essai d'un ensemble de réponses mécaniques (i.e. contrainte en fonction de la déformation) obtenues expérimentalement permet d'envisager l'identification simultanée de paramètres associés aux lois de comportement représentatives de chacune des zones du matériau observé.

#### 4) Simulation du comportement du joint soudé

Les réponses mécaniques obtenues à partir des essais de traction peuvent être reproduites à partir de modèles élasto-plastique à écoulement J2 et écrouissage isotrope. Dans un premier temps, la viscosité est négligée pour toutes les zones du joint soudé. En effet, la vitesse de déformation (de  $10^{-3}s^{-1}$  à  $10^{-5}s^{-1}$ ) n'a pas d'influence significative sur le comportement du matériau à température ambiante. Un écrouissage isotrope non linéaire sera utilisé pour décrire le comportement de toutes les zones du joint soudé:

$$R=R_0+Q_1*(1-\exp(-b_1*p)) +Q_2*(1-\exp(b_2*p)) \quad (1)$$

L'ensemble des paramètres de l'écrouissage est récapitulé dans le tableau 2, pour chaque zone. Ils sont obtenus grâce à une optimisation de type Levenberg-Marquardt. Dans toutes les zones, le module d'Young considéré vaut 210GPa et le coefficient de Poisson 0.3.

	R0 (MPa)	Q1 (MPa)	b1	Q2 (MPa)	b2
Métal de base	369.1	93.8	38.2	348.6	3.03
ICHAZ	333.5	55	202	246	12.4
FGHAZ	370	72.2	11.3	195	11.3
CGHAZ	370	157	37	500	5
Métal d'apport	350	82.25	138.3	500	5.06

Tableau 2 : récapitulatif des paramètres des lois de comportement pour chaque zone du joint soudé

La figure 12 présente les différentes réponses mécaniques obtenues pour une simulation numérique (effectuée sur le code de calcul par éléments finis Z-set) effectuées à partir de la structure à gradient représentative d'un cordon de soudure et des paramètres des lois de comportement identifiés dans le tableau 3. Les valeurs de contraintes axiales  $\sigma_{11}$  et déformations axiales  $\epsilon_{11}$  sont obtenues en un point de Gauss d'un des éléments appartenant à chacune des zones du joint soudé.

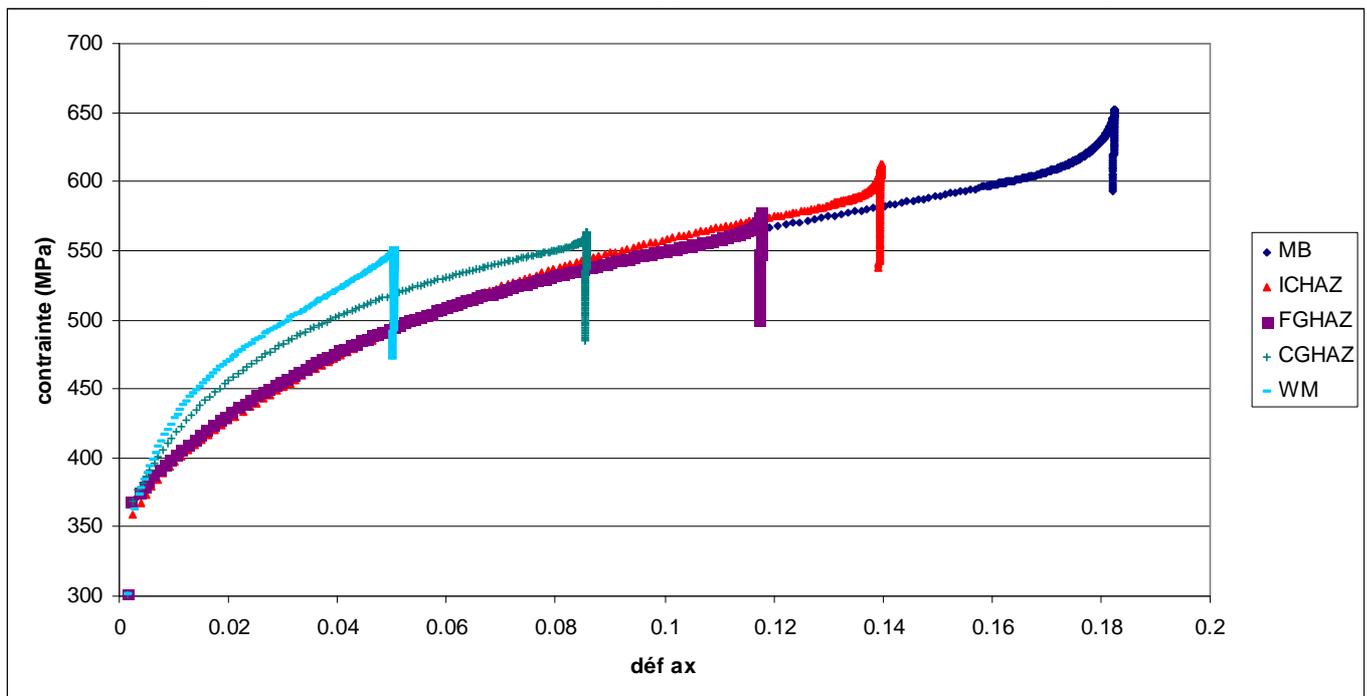


Figure 12 : courbes de traction des différentes zones du joint soudé après calcul éléments finis

Les réponses mécaniques locales révèlent la présence d'une non uniformité du comportement. Pour chacune des zones, les principales caractéristiques (limite d'élasticité, écrouissage, etc....) sont semblables à celles observées lors des essais expérimentaux.

### 5) Champs de déformation obtenus expérimentalement

Les champs de déformation sont obtenus à l'aide du logiciel CORRELI<sup>LM</sup> [7] pour une taille d'images comprises entre 16 et 32 pixels

Une première phase a consisté à définir la procédure expérimentale d'acquisition des images et de caractérisation des défauts de mesure associés, en suivant une procédure introduite dans la référence [8]. Différentes préparations de surface ont été testées : mouchetis de peinture, attaque chimique, grille. Nous retenons finalement une procédure basée sur un calcul incrémental du champ de déplacement, pour une surface préparée par mouchetis de peinture.

Le champ de déformation obtenu sur toute la surface de l'éprouvette met en évidence le fait que le métal d'apport se déforme très peu (en rouge). On retrouve également l'hétérogénéité de comportement entre le métal de base (les valeurs élevées sont en violet) et la zone affectée thermiquement (qui présente des niveaux de déformation associés aux couleurs verte et orange) (figure 14). Il existe un rapport de 2 entre les déformations dans le métal de base et celle dans ZAT. Les déformations axiales sont 5 fois plus forte dans le métal de base (25%) que dans le métal d'apport (5%).

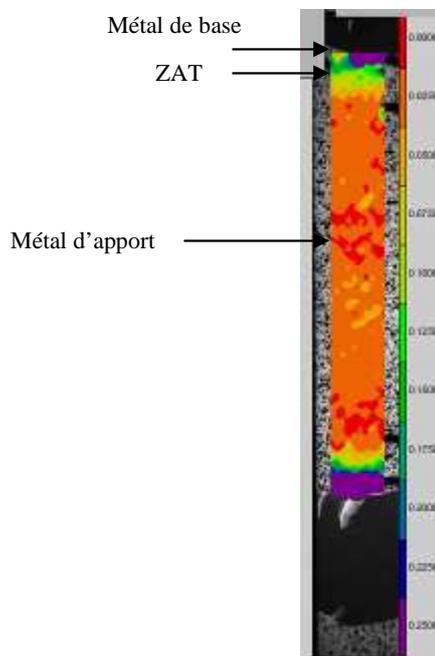


Figure 14 : champ de déformation sur une éprouvette comportant un joint soudé

Pour observer de façon plus détaillée, les hétérogénéités de déformation présentes dans la ZAT, un changement d'échelle s'avère nécessaire (champs de 6mm sur 15mm) (cf. figure 15).

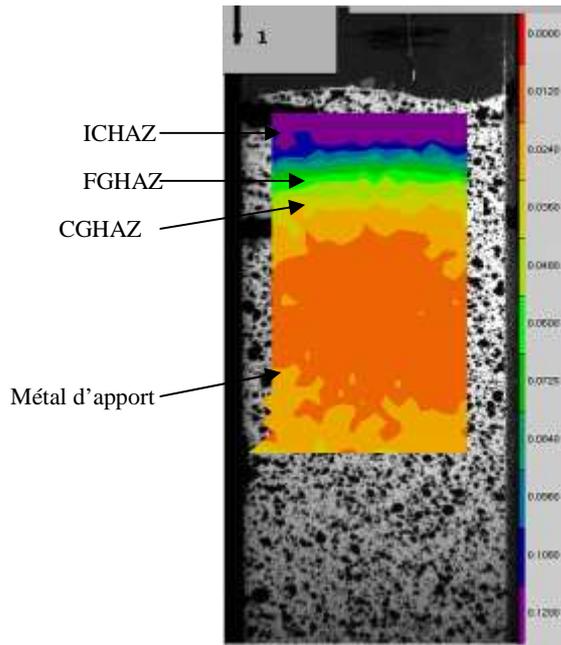


Figure 15 : champ de déformation de la ZAT (zone orange à violet en haut de la figure)

On remarque alors que l'ICHAZ est la zone qui se déforme le plus, suivie de la FGHAZ et enfin de la CGHAZ qui correspond à la zone la moins déformable de la ZAT. Ceci est en accord avec les profils de dureté réalisés.

On constate que ces champs obtenus ont la même allure que ceux obtenus avec Z-set (figure 16).

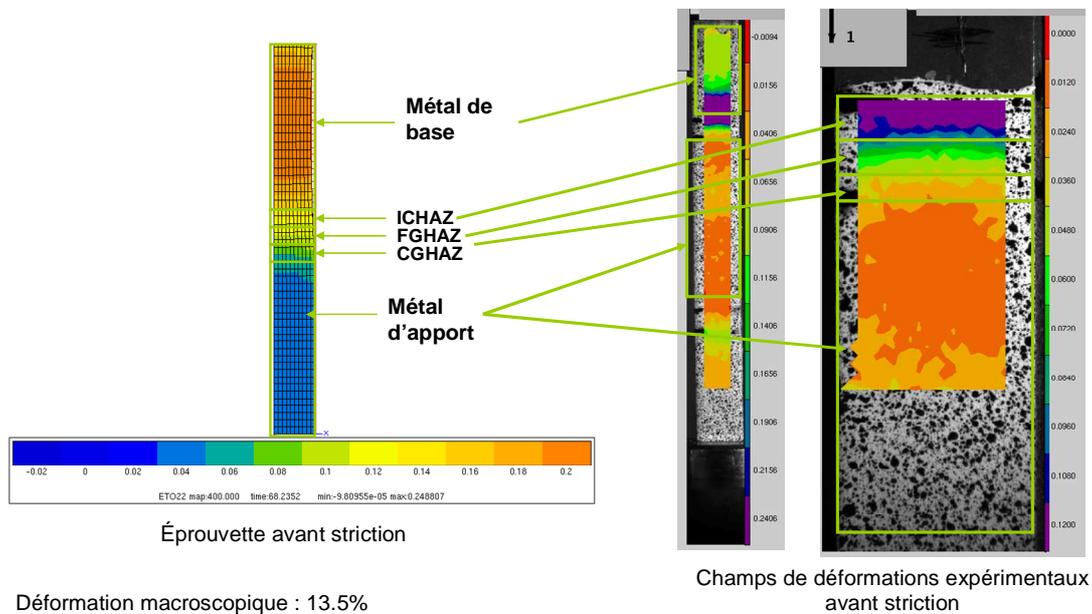
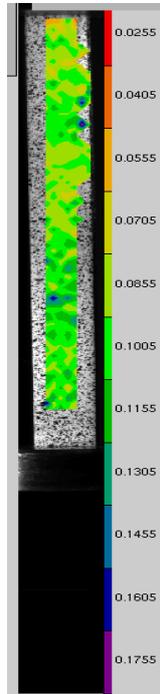


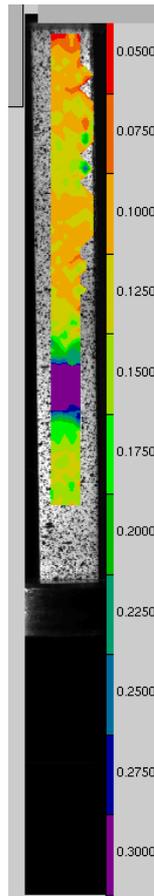
Figure 16 : comparaison d'un champ de déformation obtenu par calcul éléments finis (à gauche) et par la technique de corrélation d'images (à droite) pour un même niveau macroscopique de déformation

Afin de caractériser la sensibilité de la méthode, le champ de déformation obtenu lors d'un essai de traction sur une éprouvette homogène de matériau de base a également été étudié. Il s'avère que le champ de déformation (composante axiale dans notre exemple) est bien homogène jusqu'à apparition de la striction (figure 17).



**Figure 17 : champ de déformation axiale dans une éprouvette de métal de base avant striction, pour une déformation nominale de 13.5%**

D'autre part, si le pas d'acquisition entre deux configurations est suffisamment petit, l'évolution des champs peut permettre la visualisation de la zone de striction et ainsi anticiper la zone de rupture de l'éprouvette (figure 18).



**Figure 18 : champ de déformation dans une éprouvette de métal de base. La zone où la striction se développe jusqu'à rupture correspond avec la localisation des déformations ( $\epsilon \sim 30\%$  pour la couleur violette), tandis qu'à ce stade la déformation nominale est de 14%**

## **6) CONCLUSION**

Cette étude présente les premiers résultats d'identification de paramètres de lois de comportement décrivant l'écoulement plastique d'une structure de type joint soudé, à gradient de propriétés mécaniques. La méthode d'identification proposée permet d'obtenir des résultats très proches de ceux rapportés dans la littérature. En outre, le comportement de chacune des cinq zones du joint soudé peut être obtenu avec seulement deux essais uniques de traction simple, couplés avec une caractérisation cinématique par corrélations d'images. Dans cette étude, une correspondance entre un champ de déformations issu d'un calcul éléments finis avec un champ de déformations issu d'un logiciel de corrélation d'images a également été établie.

Les variations de la microstructure en différentes zones du joint soudé ont également été observées. Ultérieurement, des caractérisations plus fines de la déformation à l'échelle de la microstructure seront réalisées et seront corrélées à des modèles de plasticité cristalline et à des calculs sur des polycristaux présentés dans la littérature. Des lois de comportement compatibles avec les mécanismes de fluage à haute température pourront également être identifiées à partir d'expérimentations de fluage hautement instrumentées.

## **7) Remerciements**

Cette étude est financée par la Chaire EDF-GDF-SUEZ-GRT gaz - ENSMP –ENPC sur la «durabilité des matériaux et des structures pour l'énergie ».

**8) Références:**

- [1] F. Vivier, « fluage à 500°C d'un joint soudé d'un acier 9Cr-1Mo modifié: Evolution de la microstructure et comportement mécanique », Thèse de doctorat, Mines ParisTech, 2009
- [2] Rapport AREVA pour la thèse de F. Vivier sur l'acier 9Cr-1Mo modifié Mines ParisTech : Fabrication d'un joint soudé fil/flux, AREVA, 2006, numéro rapport : NTW-F R 06.3741
- [3] V. Gaffard, « Etude expérimentale et modélisation, du comportement, de l'endommagement et de la rupture en fluage à haute température de joint soudés en acier 9Cr1Mo-NbV) », Thèse de doctorat, Mines ParisTech, 2004
- [4] T. Watanabe, M. Tabuchi, M. Yamazaki et al., « Creep damage evaluation of 9Cr-1Mo-V-Nb steel welded joints showing type IV fracture », international journal of pressure vessels and piping, 2006, pp 63-71
- [5] A. Soula, « Etude de la déformation intergranulaire au cours du fluage à haute température d'un superalliage à base nickel polycristallin », thèse de doctorat, Institut polytechnique de Grenoble, 2008
- [6] N. Rupin, «Déformation à chaud de métaux biphasés : modélisation théoriques et confrontation expérimental», thèse de doctorat, Ecole Polytechnique, 2007
- [7] F. Hild, CORRELILMT, « a software for displacement field measurement by digital image correlation », LMT-CACHAN, rapport 254, 2002
- [8] M. Bornet, F. Brémand, P. Doumalin et al. « Assessment of Digital Image Correlation Measurement errors: methodology and results », Experimental Mechanics, 2009, pp 353-370