

**APPLICATION DE LA MÉTHODE ULTRASONORE POUR LA DÉTERMINATION DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES SUR DES ASSEMBLAGES BIMÉTALLIQUES SOUDÉS PAR FRICTION**  
*ULTRASONIC MEASUREMENT APPLICATION FOR RESIDUAL STRESS DETERMINATION OF BIMETALLIC FRICTION WELDED ASSEMBLIES*

F. BELAHCENE, J. HOBLOS  
ULTRA RS – Technopole de l'Aube, BP 601, 10901 Troyes Cedex 9. France  
Tél. +33 (0)3 25 72 92 60 - [f.belahcene@ultrars.com](mailto:f.belahcene@ultrars.com)

### **Résumé**

La répartition des contraintes résiduelles après soudage peut être très différente selon les procédés, les matériaux, les épaisseurs et les modes opératoires mis en œuvre. L'évaluation et la prise en compte de ces contraintes s'avèrent nécessaire en résistance des matériaux moderne pour une meilleure prévision des comportements mécaniques des pièces.

La détermination par ultrasons des contraintes résiduelles a été réalisée sur des éprouvettes bimétalliques soudées par friction ; les matériaux assemblés par friction sont : acier ferritique 16MND5, acier austénitique 304L.

Les tests ultrasonores ont permis de déterminer le niveau des contraintes résiduelles ainsi que les gradients de contraintes induits par l'incompatibilité de dilatation thermique entre les matériaux différents.

Les résultats obtenus par ultrasons sont ensuite comparés aux résultats de simulations numériques effectuées antérieurement par EDF [1-2].

### **Abstract**

*Post welding residual stress distribution is different according to the welding process, materials, thickness and the way of proceeding. The evaluation and the consideration of these stresses are necessary to the modern material resistant field in order to achieve a better prediction of the components mechanical behaviour.*

*Ultrasonic determination of residual stress is carried out on friction welded bimetallic specimen, the treated materials are: ferritic steel 16MND5, Austenitic steel 304L.*

*The ultrasonic measurements have permitted to determine both the residual stress level and the stress gradient due the thermal dilatation incompatibility between different materials. These ultrasonic results are afterwards compared to numerical simulations performed previously by EDF [1-2].*

# 1. PRINCIPE DE MESURE DES CONTRAINTES RESIDUELLES PAR METHODE ULTRASONORE

## 1.1. Approche théorique

Le contrôle par ultrasons est basé sur le fait que la vitesse de propagation des ondes ultrasonores est fonction de l'état de contrainte du matériau.

Cette relation est donnée par les formules suivantes :

$$\rho_0 V_{11}^2 = \lambda + 2\mu + (2l + \lambda) \theta + (4m + 4\lambda + 10\mu) \varepsilon_1 \quad (1a)$$

$$\rho_0 V_{12}^2 = \mu + (\lambda + m) \theta + 4\mu\varepsilon_1 + 2\mu\varepsilon_2 - \frac{n}{2} \varepsilon_3 \quad (1b)$$

$$\rho_0 V_{13}^2 = \mu + (\lambda + m) \theta + 4\mu\varepsilon_1 + 2\mu\varepsilon_3 - \frac{n}{2} \varepsilon_2 \quad (1c)$$

où :

- $V_{ij}$  est la vitesse de propagation d'une onde ayant une direction de propagation suivant  $X_1$  et une polarisation suivant  $X_j$ ,
- $\rho_0$  représente la masse volumique à l'état non contraint du matériau,
- $\theta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$  est la trace de la matrice des déformations,
- $\lambda$  et  $\mu$  : constantes de second ordre de Lamé,
- $l, m, n$  : constantes de troisième ordre de Murnaghan.

### Application de l'onde longitudinale pour la détermination des contraintes résiduelles :

Pour un solide élastique isotrope semi-infini, défini par un plan normal ( $X_1, X_2$ ), les vitesses de propagation des ondes longitudinales suivant les directions principales ( $X_1, X_2$ ) d'un champ de contraintes sont exprimées par :

$$(V_{11} - V_{11}^0) / V_{11}^0 = K_1 \sigma_{11} + K_2 \sigma_{22} \quad (2)$$

Avec :

- $V_{11}^0$  : vitesse de propagation de l'onde longitudinale à l'état de référence (pression nulle et contrainte nulle) dans la direction  $X_1$ ,
- $\sigma_{11}, \sigma_{22}$  : les contraintes,
- $V_{11}$  : vitesse de propagation de l'onde longitudinale, en présence de contraintes ( $\sigma_{11}, \sigma_{22}$ ) dans la direction  $X_1$ ,
- $K_i$  : coefficients acoustoélastiques de l'onde longitudinale qui interviennent dans le calcul des contraintes résiduelles.

Le coefficient acoustoélastique  $K_2$  est négligeable par rapport à  $K_1$  ( $K_1 \gg K_2$ ) pour presque tous les matériaux [4]. Par conséquent, nous pouvons considérer un état uniaxial. L'équation (2) devient :

$$(V_{11}-V_{11}^0)/V_{11}^0 = K_1 \sigma_{11} \quad (3)$$

Comme les mesures ont été réalisées avec une longueur du parcours acoustique constante, la contrainte est déterminée par l'expression suivante :

$$\sigma_{11} = \frac{(t_{11} - t_{11}^0)}{t_{11}} \cdot \frac{1}{K_1} \quad (4)$$

Avec :

$t_{11}^0$ ,  $t_{11}$  : temps de parcours des ondes respectivement, à l'état de référence (contrainte nulle) et en présence de contraintes.

Lorsque les contraintes à analyser sont localisées au voisinage de la surface, les ondes longitudinales de volume ne peuvent pratiquement pas être générées dans le sens de cette contrainte. Dans ce cas, les ondes Longitudinales Subsurfiques (LS) sont utilisées. Ce sont des ondes qui se propagent parallèlement à la surface, sur une épaisseur liée à la fréquence, avec la vitesse d'une onde longitudinale. L'onde LS est générée par un transducteur ultrasonore incliné sous le premier angle critique (loi de Snell-Decartes).

Bien que, les caractéristiques de l'onde longitudinale subsurfique ne soient pas complètement comprises à ce jour, de nombreux chercheurs [4,5,7] l'utilisent avantageusement pour les raisons suivantes :

- La plus grande sensibilité à la contrainte est observée pour l'onde LS se propageant parallèlement au sens de la contrainte appliquée,
- Les ondes LS sont moins sensibles à la texture et à la microstructure,
- L'onde LS est peu sensible aux rugosités et défauts de surface,
- La profondeur de pénétration de l'onde LS peut être modulée en faisant varier la fréquence, la distance de mesure, l'angle d'incidence et le diamètre du faisceau acoustique.

### **1.1. Approche pratique**

Le faisceau ultrasonore émis est capté par un ou plusieurs récepteurs placés à une distance bien précise de l'émetteur. Le signal ainsi acquis est traité avec un programme informatique.

A partir de ces acquisitions, les différentes valeurs de vitesses sont déterminées.

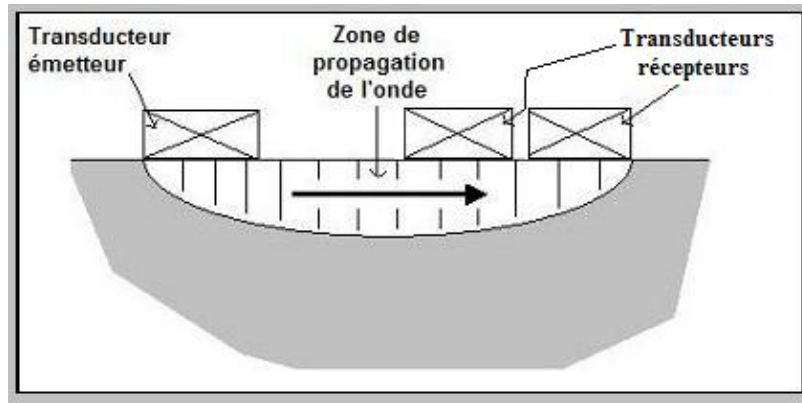


Figure 1 : Schématisation de l'émission et de la réception des ondes ultrasonores.

Surface analysée :

- (distance séparant les deux récepteurs) x (largeur du faisceau acoustique)

Volume analysé :

- (surface analysée) x (profondeur de pénétration de l'onde ultrasonore)

La figure 2 représente un modèle de propagation de l'onde LS.

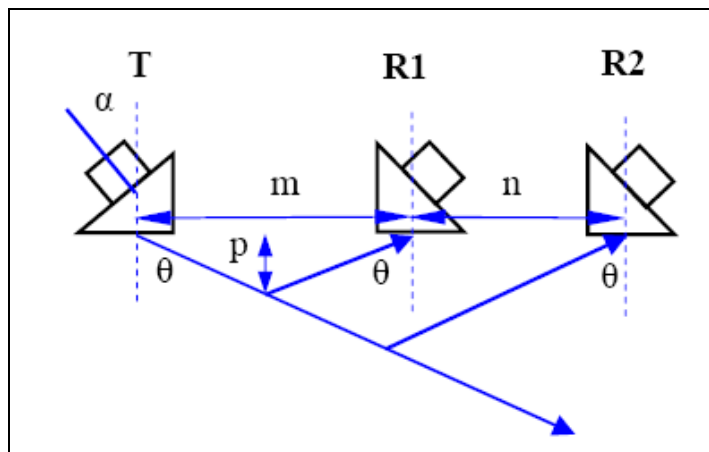


Figure 2 : Modèle simplifié pour la propagation de l'onde LS dans l'échantillon.

- L'onde LS est émise avec un angle  $\theta$  et reçue avec le même angle,
- La distribution de l'énergie (amplitude) de l'onde LS n'est pas prise en compte dans ce modèle,
- La zone de mesure est triangulaire. Les dimensions du triangle peuvent être modifiées en faisant varier l'angle  $\theta$  et les longueurs  $m, n$ .

### 1.3. Dispositif de mesure

Le système de mesure (figure 3) comprend une carte d'impulsions électriques et une carte d'acquisition. Le logiciel d'acquisition « RSscan » se lance automatiquement au cours de la mise en route du système



Figure 3 : Dispositif de mesure.

Dans le but d'améliorer le rapport signal/bruit, le signal est élaboré par une moyenne d'un certain nombre d'acquisitions.

L'écran permet de visualiser les signaux provenant d'une même source émettrice.

Le calcul du temps de parcours des échos reçus (contrainte résiduelle) est réalisé par le logiciel d'acquisition « RSscan ». Ce programme permet également d'améliorer la rapidité d'acquisition et de diminuer l'erreur sur les mesures.

## 2. ETUDE EFFECTUEE

### 2.1. Description de l'éprouvette pour l'analyse des contraintes résiduelles

Il s'agit d'une éprouvette plate bimétallique soudée par friction : 16MND5–304L de dimensions 250 x 30 x 20 mm.



Figure 4 : Eprouvette bimétallique contrôlée.

Un traitement thermique de 875°C pendant 10 heures avec un refroidissement lent a été appliqué pour supprimer les contraintes résiduelles d'usinage et de soudage. Le

champ de contraintes final est induit par l'incompatibilité de dilatation thermique entre les deux éprouvettes assemblées [1-3].

### 3. RESULTATS

#### 3.1. Calibration

La détermination des contraintes résiduelles par ultrasons passe par une étape d'étalonnage qui permet de quantifier la relation existant entre la contrainte et la vitesse de propagation (temps de parcours) de l'onde ultrasonore : c'est la détermination du coefficient acoustoélastique (coefficient de calibration) qui correspond à la pente de la droite de variation relative du temps de parcours de l'onde LS dans la direction de l'effort en fonction des contraintes appliquées.

L'éprouvette est placée sur deux appuis de la machine de flexion (figure 5) et différents niveaux croissants de chargements sont appliqués (pas à pas). Le support-capteurs est fixé directement sur la face inférieure de l'éprouvette.

L'effet de la microstructure est évalué à partir d'un double calibrage [3] ; sur la ZAT et sur le métal de base. Les valeurs des coefficients déterminés sont représentées sur le tableau 1.

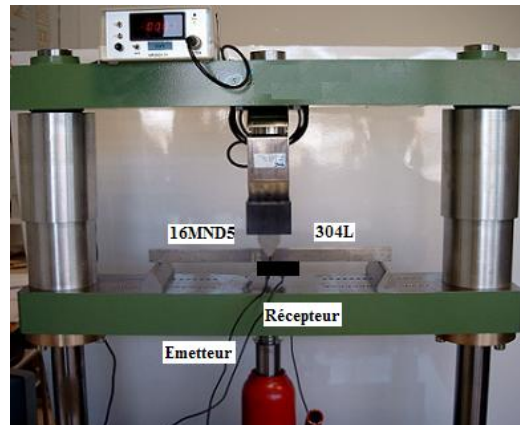


Figure 5. Machine de flexion utilisée pour la calibration.

Métal de base	ZAT	Effet de la microstructure
$K_{16MND5} \approx -1,15 \cdot 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$	$K_{16MND5} \approx -1,39 \cdot 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$	17 %
$K_{304L} \approx -1,05 \cdot 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$	$K_{304L} \approx -1,18 \cdot 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$	11 %

Tableau 1 : Coefficients acoustoélastiques déterminés dans le cas des ondes LS.

#### 3.2. Détermination des contraintes résiduelles dans l'assemblage 16MND5-304L

Les contraintes longitudinales et axiales sont représentées sur les figures 6 et 7 en fonction de la position. Les résultats de contraintes obtenus par ultrasons sont moyennés sur une profondeur de 4 mm.

Dans le cas des contraintes longitudinales (figure 6), les résultats ultrasonores présentent une forte ressemblance par rapport aux résultats de simulations numériques (MEF 4 mm) réalisés antérieurement [1,2].

Dans le cas des contraintes axiales (figure 7), les valeurs déterminées sont faibles comme dans le cas des simulations numériques réalisées à la profondeur de 4 mm [1,2].

Le calcul des contraintes résiduelles a été effectué à l'aide du code Aster [8]. Un maillage très fin a été utilisé à l'interface entre les deux matériaux pour bien capter les gradients élevés de contraintes [1,2].

Dans le cas de l'acier austénitique 304L, la méthode ultrasonore semble surestimer les contraintes axiales pour les deux derniers points près de l'interface. Cette différence est probablement due à une modification de la texture près de l'interface après soudage par friction.

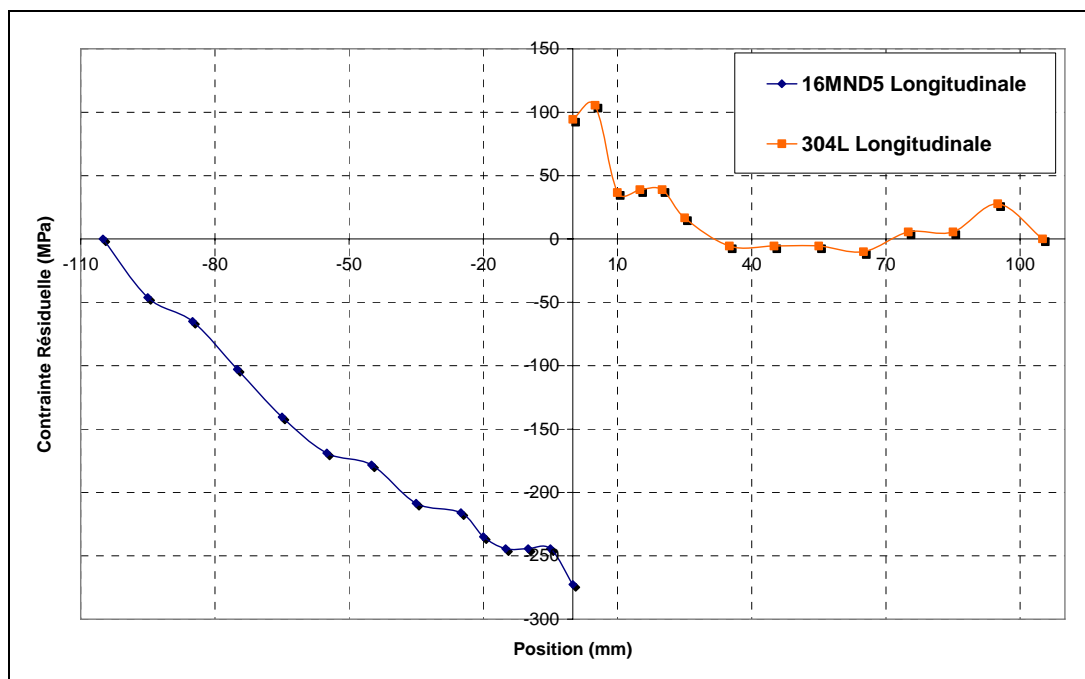


Figure 6 : Profil de contraintes résiduelles longitudinale de part et d'autre de l'axe de la soudure obtenu sur l'éprouvette 16MND5-304L .

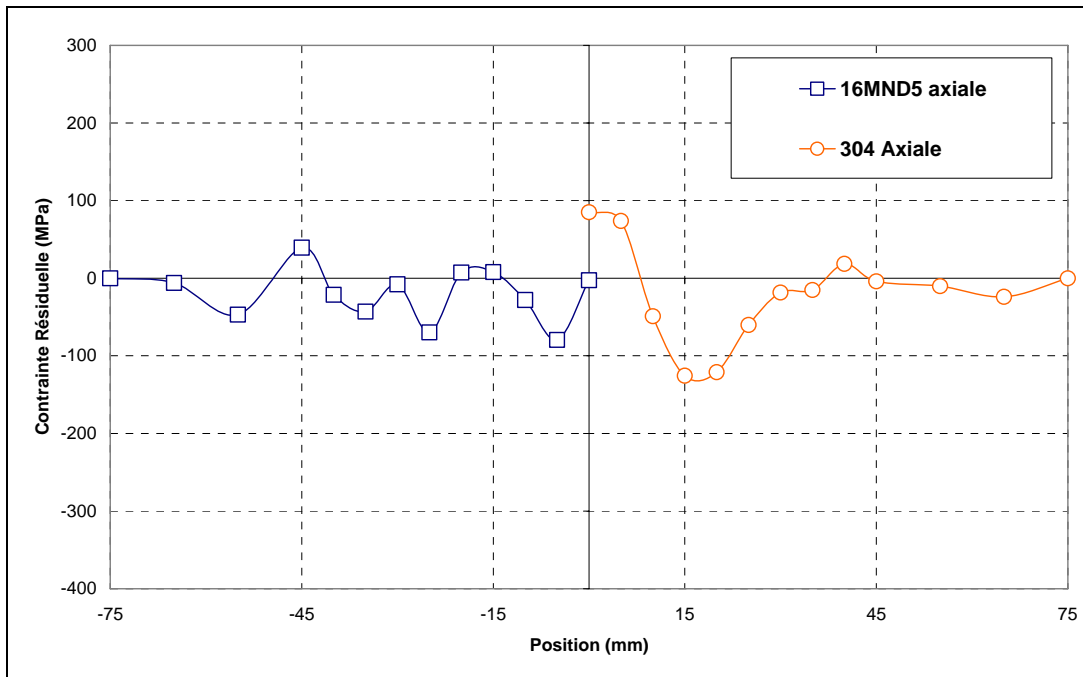


Figure 7 : Profil de contraintes résiduelles axiales de part et d'autre de l'axe de la soudure obtenu sur l'éprouvette 16MND5-304L.

#### 4. Conclusion

Cette étude montre le potentiel de la méthode ultrasonore pour l'évaluation des contraintes résiduelles de façon non destructive sur des éprouvettes bimétalliques.

La détermination des contraintes résiduelles est assurée par notre dispositif expérimental, qui a été conçu de telle manière à raffiner la méthodologie de la mesure du temps de parcours (vitesse) de l'onde ultrasonore. En effet, nos choix au niveau des éléments de notre dispositif expérimental sont les suivants :

- le support capteur est réalisé de façon à diminuer la surface de mesure et de permettre une parfaite immersion des capteurs dans le couplant,
- la mesure est effectuée en immersion afin d'obtenir une meilleure reproductibilité de l'épaisseur du couplant,
- les résultats d'étalonnage ont permis de faire le choix sur l'onde longitudinale pour les mesures,
- l'utilisation de programme « ScanRS » nous a permis un traitement efficace des signaux de mesures afin de minimiser l'erreur et améliorer la rapidité d'acquisition.

La méthode non destructive basée sur les ultrasons présente l'avantage d'être rapide, moins coûteuse et applicable sur site industriel. Elle s'est avérée satisfaisante dans le cas de l'acier 16MND5. Pour l'acier 304L, une surestimation des contraintes a été observée près de l'interface qui proviendrait des forts gradients latéraux combinés à l'influence de la microstructure à gros grains.



ULTRA RS remercie EDF, Site des renardières, pour leur soutien technique et financier.

## Références bibliographiques

- [1] P. Dupas, P. Todeschini, B. Yrieix, F. Waeckel, Comparaison de méthodes de détermination des contraintes résiduelles sur des échantillons à fort gradient, Communication présentée à la réunion du groupement Français d'analyse des contraintes résiduelles. Limoges 23 et 24 septembre 1997.
- [2] A. Bebey-Fourcot / CETIM et F. Waeckel / EDF – R&D, Préviation par le calcul des contraintes résiduelles de soudage, comparaison avec l'évaluation expérimentale. Journée sur les contraintes résiduelles au bureau d'études – Troyes le 6 mars 2002.
- [3] Procès verbal – ULTRA RS  
Détermination des contraintes résiduelles sur des échantillons à fort gradient par méthode ultrasonore. Référence n° 01-05-01-2004 Rév. 1.
- [4] Thompson. R. B., LU. W. Y. and Clarck. A. V., Ultrasonic Methods, Handbook of Measurement of Residual Stresses, Ed. By J. LU, SEM, Inc., 149-178 (1996).
- [5] F. BELAHCENE, Détermination des contraintes résiduelles superficielles par méthode ultrasonore, Thèse de doctorat, UTC, Compiègne, France (2000)
- [6] F. BELAHCENE, Détermination des contraintes résiduelles par méthode ultrasonore, Techniques de l'Ingénieur - IN8, 12 - 2002.
- [7] J. Hoblos, Evaluation des contraintes résiduelles par méthode ultrasonore avec prise en compte des effets de la microstructure : application au cas de soudage, Thèse de doctorat, Université de Lille 1, France (2004)
- [8] Code Aster, « Analyse des Structures et Thermo-mécanique pour des Etudes et Recherche », EDF, Direction des Etudes et Recherches.