

**INFLUENCE DES PARAMÈTRES DE MESURE SUR LA  
DÉTERMINATION ULTRASONORE DES CONTRAINTES :  
APPLICATION AU CAS DES ASSEMBLAGES SOUDÉS**  
*INFLUENCE PARAMETERS ON THE DETERMINATION OF RESIDUAL  
STRESSES BY ULTRASONIC METHOD: APPLICATION TO THE CASE  
OF PRESSURE EQUIPMENTS*

H. QOZAM<sup>1,2</sup>, G. BOURSE<sup>2</sup>, H. WALASZEK<sup>1</sup>, P. BOUTEILLE<sup>1</sup>, C. ROBIN<sup>2</sup>,  
M. CHERFAOUI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centre Technique des Industries Mécaniques 52, av. Félix Louat 60304 SENLIS-France

<sup>2</sup> Département Technologies des Polymères et Composites & Ingénierie Mécanique, Ecole des Mines de DOUAI, 941, rue Charles Bourseul, 59508 DOUAI-France

## Résumé

L'évaluation des contraintes résiduelles par ultrasons repose sur l'effet acoustoélastique qui traduit la dépendance de la vitesse de propagation des ondes acoustiques en fonction de l'état de déformation du solide. La technique nécessite une mesure précise de la variation de temps de propagation d'une onde ultrasonore entre un échantillon de référence non contraint et celui soumis aux contraintes, ainsi qu'un calibrage de l'effet acoustoélastique. L'état de surface ainsi que le caractère anisotrope et/ou hétérogène de la microstructure produit par les différentes opérations d'assemblage et de mise en forme entraîne la diffusion et l'atténuation du faisceau ultrasonore et affecte la précision des mesures.

La présente étude, réalisée dans le cadre d'une collaboration entre le CETIM et l'Ecole des Mines de Douai, a pour but d'évaluer l'influence des paramètres relatifs à la microstructure et à l'état de surface, qui influent sur la valeur de contraintes déterminées par la méthode ultrasonore. La prise en compte de ces paramètres lors des mesures sur des pièces industrielles permettra l'amélioration des résultats, ainsi qu'une bonne reproductibilité des profils de contraintes. L'utilisation de cette méthode pour le contrôle des installations et des composants industriels est désormais envisageable sous certaines conditions.

## Abstract

*The measurement of the residual stresses is based on the acoustoelastic effect which refers to the change in velocity of the acoustic waves when propagating in a strained solid. The experimental technique is based on acoustoelastic calibration and a precise measurement of the time of flight variation both on a non-stressed reference sample and on stressed samples. The anisotropic and/or heterogeneous characters of the microstructure and the surface quality produced by the various operations of assembly and working often generate phenomena such as diffusion and attenuation of the ultrasonic beam and may influence the measurement accuracy. The aim of this study performed in collaboration between CETIM of Senlis and Ecole des Mines de Douai is to evaluate the influence of the pertinent parameters, microstructure and surface quality, on the exact value of stresses. Taking into account these parameters during measurements on industrial equipments induces a noticeable improvement of the result accuracy in comparison with those obtained by the Hole-drilling method, as well as a good reproducibility of the stress profiles. The use of this method for the industrial components control is from now possible under certain conditions.*

## INTRODUCTION

La défaillance en fatigue des structures et composants mécaniques n'est pas seulement due aux sollicitations extérieures mais elle est également influencée par les contraintes résiduelles présentes dans celles-ci. Les contraintes résiduelles (CR) sont des contraintes existant dans la matière en l'absence de toute sollicitation extérieure. Elles sont auto-équilibrées et proviennent des hétérogénéités de déformations qui se manifestent à toutes les échelles du matériau.

Le soudage est un procédé d'assemblage couramment utilisé dans les industries mécaniques de la chaudronnerie et des appareils à pression. Selon le procédé utilisé et en fonction des températures atteintes lors de l'assemblage, des contraintes thermomécaniques apparaissent au niveau du joint soudé. L'intérêt d'évaluer les contraintes résiduelles dans ce cas est de prévoir, lors de la conception, les niveaux de contraintes qui seront admissibles par la structure en service. Cette prise en compte des CR permet, d'une part, d'optimiser le dimensionnement des structures dans la phase de conception, et d'autre part, de vérifier l'efficacité des traitements destinés à obtenir un niveau de contraintes prédéfini.

L'évaluation des contraintes résiduelles fait l'objet d'une demande croissante de la part des industries de la mécanique, encourageant ainsi le développement de différentes méthodes comme la diffraction des rayons X, le perçage incrémental et plus récemment la méthode ultrasonore et le bruit Barkhausen. De nombreuses études ont montré clairement qu'il n'existe pas de méthode universelle ou absolue qui donne une satisfaction complète dans le domaine du contrôle des composants mécaniques en service. Chaque méthode possède son domaine d'utilisation et de validité. Le choix de la méthode utilisée est guidé par le matériau, la géométrie de la pièce, l'état de surface, le coût ainsi que la précision du résultat recherché.

Dans cette étude, nous allons nous intéresser à la méthode de mesure par ultrasons. Cette dernière, malgré sa sensibilité aux effets de la microstructure et aux conditions opératoires, reste potentiellement l'une des plus prometteuse. Elle est non destructive, et permet de mesurer les contraintes volumiques et surfaciques. Sa relative facilité de mise en œuvre ainsi que le coût de ses équipements sont les principaux avantages qui expliquent et encouragent son développement. Nous allons traiter, particulièrement, l'influence de la microstructure et de l'état de surface sur la mesure des contraintes résiduelles par la méthode ultrasonore.

## THEORIE DE L'ACOUSTOELASTICITE APPLIQUEE A LA MESURE DES CONTRAINTES RESIDUELLES

### 1. Théorie de l'acoustoélasticité

L'évaluation des contraintes résiduelles par la méthode ultrasonore est basée sur l'effet acoustoélastique qui traduit la variation de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores en fonction de l'état de déformation du matériau. Cette vitesse est liée aux propriétés intrinsèques du matériau : sa masse volumique et ses constantes élastiques. Cette relation se traduit par l'équation suivante:

$$d\sigma_{ij} = \frac{E}{A_{ij}} \left( \frac{dV_{ij}}{V_{ij}^0} \right) = \frac{1}{K_{ij}} \left( \frac{dV_{ij}}{V_{ij}^0} \right) \quad (\text{Eq.1})$$

Où :  $d\sigma_{ij}$ , est la variation de contraintes en MPa avec  $i, j =$  de 1 à 3

$V_{ij}$  et  $V_{ij}^0$ , sont les vitesses de propagation d'une onde se propageant suivant la direction  $i$  et polarisée suivant  $j$  dans le matériau isotrope contraint et non contraint

$A_{ij}$ , représentent les constantes acoustoélastiques.

Le formalisme décrivant cette théorie a été établi par Hughes et Kelly [1] en utilisant la théorie de déformations finies de Murnaghan [2]. Il a été le premier à proposer un développement au troisième ordre de l'énergie de déformation du solide. Basé sur la théorie [2] de l'élasticité non linéaire des solides isotropes, ce développement fait apparaître les constantes du 2<sup>nd</sup> ordre ( $\lambda$ ,  $\mu$ ) et celles de 3<sup>ème</sup> ordre ( $l$ ,  $m$ ,  $n$ ) qui ont permis à Hughes et Kelly de formaliser l'effet acoustoélastique. A partir de la résolution de l'équation de propagation d'une onde plane dans un solide isotrope déformé, ils ont déduit les expressions qui lient sa vitesse de propagation aux déformations finies, générées par les contraintes recherchées. Ces expressions s'écrivent, dans le cas d'une onde se propageant suivant la direction (1), sous la forme:

$$\rho_0 V_{11}^2 = \lambda + 2\mu + (2\lambda + \lambda)\theta + (4m + 4\lambda + 10\mu)\alpha_1 \quad (\text{Eq.2-a})$$

$$\rho_0 V_{12}^2 = \mu + (\lambda + m)\theta + 4\mu\alpha_1 + 2\mu\alpha_2 - \frac{1}{2}n\alpha_3 \quad (\text{Eq.2-b})$$

$$\rho_0 V_{13}^2 = \mu + (\lambda + m)\theta + 4\mu\alpha_1 + 2\mu\alpha_3 - \frac{1}{2}n\alpha_2 \quad (\text{Eq.2-c})$$

Où :  $\rho_0$  est la masse volumique du matériau non contraint

$\theta = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$  est la trace de la matrice des déformations

Egle et Bray [3] ont défini les coefficients acoustoélastiques en effectuant une dérivation des équations précédentes (Eq.2) par rapport aux déformations principales. Ils ont démontré que le mode de propagation le plus sensible à l'effet acoustoélastique était le mode longitudinal  $V_{11}$  (celui où l'onde longitudinale se propage parallèlement à la direction de la charge appliquée). Dans le cas d'un chargement uniaxial (objet de cette étude) où le champ de déformation est parallèle au sens de propagation de l'onde, ce coefficient s'écrit :

$$A_{11} = \frac{dV_{11}}{V_{11}^0} = 2 + \frac{(\mu + 2m) + \nu\mu \left(1 + \frac{2l}{\lambda}\right)}{\lambda + 2\mu} \quad (\text{Eq.3})$$

Où  $A_{11}$  est la constante acoustoélastique de l'onde longitudinale.

## 2. Onde longitudinale réfractée au 1<sup>er</sup> angle critique :

La transmission des ondes ultrasonores obéit à la loi de Snell-Descartes qui prévoit la conversion de modes par réfraction. Elle permet de calculer l'angle d'incidence, suivant le type d'onde que l'on souhaite faire réfracter dans le matériau. Sous le premier angle critique  $\theta_{1c}$ , une onde longitudinale incidente (vitesse  $V_{L1}$ ) génère, dans le milieu de réfraction (vitesse  $V_{L2}$ ), une onde sub-surfacique longitudinale réfractée à  $\beta = 90^\circ$ , l'angle critique  $\theta_{1c}$  est calculé à partir de la relation :

$$\sin \theta_{1c} = \frac{V_{L1}}{V_{L2}} \quad (\text{Eq.4})$$

Le choix particulier de l'onde réfractée sous le 1<sup>er</sup> angle critique ( $L_{cr}$ ) pour réaliser cette étude est justifié par ses propriétés de propagation. Cette onde présente l'avantage d'être, en comparaison avec l'onde de Rayleigh, la plus sensible aux contraintes. Son utilisation pour des applications relatives au contrôle de l'état superficiel des structures est désormais envisageable.

Plusieurs auteurs ont traité de l'influence de la microstructure (texture, composition en phase, taille des grains...) sur la détermination des contraintes résiduelles par méthode ultrasonore [4] [5] [7]. Afin de maîtriser ces effets, les constantes acoustoélastiques doivent

être déterminées par un calibrage sur une éprouvette détensionnée, prélevée de préférence, sur la même structure que celle à contrôler.

## DEMARCHE EXPERIMENTALE :

### 1. L'échantillon :

La nuance d'acier utilisée est le P265GH. C'est un acier non allié souvent utilisé dans les circuits de dépressurisation d'eau, dans les refroidisseurs d'air ainsi que les canalisations de raffineries de pétrole. La plaque en P265 a une épaisseur de 30mm. Le soudage est effectué suivant un chanfrein en X en mode automatique sous flux. Il correspond au procédé n°12 de la norme NF EN 24063.

### 2. Le capteur :

Le capteur est constitué de trois transducteurs piézoélectriques de fréquence 3MHz : un émetteur (E) et deux récepteurs (R1 et R2), montées tous les trois sur un bloc en Plexiglas et inclinés suivant le 1<sup>er</sup> angle critique (figure2). Le système ainsi conçu permet de s'affranchir de certains phénomènes de perturbation (température, jitter, couplage...), ce qui a permis d'améliorer de façon significative la reproductibilité des mesures.

### 3. La chaîne de mesure :

La chaîne de mesure, telle qu'elle est montrée sur la figure2, comprend un ordinateur équipé d'une carte ultrasonore permettant la génération des trains d'ondes. L'acquisition des signaux est réalisée par un oscilloscope numérique (DSO), ayant une bande passante de 500 MHz, et une fréquence d'échantillonnage de 5GHz. Il permet de visualiser sur le même écran les signaux provenant des deux récepteurs. La mesure de temps de parcours entre les deux échos est effectuée par passage à zéro.

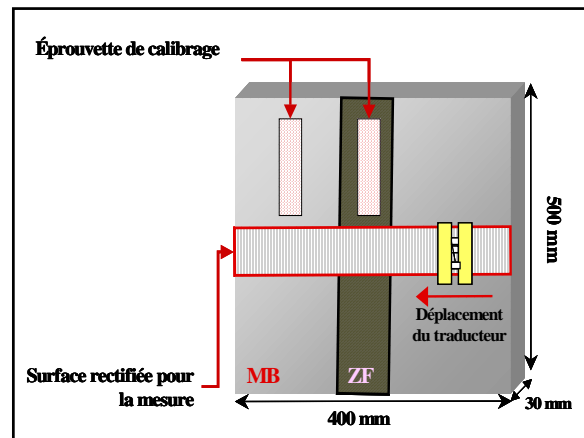


Figure 1- Schéma de la préparation faite sur la plaque en P265

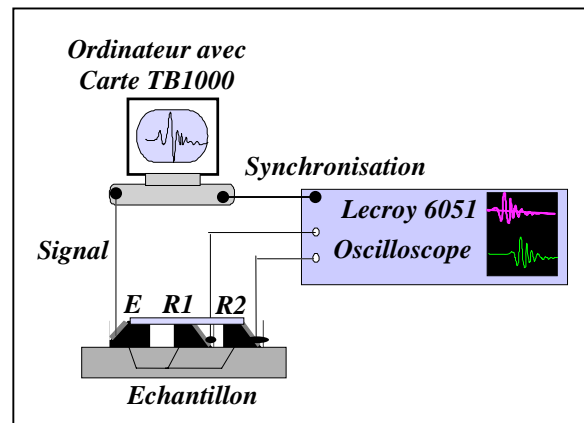


Figure 2- Schéma du dispositif de mesure de contraintes par US

### 4. La procédure de mesure de contraintes résiduelles par US:

En pratique, la mesure des contraintes par onde Lcr consiste en une mesure de temps de parcours entre les deux récepteurs suivant l'une des directions principales de contraintes dans le matériau contraint ( $t$ ) et détensionné ( $t_0$ ). La distance entre R1 et R2 étant constante, il existe une relation entre les contraintes et le temps de propagation, qui s'écrit :

$$d\sigma = \frac{E}{A_{11}} \left( \frac{dV_{11}}{V_{11}^0} \right) = - \frac{1}{K} \frac{(t - t_0)}{t_0} \quad (\text{Eq.5})$$

Une phase de calibrage est toutefois nécessaire pour déterminer le coefficient acoustoélastique K. Elle consiste à réaliser un essai de traction afin de déterminer la variation relative de vitesse en fonction de la contrainte appliquée. L'essai est effectué sur

une éprouvette détensionnée, qui est prélevée de préférence, dans le matériau qui sera utilisé pour la détermination des contraintes.

## RESULTATS

### 1. Influence de la microstructure :

Les températures atteintes au moment du soudage et le refroidissement plus au moins rapide des zones proches du cordon de soudure sont les principales causes du changement de la microstructure voisine du cordon de soudure. En effet, le métal de base affecté par les cycles thermiques, appelé zone affectée thermiquement (ZAT), évolue continûment en s'éloignant de la source de chaleur. Dans le cas de notre assemblage en P265, la microstructure évolue d'une structure bainitique ou bainite-martensite de la zone fondue (ZF) vers une structure ferrito-perlitique du métal de base (MB) (Figure3).

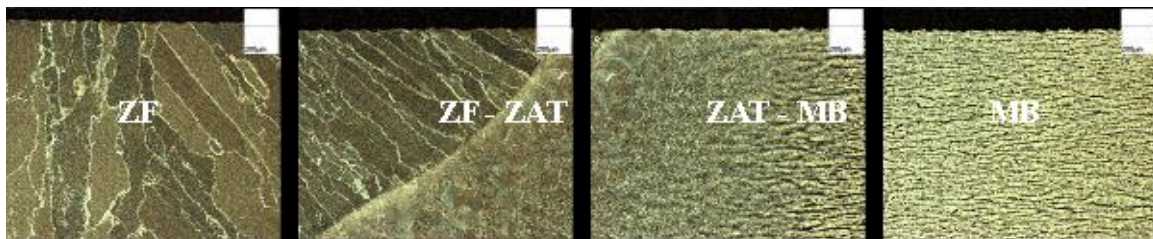


Figure - 3 Evolution de la microstructure de la soudure sous l'effet de la température de soudage [5]

#### a) Impact sur le temps de propagation dans le matériau non contraint

Lors d'une étude précédente [5], Hoblos a montré que l'évolution de la microstructure au niveau du cordon de soudure fait varier les vitesses de référence. Ainsi, en passant du métal de base vers la zone fondue, la vitesse diminue et le temps de référence ( $\sigma = 0$ ) augmente sous l'effet du changement de microstructure et du grossissement de grain. Cette variation de vitesse a été remesurée dans cette étude à l'aide du capteur optimisé en termes de reproductibilité. Le résultat est présenté à la figure 4.

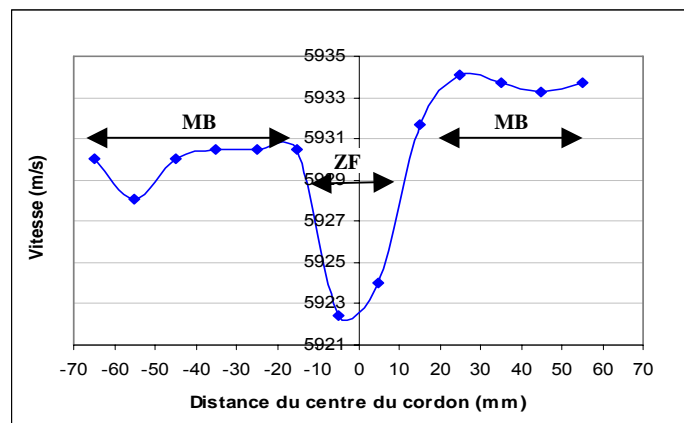


Figure – 4 Evolution de la vitesse de propagation autour du cordon de soudure

Les vitesses ont été mesurées sur un échantillon détensionné (600°C-2 heures, suivi d'un refroidissement lent au four) qui comprend les trois zones de la soudure (ZF, ZAT et MB). La comparaison des métallographies réalisées sur des échantillons prélevés dans chacune des zones étudiées, avant et après détensionnement, n'a pas révélé de changement (figure5) de la microstructure.

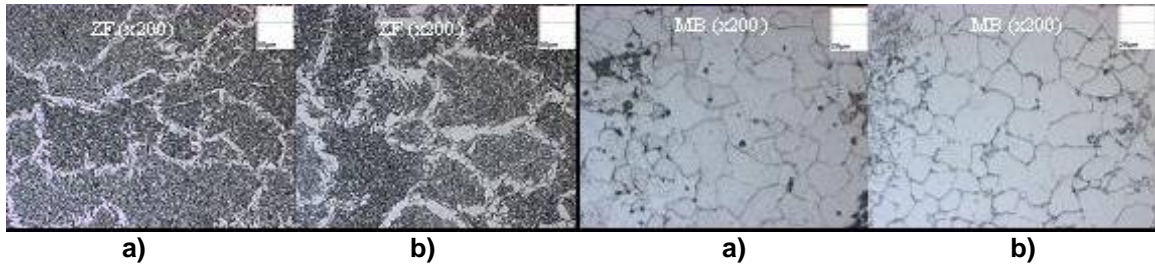


Figure – 5 Microstructures respectives de la ZF et du MB a) avant détensionnement b) après détensionnement [5]

### b) Impact sur la constante acoustoélastique :

Afin de déterminer l'incidence de l'évolution de la microstructure autour du cordon de soudure sur la constante acoustoélastique, nous avons prélevé des éprouvettes dans chacune des zones ZF et MB (voir figure1). Elles ont subi un détensionnement identique à celui défini précédemment. Le prélèvement d'éprouvette n'a pas été possible au niveau de la ZAT à cause de ses faibles dimensions.

Les résultats de calibrage de la mesure ultrasonore effectué sur l'échantillon en P265 sont représentés sur la figure 6.

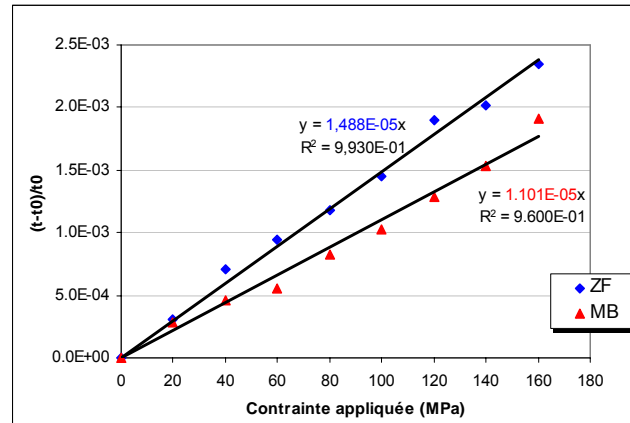


Figure – 6 Influence du changement de la microstructure sur la constante acoustoélastique

La linéarité des deux courbes de calibrage vérifie bien la loi de propagation de l'onde sous chargement uniaxial (Eq.5). La constante acoustoélastique  $K_{ZF}$  déterminée dans la zone fondue est supérieure d'environ 26% à celle déterminée dans le métal de base. Le calibrage a été répété trois fois, et on estime l'erreur à 5% sur la détermination de ces constantes.

## 2. Influence de la rugosité

Afin d'évaluer l'influence de la rugosité sur la reproductibilité des mesures, nous avons usiné six éprouvettes de dimensions  $30 \times 120 \times 8 \text{ mm}^3$  avec des rugosités standard de  $R_a$  égal à : 0,05, 0,8, 1,6, 3,2, 6,3 et 12,5  $\mu\text{m}$ . L'usinage a été effectué sur les éprouvettes à partir d'un état normalisé (austénitisation à 800°C suivie d'un refroidissement à l'air). L'enlèvement de matière a été effectué par des passes fines de la meule, afin de limiter l'épaisseur affectée par cet usinage à une centaine de microns, conformément à ce qui est conseillé dans la littérature [6]. La profondeur de pénétration des ondes  $L_{cr}$  étant de l'ordre d'une longueur d'onde ( $\approx 2 \text{ mm}$  dans l'acier à 3 MHz) [8], l'impact de cet usinage sur le temps de propagation sera négligeable. Les essais ont été répétés cinq fois afin d'évaluer l'incidence du couplage/ découplage sur la reproductibilité des résultats. Ces derniers sont représentés à la figure 7.

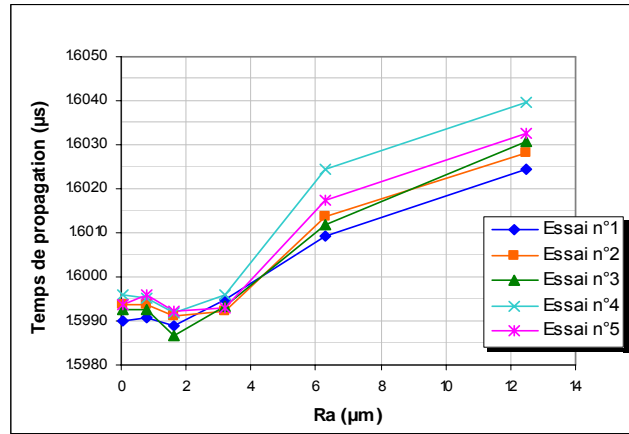


Figure – 7 Influence de la rugosité de surface sur le temps de propagation des ultrasons

Les résultats montrent que pour un  $R_a$  inférieur ou égal à  $3,2 \mu\text{m}$ , une meilleure reproductibilité de couplage (équivalente à  $0,4 \text{ ns}$ ) est obtenue, et la dispersion des résultats entre les différentes plaques est du même ordre. Lorsque le  $R_a$  dépasse ce seuil, la reproductibilité du couplage se détériore fortement (de l'ordre de  $1,5 \text{ ns}$ ) et la dispersion de temps de propagation, entre les différents échantillons, peut atteindre  $4,5 \text{ ns}$ . Sachant qu'avec le capteur utilisé,  $1 \text{ ns}$  est équivalent à  $50 \text{ MPa}$ , la rugosité peut avoir une grande incidence sur le temps de propagation, et un calibrage qui serait effectué sur une éprouvette de rugosité différente de la pièce mesurée, pourrait conduire à des résultats erronés.

### 3. Profil de contraintes résiduelles autour du cordon de soudure

Les résultats présentés à la figure 8 concernent des profils de contraintes résiduelles déterminés autour du cordon de soudure, sur une plaque en P265, avant et après correction de  $K_{ZF}$  et  $t_{0ZF}$ .

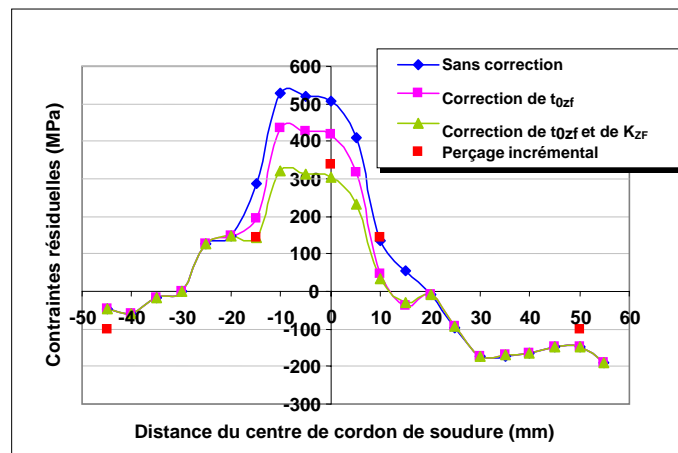


Figure – 8 Profils de contraintes résiduelles sur la plaque en P265 avant et après correction de  $K_{ZF}$  et  $t_{0ZF}$

La correction du temps de propagation à contrainte nulle et de la constante acoustoélastique dans la zone fondue, effectuée pour prendre en compte la différence de la microstructure entre cette zone et le métal de base, entraîne une diminution de la valeur des contraintes initialement estimée comprise entre  $100$  et  $200 \text{ MPa}$  dans la zone fondue. Ces valeurs de contraintes sont de l'ordre de la limite d'élasticité du métal de base ( $309 \text{ MPa}$ ) et sont équivalentes à celles déterminées par la méthode du trou.



#### 4. Reproductibilité des mesures autour du cordon de soudure

Le résultat, présenté dans le paragraphe précédent, a été obtenu sur un joint soudé arasé, puis rectifié avec des passes fines pour obtenir une rugosité d'environ  $3 \mu\text{m}$ . Les essais ont été répétés trois fois, à la même température, tout en respectant les mêmes conditions de couplage : positionnement, épaisseur du couplant. Ceci a pu être obtenu, grâce au développement d'un nouveau capteur qui permet de reproduire son positionnement ainsi que l'épaisseur du film de couplage (sur surfaces planes). Le résultat en termes de reproductibilité est présenté en comparaison avec la méthode de perçage incrémental à la figure 9.

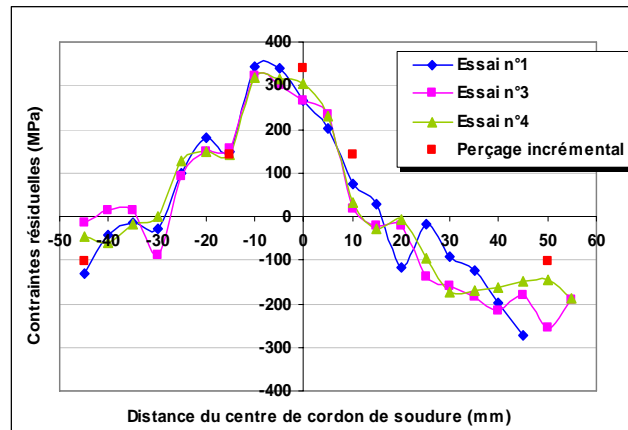


Figure – 9 Reproductibilité des profils de contraintes résiduelles sur la plaque en P265 après correction de  $K_{ZF}$  et  $t_{0ZF}$

Les profils de contraintes présentent une bonne reproductibilité au niveau de la zone fondue. La dispersion des valeurs en un point donné est comprise entre 0 et 75 MPa. Cependant, au niveau de la zone affectée thermiquement ainsi que du métal de base, cette dispersion est plus importante, elle peut atteindre localement 100 MPa.

#### CONCLUSION

Cette étude montre les potentialités de la méthode ultrasonore à évaluer les contraintes résiduelles dans les assemblages soudés. L'utilisation des ondes Lcr rend cette technique particulièrement intéressante car la profondeur d'investigation est d'environ une [8] à deux [7] fois sa longueur d'onde. Ceci nous permet de déterminer les contraintes de surface dans la direction de propagation.

Les problèmes rencontrés précédemment, lors de l'utilisation de cette méthode dans les joints soudés, liés à la difficulté de séparation de l'effet de la microstructure de celui des contraintes au niveau de la ZF ont été traités. Une approche a été proposée pour répondre à ce problème, elle consiste à déterminer les constantes acoustoélastiques ainsi que les vitesses  $V_0$  ( $\sigma = 0$ ) pour chacune des zones de la soudure (MB et ZF). La correction des profils de contraintes après intégration de ces paramètres montre une meilleure adéquation entre cette méthode et celle du perçage incrémental.

L'analyse de l'effet de la rugosité sur la reproductibilité de temps de propagation a permis de déterminer un seuil d'environ  $3 \mu\text{m}$  à partir duquel on obtient une bonne reproductibilité des mesures grâce au développement d'un capteur pouvant assurer la reproductibilité du positionnement et de l'épaisseur du film de couplage.



## REFERENCES

- [1] Hughes, D. S., and Kelly, J. L., Second-order elastic deformation of solids, Phys. Rev, 92, 5, 1953, pp 1145-1149
- [2] Murnaghan, T. D., Finite deformation of an elastic solid, John Wiley, New York, 1951
- [3] Egle, D. M., and Bray, D. E., Measurement of acoustoelastic and third-order elastic constants for rail steels, J.A.S.A, 60, 3, 1976, pp 741-744
- [4] Hoblos, J., Bourse, G., Robin, C., Walaszek, H., Lieurade, H., Evaluation des contraintes résiduelles induites par soudage par la méthode ultrasonore : analyse de la microstructure, Mécanique et Industries, Vol 8, N°1, pp 27-34, 2007
- [5] Hoblos, J., « Evaluation des contraintes résiduelles par méthode ultrasonore avec prise en compte des effets de la microstructure : application au cas du soudage », thèse soutenue le 27 mai 2004 à l'USTL
- [6] Bléhaut, H., Influence des contraintes résiduelles sur l'intégrité de surface lors du parachèvement mécanique, thèse de Doctorat, 2003
- [7] Abdellaoui, Y., Evaluation des contraintes résiduelles dans les assemblages soudés par méthode ultrasonore-Prise en compte de la microstructure, Thèse de doctorat : Université de Technologie de Compiègne, avril 1997
- [8] Belahcene, F., 'Détermination des contraintes résiduelles superficielles par méthode ultrasonore', Thèse de doctorat : Université de Technologie de Compiègne et l'Université de Technologie de Troyes, avril 2000