



**HAL**  
open science

## Analyse expérimentale de distorsions induites en soudage

Julien Chapuis, Cyril Bordreuil, Fabien Soulié, Gilles Fras, Yves El Kaïm

► **To cite this version:**

Julien Chapuis, Cyril Bordreuil, Fabien Soulié, Gilles Fras, Yves El Kaïm. Analyse expérimentale de distorsions induites en soudage. 19ème congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. 5p. hal-00808043

**HAL Id: hal-00808043**

**<https://hal.science/hal-00808043v1>**

Submitted on 4 Apr 2013

**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.

# Analyse expérimentale de distorsions induites en soudage

J. CHAPUIS, C. BORDREUIL, F. SOULIÉ, G. FRAS, Y. EL KAÏM

Laboratoire de Mécanique et Génie Civil (LMGC)  
UMR5508-UM2-CNRS  
CC48 Place Eugène Bataillon  
34095 MONTPELLIER

## Résumé :

*Les phénomènes d'instabilités élastiques et de déformations plastiques peuvent conduire à l'apparition de distorsions importantes dans les opérations de soudage de tôles minces. On présentera un dispositif expérimental original, incluant des mesures de déformations, d'efforts et de paramètres du procédé, le but étant d'analyser les corrélations entre conditions de bridage et distorsions. La démarche expérimentale sera illustrée par l'étude de ligne de fusion sur des tôles minces bridées localement et non bridées. La représentation du déplacement hors plan permettra d'appréhender l'effet du bridage étudié sur les distorsions résiduelles de la plaque.*

## Abstract :

*Elastic instability and plastic strains could lead to large distortions induced by welding process of thin plates. In this work, an original experimental setup including strain and force measurements and process parameters is developed. This setup will allow us to study the influence of boundary conditions on distortions.*

**Mots clefs :** Distorsions, soudage, instrumentation, expérimentation

## 1 Introduction

L'analyse des distorsions induites au cours du soudage demeure une des préoccupations principales des industriels voulant assembler des tôles minces. L'étude des distorsions est souvent réalisée sur des prototypes à plus petites échelles ou sur des maquettes numériques, demandant souvent des calages pour être représentatif.

Les distorsions sont souvent dues aux couplages de différents mécanismes physiques tels que les effets induits par la thermique, le comportement structural de l'assemblage [1] et les propriétés des matériaux.

Les distorsions induites par le soudage sont de différents ordres : (i) contraction longitudinale (ii) contraction transversale (iii) variation angulaire et (iv) instabilité élastique. Elles sont toutes associées à des incompatibilités de déformations au cours du refroidissement entre le cordon et le reste de la structure. Le comportement équivalent du cordon dépend du chargement au cours du refroidissement. Une tôle libre aura ainsi tendance à plus se déformer qu'une tôle bridée.

Si l'influence du bridage semble important, peu d'études étudient l'interaction de celui-ci avec les distorsions [2]. Dans ce travail, on s'intéresse à la mise en place d'un dispositif permettant d'analyser expérimentalement l'influence du bridage. Pour cela, on s'appuie sur la mesure d'efforts au niveau des bridages, au cours et après le soudage. Parallèlement, on étudie le signal d'un demi-pont de jauges pendant et après soudage afin d'obtenir des informations sur une éventuelle instabilité élastique. Finalement, les distorsions après soudage sont analysées pour une pièce bridée avec le dispositif, ainsi que pour une pièce non bridée afin de quantifier l'influence de ce dernier. L'ensemble des résultats obtenus soulignent l'intérêt de ce type de mesure.

## 2 Expérimentation

Dans cette partie, on va détailler le dispositif ainsi que les mesures qui vont permettre d'étudier les distorsions et les couplages avec le bridage.

### 2.1 Le dispositif expérimental

Les éprouvettes sont de forme rectangulaire de dimension 190 x 150 mm et d'épaisseur 1,5 mm. Les appendices sur les largeurs de la tôle permettent de réaliser les phases d'amorçage et d'extinction de l'arc en dehors de la zone d'essai. Les effets de ces phases sont ainsi négligeables sur les mesures. Les cylindres présents sous la tôle (Fig 1) sont des capteurs d'efforts.

Deux configurations d'essais ont été testées :

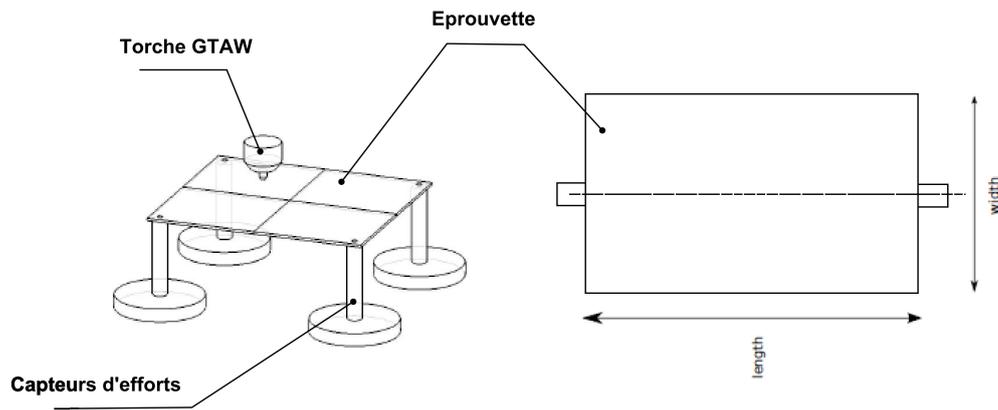


FIGURE 1 – Dispositif expérimental et éprouvettes

1. Essais avec bridage : la tôle est alors fixée sur ces capteurs, réalisant ainsi un bridage minimal qui bloque en translation et en rotation les quatre coins de la tôle ;
2. Essais sans bridage : les capteurs ne servent alors que de supports pour la tôle.

Le dispositif utilisé est constitué d'une torche TIG fixe et d'une table X-Y mobile, pilotée en déplacement/vitesse, sur laquelle sont fixées les éprouvettes.

Le matériau constitutif des éprouvettes est un acier inoxydable, de type 304L. Ce choix est motivé par la volonté de limiter l'apparition de phénomènes métallurgiques qui peuvent conditionner l'analyse des résultats. Les essais sont effectués à paramètres (tension, intensité, vitesse,...) de soudage constants. La vitesse d'avance est de 40cm/min, l'intensité de 70A et la tension de 12 Volts. Des lignes de fusion sont réalisées d'une extrémité à l'autre, créant ainsi au centre de l'éprouvette, un cordon d'environ 3mm de largeur.

## 2.2 Mesures au cours du soudage

La mesure de grandeurs physiques au cours du soudage est particulièrement délicate du fait de la forte perturbation électromagnétique induite par l'arc et du mouvement relatif entre la torche et la pièce. Il convient de prendre des précautions au niveau des câblages (jauges,...) en évitant les différences de potentiels entre les différents composants de la chaîne d'acquisition. Au niveau des capteurs résistifs une double protection [3] doit être mise en oeuvre afin de réduire les effets électrostatiques et magnétostatiques (Fig 2). Pour réduire l'influence électrostatique, on crée une cage de Faraday autour du capteur et on met la cage au potentiel de la terre. Pour ce qui est de l'électromagnétisme, on place une couche de matériau peu conducteur des flux magnétiques (type cuivre). Le montage en demi-pont devrait réduire l'influence d'un fort courant induit dans le capteur.

Au niveau du conditionnement des signaux, un rack de mesures dédié à l'instrumentation en cours de soudage a

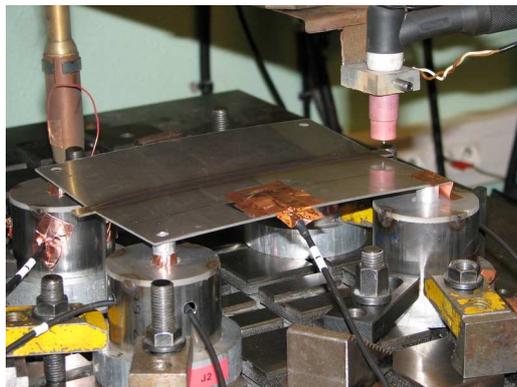


FIGURE 2 – Photo du dispositif expérimental

été développé au laboratoire. Le conditionnement de signaux doit être réalisé avec un total découplage entre les capteurs et l'échantillonneur afin de protéger la centrale d'acquisition de tout retour de courant. Des voies optocouplées ont alors été développées pour les capteurs en contact direct avec l'éprouvette. Le développement des cartes de conditionnement des différents signaux a été réalisé en limitant au maximum les interactions avec l'environnement extérieur mais également avec l'alimentation. Les signaux présentés dans ce travail sont des montages en demi-pont filtrés avec un passe bas à 120 Hertz.

Afin d'appréhender les temps significatifs d'apparition des efforts, une acquisition de 10 minutes à 20 Hertz est réalisée. L'ensemble des signaux sont ensuite centralisés sur des cartes d'acquisition assurant la synchronisation des différentes données.

### 2.2.1 Mesures d'efforts

Les capteurs sont dimensionnés pour mesurer les efforts dans le plan et pour ne pas être sensibles aux moments induits. Ils sont fabriqués en alliages d'aluminiums. Ils ont un diamètre de 16mm et une longueur hors encastrement de 50mm, ce qui leur confère une rigidité de 10000N/mm.

Les capteurs sont suffisamment éloignés de la source de chaleur induite par l'arc (environ 100mm) afin de pouvoir s'affranchir des mesures de températures de correction. En effet, les jauges sont compensées pour des alliages d'aluminium, ce qui limite l'influence de la thermique sur le signal. Des essais préliminaires ont permis de mettre en évidence la faible température des capteurs après essai (moins de 30 degrés). On mesure alors l'effort X (dans la direction de soudage) et Y dans la direction perpendiculaire.

### 2.2.2 Mesures des déformations

Les jauges sont placées au milieu des éprouvettes dans la direction du soudage et à 60mm du cordon. Deux jauges de part et d'autre de la tôle sont montées en demi-pont afin d'observer les déformations induites par la flexion au cours du refroidissement. Une évolution rapide du signal dénotera une instabilité élastique type flambage. Le montage en demi-pont de part et d'autre permet de s'affranchir des problèmes d'erreurs de mesures induites par la variation de température.

### 2.3 Mesures de distorsions

Les distorsions sont mesurées à l'aide d'un scanner tridimensionnel Breuckmann mesurant les formes par projection de moiré et corrélation. On obtient une surface de nuage de points tridimensionnel. La surface est ensuite travaillée (repérage, rotation, ajustement,...) afin d'extraire une zone utile et pouvoir comparer deux mesures. Ce type d'instrument de mesure ne nécessite pas de précautions particulières.

La tôle est supposée initialement plane. L'ajustement consiste à faire passer un plan par la moyenne des distances dans la direction z. Ce qui signifie que dans cette mesure, on néglige toutes les déformations dans le plan.

## 3 Résultats

Dans cette partie, on présentera indépendamment les résultats que l'on analysera par la suite. On rappelle que le temps de soudage est d'environ 50 secondes et celui de l'acquisition de 10 minutes. L'énergie apportée à la pièce est de 40950J. Le temps de retour à l'ambiante est alors d'environ 8 minutes.

### 3.1 Mesures d'efforts

La figure 3 montre les résultats issus d'une acquisition pour un capteur situé du côté de l'amorçage. Afin de mieux visualiser les efforts, ils ont été tracés avec des signes opposés. En réalité, l'action du bridage sur la tôle est une action de traction dans les deux cas en fin d'opération de soudage. On remarque que durant tout le temps de soudage les efforts sont faibles et qu'au cours du refroidissement, ils sont de plus en plus importants. Pour cette étude de faisabilité de qualité des résultats, les mesures de thermocouples n'ont pas été envisagées. On observe 3 zones sur la figure 3. La première correspond au temps de soudage. Les efforts de liaisons sont quasiment nuls au niveau des liaisons. Une deuxième zone correspond à la diffusion de la chaleur dans la tôle et au début du refroidissement. La troisième phase correspond au retour à l'équilibre en température. On remarque qu'à la fin de la mesure, les efforts sont quasi constants dénotant un effort créé au niveau de la liaison, dû au chargement thermique, engendré par le soudage.

### 3.2 Mesures des déformations

La figure 4 présente, l'évolution du signal du demi-pont de jauges au cours du temps. On rappelle que les jauges sont collées dans la direction de soudage, on mesure de la flexion suivant un axe perpendiculaire à la ligne de fusion. On remarque encore les 3 zones d'évolution des efforts, avec une légère modification pour la phase correspondant au soudage. On remarque que le passage de la torche induit une sollicitation de flexion. En fin de sollicitation, en supposant une sollicitation de traction (qui n'est probablement pas), on approche une valeur avoisinant les 150 MPa au point de mesure.

Avec les conditions de soudage choisies, on ne remarque aucune discontinuité au cours du temps, ce qui laisse penser qu'il n'y a pas de bifurcation de type élastique dans ce cas.

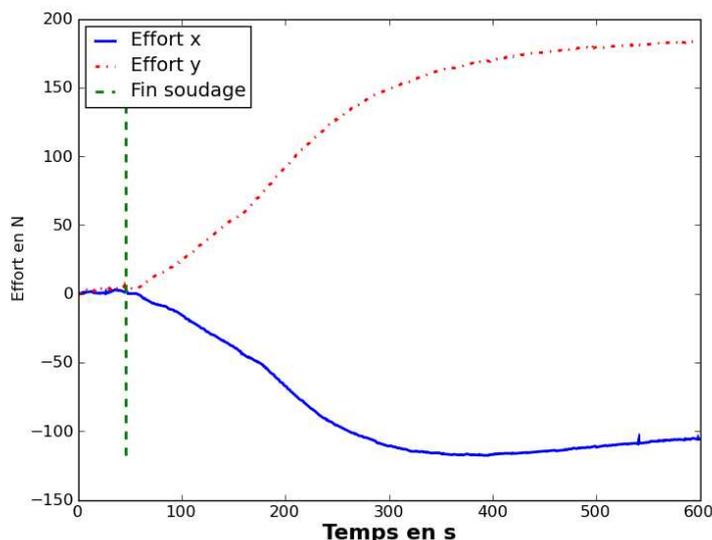


FIGURE 3 – Evolution des efforts dans le plan au cours du temps (temps de soudage environ 50s)

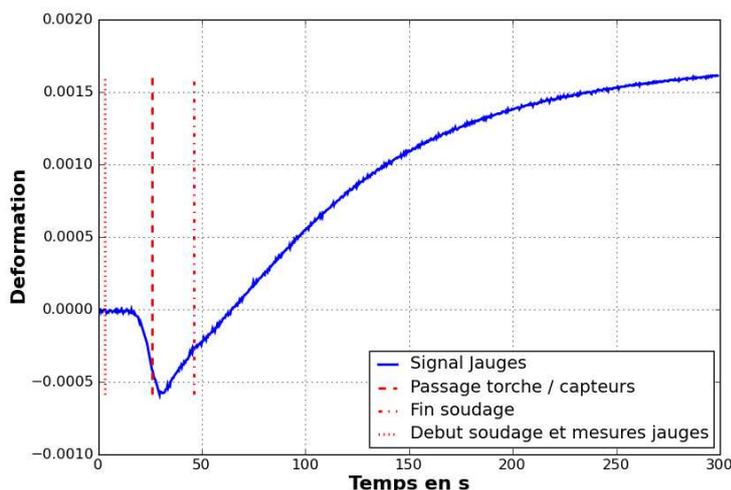


FIGURE 4 – Evolution de la déformation de flexion au cours du temps (temps de soudage environ 50s)

Comme pour les efforts, on peut remarquer une forte évolution des déformations entre 100 et 200 s correspondant au temps d'homogénéisation en température de la tôle.

### 3.3 Mesures de distorsions

Sur la figure 5 sont représentées les distorsions pour les deux tôles soudées avec et sans bridage. On retrouve dans les deux cas des formes identiques en forme de col avec les mêmes courbures. On remarque que dans les deux cas on a une forte distorsion angulaire. Un examen a posteriori n'indique pas la présence d'énergie élastique emmagasinée sous forme de flexion dans les tôles.

Qualitativement, entre les deux configurations, on observe une différence sur les maxima de 1mm et sur les points minima de 1mm. Ces écarts peuvent sembler peu importants mais sur une amplitude de déplacement hors plan de 6mm, cela représente un écart d'environ 30%. Le résultat est relativement symétrique dans la direction de soudage ce qui semble indiquer une faible influence de l'évolution du soudage (de la thermique par exemple) sur la création des distorsions.

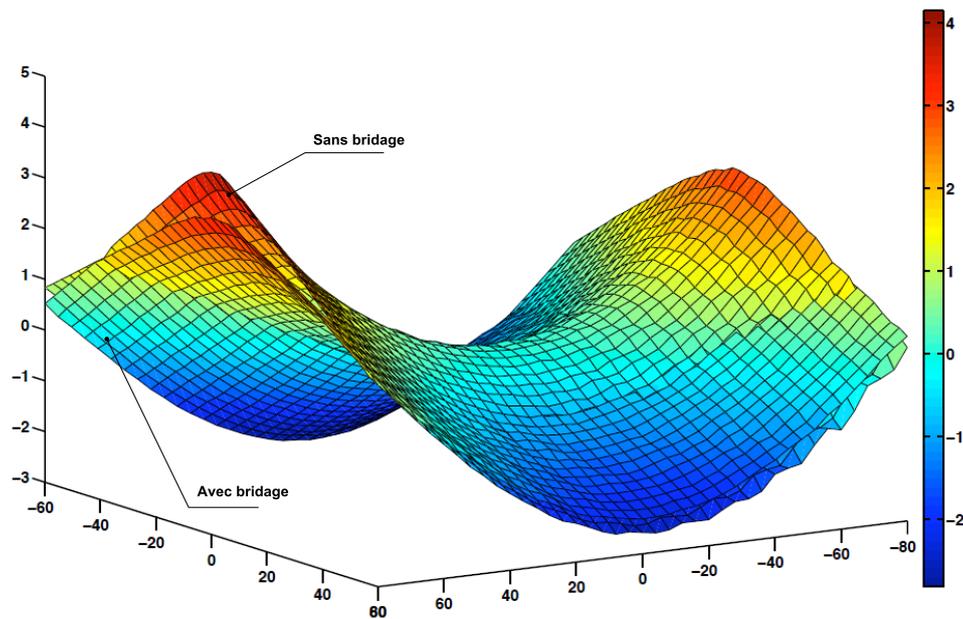


FIGURE 5 – Distorsions hors plan (toutes les dimensions sont en mm)

## 4 Discussion

L'ensemble des résultats montre l'influence des conditions de bridage sur les distorsions. Il semble bien établi que leur apparition est un couplage entre l'évolution thermique dans l'éprouvette, la mécanique de l'éprouvette et le comportement non linéaire du matériau. Dans les essais, on peut quantifier l'effet de manière précise (faible ratio bruit - mesure) de l'action mécanique sur les distorsions finales. Aussi bien au niveau des efforts pour la plaque bridée et des jauges pour la plaque non bridée, les résultats ne montrent pas de bifurcation de type élastique sur les signaux. Néanmoins on observe de fortes déformations (déplacements relatifs de l'ordre de plusieurs millimètres) témoignant de la présence de déformations plastiques importantes. Il est communément admis [4] que les contraintes résiduelles (et donc les distorsions) sont issues de l'incompatibilité de déformations de la zone fondue au cours du refroidissement et du matériau au voisinage, créant une action locale (dépendant des conditions aux limites). Cette action locale est souvent modélisée par des déformations inhérentes au procédé dépendantes de l'énergie de soudage. Dans notre cas, au vu des distorsions observées et des efforts mesurés, les déformations plastiques sont à prendre en compte dans l'analyse.

Les essais montrent que les distorsions prennent naissance lors de la phase de refroidissement. Afin d'améliorer la compréhension et les éléments à prendre en compte dans une modélisation, il conviendrait de connaître le niveau et la répartition des températures par l'intermédiaire de mesures de thermocouples.

## 5 Conclusion

Un dispositif d'étude d'instabilité élastique et de distorsions au sens large a été développé. La qualité des résultats (les signaux) confirme la possibilité de mesurer des déformations au cours du soudage. Les premières mesures, si elles n'expliquent pas encore l'ensemble des distorsions, permettent de bien visualiser le domaine de création des distorsions. Afin d'affiner la compréhension de ces phénomènes, il est prévu de réaliser une campagne d'essais complète (Mesures d'efforts couplées aux mesures de températures).

Ce dispositif permet également de quantifier l'influence du bridage par la mesure des actions de liaisons. Une étude systématique pourrait alors permettre d'améliorer la position des bridages lors de l'établissement d'un Descriptif de Mode Opérateur en Soudage (DMOS).

## Références

- [1] Tsai.C.L J., Han.M.S. Investigating the bifurcation phenomenon in plate welding. *Welding Journal*, July(6), 151s–162s, 2006.
- [2] Roeren .S R. M., Schwenk .C. Different approach to model clamping conditions within a welding conditions. In *Mathematical modelling of weld phenomena 8*, 2006.
- [3] Vishay . Noise control in strain measurement. Technical report, 2007. TN-501-2.
- [4] Yuan.M.G U. Prediction of residual stresses in butt welded plates using inherent strains. *Journal of engineering materials and technology*, 115, 417–423, 1993.