

Modélisation numérique avec apport de matière du soudo-brasage des assemblages hétérogènes acier/aluminium

Virgil Optasanu, Pierre Sallamand, Bruno Martin & Tony Montesin

ICB - Institut Carnot de Bourgogne,
UMR 5209 CNRS-Université de Bourgogne,
9 Av. A. Savary, BP 47870
F-21078 DIJON Cedex, FRANCE
virgil.optasanu@u-bourgogne.fr

Résumé :

Dans cette étude nous abordons la modélisation numérique thermomécanique du soudo-brasage de tôles d'acier et d'aluminium par la technique CMT dans une configuration à clin. Ces métaux ont des coefficients de dilatation thermique différents, ce qui provoque des déformations et des contraintes résiduelles élevées. Cette simulation prend en compte l'apport de matière durant le processus. Une validation de la modélisation est faite sur le cas simple du dépôt d'un cordon de matériau d'apport sur une plaque d'aluminium. Pour l'assemblage hétérogène des comparaisons sont faites entre les résultats numériques et expérimentaux en termes de déplacements hors-plan.

Abstract :

This study deals with the numerical simulation of heterogeneous brazing of steel / aluminium alloy sheets by CMT process. The difference between the linear expansion coefficients of these materials generates high deformations and residual stress. The addition of brazing material is simulated. A validation the model is made in the simplest case of a sheet of aluminium alloy with a brazing bead. Comparisons are made between numerical and experimental results on out-of-plane displacements of steel / aluminium assembly.

Mots-clefs :

soudo-brasage ; hétérogène ; modélisation

1 Introduction

Les nouvelles exigences européennes sur l'énergie et les normes anti-pollution qui seront effectives en 2008, imposent à l'industrie automobile de réduire la consommation des véhicules. Une des voies pour y parvenir est de réduire leur masse en utilisant des matériaux dont les propriétés spécifiques sont élevées et en prenant en compte les possibilités de recyclage. L'aluminium est une des réponses mais son coût restant assez élevé, seul le remplacement d'éléments de carrosserie est envisagé. Le coût de ces dernières en serait diminué tout en restant dans les gains de poids recommandés. Cependant cette solution nécessite l'assemblage de l'aluminium avec l'acier pour conserver l'intégralité de la structure. Si les performances mécaniques des assemblages acier/aluminium soudés atteignent aujourd'hui des efforts à rupture satisfaisants, des fissurations transversales, dommageables à leur tenue mécanique, se produisent au sein du cordon sous certaines conditions opératoires.

Plusieurs phénomènes sont soupçonnés d'être à l'origine des ces fissurations :

- La réalisation du soudo-brasage aboutit à la création d'un cordon chimiquement hétérogène dans lequel apparaît une phase métastable dont l'évolution est difficilement maîtrisable,

- L'association de matériaux à coefficient de dilatation thermique différents, peut engendrer des déformations à l'origine de contraintes mécaniques élevées.

C'est précisément pour mieux comprendre les causes de ces fissures, que des travaux ont été initiés : A. Mathieu *et al.* (2004), (2006), V. Optasanu *et al.* (2006). Ils portent sur le procédé de soudo-brasage de tôles d'acier et d'aluminium par des techniques laser ou par la technique CMT (cold metal transfer). En parallèle des expériences, une simulation thermomécanique est menée pour mieux comprendre les influences sur les déformations de l'assemblage post débridage.

2 Technique expérimentale

2.1 Matériaux

Les matériaux à assembler sont : alliage d'aluminium 6016 d'épaisseur 1,2 mm avec un traitement T4 et acier bas carbone d'épaisseur 0,77 mm, revêtu d'une couche de galvanisation de zinc d'épaisseur 10 μ m. Le matériau d'apport est un fil de diamètre 1,6mm en alliage d'aluminium à 12% (en poids) de silicium (composition eutectique) de nuance 4047 choisi pour sa température de fusion de 580°C compatible avec l'alliage d'aluminium à assembler.

2.2 Le procédé d'assemblage

Une pré-étude avait été menée en utilisant une source laser dans le cadre des travaux de thèse de A. Mathieu (2005). Cependant, compte-tenu du modèle que nous souhaitons mettre en œuvre, il est apparu judicieux de réaliser l'assemblage avec le procédé Cold Metal Transfer (CMT). Comme l'indique son nom, c'est un procédé de soudage dit "froid" dont la principale caractéristique réside dans le fait qu'il interrompt ou coupe l'arc court avec un mouvement du fil intégré dans le processus de soudage. En effet, à chaque fois qu'un court-circuit ($F_{\max} = 70\text{Hz}$) se produit, la gestion du processus coupe l'alimentation électrique, d'une part et contrôle le retrait du fil d'autre part. Ce mouvement du fil favorise le détachement des gouttelettes pendant le court-circuit (figure 1). Grâce au contrôle du court-circuit, le courant et la chaleur induits dans les matières à assembler sont fortement réduits. Les effets thermiques sont ainsi diminués et le volume fondu des matériaux à assembler relativement faible. Ainsi, le métal est déposé sous forme de gouttes qui se juxtaposent les unes après les autres.



FIG. 1 – Principe du CMT

2.3 Configuration de brasage

Compte tenu de la configuration de l'assemblage à clin, il est nécessaire de travailler sur un montage de bridage dans lequel la torche est positionnée à un angle α par rapport aux plaques avec un angle par rapport à la torche CMT (FIG. 2).

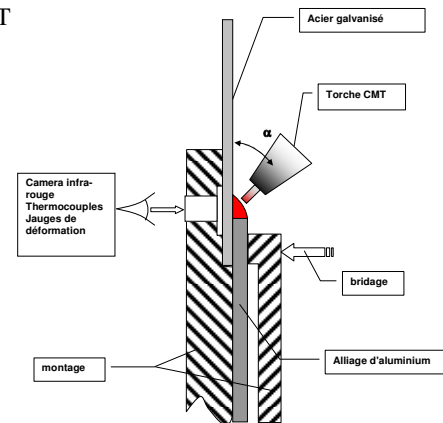


FIG. 2 – Dispositif expérimental

Les paramètres du CMT dépendent du couple de matériaux et des dimensions des pièces à assembler. Ainsi avant de réaliser des assemblages de 300 mm de long, une recherche des paramètres optimaux est menée sur des échantillons de plus courtes longueurs.

3 Simulations numériques

L'assemblage hétérogène des matériaux a été modélisée de point de vue thermomécanique à l'aide des éléments finis 3D (logiciel CASTEM). Le dépôt du cordon de brasage a été modélisé par un apport « plot par plot » de matériau à l'état fondu. A chaque pas de temps, un nouveau « plot » est déposé sur les surfaces. A la fin du processus l'assemblage est refroidi par convection naturelle. L'effet de la convection n'est pas pris en compte lors du dépôt du cordon proprement dit pour ne pas alourdir les calculs. En effet, la diffusion de chaleur se fait principalement par conduction, vu les temps très courts de dépôt. La convection sert principalement au refroidissement lent de l'assemblage une fois soudé.

3.1 Modélisation thermomécanique

Pour réaliser le maillage nous avons utilisé des éléments 3D linéaires, choix imposé par l'impossibilité de traiter le changement de phase avec des éléments quadratiques sous CASTEM. Le maillage a été raffiné autour du cordon de brasage car c'est à cet endroit que le gradient de température, de déformation et de contraintes est le plus important. La forme du cordon de soudure a été modélisée approximativement (sans prendre en compte par exemple la forme arrondie du cordon), néanmoins les dimensions des zones de contact entre le matériau d'apport et les plaques ainsi que l'aire de la section ont été scrupuleusement respectés.

Le couplage thermomécanique est de type faible, les phénomènes thermiques influant sur les comportements mécaniques, mais non l'inverse. Cette hypothèse est généralement admise dans l'étude des phénomènes de soudo-brasage.

Du point de vue thermique, la simulation fait intervenir des phénomènes de solidification et conduction durant le processus de brasage ainsi que la convection lors du refroidissement ultime de l'échantillon. Dans ces conditions, nous supposons que le flux de chaleur évacué par convection est négligeable durant la courte durée du processus de brasage (surtout pour des échantillons relativement courts) par rapport à celui dû à la conduction entre le matériau chaud et la plaque froide. Nous avons également pris en compte les variations des paramètres matériaux avec la température. Les matériaux ont été considérés comme étant homogènes et isotropes thermiquement. La modélisation mécanique est décrite par un comportement élasto-plastique à écrouissage cinématique linéaire, ce qui paraît être le meilleur compromis précision / temps de calcul (Bru et al., 1997). Les caractéristiques thermomécaniques évoluent avec la température. L'évolution de la dépendance pour quelques paramètres est donnée FIG 3. Les variations des certains paramètres sont pris dans la littérature, d'autres sont mesurés.

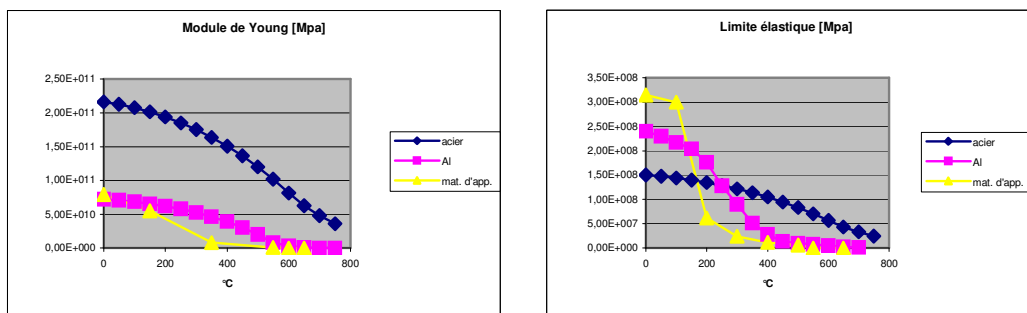


FIG. 3 : Variations de E et σ_y avec la température

Afin de comparer les résultats expérimentaux avec les prédictions numériques nous avons traité d'abord le phénomène simple du dépôt d'un cordon de matériau d'apport sur une plaque d'aluminium. Ensuite, nous avons modélisé le brasage hétérogène acier – alliage d'aluminium, dont les résultats seront présentés au paragraphe 3.3.

3.2 Validation de la modélisation

Pour valider notre modélisation nous avons simulé le dépôt d'un cordon de brasage sur une plaque et nous avons comparé les résultats concernant les déformations macroscopiques post-processus avec les observations. Effectivement, à la suite du dépôt d'un cordon de brasage sur une plaque d'alliage d'aluminium (6016) on peut constater une déformation macroscopique de la plaque (qui peut s'apercevoir légèrement FIG. 4).

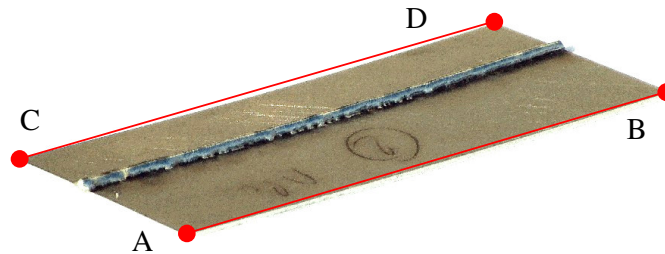


FIG 4. Photo de l'échantillon après dépôt d'un cordon de brasage par CMT (aluminium seul)

Le bridage de la plaque pendant le processus est simulé à l'aide d'une force appliquée sur une surface et d'une zone de contact (avec la table rigide) faisant face à cette force. Le débridage est simulé par la diminution progressive de cette force jusqu'à zéro. L'imposition du bridage par un couple "force appliquée" — "conditions de contact" présente l'avantage de permettre aux matériaux de se dilater thermiquement.

La FIG. 5 présente les conséquences du débridage sur la déformation de la plaque. La plaque déformée "en dièdre" avant débridage (FIG. 5.a), gagne une forme incurvée selon une direction perpendiculaire au cordon de matériau d'apport (FIG. 5.b), ce qui est effectivement constaté expérimentalement.

FIG. 6 on peut voir une comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques sur les déplacements des points le long des droites A-B et C-D. Nous pouvons constater que nous avons le même ordre de grandeur (différence de 25%) ce qui, pour un calcul rapide, peut-être considéré comme étant d'une précision satisfaisante. Néanmoins, il faut être critique par rapport à l'aspect quantitatif, car les caractéristiques mécaniques des matériaux simulés sont issues d'une littérature assez pauvre en données à haute température pour les matériaux utilisés. Une caractérisation mécanique des matériaux mis en œuvre permettrait de mieux apprécier les écarts entre la simulation et l'expérience.

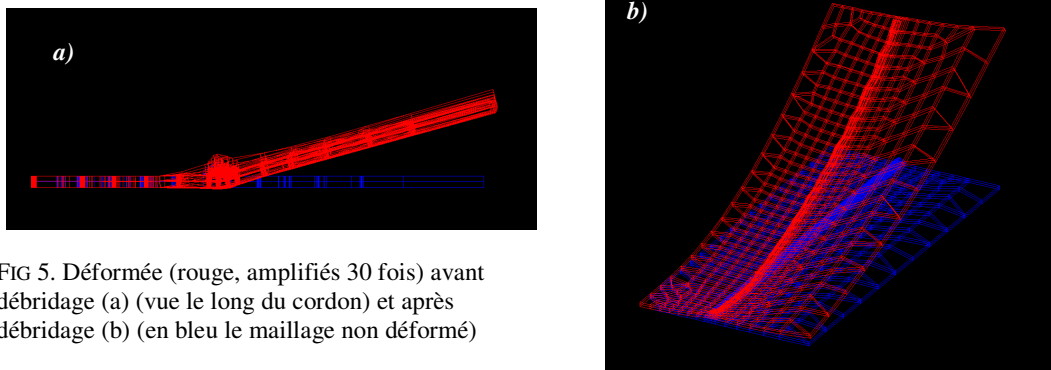


FIG 5. Déformée (rouge, amplifiés 30 fois) avant débridage (a) (vue le long du cordon) et après débridage (b) (en bleu le maillage non déformé)

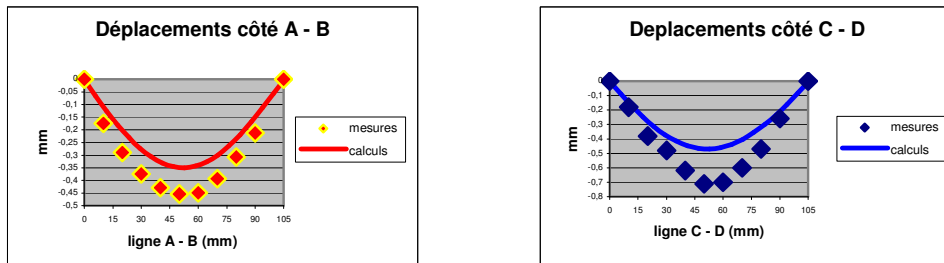


FIG. 6. Profil de la déformée des bords de la plaque (calculé et mesurée)

3.3 Modélisation d'un assemblage hétérogène acier – alliage d'aluminium

Le but ultime de notre modélisation concerne l'assemblage hétérogène acier / alliage d'aluminium. Le problème a été abordé comme lors de la validation, mais cette-fois-ci en présence de deux plaques en configuration à clin. Un exemple de maillage utilisé est donné FIG. 7.

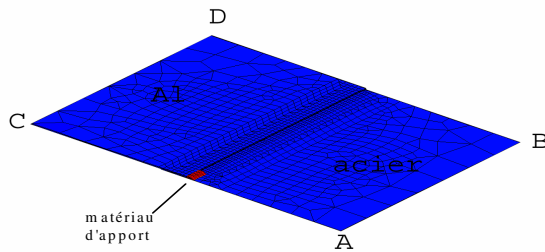


FIG. 7. Maillage utilisé (les plaques sont en bleu et le matériau d'apport en rouge)

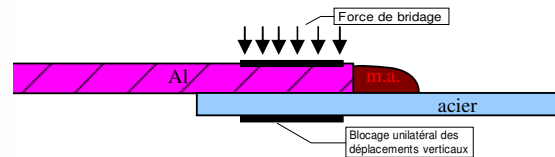


FIG. 8. Blocages et forces de bridage

Nous allons nous intéresser à la déformée des plaques après brasage et refroidissement. Pour cela nous allons prendre comme référence le bord A-B de la plaque en acier et le bord C-D de la plaque en alliage d'aluminium et faire une comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques concernant la déformée de ces bords.

Les Fig. 9 et 10 présentent les résultats des calculs et des mesures du déplacement des plaques après brasage. On observe que les plaques se comportent différemment : celle en acier présente une courbure concave alors que celle en alliage d'aluminium une convexe. Ce comportement, difficilement prévisible d'ailleurs, est visible aussi dans les résultats numériques même si un certain écart subsiste entre les valeurs calculées et mesurées.

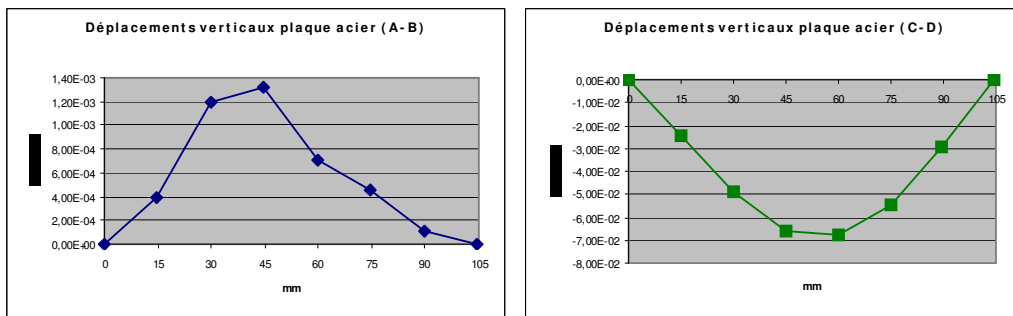


FIG. 9. Résultats numériques sur la déformée des bords des plaques

On constate un rapport de 4 entre les résultats expérimentaux et ceux numériques concernant la flèche maximale de la plaque d'aluminium et un rapport de plus de 150 entre les mêmes résultats concernant la plaque d'acier. La différence entre les valeurs des déplacements calculés et mesurés pour le cas de la plaque en acier nous font penser que les paramètres thermomécaniques de l'acier ne sont pas bien connus. Ceci impose inévitablement une caractérisation détaillée du matériau, ce que nous allons faire dans le prolongement de nos travaux.

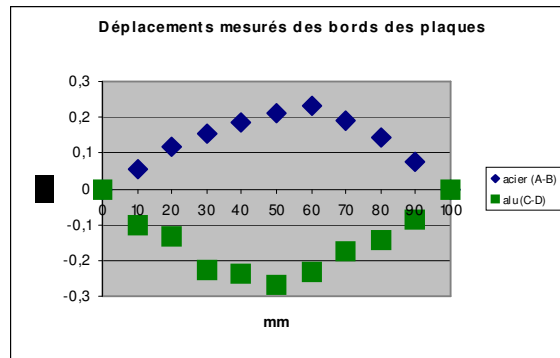


FIG. 10. Mesures expérimentales sur la déformée des bords des plaques

Conclusion

Le procédé CMT permet de réaliser des assemblages de matériaux hétérogènes avec un minimum de déformation et en limitant la formation de phases fragiles.

La simulation thermomécanique à couplage faible a donné des résultats encourageants concernant les déformées de point de vue qualitatif, cependant une caractérisation expérimentale des matériaux utilisés devrait permettre d'améliorer les résultats. Dans le cas de la déformée d'une plaque d'aluminium avec un cordon de matériau d'apport les écarts entre les valeurs calculée et mesurée de la déformée sont de 25%, ce que nous estimons être très prometteur.

Nous travaillons également actuellement sur l'association d'une modélisation 3D - éléments de type coque ce qui nous permettra de diminuer les temps de calculs.

L'étude présentée ici pourra à terme permettre de mieux comprendre les comportements des assemblages hétérogènes afin de contourner les difficultés liées à l'apparition de contraintes résiduelles qui déforment les matériaux après assemblage, par un choix soigné des paramètres du processus.

Références

- D. Bru, J. Devaux, J.M. Bergheau, D. Pont, 1997, Influence of material properties at high temperature on the modelling of welding residual stress and deformation state, *Mathematical Modelling of Weld Phenomena 3*, pp. 456-463
- A. Mathieu, S. Mattei, L. Rodriguez, A. Deschamps, M. Suéry, J.C. Viala, B. Martin, D. Grevey, 2004, Laser brazing of steel/aluminium assembly, *Proceedings of ICALEO San Francisco (USA)*
- A. Mathieu, S. Mattei, A. Deschamps, B. Martin, D. Grevey, 2006, Control using Thermography Measurements for Laser Brazing of Steel/Aluminum Assembly, *NDT & E International*, vol.39, Issue 4, pp.272-276
- A. Mathieu, 2005, Etude de l'assemblage hétérogène acier/aluminium obtenu par faisceau laser. Approche thermique et physico-chimique, thèse de doctorat, Université de Bourgogne
- V. Optasanu, P. Sallamand, B. Martin, T. Montesin, S. Mattei, D. Grevey, 2006, Etude numérique et expérimentale de l'assemblage acier aluminium par soudo-brasage, *Matériaux 2006*, Dijon 13-17 nov. cdRom.