

# Simulation numérique du soudage appliquée au cas d'une traverse arrière d'automobile

N. GARSOT<sup>a</sup>, N.T. NIANE<sup>b</sup>, P.BRISTIEL<sup>b</sup>

*a. Alter Solutions, 6 avenue du Général De Gaulle, 78000 VERSAILLES*

*b. PSA Peugeot Citroën, 18 rue des Fauvelles, 92250 LA GARENNE-COLOMBES*

## Résumé :

*PSA Peugeot Citroën travaille depuis plusieurs années sur la simulation numérique du soudage, avec pour ambition de réduire le nombre nécessaire d'essais à la mise au point des gammes de fabrication. Ce travail illustre, grâce à un exemple industriel, la méthodologie permettant de remplir cet objectif. Pour ce faire, deux cas tests (soudage T et à clin) sont utilisés pour calibrer les paramètres du modèle et valider la méthodologie. La simulation d'une traverse comportant 88 cordons est ensuite réalisée afin de prévoir sa distorsion. Les résultats ainsi obtenus sont en accord avec les observations expérimentales.*

## Abstract :

*PSA Peugeot Citroën has worked for several years on welding simulation in order to optimize the Gas Metal Arc Welding process. This work illustrates our methodology through an industrial example. Two test cases are used to calibrate the model and validate the methodology. Then a simulation of a rear crossmember with 88 joints is carried out to predict its final distortion. The results obtained are in agreement with the experiments.*

**Mots clés : Soudage MAG, Méthode des Eléments finis, Transformation de phase, Distorsion, Traverse arrière automobile**

## Introduction

Le procédé de soudage par apport de matière MIG/MAG est très utilisé dans l'industrie automobile. Cependant l'apport de chaleur qui se produit durant le procédé, peut générer d'importantes distorsions de structure et introduire des contraintes résiduelles pénalisantes pour la tenue de la structure.

PSA Peugeot Citroën travaille depuis plusieurs années sur la simulation numérique du soudage afin d'optimiser le procédé MAG. Celui-ci, bien que très répandu dans l'industrie, génère de nombreux phénomènes non-linéaires principalement liés au flux thermique non uniforme agissant sur la pièce. Dans un contexte de forte concurrence industrielle où la réduction des coûts/délais est primordiale, la simulation numérique peut apporter une solution [1] et permettre la diminution des essais nécessaires à la mise au point du procédé. De nombreux modèles ont été mis en place afin d'évaluer les distorsions ainsi que l'état de contrainte des pièces après soudage [2]. Cependant les modèles prenant en compte tous les paramètres influents du soudage (transformation de phase, simulation du flux thermique, propriétés thermomécaniques), sur de grandes structures assemblées par un grand nombre de cordons sont très peu répandus [3].

L'objectif de cette étude est de mettre en place une méthode de modélisation permettant la prédiction des distorsions des pièces soudées de manière robuste.

## 1 Modélisation éléments finis

Durant le procédé, de nombreux phénomènes physiques non-linéaires (thermique, métallurgie, mécanique) contribuent à la distorsion finale de la pièce. Une méthodologie de simulation 3D utilisant la méthode des éléments finis a été développée afin de prévoir les distorsions obtenues après soudage de pièces industrielles assemblées par un grand nombre de cordons de soudure. Les simulations, menées avec le code commercial SYSWELD<sup>®</sup>, se décomposent en deux étapes. Tout d'abord, un calcul transitoire thermique-métallurgique est réalisé (couplage fort). Le résultat du calcul est ensuite utilisé comme entrée du calcul mécanique pour déterminer la distorsion de la structure. L'interaction de la mécanique sur les propriétés thermiques et métallurgiques est négligée (couplage faible).

### 1.1 Analyse thermo-métallurgique

L'analyse est basée sur la résolution de l'équation de la chaleur modifiée (1) qui permet la prise en compte de la chaleur latente de fusion et la chaleur de transformation de phase à l'état solide.

$$\rho \cdot C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (\lambda \nabla T) - \sum_{i < j} L_{ij} A_{ij} \quad (1)$$

Dans cette expression,  $L_{ij}(T)$  est la chaleur latente de la transformation de la phase  $i \rightarrow j$ ,  $A_{ij}$  est la portion de phase  $i$  qui est transformée en phase  $j$  par unité de temps. On précise que la chaleur spécifique  $C$  et la conductivité thermique  $\lambda$  sont pondérées par les proportions des différentes phases. Les chaleurs spécifiques des phases  $C_i$ , et les chaleurs de transformation  $L_{ij}$  sont calculées comme une fonction des enthalpies  $H_i$  par :

$$C_i = \frac{dH_i}{dT} \text{ et } L_{ij} = H_j - H_i \quad (2)$$

### 1.2 Source de chaleur

L'apport de chaleur est représenté par une source interne, en forme de deux demi-ellipsoïdes [4], se déplaçant le long de chaque trajectoire de soudage. Les différents paramètres de source sont identifiés à partir de macrographies de cordons décrites plus loin (cas de soudage en T et à clin).

Dans toutes les simulations les cordons sont préexistants. Ils sont constitués d'une phase artificielle assurant qu'un cordon non « fondu » ne contribue pas à la rigidité de la structure. Si la puissance fournie par la source est suffisante pour fondre le métal d'apport, la phase artificielle se transforme en austénite et suit un chemin de refroidissement standard.

### 1.3 Transformation de phase

Dans le cas de l'acier S355, les transformations métallurgiques à prendre en compte sont la transformation austénitique au chauffage et les transformations ferritique, bainitique et martensitique au refroidissement. Dans le cas de transformation par diffusion (austénite, ferrite et bainite) le modèle utilisé est celui de Leblond [5] dont les paramètres sont directement extraits du diagramme TRC [6]. Durant la transformation martensitique, la proportion de phase formée dépend uniquement de la température courante. Dans ce cas, on peut directement utiliser le modèle de Koistinen-Marburger [7].

### 1.4 Analyse mécanique

L'analyse mécanique est réalisée en utilisant une loi matériau thermo-élastoplastique isotrope avec critère de Von Mises. La limite d'élasticité et l'expansion liée à la transformation de phase sont obtenues par moyenne des valeurs des différentes phases en fonction de la température. La plasticité de transformation est déterminée par le modèle de Leblond [8]. Le coefficient de Poisson, quant à lui, sera supposé constant [9].

## 2 Investigations expérimentales

Les essais de soudage sont réalisés sur un acier S355. Deux types de soudure sont considérés dans cette étude : en T et à clin. Dans les deux cas, on étudie l'assemblage de deux tôles carrées de côté 100 mm et d'épaisseur 5 mm fixées sur une table mobile. Les plaques horizontales sont bridées en deux points comme exposé sur la figure 1. Dans le cas du soudage à clin, trois appuis ponctuels sont ajoutés pour maintenir la plaque inférieure en début de soudage. La torche de soudage fixe est orientée à 45° par rapport à l'horizontale. Le poste à souder est alimenté par un générateur SAF OPTIPULS 380iW avec protection active d'un gaz Ar/CO<sub>2</sub> (79Ar%, 21%CO<sub>2</sub>). Cinq thermocouples sont répartis sur les plaques afin d'enregistrer l'évolution de la température durant l'essai.

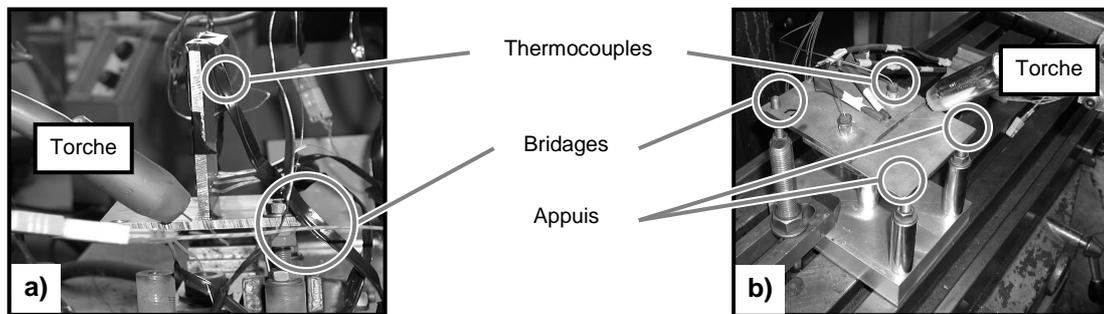


FIG. 1 – Montage expérimental des cas de calibration a) en T et b) à clin.

Les différents paramètres d'essais utilisés sont listés dans le tableau 1.

TAB. 1 – Cas de soudages étudiés.

Type de soudure	Dimension des plaques (mm)	Vitesse (mm/s)	Puissance (W)	Nombre d'essais
T	100x100x5	6.5	5475	5
Clin	100x100x5	10	5800	5

Après soudage des micrographies sont réalisées afin de déterminer les dimensions de la zone fondue (ZF) et de la zone affectée thermiquement (ZAT). Les métallographies sont issues de sections du cordon situées à mi-longueur du joint soudé. Ces échantillons sont enrobés dans une résine pour être poli. Enfin, la surface métallique est exposée à une solution de nital permettant la mise en évidence de la microstructure.

## 3 Calibration du modèle

### 3.1 Maillage et conditions aux limites

Un modèle éléments finis est mis en place pour simuler le soudage MAG de deux plaques (à clin et en T) en utilisant le logiciel commercial SYSWELD<sup>®</sup>. La géométrie des deux structures est modélisée à l'aide d'éléments 3D (hexaèdres et pentaèdres). Ce maillage est affiné au niveau des cordons de soudure assurant un bon compromis entre précision des résultats et rapidité de calcul. A la surface de chaque plaque et du cordon, des éléments 2D sont ajoutés afin d'appliquer une condition aux limites de convection et de radiation.

Dans les deux cas, les zones de bridage sont supposés totalement encastrées sur toute l'épaisseur de la plaque. Afin de décrire le transfert de chaleur vers la structure, on utilise la densité volumique de puissance précédente §1.2. Cette source est pondérée par une fonction assurant la constance de la puissance fournie à la structure (cf. tableau 1).

Les plaques sont initialement à 20°C et ferritiques. Elles subissent une perte de chaleur par leur surface externe, par radiation  $q_r = \varepsilon \cdot \sigma (T - T_0)^4$  avec  $\varepsilon = 0.8$  et  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$  et par convection (supposée constante)  $q_c = 25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

### 3.2 Résultats et discussion

Sur la figure 2, on montre les micrographies obtenues après soudages des plaques en T et à clin à mi-distance du cordon. Les résultats de simulation y sont superposés. Il s'agit de deux courbes correspondant aux iso valeurs de la température à 1505°C (température de fusion) et 867°C (température d'austénitisation). Ces photos mettent en évidence une prédiction suffisante de la forme du bain de soudure (vis-à-vis des résultats de distorsion) et sont utilisées pour valider la partie thermique du modèle.

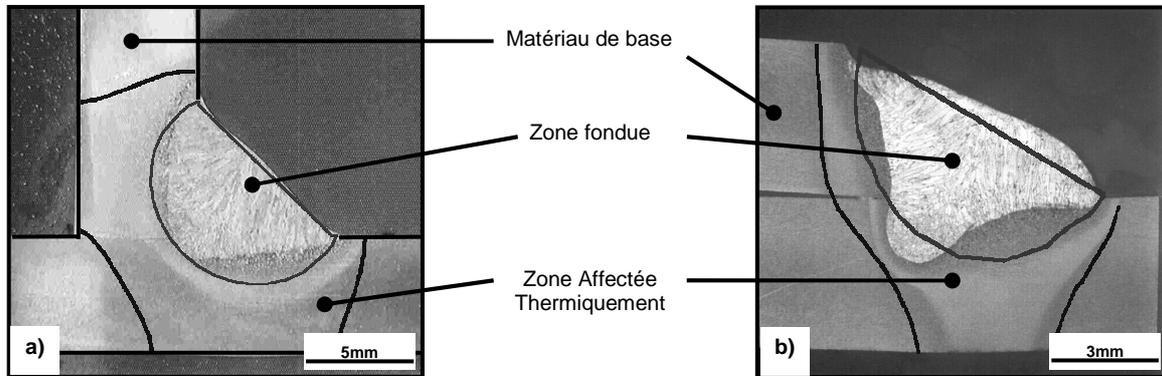


FIG. 2 – Comparatif essai/simulation des cordons de soudure a) en T et b) à clin.

Pour les deux cas de soudage, nous mesurons le déplacement de deux points éloignés du cordons. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 3a) pour le cas du soudage en T et sur la figure 3b) pour le soudage à clin. Les graphes mettent en évidence que le modèle prévoit de manière précise la distorsion des pièces.

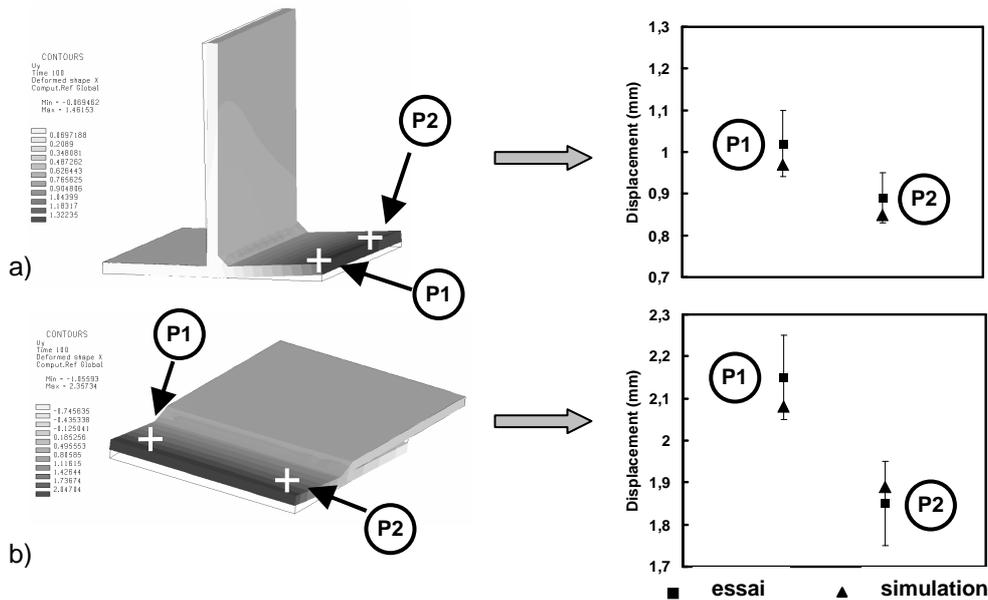


FIG. 3 – Comparatif essai/simulation des déplacements pour le soudage a) en T et b) à clin.

### 4 Cas test de la traverse arrière

L'objectif principal du modèle est la prédiction des distorsions de pièces industrielles comportant un grand nombre de cordons. La traverse étudiée se compose d'une vingtaine de pièces assemblées par 88 cordons déposés successivement. A la fin de la simulation du soudage, on effectue un calcul de débridage pour comparer les distorsions ainsi obtenue aux mesures.

### 4.1 Maillage et conditions aux limites

Cette simulation représente le soudage de plus de 5 mètres de soudure, à une vitesse moyenne de 12.5 mm/s pendant 20 minutes suivi d’un refroidissement de 50 minutes. La figure 4 montre le maillage ainsi que les zones de bridage utilisées. Des éléments 2D sont ajoutés à la surface des différentes pièces afin d’appliquer une condition de convection et de radiation.

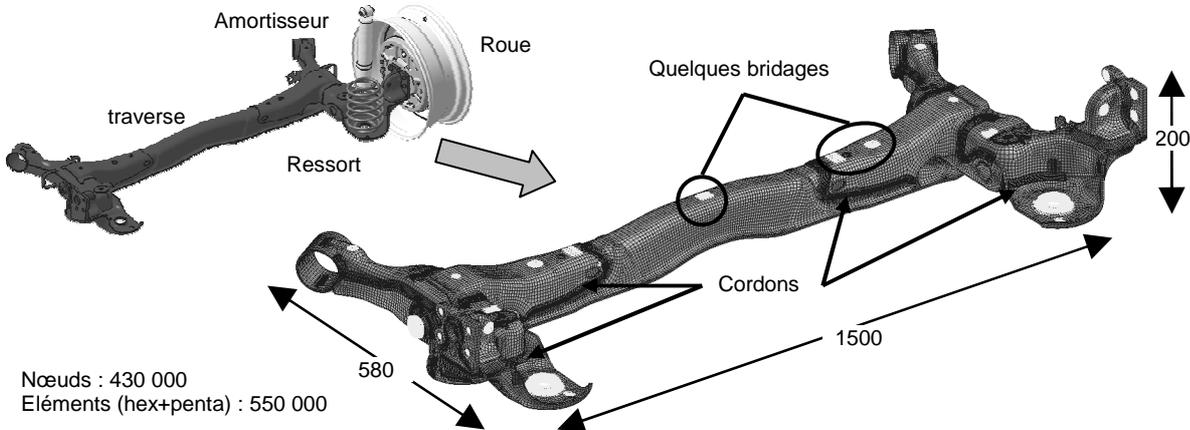


FIG. 4 – Maillage de la traverse arrière.

Les nœuds des zones de bridages sont supposés totalement encastrés sur toute l’épaisseur de chacune des pièces concernées. La densité volumique de puissance, les conditions de convection/radiation la température initiale ainsi que la structure initiale du matériau sont identiques à celles précédemment décrites. Le calcul a tourné pendant 4 jours sur une machine dont les caractéristiques sont données dans le tableau 2.

TAB. 2 – Caractéristiques de la station de calcul utilisée.

Carte mère	bi sockets
Processeurs	24 cores : 3 x Intel Xeon X5680 @ 3.33 GHz (8 cores)
Mémoire	48 Go : 24 x 4Go DDR3 PC10600 (1333 MHz)
OS	Suse 10 Linux Server (x86_64)
Version Sysweld	DMP, MPI pré requis : Intel MPI (3.2.2 minimum)

### 4.2 Résultats et discussion

Sur la figure 5a), on montre l’enveloppe des températures maximales permettant la visualisation des zones fondues. On compare sur la figure 5b), une micrographie représentative d’une tranche d’un des 88 cordons superposée avec le résultat de calcul (2 iso valeurs de température de 867°C et 1505°C). On y observe une bonne concordance entre l’expérience et la simulation.

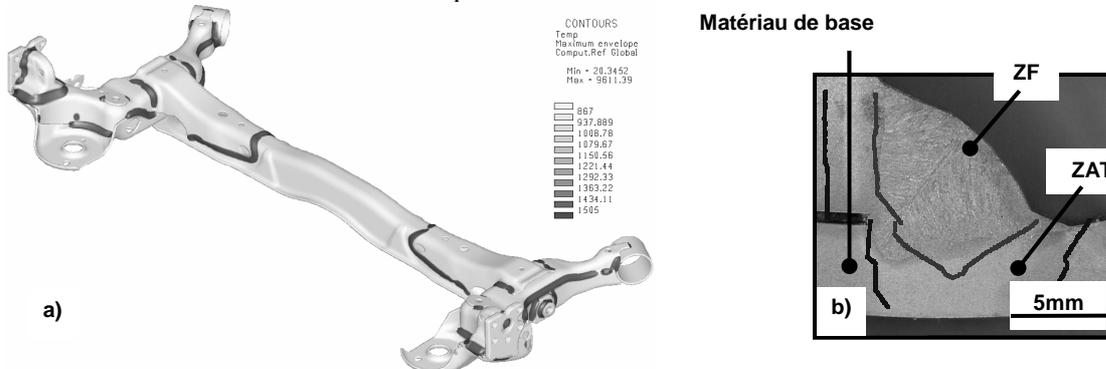


FIG. 5 – Résultat thermique de la traverse a) enveloppe des températures max, b) comparatif des macrographies essai/simulation.

Sur la figure 6, on montre la géométrie initiale (traits fins) ainsi que la déformée après débridage. On donne, sur le graphe de la figure 6, le déplacement de l'entraxe des coupelles ainsi que celui des bagues. Ces dimensions font parties des points de contrôles utilisés lors de la fabrication. Dans tous les cas, on y observe une bonne corrélation.

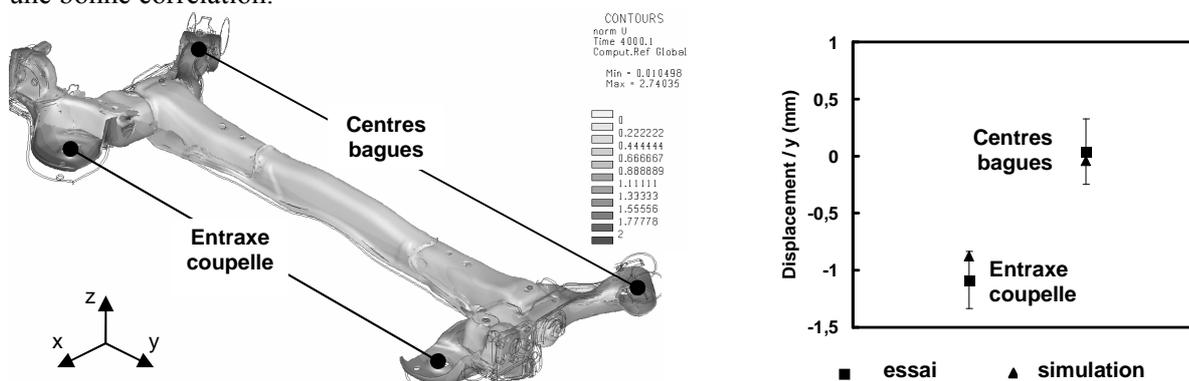


FIG. 6 – Distorsion de la traverse après débridage.

## Conclusions

Une nouvelle méthodologie s'appuyant sur un modèle éléments finis purement tridimensionnel a été mis en place pour réaliser des simulations transitoires de soudage. Celle-ci a permis de prendre en considération les phénomènes thermo-métallurgiques couplés à la mécanique sur des cas géométriquement simples et complexes. Après identification du modèle sur des cas tests, un cas industriel a été présenté. Ce dernier comporte une vingtaine de pièces assemblées par 88 cordons. La simulation a permis la prévision de distorsion de la structure de manière précise. Le travail en cours de validation l'utilisation du résultat métallurgique et mécanique dans un calcul de tenue en fatigue.

## Remerciements

Nous remercions ESI GROUP pour leur investissement dans la mise au point du présent modèle.

## Références

- [1] J. Mackerle, Finite element analysis and simulation of welding an addendum: a bibliography (1996-2001), *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 10, 295-318, 2004.
- [2] D.-H. Kang et al. Analysis of laser weldment distortion in the EDFA LD pump packaging, *Finite Elements in Analysis and Design*, 37, 749-760, 2001.
- [3] B. Saint-Germain, Etude expérimentale et numérique des distorsions de structures mécano-soudées, Thèse en mécanique et matériaux, Ecole Centrale Paris, 2006.
- [4] J.A. Goldak et al. A new finite element model for welding heat sources. *Metallurgical transactions*, 15b, 1984.
- [5] J.B. Leblond et J.C. Devaux A new kinetic model for anisothermal transformation metallurgical transformations in steel including effect of austenite grain size, *Acta Metallurgica*, 32, 1984.
- [6] P. Seyffarth et al. *Großer Atlas Schweiß-ZTU-Schaubilder*, Deutscher Verlag für Schweißtechnik DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1992.
- [7] D.P. Koistinen and R.E. Marburger A general equation prescribing extend of austenite-martensite transformation in pure Fe-C alloys and plain carbon steels, *Acta Metallurgica*, 7, 1959.
- [8] J.B. Leblond et al. Mathematical modelling of transformation plasticity in steels. part I & II, *International Journal of Plasticity*, 5, 1996.
- [9] P. Tekriwal, J. Mazumder, Transient and residual thermal strain-stress analysis of GMAW, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 113, 336-343, 1991.