



HAL
open science

Une méthode de prédiction de contrainte résiduelle dans une structure ayant subi un traitement de billage ultrason

Jun Li

► **To cite this version:**

Jun Li. Une méthode de prédiction de contrainte résiduelle dans une structure ayant subi un traitement de billage ultrason. 10e colloque national en calcul des structures, May 2011, Giens, France. pp.Clé USB. hal-00592805

HAL Id: hal-00592805

<https://hal.science/hal-00592805>

Submitted on 3 May 2011

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.

Une méthode de prédiction des contraintes résiduelles dans une structure mince ayant subi un traitement de billage ultrasonore

Jun Li^{1,2}, Thibaut Chaise², Daniel Nélias², Vincent Robin³,
Régis Kubler⁴, Marc Desvignes⁴, Said Taheri¹, Emmanuelle Rouhaud⁵

¹ LaMSID UMR EDF-CNRS-CEA 2832, EDF R&D, France, {jun.li, said.taheri}@edf.fr

² LaMCoS, INSA-Lyon, CNRS UMR5259, F69621, France, {jun.li, thibaut.chaise, daniel.nelias}@insa-lyon.fr

³ AREVA NP Lyon, France, vincent.robin@areva.com

⁴ Arts et Metiers ParisTech, Laboratoire Mecasurf, France, {regis.kubler, marc.desvignes}@ensam.eu

⁵ Université de Technologie de Troyes, France, emmanuelle.rouhaud@utt.fr

Résumé — Le billage ultrasonore (US) est un procédé de mise en compression des surfaces des pièces métalliques. Il permet d'y générer des contraintes de compression et retarde ainsi le risque d'amorçage et la propagation de fissures. On s'intéresse dans cette étude au niveau de contraintes résiduelles induit par le procédé ainsi qu'à la distorsion d'une structure mince ayant subi un traitement de billage US. Le principe du procédé de billage US est d'abord rappelé. Ensuite, une méthode de type semi-analytiques (SA) 3D est proposée dans cette étude. Les résultats obtenus par cette méthode numérique sont validés par comparaison à des résultats éléments finis (EF) obtenus avec différents codes commerciaux pour un calcul mono impact. Les résultats expérimentaux des essais de billage US sur des éprouvettes minces en Inconel 600 sont alors confrontés aux résultats numériques.

Mots clefs — Contraintes résiduelles, Billage US, Simulation numérique.

1 Introduction

Le billage ultrasonore (US) est un procédé de traitement à froid, qui consiste à projeter des billes de façon aléatoire sur la surface d'une pièce afin de générer une zone de compression. La présence de cette zone en compression tend à réduire les risques d'amorçage et de propagation de défauts.

Bien que les méthodes de simulation numérique de type dynamique par éléments finis soient capables d'estimer le niveau de contraintes résiduelles dans une pièce billée, les temps de calculs deviennent trop importants dès lors que l'on souhaite prendre en compte un nombre important d'impacts. Dans cette contribution, nous proposons une méthode numérique de type semi-analytique 3D, qui permet d'estimer dans un temps industriellement acceptable, la distorsion et l'état de contraintes résiduelles dans une structure mince après un traitement de billage US.

2 Procédé de billage US et dispositif expérimental

Un schéma explicatif du dispositif expérimental est représenté Figure 1(a). Un champ électrique sinusoïdal est délivré par un générateur. A l'aide d'un convertisseur, cette énergie électrique est transformée en vibrations ultrasonores amplifiées ensuite par un booster. L'énergie vibratoire est transformée en énergie cinétique des billes qui sont mises en mouvement au moyen de la partie terminale de l'ensemble acoustique, appelée "Sonotrode". Les billes sont maintenues dans une enceinte (appelée aussi chambre) en haut de laquelle est positionnée la pièce à traiter.

Dans le cas de notre montage expérimental, une éprouvette d'épaisseur fine est fixée sur cette chambre au moyen de 4 vis, (cf. Figure 1(b)). Les impacts successifs des billes vont changer l'état et les propriétés mécaniques du matériau et générer un gradient de déformation plastique de compression en peau et en sous couche immédiate de la pièce traitée. La libération de la pièce à l'issue du

traitement entraîne une redistribution des contraintes résiduelles qui fait fléchir l'éprouvette, en un arc convexe par rapport à la surface billée comme schématisé sur la Figure 1(c). De nombreux paramètres peuvent influencer les résultats des essais. Ils sont principalement liés aux billes (géométrie, nature, diamètre) et aux paramètres du procédé tels que la vitesse des billes entrant en contact avec la pièce à traiter et le temps de traitement qui est lié au taux de recouvrement défini plus bas.

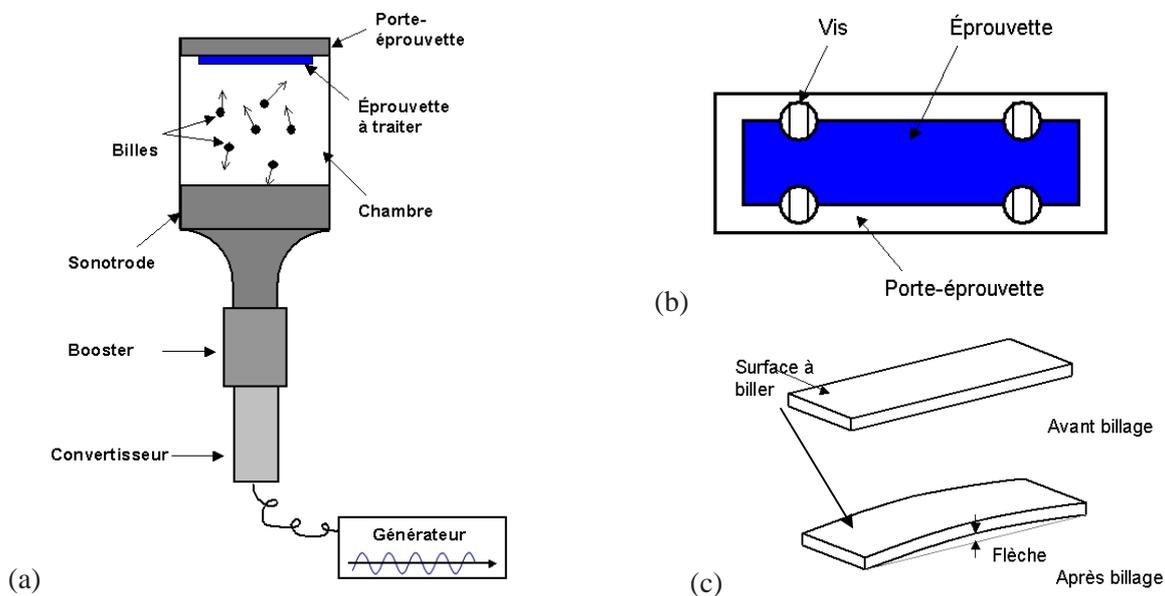


Figure 1 – Schéma explicatif du dispositif expérimental - (a) vue d'ensemble, (b) système de fixation de l'éprouvette, (c) sens de la flèche due au billage

Les essais de billage US ont été réalisés, à l'université de technologie de Troyes, sur des éprouvettes en Inconel 600 (alliage à base nickel) de dimension 60 x 18 x 2 mm. Les éprouvettes sont détensionnées par un traitement thermique afin de réduire au maximum les contraintes d'usinage. Les billes sont en acier 100Cr6 de diamètre 4 mm. L'amplitude et la fréquence de la sonotrode sont définies de manière à ce que les billes aient une vitesse initiale théorique de 4 m/s. Les taux de recouvrement considérés varient de 100% à 200%. La figure ci-après illustre les différents taux de recouvrement obtenus. Pour atteindre un taux de recouvrement supérieur à 100%, on part de l'hypothèse qu'il est proportionnel au temps d'exposition.

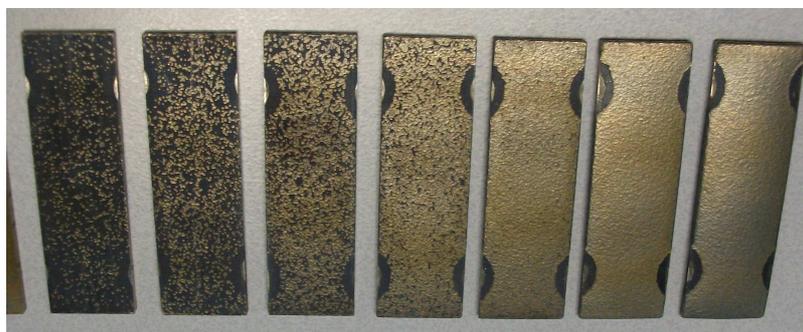


Figure 2 – Epreuves traitées avec différents taux de recouvrement (Les éprouvettes sont teintées pour une meilleure visibilité.)

A l'issue de l'essai, les profils de contraintes résiduelles sont déterminés au centre de la plaque par diffraction des rayons X et la courbure est mesurée au moyen d'une machine à mesurer tridimensionnelle.

3 Modélisation numérique

Jusqu'à présent, la modélisation de l'ensemble des impacts dans un procédé de billage US pour atteindre un taux de recouvrement de 100% n'est pas envisageable en raison des coûts de calcul. Toutefois, après saturation, on peut supposer que l'état de déformations plastiques et de contraintes résiduelles dans une pièce billée est homogène dans des plans parallèles à la surface, même si les billes entrent en collision avec la pièce de façon aléatoire. Par conséquent, la méthodologie proposée consiste à étudier une zone locale représentative de la pièce dans le but de minimiser le nombre d'impacts à simuler. Cette zone élémentaire est constituée du triangle reliant les centres de trois impacts successifs normaux équidistants (Figure 3).

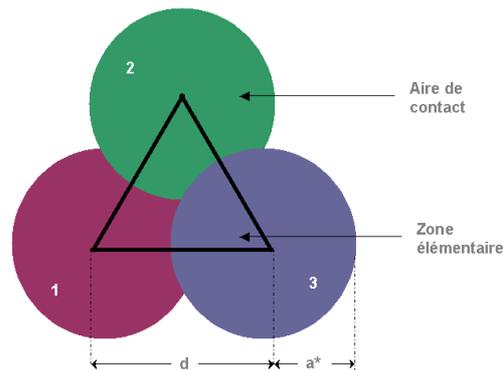


Figure 3 - Zone élémentaire pour un taux de recouvrement à 100%

Cette configuration nécessite la définition du taux de recouvrement qui aura un impact sur le niveau de contraintes et de déformations de la structure traitée par le procédé. Il correspond au rapport entre la surface impactée et la surface à traiter qui peut être exprimé par la formule suivante :

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{3}} \left(\frac{a^*}{d} \right)^2 \quad (1)$$

avec T le taux de recouvrement, d la distance entre les centres des impacts et a* le rayon de l'empreinte due au contact plastique, qui est ici déterminé numériquement avec le code SA sur le premier impact.

Les simulations sont menées au moyen d'un code développé au LaMCoS de l'INSA-Lyon. Cet outil est basé sur les méthodes semi-analytiques (SA) adaptées au problème du contact élasto-plastique [1-3]. Les calculs sont réalisés en 3D sur un massif semi-infini. L'avantage de la méthode SA par rapport à la méthode EF est qu'elle permet un gain de temps de calcul considérable. En revanche, cette hypothèse de massif semi-infini ne permet pas de simuler le comportement d'une structure mince billée correspondant à notre montage expérimental. Pour ce faire, une stratégie est mise en œuvre.

Pour déterminer le niveau de contrainte et de déformation dans l'ensemble de la structure, le champ de déformation plastique obtenus avec le code semi-analytique dans la zone élémentaire est transporté dans un modèle éléments finis dont les conditions aux limites sont proches de nos conditions expérimentales. Le modèle EF est discrétisé en éléments hexaédriques linéaires. Le champ de déformations inélastiques moyennées issu du code SA est projeté aux points de Gauss des éléments. Aucun chargement n'est appliqué sur la plaque. Les contraintes sont enfin calculées en résolvant l'équation d'équilibre statique dans un état relâché c'est à dire libre de tout bridage.

Dans le cadre de cette étude, les résultats finaux des calculs EF sont issus des calculs réalisés avec le code Systus/Sysweld [4] avec la méthodologie de transport de champ des déformations inélastiques

provenant du calcul semi-analytique et présentée précédemment. L'écrouissage du matériau est considéré comme isotrope. Les paramètres de la loi de comportement ont été identifiés sur la base d'essais de traction monotone.

4 Comparaison des résultats numériques et expérimentaux

Les résultats numériques et expérimentaux sont comparés tout d'abord au niveau des contraintes résiduelles puis en terme de la distorsion de la structure.

On remarque sur les Figures 4 et 5 un bon accord entre les résultats numériques et expérimentaux et ce quelque soit le sens d'observation. L'écart relativement plus important sur la surface provient probablement de l'insuffisance du traitement thermique de détensionnement au regard de l'écrouissage important de l'éprouvette en surface suite aux opérations d'usinage. Cette hypothèse est par ailleurs soutenue par la réduction de l'écart avec le taux de recouvrement. En effet, plus le taux de recouvrement sera important, plus le matériau sera écroui et moins les conditions initiales (écrouissage lié à l'usinage) auront d'influence.

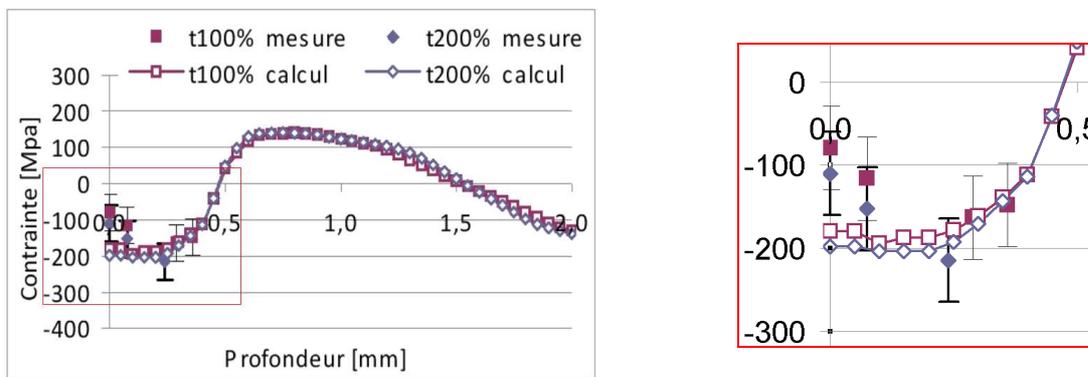


Figure 4 – Comparaison des contraintes résiduelles dans le sens longitudinal obtenues numériquement et expérimentalement pour une vitesse initiale de billes de 4 m/s et avec les taux de recouvrement de 100% et 200%

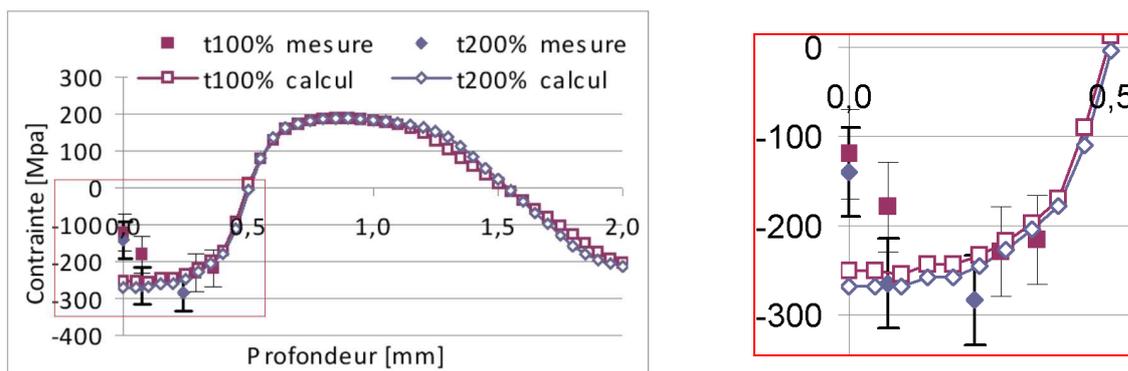


Figure 5 – Comparaison des contraintes résiduelles dans le sens transversal obtenues numériquement et expérimentalement pour une vitesse initiale de billes de 4 m/s et avec les taux de recouvrement de 100% et 200%

La Figure 6 nous montre encore que les résultats obtenus numériquement sont en bonne adéquation avec les résultats expérimentaux. On observe un écart de 4% au niveau de la flèche. A l'inverse de l'évolution de l'erreur sur les contraintes avec le taux de recouvrement, on remarque pour la déformation aux bords, que l'écart croît avec l'augmentation du taux de recouvrement. Cette

évolution peut être liée à une imprécision des conditions aux limites au niveau des vis de maintien dans la modélisation. En effet, plus le taux de recouvrement sera important, plus la structure va se déformer. La déformation va s'étendre sur un domaine plus ample et les conditions aux limites vont alors impacter le résultat obtenu.

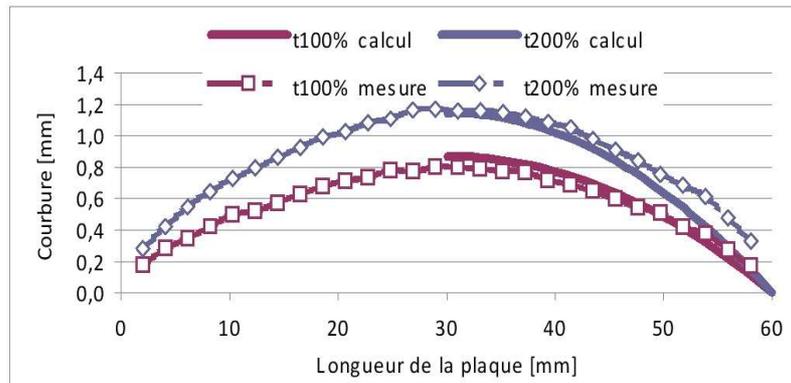


Figure 6 – Comparaison de la courbure longitudinale obtenue expérimentalement et numériquement avec une vitesse initiale de billes de 4 m/s et avec les taux de recouvrement de 100% et 200%

5 Benchmark du mono impact

Dans une seconde partie, un benchmark a été réalisé dans le cas d'un mono impact entre le code semi-analytique et les codes éléments finis Abaqus Explicit, Systus/Sysweld et Code_Aster (résultats non encore exploités).

Le massif impacté est en TA6V, un alliage à base Titane qui suit une loi de comportement de type Ramberg-Osgood $\sigma = \sigma_0 + K.(\epsilon_p)^n$, où σ_0 est la limite élastique initiale, ϵ_p est la déformation plastique et K, n sont des coefficients du matériau. Dans le cas présent, les valeurs de K et n sont respectivement de 3270,6MPa et 0,441. L'érouissage du matériau est supposé isotrope. La bille est en acier 100Cr6 de diamètre 0,6 mm. Elle est considéré comme étant purement élastique. Cette bille est projetée sur le massif avec une vitesse initiale de 40m/s avec un angle d'incidence nul. Les forces d'inertie ne sont pas prises en compte. Le frottement est supposé nul. Les propriétés mécaniques des matériaux du massif et de la bille sont rappelées dans le tableau ci-après.

	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Module de Young (GPa)	Coefficient de Poisson
Massif	4400	111	0,29
Bille	7800	207	0,29

Tableau 1 – Propriétés mécaniques des matériaux

Sachant que le modèle SA utilise la méthode de la transformée de Fourier rapide (FFT) pour accélérer la résolution, le maillage a été réalisé à partir de cuboïdes de taille identique, dont le seul point de calcul est situé au centre du cube. Le modèle Abaqus repose sur un maillage d'éléments hexaédriques linéaires sous le contact et tétraédriques dans le reste du massif. Une moitié de la structure est modélisée. En ce qui concerne le modèle Systus/Sysweld, un quart de la structure est pris en compte avec des éléments hexaédriques quadratiques sous-intégrés (Figure 7). Dans les deux modèles EF, des éléments hexaédriques ont été choisis dans la zone de contact dont la taille minimale d'élément est de 8 x 8 x 4 μm^3 .

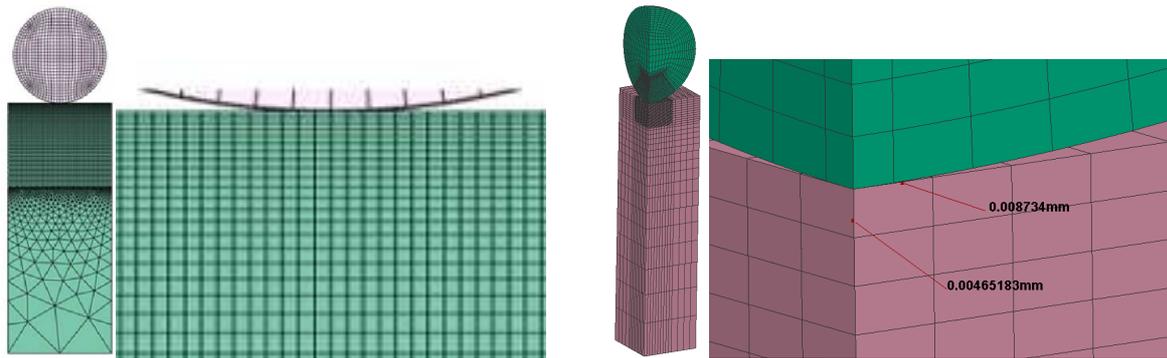


Figure 7 – Maillage des modèles numériques – (gauche) Abaqus, (droite) Systus/Sysweld

Le Tableau 2 récapitule le type d'éléments et le nombre de nœuds de chaque modèle. Les temps de calcul sont aussi donnés à titre indicatif car les processeurs utilisés sont très différents.

	Méthode SA	Modèles EF	
		Abaqus	Systus/Sysweld
Type d'éléments du maillage	Cuboïde à un point de calcul central	Eléments linéaires à intégration réduite	Eléments quadratiques à intégration réduite
Nombre de nœuds	Massif semi-infini composé de cuboïdes de taille identique	139 693	139 557
Temps de calcul	≈ 3h	≈ 22h	≈ 10h

Tableau 2 – Récapitulatif du type d'élément, du nombre de nœuds et du temps CPU à titre indicatif pour les différents modèles

Les profils de déformations plastiques cumulées et de contraintes résiduelles équivalentes de von Mises sont tracés au centre de l'impact en fonction de la profondeur sur la Figure 8.

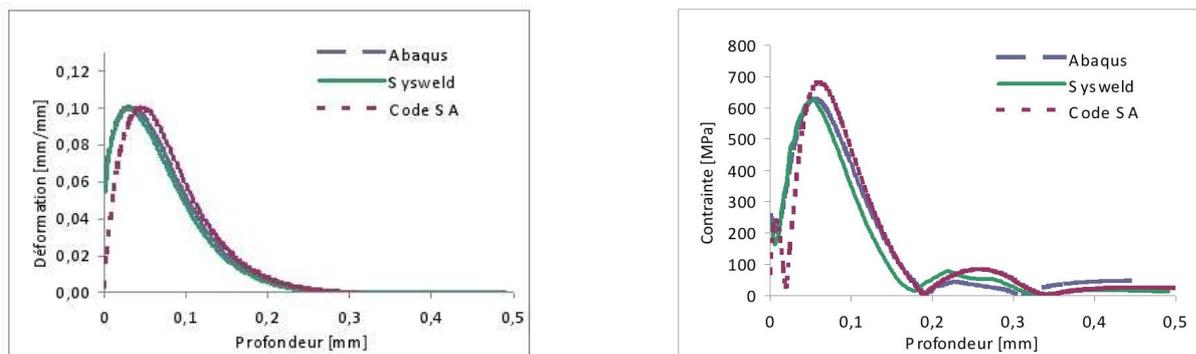


Figure 8 – Résultats des calculs mono impact – (gauche) déformation plastique cumulée, (droite) contrainte équivalente de von Mises

Les résultats montrent une bonne concordance entre les calculs réalisés avec les codes de type éléments finis. La profondeur pour laquelle la déformation plastique cumulée atteint la valeur maximale est légèrement plus importante même si l'amplitude reste proche. Notons que par la méthode SA, le calcul des déformations plastiques est effectué dans la géométrie initiale sous l'hypothèse des petites perturbations. Tandis que pour les modèles EF une formulation lagrangienne actualisée est adoptée.

Des constatations similaires peuvent être faites pour la contrainte équivalente de von Mises.

Malgré ces quelques écarts, les résultats des codes EF et SA restent proches.

6 Conclusion

Un modèle multi-impact permettant la prédiction de la flèche et du niveau de contraintes résiduelles d'une structure mince après le traitement de billage US a été proposé. Ce modèle est basé sur un code semi-analytique dont l'avantage est un gain de temps de calcul considérable par rapport aux codes éléments finis sans autant sacrifier la qualité des résultats. Ce point est vérifié en mono impact par comparaison avec les résultats issus des codes éléments finis tels que Abaqus et Systus/Sysweld.

Cette méthode de prédiction est confrontée à l'expérience avec un billage US de plaques minces. Les contraintes résiduelles calculées sont en bon accord avec celles mesurées. La flèche de l'éprouvette après billage est estimée à quelques pourcents près.

Références

- [1] C. Jacq, D. Nélias, G. Lormand, D. Girodin. *Development of a three dimensional semi-analytical elastic-plastic contact code*. Journal of Tribology, 124:653–667, 2002.
- [2] D. Nélias, V. Boucly, M. Brunet. *Elastic-plastic contact between rough surfaces: proposal for a wear or running-in model*. ASME Journal of Tribology, 128(2):476–485, 2006.
- [3] D. Nélias, E. Antaluca, V. Boucly, V. Cretu. *A 3d semi-analytical model for elastic-plastic sliding contacts*. ASME Journal of Tribology, 129(4):761–771, 2007.
- [4] *Systus/Sysweld. User's manual*. ESI Group, 2008.

