HAL
open science

Simulation 3D du soudage par frottement malaxage (FSW) à l'aide d'une formulation Arbitrairement Lagrangienne ou Eulérienne (ALE)

Sabrina Gastebois, Lionel Fourment

To cite this version:

Sabrina Gastebois, Lionel Fourment. Simulation 3D du soudage par frottement malaxage (FSW) à l'aide d'une formulation Arbitrairement Lagrangienne ou Eulérienne (ALE). CSMA 2013 - 11ème colloque national en calcul des structures, May 2013, Giens, France. hal-00847475

HAL Id: hal-00847475

https://minesparis-psl.hal.science/hal-00847475v1

Submitted on 23 Jul 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.

Simulation 3D du soudage par frottement malaxage (FSW) à l'aide d'une formulation Arbitrairement Lagrangienne ou Eulérienne (ALE)

Sabrina GASTEBOIS [1]*, Lionel FOURMENT [2]

1 MINES ParisTech, CEMEF, sabrina.gastebois@mines-paristech.fr
2 MINES ParisTech, CEMEF, lionel.fourment@mines-paristech.fr
* Auteur correspondant

Résumé — Le procédé FSW est un procédé de soudage par frottement et malaxage dont la complexité résulte d'un très fort couplage thermomécanique. Nous présentons une nouvelle formulation Arbitrairement Lagrangienne ou Eulérienne (ALE) en vue de le modéliser avec précision. Son utilisation montre qu'elle est parfaitement adaptée à la simulation du FSW en 3D. Elle permet notamment de simuler des soudures de qualité ou la formation de défauts tels que les bavures ou les trous tunnels qui peuvent apparaître en arrière du pion. Des améliorations ont été apportées au logiciel afin d'augmenter la précision de la simulation. Un filetage numérique a ainsi été modélisé sur l'outil pour augmenter le malaxage du matériau. Le transport des champs continus a été perfectionné pour gérer des instabilités de surface.
Mots clés — soudage par frottement et malaxage, FSW, formulation ALE, remaillage, transport de champ

1. Introduction

L'industrie aéronautique cherche à remplacer l'assemblage par rivetage des tôles par le procédé de soudage par frottement malaxage (FSW) (cf Fig. 1) [1] afin d'alléger les structures. Un outil cylindrique en rotation, constitué d'un pion et d'un épaulement, entre en contact avec les plaques à souder et se déplace le long du cordon de soudure. Le frottement de l'épaulement, avec les tôles assemblées selon la configuration de soudage voulue, génère de la chaleur qui amène le matériau à un état pâteux. Le pion assure le malaxage en profondeur des tôles en contact. Le matériau n'étant pas porté à son point de fusion, il voit ses propriétés thermomécaniques peu dégradées (peu de porosité, de fissurations à chaud, moins de contraintes résiduelles).

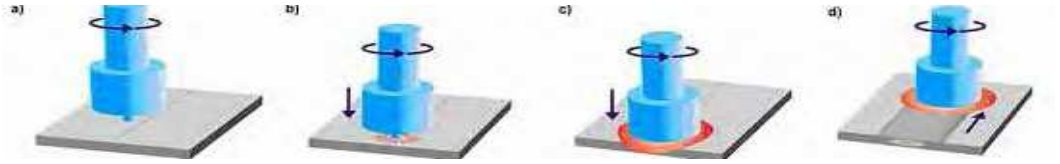

Fig. 1. Etapes du procédé de soudage par frottement et malaxage (FSW)

La simulation numérique permet une étude en profondeur de ce procédé complexe. Elle a pour objectif à la fois d'évaluer l'influence de différentes géométries d'outils et d'optimiser le procédé. La complexité de l'écoulement autour de l'outillage, ainsi que la grande sensibilité du procédé à la taille de la zone de contact, plaident pour l'utilisation d'une formulation Arbitrairement Lagrangienne ou Eulérienne (ALE) comme utilisée dans [2, 3, 4]. Cette approche a clairement démontré sa faisabilité dans [2]. Son atout principal est de modéliser précisément le contact outil / matière. Pour cela un contact unilatéral est généralement utilisé [2, 3] résultant en un flux de matière réaliste autour du pion. La méthode de régularisation de maillage proposée dans [2] n'autorisait pas le calcul parallèle et ne convenait pas à tous les procédés de mise en forme. Une nouvelle méthode de régularisation de maillage a donc été développée dans [5, 6] pour le laminage de tôles et a été parallélisée dans [6, 8].

Cette approche repose sur la projection de la nouvelle surface régularisée sur l'ancienne surface résultant de la réactualisation lagrangienne du domaine et lissée par une méthode locale de Nagata [5, 6, 7]. Cet algorithme de lissage permet la détection automatique des singularités tels que les coins ou les arrêtes.

L'objectif de ce travail est d'évaluer cette nouvelle formulation ALE sur la simulation numérique du FSW, d'améliorer la précision de l'algorithme de transport utilisé et d'enrichir le modèle mécanique pour prendre en compte le filetage des outils. Après la présentation de la formulation ALE utilisée, certains points relatifs à la précision du transport des champs sont discutés avant de décrire le modèle de filetage. Ce papier expose ensuite les résultats de l'évaluation de cette formulation, sur un problème de soudage FSW.

2. La formulation ALE

Nous détaillons ci après la formulation Arbitrairement Lagrangienne Eulérienne (ALE) étudiée [2, 5, 6, 8]. Elle repose sur une approche découplée. A chaque incrément de calcul, au temps *t*, les trois étapes suivantes sont réalisées :

- la première étape est un calcul Forge habituel ou les champs de pression p et de vitesse matérielle V sont calculés,
- la seconde étape concerne le calcul de la vitesse de maillage basé sur une régularisation du maillage,
- la troisième étape repose sur les méthodes de transfert de champ présentées dans [5]

La seconde étape est la plus délicate pour la simulation des procédés de mise en forme, elle centralise notre attention dans ce papier. Le calcul de la vitesse de maillage se fait en deux étapes :
- une simple opération de barycentrage des nœuds du maillage,
- la projection des nœuds de surface sur le domaine à l'instant $t + \Delta t$,

Cette seconde étape est particulièrement critique. De sa précision dépend la conservation du domaine au cours du temps et donc la précision de la formulation ALE. L'approche suivie consiste à calculer la surface du domaine à l'instant $t + \Delta t$ par une simple réactualisation lagrangienne $x_{t+\Delta t} = x_t + v_t \Delta t$. Toutefois, cette méthode s'avère trop simple et trop diffusive, entraînant des pertes de volume et de précision trop importantes [2,6]. Cette opération de projection peut être améliorée en augmentant l'ordre d'interpolation de la surface du domaine grâce à une méthode de lissage [6] qui constitue le cœur de l'étape de régularisation.

Les algorithmes de cette formulation permettent des calculs en parallèle suivant une approche par partitionnement de domaines où chaque processeur ne connaît qu'une partie du domaine de calcul [9].

2.1. Le calcul de la vitesse de maillage

Le calcul de la vitesse de maillage utilise un algorithme itératif de Jacobi. A chaque itération, un barycentrage des nœuds à partir des positions des nœuds voisins (appartenant à un même élément) est réalisé sur le maillage ALE au temps $t + \Delta t$. Ceci permet de conserver une bonne qualité de maillage. Afin de conserver également le volume, les nœuds frontières du maillage régularisé sont projetés sur la surface du maillage lagrangien réactualisé [2, 5] :

$$X_p^{it} = \prod X_{m,b}^{it} \qquad \textbf{(1)}$$

On itère l'algorithme jusqu'à ce que les variations sur X_p^{it} soient inférieures à une tolérance prescrite ou qu'un nombre maximal d'itérations nbiter soit atteint :

$$\frac{\left\| \max_{m\in\Omega}(V_{may,m}^{it} - V_{may,m}^{it-1}) \right\|}{\max_{n\in\Omega}\left\| V_n^{it} \right\|} < \text{convlim} \tag{2}$$

La vitesse de maillage est calculée à partir des coordonnées projetées, et utilisée à chaque pas de temps pour actualiser le maillage ALE :

$$V_{may,m}^{it} = \frac{X_p^{it} - X_m^{t}}{\Delta t}, \quad X^{t+\Delta t} = X^{t} + V_{may}^{t+\Delta t}\,\Delta t \tag{3}$$

2.2. La méthode de Nagata

Lors de la projection des nœuds de la surface ALE au temps t sur la surface lagrangienne réactualisée au temps $t+\Delta t$, une variation de volume due à une perte de précision a lieu. Afin de réduire cette imprécision, une solution est d'augmenter l'interpolation de la surface lagrangienne afin de transformer la surface C^0 en une surface C^1. Des éléments quadratiques sont utilisés à la place des éléments linéaires, une fonction de forme hiérarchique de degré 2 est ajoutée aux fonctions de formes linéaires habituelles pour interpoler deux nœuds par une arête courbe [6, 7] (cf Fig. 2).

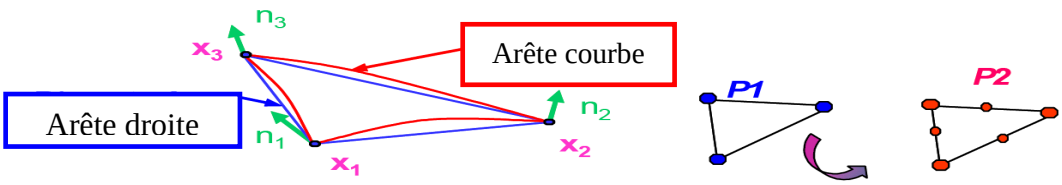

Fig. 2. Surface de Nagata

La précision de la construction de ces arêtes courbes repose en grande partie sur la précision du calcul des normales à la surface. Pour cela le calcul de normales *votées* [6, 10] s'avère très efficace. Une matrice de corrélation en chaque nœud *k* est calculée à partir des faces contenant le nœud :

$$\begin{cases} M = \sum_f \omega_f n_f n_f^T \\ \omega_f = \dfrac{A_f}{\max_f A_f} \exp\left(\dfrac{3\left\| KC_f \right\|}{\max_f \left\| KC_f \right\|} \right) \end{cases} \tag{4}$$

Où A_f est la surface de la face f, C_f son barycentre et n_f sa normale extérieure.

Les valeurs propres de cette matrice sont ensuite calculées pour déterminer les singularités géométriques (arête ou coin) du noeud *k*. En FSW, ceci permet de repérer automatiquement les arêtes et les coins qui peuvent se former au cours du procédé lors de l'apparition de défauts ou de bavures. Puis le calcul des normales est effectué par patch et *voté* en moyennant les normales n_f d'un ensemble E défini au préalable et dont les faces respectent un angle minimal avec la face du nœud considéré :

$$n^k = \sum_{f\in E} \omega_f n_f \tag{5}$$

2.3. Le transport des champs nodaux

Une étape importante de la formulation ALE concerne le transport des champs de l'ancien maillage ALE sur le nouveau, à chaque pas de temps. Nous détaillons le transport des champs P1 définis aux

nœuds tels que la température, les vitesses ou les pressions. Soit ξ une variable C^1 à transporter, elle s'écrit au temps $t+\Delta t$:

$$\xi_{\mathrm{ALE}}^{\mathrm{t+\Delta t}} = \xi_{\mathrm{ref}}^{\mathrm{t}} + \int_{\Delta t} d_{tg}\xi, \quad d_{tg}\xi = d_t\xi - c\nabla\xi \tag{6}$$

Où $d_{tg}\xi = d_t\xi - c\nabla\xi$ est la dérivée de grille au temps t et $c = V_{mat} - V_{may}$ est la vitesse convective. La linéarisation de la dérivée particulaire $d_t\xi$ et de la dérivée de grille $d_{tg}\xi$ au premier ordre avec la méthode des différences finies s'écrit :

$$d_t\xi = \frac{\xi_{lag}^{t+\Delta t} - \xi^t}{\Delta t}, \quad d_{tg}\xi = \frac{\xi_{ale}^{t+\Delta t} - \xi^t}{\Delta t} \tag{7}$$

Ainsi, l'expression de la variable ALE au temps $t+\Delta t$ est la suivante :

$$\xi_{\mathrm{ALE}}^{\mathrm{t+\Delta t}} = \xi_{\mathrm{LAG}}^{\mathrm{t+\Delta t}} - (V_{mat} - V_{may})\nabla\xi^{\mathrm{t+\Delta t}}\Delta \mathrm{t} \tag{8}$$

où le gradient du champ ξ est constant par élément et calculé sur l'élément amont à la direction de la vitesse convective (cf Fig.3) [2,5]:

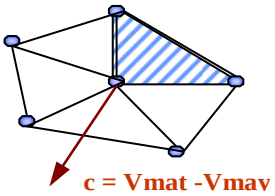

Fig. 3. Elément amont et vitesse convective

L'opérateur de transport repose donc sur la localisation d'un élément amont à la direction de la vitesse convective pour y calculer le gradient du champ ξ. Compte tenu de la complexité de l'écoulement étudié, il existe un ensemble de nœuds dont le déplacement amont peut sortir du domaine. L'élément amont de ces nœuds est obtenu en projetant l'antécédent au nœud dans la direction normale à la face. Ainsi cet élément amont peut subir une variation de température dans les directions normales et tangentielles. Ce gradient dans la direction normale à la face du nœud conduit, par intégration, à des valeurs aberrantes au cours des calculs. Cela s'explique par le fait que le gradient n'est pas connu dans cette direction, et qu'il est donc préférable de le considérer comme nul. Pour cela, seules les composantes du gradient dans la direction tangente sont considérées :

$$\vec{\nabla T} = \vec{\nabla T} - \nabla T_n\,\vec{n} = \vec{\nabla T} - (\nabla T_x n_x + \nabla T_y n_y + \nabla T_z n_z)\cdot\vec{n} \tag{9}$$

3. Améliorations du modèle et application au soudage FSW

3.1. Modélisation du filetage

Le malaxage du matériau produit par le pion de soudage joue un rôle très important sur la qualité de la soudure. Afin d'augmenter son effet, le pion est souvent fileté. Ce filetage est modélisé suivant la méthode utilisée dans [2, 11] ; elle consiste à ajouter une composante verticale à la vitesse de l'outil, dans le calcul du frottement. Cette vitesse additionnelle dépend du pas de vis et de la vitesse de rotation de l'outil :

$$V_{outil}^{fileté} = V_{outil} + V_{vis} n_{rot}\,, \quad V_{vis} = \frac{2\pi\,\Omega\,p}{60} \tag{10}$$

Où $V_{vis}(mm/s)$ est la vitesse de vis, $\Omega(tpm)$ est la vitesse de rotation de l'outil, p est le pas de vis. L'équation du frottement de Norton est alors modifiée selon les équations suivantes :

$$\begin{cases} \tau = -\alpha_f K \left|\Delta v_t\right|^{p-1} \Delta v_t \\ \Delta v_t = (v - v_{outil}^{fileté}) - (v - v_{outil}^{fileté}) \cdot n \end{cases} \tag{11}$$

3.2. Simulation du procédé FSW

Le cas de soudage considéré est celui d'un aluminium en pleine tôle, sans calcul thermique dans les outils (cf Fig. 4). La phase du procédé étudiée est celle de soudage, ainsi le profil de température de la plaque est initialisé à partir d'un profil de température issu d'un calcul de plongée. Le matériau est modélisé par une loi de Norton-Hoff, dont le coefficient de sensibilité à la vitesse de déformation m et la consistance K, évoluent en fonction de la température [2] :

$$\bar{\sigma} = K(T)\left(\sqrt{3}\dot{\bar{\varepsilon}}\right)^{m(T)} \tag{12}$$

Une loi de Norton (11) modélise le frottement entre l'outil et la plaque [2]. Une formulation eulérienne est utilisée aux bords du domaine et une formulation ALE à l'intérieur. Les calculs sont réalisés en parallèles sur 4 processeurs. La plaque contient environ 24 000 nœuds.

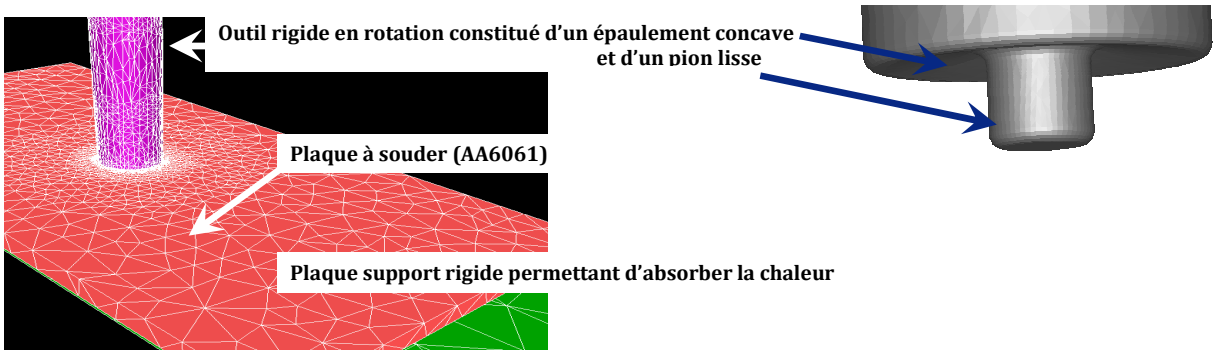

Fig. 4. Description du cas de soudage

L'échauffement du matériau, généré par le frottement de l'outil, influe sur les propriétés mécaniques du matériau. L'utilisation d'un coefficient de transfert thermique inadapté entre les outils et le matériau peut engendrer un refroidissement trop important du matériau. Sa viscosité augmente ce qui provoque la perte de contact avec le pion, formant ainsi une cavité à l'arrière (cf Fig. 5).

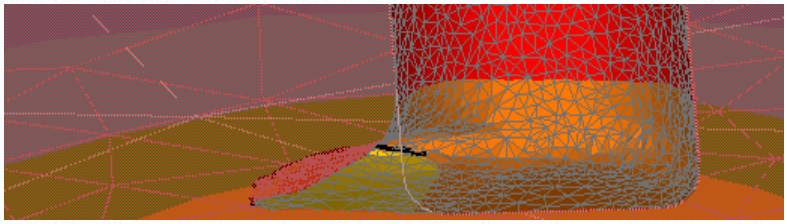

Fig. 5. Cavité en arrière de l'outil

Le logiciel est capable de simuler la perte de contact entre l'outil et la plaque car les nœuds à l'interface sont représentés par un contact unilatéral. Ils peuvent donc se décoller dans la direction normale à l'outil. Si le matériau n'a pas de raisons physiques de quitter le contact, on observe alors

que ce dernier est parfaitement conservé sous l'épaulement (cf Fig. 6) ainsi qu'autour du pion. La matière est bien recollée lorsqu'elle passe de la zone d'avance à la zone de retrait, ce qui montre la précision de l'algorithme de projection intégré au calcul de la vitesse de maillage. Etre capable de prédire correctement le contact est essentiel, c'est en effet un paramètre directement lié au frottement et donc aux échanges de chaleurs outil/matière [12].

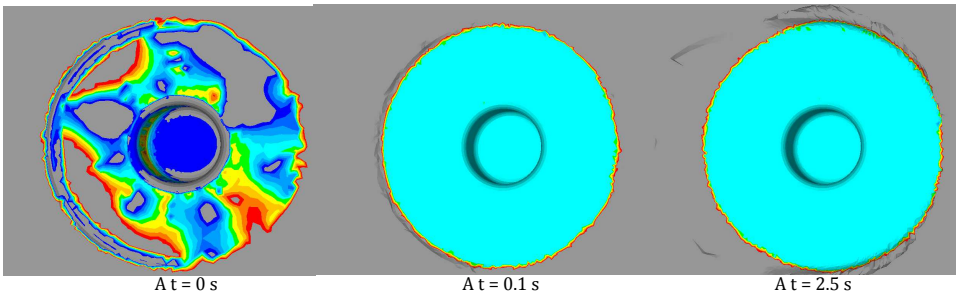

Fig. 6. Etat du contact au cours de la simulation – la couleur bleu correspond à des nœuds en contact.

Les figures suivantes présentent une initialisation particulière de la simulation du soudage en partant d'une plaque uniformément chauffée à 100 degrés avec un outil en rotation mais fixe en translation, sans et avec filetage. Le filetage permet d'augmenter le frottement dans la hauteur du pion et de chauffer davantage le matériau pour le rendre plus malléable (cf Fig. 7). Ainsi lorsque dans un second temps l'outil se met à avancer, la perte de contact à l'arrière du pion est diminuée voir annulée (cf Fig. 8).

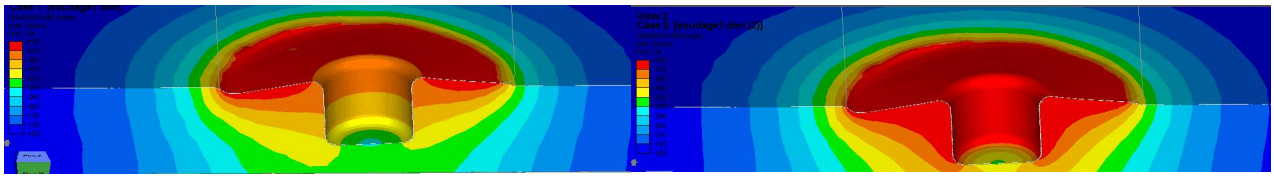

Fig. 7. Echauffement avec un pion non fileté (gauche) ou fileté (droite) (échelle = 100° – 450°)

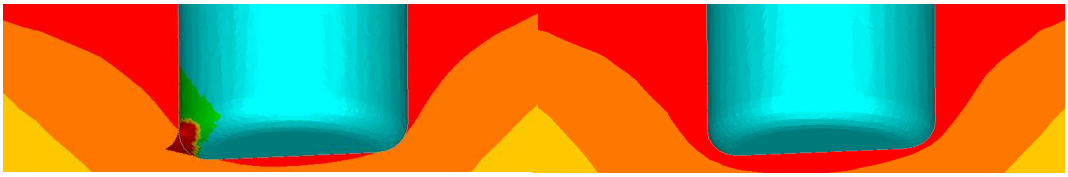

Fig. 8.Etat de contact sur le pion avec un pion non fileté (gauche) ou fileté (droite) (température dans le plan)

Si la profondeur de pénétration de l'épaulement est trop élevée, une certaine quantité de matière est rejetée sur les bords de l'outil ce qui crée des bavures. Avec la méthode de régularisation de maillage développée [3,4], les coins et les arêtes sont détectés automatiquement, ce qui permet de modéliser la formation de ces bavures (cf Fig. 9).

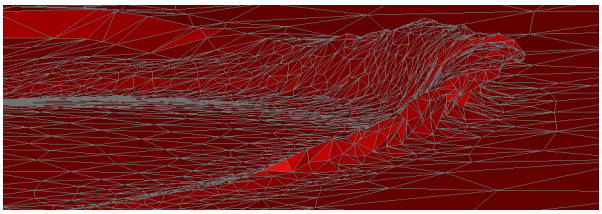

Fig. 9. Bavures au passage de l'outil

Outre la modélisation des défauts géométriques de soudure, la simulation rend compte d'un bon échauffement de la matière (cf Fig. 10). Les résultats présentés ont été obtenus en utilisant l'algorithme de transport amont modifié. Les champs de températures se stabilisent au bout de 1s de

simulation et les isovaleurs obtenues correspondent aux observations expérimentales. Notons que les temps de calculs pour 8 s de simulation sont de 2 jours.

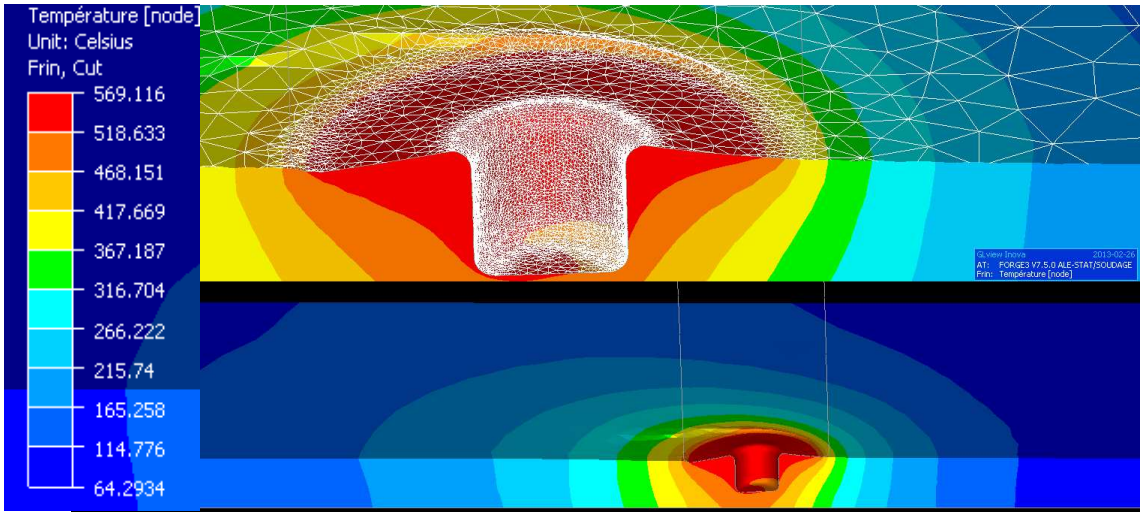

Fig. 10. Champs de température au bout de 8s (zoom autour de l'outil en haut)

5. Conclusion

La nouvelle formulation ALE développée pour la simulation du laminage de tôles s'avère tout à fait efficace pour simuler le procédé FSW, sans nécessiter aucun ajustement des algorithmes de contact ou de remaillage. Sa capacité à prédire avec précision l'état de contact entre l'outil et la plaque lui donne un caractère également prédictif pour l'apparition de divers défaut tels que les trous tunnels et les bavures ; cela constitue un atout considérable pour optimiser la qualité d'une soudure. Du point de vue de la formulation ALE utilisée, la modélisation de ces défauts et de soudures sans défauts a ainsi mis en évidence la précision de l'algorithme de calcul de la vitesse de maillage associé à la méthode de lissage de Nagata. Pour l'application au soudage FSW, la modélisation du frottement a été enrichie afin de prendre en compte le filetage de l'outil. Du point de vue de la simulation, ce filetage permet d'éviter la formation de cavités, comme cela est observé sur le procédé réel. Par ailleurs, la méthode de transport amont des champs continus (température) a été affinée pour les termes de surface et donne d'excellents résultats.

Les perspectives de ce travail concernent la réduction du temps de calcul en utilisant des pas de temps plus importants. Une possibilité serait d'utiliser un schéma d'actualisation du domaine en coordonnées cylindriques.

Remerciements : Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une Chaire financée par la société Daher.

Références

[1] The Welding Insitute (TWI).

[2] Guerdoux, Fourment, "3D numerical simulation of different phase of friction stir welding," Modelling and simulation in materials science and engineering, vol. 17, pp. 0 – 32, 15 mai 2009.

[3] Schmidt, Hattel, "A local model for the thermo mechanical conditions in friction stir welding," Modelling and simulation in materials science and engineering, vol. 13, pp. 77 – 93, 2005.

[4] Cho, Kang, Han, Oh, "Modelling friction stir welding process aluminium alloys," METALS AND MATERIALS International, vol. 14, n°2, pp. 247 – 258, 2008.

[5] Philippe, “Développement d’une formulation ALE pour la simulation tridimensionnelle du laminage de produits plats,” Ph.D. dissertation, Ecole des Mines de Paris, 19 juin 2009.

[6] Fourment, Gavoille, Kumar, Hachani, “Numerical simulation of reduced contact area metal forming processes: ALE formulation, data transfer and anisotropic remeshing - application to rolling and drawing” CD-ROM Proceedings of the 6th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2012), September 10-14, 2012, Vienna, Austria, ISBN: 978-3-9502481-9-7.

[7] Nagata, “Simple local interpolation of surfaces using normal vectors,” Computer Aided Geometric Design, vol. 22, pp. 327-347, 2005.

[8] Kumar, Fourment, “Remapping method for transferring data between two meshes using a modified iterative SPR approach for parallel resolution”, Esaform 2012.

[9] Marie, “Un modèle de parallélisation SPMD pour la simulation numérique de procédés de mise en forme des matériaux,” Thèse de doctorat, ENSMP, 1997.

[10] Page, Sun, Koschan, Paik, Abidi, “Normal vector voting : Crease detection and curvature estimation on large, noisy meshes,” Graphical models, 2002.

[11] Cho, Boyce, Dawson, “Modelling of strain hardening during friction stir welding of stainless steel,” Modelling and simulation in materials science and engineering vol.15, pp. 469–486, 2007.

[12] Assidi, Fourment, Guerdoux and Nelson, “Friction model for friction stir welding process simulation: Calibration from welding experiments,” International journal of machine tool and manufacture, vol. 50, pp. 143 – 155, 2010.