

Modèle de comportement élastoplastique adapté à la simulation numérique du soudage

C. Mang¹, S. Hendili²

¹ IMSIA - UMR EDF/CNRS/CEA/ENSTA 9219 - EDF Lab Paris-Saclay, FRANCE
chetra-externe.mang@edf.fr

² Dépt. Management des Risques Industriels / Dept. Industrial Risk Management
6 quai Watier 78401 CHATOU cedex - FRANCE
sofiane.hendili@edf.fr

Résumé — Nous proposons un modèle de comportement élastoplastique adapté au calcul thermomécanique à haute température, rencontré par exemple en simulation numérique du soudage. Ce modèle permet de prendre en compte la restauration d'écrouissage à l'état solide. Ce modèle a été implanté via le générateur de code MFront, développé par le CEA, et permettant en particulier l'intégration de lois de comportement dans un code de simulation numérique. Le modèle est validé sur un essai de dilatométrie bloquée (essai Satoh), en comparant les résultats numériques à des résultats expérimentaux.

Mots clés — plasticité, thermomécanique, simulation numérique du soudage, seuil surfacique, restauration d'écrouissage, dilatométrie.

1 Introduction

Un des objectifs de la simulation numérique du soudage est de déterminer les déformations et contraintes résiduelles dans les assemblages soudés. Une description fine du comportement thermomécanique des matériaux mis en jeu lors de l'opération de soudage est requise sur une plage de température importante, allant jusqu'à la température de fusion. Généralement, le comportement des matériaux soudés est modélisé par des lois élastoplastiques qui permettent une assez bonne approximation des champs résiduels engendrés par une opération de soudage.

Lors d'une opération de soudage, et plus particulièrement lors du soudage multi-passes, les composants soudés subissent plusieurs cycles thermiques (chauffage - refroidissement). Pour certains matériaux, et dans certaines conditions, les cycles thermiques imposés par le soudage entraînent l'annulation, partielle ou totale, des dislocations. Ce phénomène, appelé restauration d'écrouissage, se manifeste à l'échelle macroscopique par une diminution de la limite d'élasticité du matériau. La prise en compte de la restauration d'écrouissage est nécessaire pour améliorer le calcul des contraintes et déformations résiduelles de soudage.

La restauration de l'écrouissage d'un matériau peut être modélisée en imposant, à partir d'une température donnée, une diminution progressive des variables d'écrouissage. Cette température de début de restauration est généralement prise autour de 600°C. Lorsque la température du matériau est proche de la température de fusion, l'écrouissage est totalement restauré. Cette technique de modélisation de la restauration d'écrouissage a été considérée et développée dans un modèle élastoplastique spécifique, à écrouissage isotrope non-linéaire.

Par la suite, on décrit le modèle élastoplastique développé pour prendre en compte la restauration d'écrouissage à l'état solide. Ensuite, on présente la simulation d'un essai de dilatométrie bloquée [2] qui a été réalisée pour valider le modèle. L'influence de la vitesse de restauration est également étudiée.

2 Description du modèle

Dans cette étude, nous considérons une loi de comportement élastoplastique avec un critère de plasticité de type von Mises et un écrouissage isotrope non linéaire. A tout instant, l'état du matériau est décrit

par la contrainte σ , la déformation ε , la déformation plastique ε^p , la déformation plastique cumulée p et la température T .

La contrainte est décomposée en deux parties : la contrainte hydrostatique σ^h et la contrainte déviatorique $\tilde{\sigma}$.

$$\sigma = \sigma^h \mathbf{Id} + \tilde{\sigma} \quad (1)$$

où

$$\sigma^h = \frac{1}{3} tr(\sigma) = K tr(\varepsilon - \varepsilon^{th}) \quad (2)$$

pour

$$\varepsilon^{th} = \alpha(T - T_{ref}) \quad (3)$$

$$\tilde{\sigma} = 2\mu(\tilde{\varepsilon} - \varepsilon^p) \quad (4)$$

où

$$\tilde{\varepsilon} = \varepsilon - \frac{1}{3} tr(\varepsilon) \mathbf{Id} \quad (5)$$

K, μ, α sont des paramètres du matériau qui peuvent dépendre de la température et T_{ref} est la température de référence pour laquelle la déformation thermique est nulle.

Le critère de plasticité de Von Mises est considéré. Les variables internes ε^p et p sont gouvernées par la loi d'écoulement normale classique associée à un critère de plasticité F avec la fonction d'écrouissage isotrope R .

$$F(\sigma, R) = \sigma_{eq} - R \quad (6)$$

$$\dot{\varepsilon}^p = \frac{3}{2} \dot{p} \frac{\tilde{\sigma}}{\sigma_{eq}} \quad (7)$$

2.1 Prise en compte de la restauration d'écrouissage

Lorsque la température est inférieure à T_{res} (température d'activation de la restauration d'écrouissage à l'état solide), le modèle de comportement suit le modèle élastoplastique classique de type Von Mises à écrouissage isotrope non linéaire. A partir de la température T_{res} , le phénomène de restauration d'écrouissage à l'état solide est pris en compte : la déformation plastique cumulée diminue progressivement à partir de T_{res} et devient nulle à la température de fusion T_{fus} .

La restauration d'écrouissage est modélisé en introduisant la déformation plastique cumulée effective \hat{p} , définie par :

$$\hat{p} = (1 - D_p)p \quad (8)$$

où

$$D_p = \begin{cases} 0 & \text{si } \tau_p \leq 0 \\ 1 - (1 - A_p)(1 - \tau_p) - A_p \exp(-B_p \tau_p) & \text{si } 0 < \tau_p < 1 \\ 1 & 1 \leq \tau_p \end{cases} \quad (9)$$

avec

$$\tau_p = \frac{T - T_{res}}{T_{fus} - T_{res}} \quad (10)$$

A_p, B_p sont des paramètres du modèle pour la restauration d'écrouissage à l'état solide. A_p est le paramètre pour régler la vitesse de la restauration progressive linéaire dans le cas $B_p = 0$. B_p est le paramètre pour régler la vitesse de la restauration progressive exponentielle dans le cas $A_p = 1$.

2.2 Mise en oeuvre du modèle

Le modèle décrit précédemment a été programmé dans Code_Aster via le générateur de code MFront. Cette programmation consiste essentiellement à définir les paramètres matériaux et à introduire le système d'équations à résoudre obtenu par une discrétisation implicite des relations de comportement. Cette démarche est classique ; nous renvoyons vers [4] pour plus de détails.

Remarque : La fonction d'érouissage R est une fonction non linéaire de la déformation plastique cumulée p et de la température T , définie par :

$$R = R(T, p) = AT + Bp^{1/3} + Cp + DTp + E \quad (11)$$

A, B, C, D, E sont des paramètres déterminés à partir des courbes de traction expérimentales, dans un intervalle de température. En prenant deux courbes de traction C_i et C_{i+1} correspondantes aux températures T_i et T_{i+1} , R est une surface entre les deux courbes. Nous optimisons les paramètres de la fonction surfacique en choisissant deux points à partir d'une courbe et trois à partir d'autre. Nous choisissons des paramètres pour que la ligne frontière de la surface soit le plus proche de chaque courbe de traction donnée.

Dans notre cas d'étude, nous prenons des courbes de traction pour l'acier 316L [3]. La figure 1 (à gauche) illustre un seuil surfacique correspond aux courbes de traction à la température $T_1 = 20^\circ\text{C}$ et $T_2 = 200^\circ\text{C}$, et la figure 1 (à droite) montre les seuils surfaciques entre la température $T_1 = 20^\circ\text{C}$ et $T_2 = 3000^\circ\text{C}$

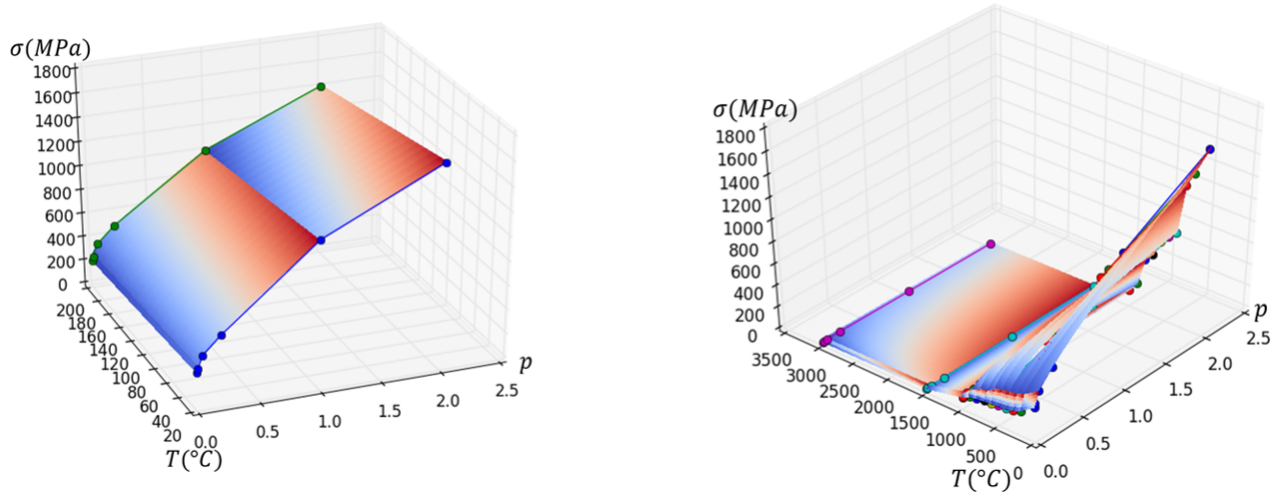


FIGURE 1 – Seuil surfacique pour l'acier 316L.

3 Validation

Pour valider le modèle, nous comparons les résultats numériques et expérimentaux d'un essai de dilatométrie bloquée. Deux calculs sont réalisés avec le modèle élastoplastique proposé dans cette étude, respectivement avec et sans prise en compte de la restauration d'érouissage.

On considère un cube élémentaire de taille $1\text{mm} \times 1\text{mm} \times 1\text{mm}$ (voir figure 2) pour modéliser la zone utile de l'éprouvette. On bloque le déplacement $u_y = 0$ de tous les noeuds du cube. Les déplacements $u_x = 0, u_z = 0$ sont imposés sur le noeud N_3 et le déplacement $u_x = 0$ sur le noeud N_7 . La figure 3 illustre les cycles thermiques imposés sur tous les noeuds du maillage. Les paramètres de restauration sont $A_p = 1, B_p = 0,03$ et la température de fusion $T_{fus} = 1400^\circ\text{C}$.

La table 1 montre une comparaison entre les simulations (avec et sans restauration d'érouissage) et l'expérience. Nous constatons que, à la fin de chaque cycle de température, la valeur de la contrainte σ_{yy} obtenue par la simulation est plus proche de l'expérience lorsque la restauration d'érouissage est prise en compte. La restauration d'érouissage permet également une meilleure estimation du profil de la contrainte au cours des différents cycles (voir figure 4).

La figure 5 illustre l'évolution de la déformation plastique cumulée en fonction du temps pour les simulations avec et sans la restauration d'écroutissage. La déformation plastique cumulée est diminuée progressivement à partir de la température de restauration $T_{res} = 600^{\circ}C$ à l'instant $t = 54s$ jusqu'à la température $T_{fus} = 1125^{\circ}C$ à l'instant $t = 100s$. Ensuite, elle croît progressivement selon la loi de restauration jusqu'à encore une fois la température de restauration T_{res} . Et puis, elle évolue en suivant un comportement élastoplastique classique (sans restauration).

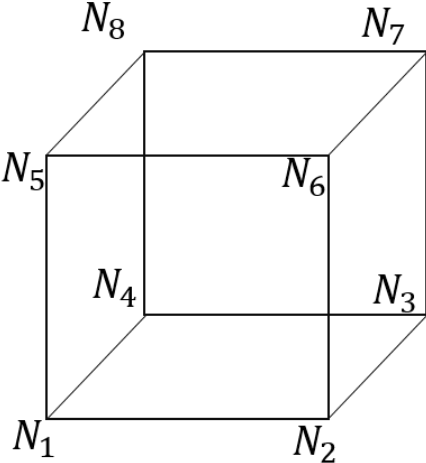


FIGURE 2 – Géométrie du cube.

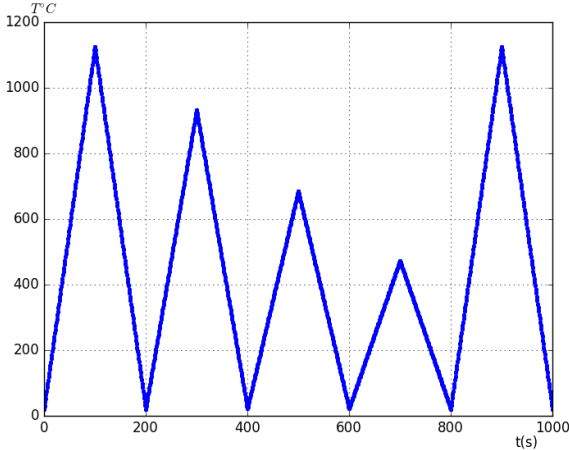


FIGURE 3 – Evolution du cycle de la température.

TABLE 1 – Valeurs de la contrainte σ_{yy} à la fin de chaque cycle thermique : résultats numériques (calculs avec et sans restauration d’écrouissage) et résultats expérimentaux.

$t(s)$	200	400	600	800
$T(^{\circ}C)$	21	22	22	21
$\sigma_{yy}(MPa)$ (expérience)	303	316	325	327
$\sigma_{yy}(MPa)$ (avec restauration)	350	361	364	382
$\sigma_{yy}(MPa)$ (sans restauration)	393	435	455	465

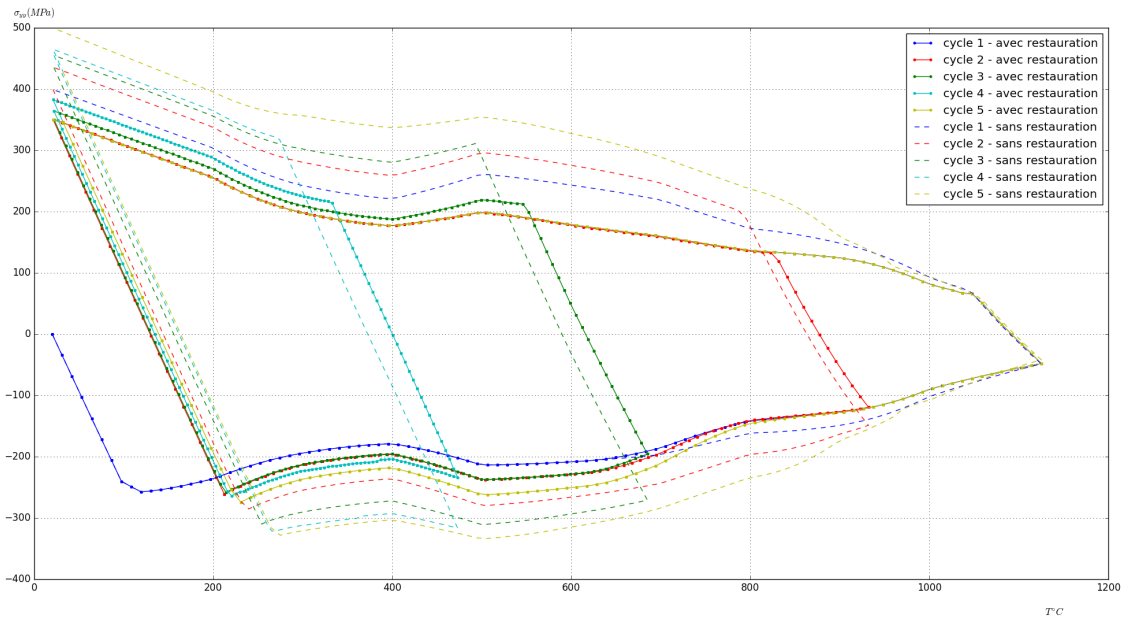


FIGURE 4 – Evolution de la contrainte σ_{yy} au cours des différents cycles thermiques : résultats numériques, avec et sans restauration, et résultats expérimentaux.

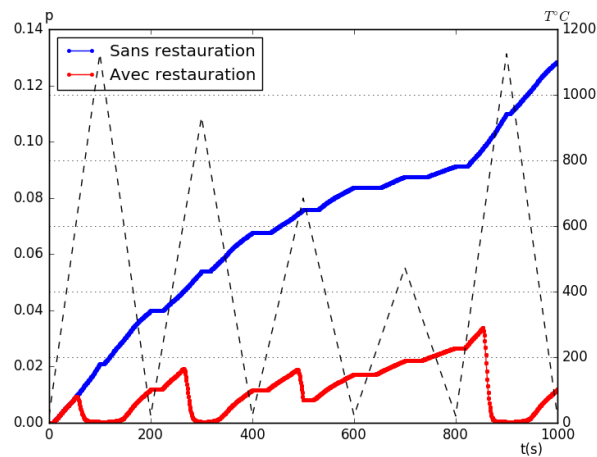


FIGURE 5 – Evolution de la déformation plastique cumulée.

4 Influence de la vitesse de restauration

Dans cette section, nous étudions des différentes valeurs de la vitesse de restauration dans le cas $A_p = 1$. Cette vitesse est représentée par le paramètre B_p . L'écrouissage est restauré rapidement quand la valeur B_p est importante. Nous simulons en variant les valeurs $B_p = 0.01, B_p = 0.05, B_p = 0.1$ et la valeur de référence $B_p = 0.03$. La figure 6 illustre les évolutions de la déformation plastique cumulée en fonction du temps. Elle montre que, à partir de l'instant $t = 500s$ où la température est légèrement plus grande que T_{res} , la différence des déformations plastiques cumulées entre les différentes vitesses est importante. Cela a un impacte directe sur la contrainte à cet instant (voir figure 7). A la température $T = 1125^\circ C$, les déformations plastiques cumulées à différentes vitesses sont semblables. On constate que la vitesse de la restauration d'écrouissage a un impact important légère sur la contrainte où la température maximale du cycle est légèrement plus grande que la température de l'activation. A haute température, cette vitesse n'a pas d'influence.

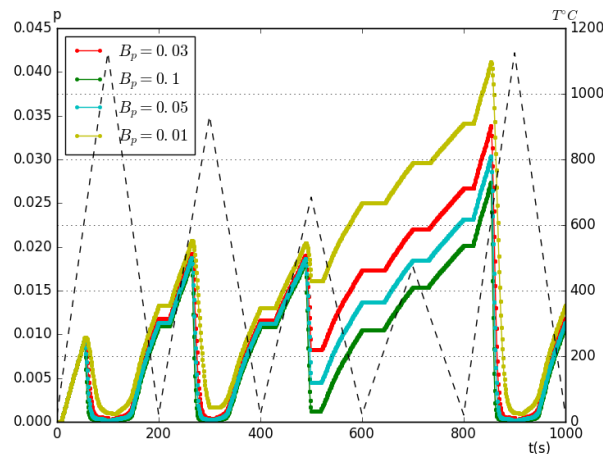


FIGURE 6 – Evolution de la déformation plastique cumulée.

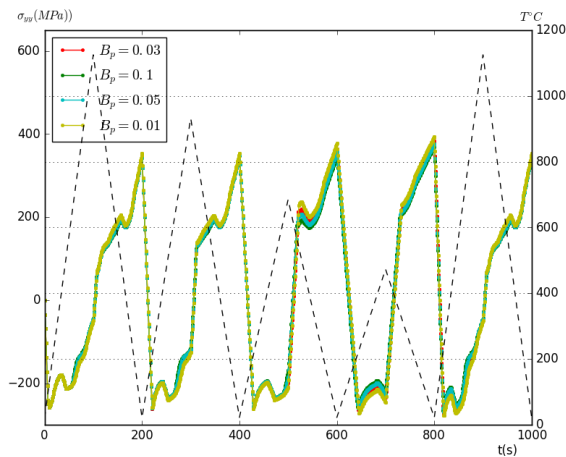


FIGURE 7 – Evolution de la contrainte σ_{yy} pour la simulation avec, sans restauration d'écrouissage, et l'expérience au premier cycle de la température.

5 Conclusion

Un modèle élastoplastique à écrouissage isotrope non-linéaire a été considéré et a été implanté via le générateur de code MFront, développé par le CEA, et permettant en particulier l'intégration de lois de comportement dans un code de simulation numérique. Ce modèle permet de prendre en compte le phénomène de restauration d'écrouissage rencontré notamment dans le soudage multi-passes. Plus précisément, ce modèle permet de restaurer la variable d'écrouissage à l'état solide en la diminuant progressivement et en l'annulant complètement à la température de fusion.

Une expression analytique de la fonction d'écrouissage a été proposée. Les paramètres de cette fonction sont calés à partir des courbes de tractions obtenues dans [3] sur l'acier austénitique 316L. Ensuite, le modèle a été validé sur un essai de dilatométrie bloquée - connu sous le nom d'essai Satoh [2] - également réalisé dans [3] sur l'acier 316L. Nous constatons que la prise en compte, dans la simulation numérique, de la restauration d'écrouissage à l'état solide, permet d'obtenir des résultats plus proches de l'expérience.

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un projet de R&D, mené à EDF, et qui a pour objectif d'améliorer les fonctionnalités de Code_Aster pour la simulation numérique du soudage. Le modèle proposé dans cette étude devra permettre *in fine* l'annulation à la température de fusion d'autres grandeurs comme les déformations thermiques et plastiques.

Références

- [1] *code_aster et salome_meca, plateforme de simulation en thermomécanique*, logiciel Open Source sur www.code-aster.org, EDF, 1989-2017.
- [2] K.Satoh, T. Ohnishi. *Transient thermal stresses of Weld Heat-Affected Zone by Both-Ends Fixed Bar Analogy*, Transactions of Japan Welding Society, 1972, Vol. 3, pp.125-134.
- [3] L. Depradeux. *Simulation numérique du soudage, acier 316L. Validation sur cas-tests de complexité croissante*, thèse de doctorat, INSA Lyon, 2004.
- [4] *MFront, un générateur de code matériau*, logiciel Open Source sur <http://tfel.sourceforge.net>, CEA-EDF, 1989-2017.