ÉTUDE NUMÉRIQUE DE LA NOCIVITÉ DES DÉFAUTS DANS LES SOUDURES

Laurent Lacourt [a,b,c], Samuel Forest [a], Franck N'Guyen [a], David Ryckelynck [a], François Willot [a,b], Sylvain Flouriot [c], Victor de Rancourt [c], Alexandre Thomas [c]

[a] Mines ParisTech PSL Research University, Centre des Matériaux, CNRS UMR 7633, laurent.lacourt@mines-paristech.fr ; [b] Mines ParisTech PSL Research University, Centre de Morphologie Mathématique ; [c] CEA Centre d'Études de Valduc

Mots-clefs : défauts, fatigue, soudage par laser pulsé, méthodes de réduction de modèles.

1 Introduction

Au cours du soudage de deux pièces en TA6V par laser pulsé, des bulles de gaz peuvent être piégées dans la zone fondue (Fig.1). Grâce aux progrès des méthodes de contrôle non destructif, il est maintenant possible de détecter, localiser et dimensionner ces défauts sur des pièces en production. Pour éviter le rebut de pièces contenant des défauts non critiques, il est indispensable de développer des méthodes de calcul les prenant en compte. L'objectif de cette thèse est de proposer une méthodologie innovante de dimensionnement de structures avec défauts.

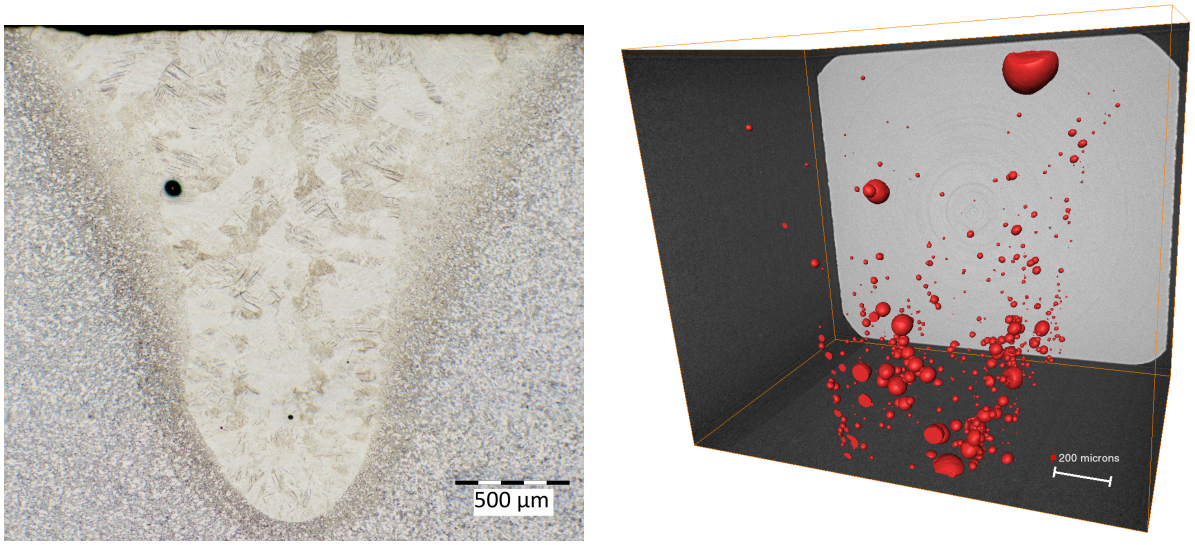


FIGURE 1 – Coupe métallographique d'une soudure autogène en TA6V présentant un défaut (à gauche) et reconstruction tridimensionnelle de défauts dans une soudure observée par tomographie X.

Le travail de thèse est découpé en plusieurs volets. Dans un premier temps, le matériau "sain" est caractérisé mécaniquement. Ensuite les populations de défauts dans des soudures sont observées *via* des analyses par tomographie aux rayons X. À partir de ces données, un modèle statistique est mis en place afin de générer des configurations réalistes de défauts par simulation numérique. Ces populations sont ensuite étudiées par des calculs éléments finis en utilisant des méthodes de réduction de modèles.

2 Caractérisation mécanique du TA6V-α'

Afin de mettre en place la méthodologie, les travaux de thèse se concentrent sur un matériau en particulier : l'alliage de titane TA6V. À réception, le matériau présente une microstructure biphasée ($\alpha + \beta$). Cependant, à cause du refroidissement rapide lors du soudage, la zone fondue exhibe une microstructure martensitique (α') [1]. Un traitement thermique a été mis au point afin d'obtenir une microstructure martensitique présentant une taille d'ex-grains β similaire à celle observée sur la zone fondue. Ce matériau modèle a été caractérisé sous chargement cyclique et une loi de comportement élasto-visco-plastique a été identifiée (Fig.2).

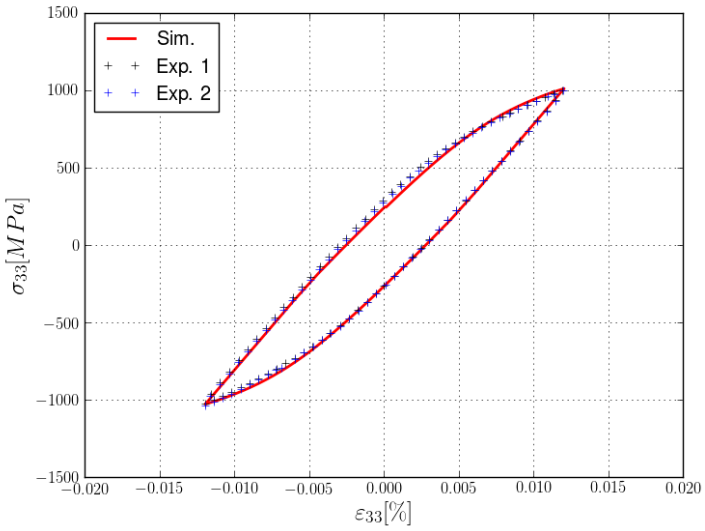


FIGURE 2 – Cycle stabilisé d'un essai d'écrouissage cyclique sur TA6V-α' et simulation avec le comportement élasto-visco-plastique identifié.

3 Étude et génération de populations de défauts

L'analyse par tomographie aux rayons X d'une éprouvette prélevée dans la soudure a permis d'acquérir des données sur la population de défauts. Grâce à ces données, une démarche d'analyse d'images a été mise en place et un premier modèle de génération de défauts a été étalonné.

3.1 Étude de la population de défauts

Après acquisition et reconstruction, les images de tomographie sont binarisées en utilisant les outils d'analyse d'images sous MATLAB. En sortie de cet outil, le barycentre et la matrice d'inertie de chaque défaut sont connus. De plus, un maillage est automatiquement généré à partir de l'image, ce qui permet une étude de la courbure locale (Fig.3) [2, 3]. Un ensemble d'indicateurs morphologiques a été mis en place afin de caractériser la géométrie des défauts. Une analyse en composantes principales de ces indicateurs suivie d'un clustering ont permis de mettre en évidence différentes familles de défauts avec une approche semblable à [4]. La mise en place d'indicateurs mécaniques permettra par la suite de trancher sur la pertinence de ces familles de défauts.

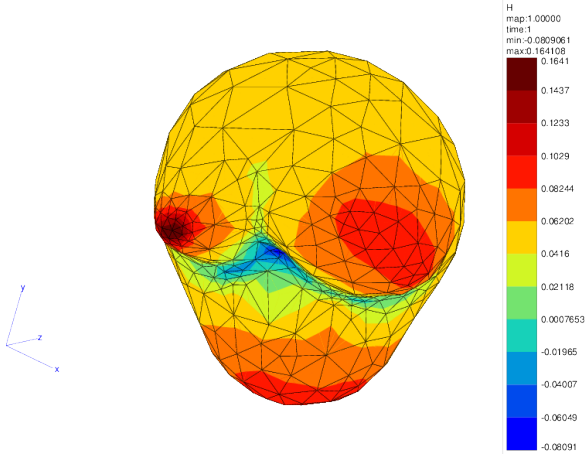


FIGURE 3 – Maillage d'un défaut atypique et représentation de sa courbure moyenne aux noeuds

3.2 Génération de populations de défauts

L'étude de la position des barycentres des défauts dans les impulsions a permis de mettre en place un modèle de génération de germes. Ce modèle comporte 7 paramètres. Le germe est généré dans le repère local de l'impulsion, puis les impulsions sont assemblées périodiquement afin de reconstituer un cordon. Dans ce premier modèle, puisque le germe est tiré à priori, la forme et la position du défaut sont supposées non correlées. Une réalisation de ce modèle peut-être observée Fig. 4.

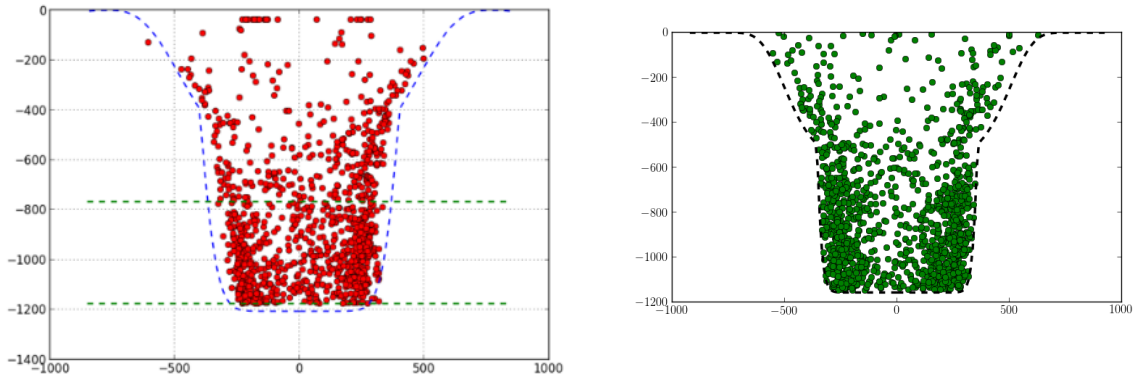


FIGURE 4 – Projection des barycentres des défauts sur le plan normal à la direction de soudage : données expérimentales (à gauche) et données simulées (à droite).

Des premiers calculs ont pu être lancés en faisant l'hypothèse que tous les défauts sont sphériques : leur rayon est alors tiré dans une loi log-normale. Par la suite, un dictionnaire de défauts sera mis en place à partir des populations observées et il deviendra possible de tirer des populations de défauts non sphériques.

4 Méthodes de réduction de modèles

4.1 Méthodologie

Pour l'étude de l'impact de la présence de défauts sur la réponse mécanique du composant, des méthodes basées sur la réduction de modèle sont mises en place. Une démarche d'hyper-réduction est adoptée [5, 6, 7], dans le cadre de la mécanique partielle des champs lointains [8].
Dans ce cadre, des bases réduites de modes empiriques POD [9] sont construites pour les défauts d'une part et pour les structures d'autre part. Lors du calcul de ces modes empiriques, une hypothèse de séparation d'échelle est faite : les modes microscopiques liés aux défauts $\left(\boldsymbol{\psi}_{\boldsymbol{k}}^{\boldsymbol{\infty}}\right)_{k=0}^{N^{\infty}}$ sont calculés sur la fluctuation locale liée au défaut dans un milieu infini et homogène. Les modes macroscopiques $\left(\boldsymbol{\psi}_{\boldsymbol{k}}^{\boldsymbol{M}}\right)_{k=0}^{N^{M}}$ sont calculés pour une pièce de structure donnée sans aucun défaut. Les deux bases réduites sont ensuite assemblées avant de lancer le calcul hyper-réduit. Une correction éléments finis locale permettra de prendre en compte les interactions pouvant avoir lieu.

4.2 Exemple : réponse mécanique d'un amas de pores sous sollicitation cyclique

La méthode exposée ci-dessus a été utilisée pour étudier la réponse mécanique d'un amas de pores observé par tomographie aux rayons X (Fig. 5). Après maillage de l'image, des modes liés à chaque défaut pris indépendamment ont été calculés. Ces modes ont ensuite été assemblés dans une base réduite. Pour prendre en compte les interactions entre défauts, une zone de correction éléments finis à été mise en place. Cette zone constitue le domaine d'intégration réduit représenté à droite sur la Fig. 6. Dans l'exemple présenté, la méthode d'hyper réduction permet une division du temps de calcul par 5 (phase de construction des modes de défaut comprise) pour une bonne précision de calcul. L'erreur relative en déformation plastique cumulée ne dépasse par les 5% sur 30 cycles, et les cartes de contrainte de von Mises sont très similaires (Fig. 6).

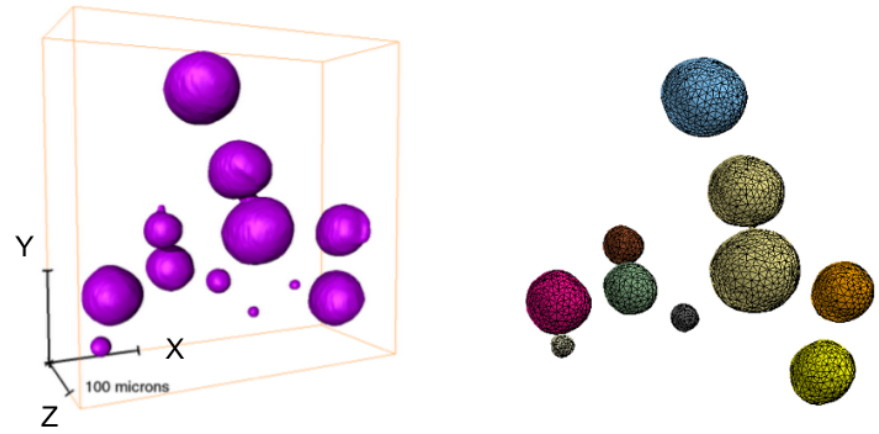


FIGURE 5 – Image de tomographie après reconstruction (à gauche) et maillage (à droite) d'un amas de pores observé dans une soudure.

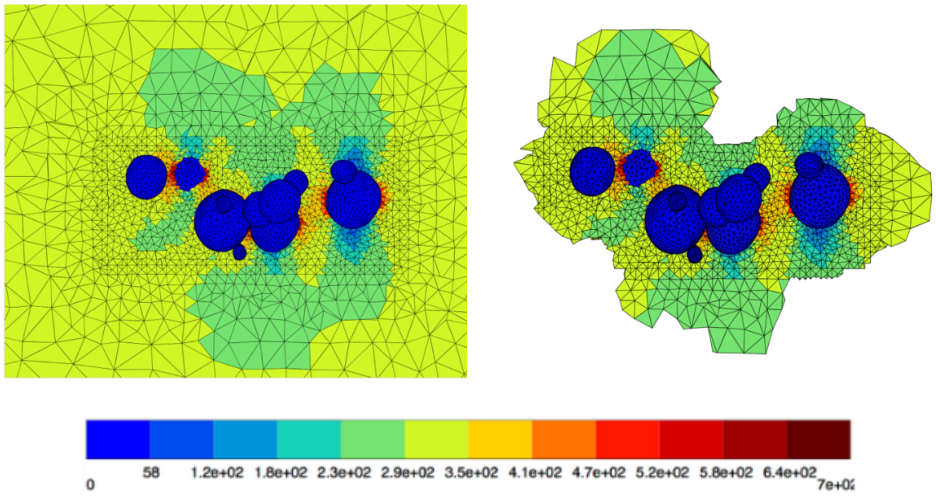


FIGURE 6 – Champ de contrainte équivalente de von Mises pour la simulation classique éléments finis (à gauche) et pour la simulation hyper-réduite (à droite)

5 Conclusion

L'objectif de la thèse est de fournir un outil de calcul de durée de vie prenant en compte les défauts qui auront été détectés par contrôle non destructif. Afin de pouvoir être utilisée en bureau d'études, la méthodologie doit donner des résultats fiables dans un temps de calcul réduit. Cette exigeance motive l'utilisation de méthodes de réduction de modèles et la mise au point d'un modèle de génération de défauts. En effet, comme présenté plus haut, les méthodes de réduction de modèle permettent déjà de réduire le temps de calcul. Le couplage avec le modèle de génération de défauts permettra de simuler *a priori* un grand nombre de configurations et de les traiter afin d'en extraire les plus critiques.

Références

[1] Y. Robert Simulation numérique du soudage du TA6V par laser YAG impulsionnel : Caractérisation expérimentale et modélisation des aspects thermomécaniques associés à ce procédé. Thèse de l'École des Mines de Paris, 2007.

[2] B. Hamann, Curvature Approximation for Triangulated Surfaces, Computing Suppl. 8 :139-153, 1993.

[3] J. Madison, L. Aagesen Quantitative characterization od porosity in laser welds of stainless steel. Scripta Mat., 67 :783-786, 2012

[4] F. Delloro A new approach to 3D modeling of the cold spray process, combining morphological methods and finite element simulations Thèse de l'École des Mines de Paris, 2015.

[5] D. Ryckelynck A priori hypereduction method : an adaptive approach. Int. J. of Computational Physics, 202 :346-366, 2005.

[6] D. Ryckelynck Hyper reduction of mechanical models involving internal variables. Int. J. Numer. Meth. Engng, 77(1) :75-89, 2009.

[7] D. Ryckelynck, K. Lampoh, and S. Quilici. Hyper-reduced predictions for lifetime assessment of elasto- plastic structures. Meccanica, 51, 2016.

[8] D. Ryckelynck, L. Lacourt. Réduction de modèle pour une mécanique partielle des champs lointains Colloque National Mécamat, 2018

[9] J. Lumley. The structure of inhomogeneous turbulence. Atmospheric Turbulence and Wave Propagation, Nauka, Moscow, pages 166-178, 1967