



Influence de l'épaisseur en fatigue oligocyclique d'assemblages soudés : une méthode rapide

David Thevenet, Jonathan Raujol-Veillé, Cédric Doudard, Sylvain Calloch,
Hans Minnebo

► To cite this version:

David Thevenet, Jonathan Raujol-Veillé, Cédric Doudard, Sylvain Calloch, Hans Minnebo. Influence de l'épaisseur en fatigue oligocyclique d'assemblages soudés : une méthode rapide. CFM 2015 - 22ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2015, Lyon, France. hal-03446477

HAL Id: hal-03446477

<https://hal.science/hal-03446477>

Submitted on 24 Nov 2021

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.

Influence de l'épaisseur en fatigue oligocyclique d'assemblages soudés : une méthode rapide

D.THEVENET^a, J. RAUJOL-VEILLE^a, C. DOUDARD^a, S. CALLOCH^a,
H. MINNEBO^b

a. LBMS, 2 rue François Verny, 29806 Brest Cedex 9, david.thevenet@ensta-bretagne.fr

b. DCNS, rue Choiseul, 56311 Lorient Cedex, hans.minnebo@dcnsgroup.com

Résumé :

Les assemblages soudés demeurent largement utilisés dans le domaine de la construction navale. En raison des concentrations de contraintes et du chargement cyclique rencontrés, les joints soudés demeurent des sites d'amorçage privilégiés de fissures de fatigue. Aussi, connaître l'historique des contraintes et des déformations aux points critiques de la structure est indispensable, en particulier dans les zones de plasticité confinée. Afin d'éviter de longs calculs non linéaires par éléments finis, des méthodes de calcul simplifié du champ élasto-plastique de contrainte/déformation peuvent être utilisées. Lors de précédents travaux, une approche pour estimer l'état de contraintes aux points critiques a été développée et appliquée aux cas d'éprouvettes entaillées. Le travail porte cette fois sur son application à des joints soudés en T dans le but de calculer leur durée de vie à l'amorçage d'une fissure de fatigue. Enfin, une approche paramétrique, destinée à s'affranchir de tout calcul par éléments finis, a été adoptée afin de prendre en compte les géométries locales du cordon soudé. Les prévisions issues de cette approche ont alors été comparées à des résultats expérimentaux et ont permis d'évaluer l'effet de l'épaisseur sur la tenue en fatigue oligocyclique de ces structures soudées.

Abstract :

Welded assemblies are commonly used in shipbuilding industry. Due to the combination of stress concentration and cyclic loading, welded joints could be a critical area for fatigue damage. Thus, knowing stress/strain histories at the critical points of the structure is necessary, particularly when a confined plasticity occurs. To avoid time consuming non-linear finite element analyses, simplified estimation methods of the elastic-plastic strain/stress can be used. In a previous work, an approach to estimate the stress state at the critical points was developed and employed in the case of notched specimens. The present paper focuses on welded joints in order to validate this strategy with the aim to estimate the fatigue crack initiation life of T-joints. To go further and avoid any finite element analysis, a parametric approach has been adopted to take into account the local geometries of welded joints. The results predicted by this approach are compared to experimental fatigue lives and lead to analyze the thickness effect on the low cycle fatigue properties of welded joints.

Mots clefs : fatigue oligocyclique, assemblages soudés, méthode rapide, plasticité confinée, prévision, durée de vie

1 Introduction

Le procédé d'assemblage par soudage offre de nombreuses possibilités pour concevoir des structures complexes à partir d'éléments à géométrie simple (*e.g.* plaques, tubes, profilés...) fréquemment employés en construction navale. Ces éléments, qui participent au maintien de l'intégrité de la structure, subissent en service des chargements mécaniques cycliques complexes et de forte amplitude. De par leur géométrie, ces zones d'assemblage sont des concentrateurs de contraintes, en particulier au voisinage des cordons de soudure où une plasticité confinée, germe de fissures par fatigue, peut apparaître. Il est donc important que les bureaux d'études disposent de méthodes de calcul performantes permettant d'aborder le dimensionnement des assemblages soudés vis-à-vis de la fatigue.

Dans le cas de la fatigue oligocyclique, il est nécessaire de connaître l'historique des contraintes et des déformations aux points jugés critiques. Pour éviter de longs calculs par éléments finis, des méthodes de calcul simplifié du champ de déformation plastique de type « Neuber amélioré » sont souvent utilisées. Néanmoins, ces méthodes manquent généralement de précision. Aussi, une nouvelle approche [1]-[2], basée sur une technique de modélisation à deux échelles est proposée dans ce travail.

Par ailleurs la prise en compte de l'effet d'épaisseur dans une démarche de dimensionnement à la fatigue est une préoccupation majeure des bureaux d'études. En effet, différentes études issues de la littérature [3]-[4] ont montré qu'un accroissement de l'épaisseur d'une structure s'accompagne d'une réduction de la résistance en fatigue. Toutefois, les corrections proposées sont basées sur des résultats ne couvrant pas une gamme d'épaisseur suffisante au vue de l'application recherchée et restent limitées au cas de la fatigue polycyclique.

La méthode proposée sera mise en œuvre sur des assemblages soudés en T de différentes épaisseurs. Combinée à un critère de fatigue oligocyclique, les prévisions en termes de durée de vie seront alors confrontées à une campagne d'essais de fatigue menée pour trois épaisseurs distinctes. Enfin, une approche paramétrique sera adoptée afin de développer un outil de dimensionnement à la fatigue oligocyclique permettant de s'affranchir de toute analyse par éléments finis (AEF).

1 Cas d'étude : assemblages soudés

1.1 Joints en T

Les structures soudées étudiées dans le cadre de ce travail sont des joints en T, assemblés et fournis par DCNS. Les soudures ont été réalisées par procédé MAG (Metal Active Gas) semi-automatique à partir de tôles en acier à haute limite d'élasticité de différentes épaisseurs. Les paramètres géométriques relatifs à la description de l'assemblage soudé sont définis en Figure 1a : ρ rayon de raccordement), θ (angle de raccordement), a (profondeur de gorge), h_1 (hauteur de raidisseur), t_1 (épaisseur de raidisseur), h_2 (longueur du bordé), t_2 (épaisseur du bordé). Ces joints soudés en T possèdent trois épaisseurs t_2 différentes (1.0t, 2.0t, 2.8t).

Des mesures de la géométrie locale du cordon de soudure ont été systématiquement réalisées à l'aide d'un capteur laser (DCNS) sur l'ensemble de la longueur sur cordon. Les valeurs relatives à ces mesures (moyenne, écart-type) sont indiquées dans la Figure 1b. Enfin, dans le but de réduire l'influence des contraintes résiduelles, ces structures soudées ont été soumises à un traitement thermique de détentionnement (600°C pendant 30 min.).

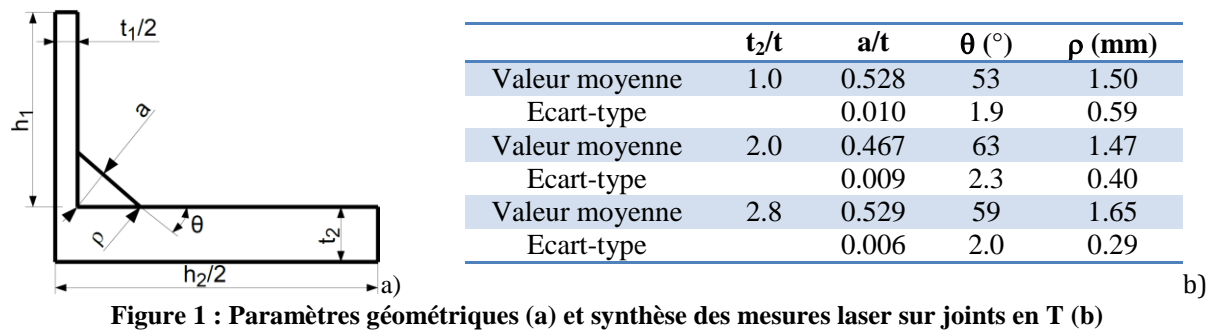
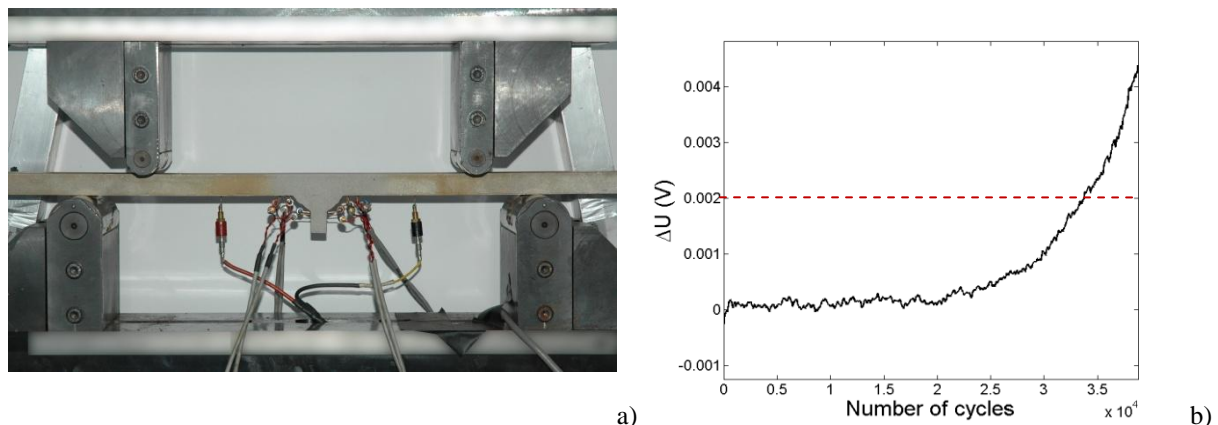


Figure 1 : Paramètres géométriques (a) et synthèse des mesures laser sur joints en T (b)

1.2 Dispositif expérimental

Les éprouvettes soudées ont été soumises à des essais de fatigue en flexion quatre points pour différentes amplitudes de chargement $\sigma_{a\text{ nom}}$ et un rapport de charge $R_\sigma = F_{\min}/F_{\max}$ égal 0,1. Ces essais, pilotés en effort imposé, ont été réalisés à l'air ambiant sur une machine de fatigue servo-hydraulique Schenck d'une capacité de 250 kN (Figure 2a). Un dispositif ACPD (Alternating Current Potential Drop) [5] est utilisé afin d'interrompre l'essai lorsqu'une fissure de faible profondeur s'est développée dans l'assemblage. La Figure 2b indique l'évolution du signal ACPD lors d'un essai de fatigue et le critère d'arrêt (2 mV) utilisé, correspondant à une fissure d'environ 0,5 mm de profondeur. Les résultats de ces essais de fatigue sont indiqués dans la Figure 6b.

Figure 2 : Joint en T sous chargement de fatigue en flexion 4 points (a) et évolution du signal ACPD en fonction du nombre de cycles ($N_i = 34\,000$ cycles) (b)

1.3 Matériau et loi de comportement

Les fissures de fatigue, observées expérimentalement, se sont systématiquement amorcées en pied de cordon dans la zone affectée thermiquement (ZAT). Pour cette raison, des essais de caractérisation ont été menés sur un matériau représentatif de celui rencontré en pied de cordon soudé : une ZAT simulée homogène (DCNS). Pour établir la loi de comportement relative à ce matériau, des essais de traction monotone et cyclique ($R_\epsilon = 0$), pilotés en déformation imposée, ont été menés sur des éprouvettes cylindriques. La loi de comportement retenue pour décrire le comportement élasto-plastique de la ZAT simulée comporte quatre écrouissages cinématiques et deux écrouissages isotropes (Table 1). L'identification des paramètres de cette loi a été réalisée sous Matlab®, par minimisation de l'écart entre les résultats expérimentaux et la réponse du modèle numérique [2].

Seuil de plasticité	$f = J_2(\underline{\sigma} - \underline{X}_T) - \sigma_y - R \leq 0$
Loi d'évolution de R (2 écrouissages isotropes)	$\dot{R} = b(Q - R)\dot{p}$
Loi d'évolution de X_i (4 écrouissages cinématiques)	$\dot{\underline{X}}_i = \frac{2}{3} C_i \dot{\underline{\varepsilon}}^p - \gamma_i \underline{X}_i \dot{p}$ avec $\underline{X} = \sum_i \underline{X}_i$

Table 1 : Seuil de plasticité et loi d'évolution des variables d'écrouissage

Des essais de fatigue ont également été menés pour identifier le comportement en fatigue oligocyclique de la ZAT simulée. Ils ont été réalisés pour différentes amplitudes de déformation $\Delta\varepsilon$ ($R_\varepsilon = -1$) et ont permis d'identifier les paramètres de la loi de Manson-Coffin-Basquin (MCB) [6], couplée à une correction de la contrainte moyenne de type Smith-Watson-Topper (SWT) [7]

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} \sigma_{max} = \frac{\sigma_f'^2}{E} (2N_i)^{2b} + \sigma_f' \varepsilon_f' (2N_i)^{b+c}, \quad (1)$$

où N_i désigne la durée de vie à l'amorçage, E le module d'Young, (σ_f', b) et (ε_f', c) les paramètres de la loi MCB.

2 Prédiction de la durée de vie en fatigue oligocyclique d'assemblages soudés : utilisation d'une méthode rapide

2.1 Présentation de la méthode

Les méthodes de calcul simplifiées, destinées à établir les tenseurs des contraintes $\underline{\sigma}$ et des déformations $\underline{\varepsilon}$ dans une zone de plasticité confinée, consistent à déterminer ces champs à partir des tenseurs des contraintes $\underline{\sigma}_M$ et des déformations $\underline{\varepsilon}_M$ issus d'un calcul élastique. Herbland [1] proposa une équivalence entre ce cas d'étude et un problème à deux échelles [8] (Figure 3) : la zone de plasticité confinée est assimilée à une inclusion, contenue dans une matrice élastique soumise à une contrainte égale à la contrainte nominale multipliée par un coefficient de concentration de contraintes K_T . Le tenseur élasto-plastique des contraintes $\underline{\sigma}$ (au point critique de la structure) est alors donné par

$$\underline{\sigma} = \underline{\sigma}_M - \underline{\underline{C}} : \underline{\varepsilon}^p, \quad (2)$$

où $\underline{\varepsilon}^p$ est le tenseur des déformations plastiques et $\underline{\underline{C}}$ est l'opérateur de localisation (tenseur d'ordre 4) qui dépend de la géométrie de la structure et des propriétés matériaux.

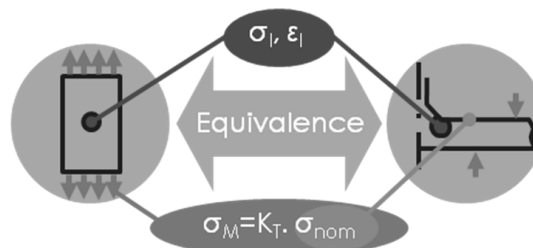


Figure 3 : Equivalence entre approche à deux échelles (a) et plasticité confinée (b)

L'identification de l'opérateur de localisation est réalisée à partir d'un calcul élasto-plastique monotone de la structure étudiée. Cette méthode simplifiée a été validée expérimentalement pour des éprouvettes plates entaillées [9] sollicitées en traction monotone et cyclique. Combinée à un critère de fatigue (Eq. 1), une méthode rapide (MR), qui désigne l'ensemble de la chaîne de calcul (intégrant la phase d'identification des propriétés matériaux), a été mise en place afin d'aboutir de manière quasi-instantanée à la durée de vie d'une structure à partir d'un unique calcul élasto-plastique.

2.2 Identification de l'opérateur de localisation

Dans un premier temps, afin d'identifier l'opérateur de localisation, un calcul élasto-plastique intégrant la loi de comportement de la ZAT simulée (§.1.3) a été mené pour une géométrie locale donnée. Un modèle par éléments finis a été développé sous Abaqus/Standard. En raison de la symétrie de la structure, seule la moitié de l'assemblage soudé a été modélisée. Le modèle numérique retenu s'appuie sur l'hypothèse des contraintes planes et sur l'utilisation d'éléments linéaires quadrangulaires à 4 nœuds (CPS4R). Compte tenu de la concentration de contraintes rencontrée, une étude de convergence au maillage a été réalisée et a conduit au choix du maillage représenté dans la Figure 4a.

Conformément aux essais, un chargement monotone de flexion quatre points a été appliqué au modèle numérique. Dans le cas d'un problème 1D (*i.e.* assemblage en T), la relation (1) s'écrit alors

$$\sigma = \sigma_M - C\varepsilon^p, \quad (3)$$

où σ et σ_M représente respectivement la contrainte principale (non nulle) de $\underline{\underline{\sigma}}$ et $\underline{\underline{\sigma}}_M$, ε^p est la déformation plastique (dans la direction considérée) et C la composante (non nulle) de l'opérateur de localisation. C peut alors être aisément calculé à partir du couple (ε^p, σ) et $\sigma_M = K_T \cdot \sigma_{nom}$ au point critique, localisé au sein du rayon de raccordement.

La Figure 4b montre la réponse numérique (EF) et celle issue de la méthode simplifiée (opérateur C) au point critique de la structure soumise à un chargement élasto-plastique monotone. Le calcul de la pente de la droite (C/E), où E désigne le module d'Young, conduit alors à l'identification de l'opérateur C .

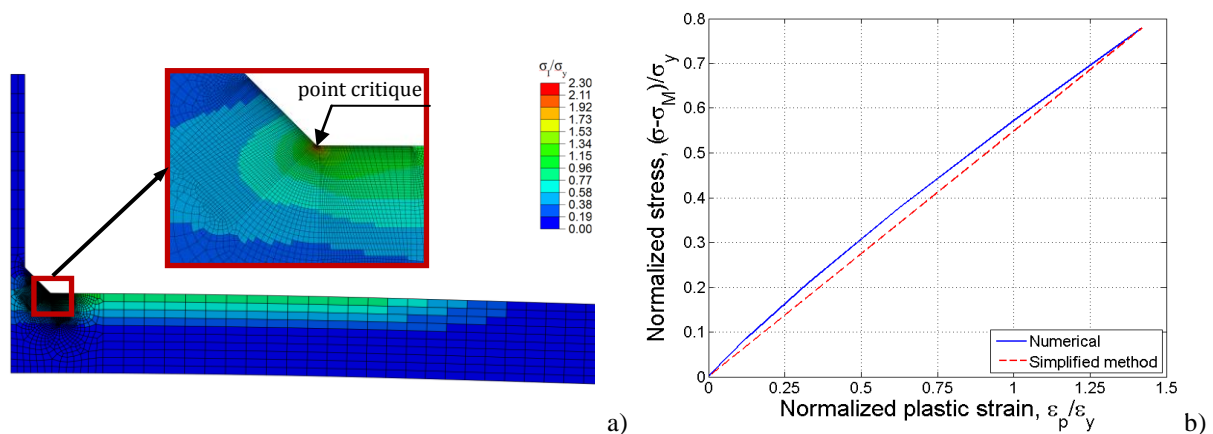


Figure 4 : Modèle numérique de l'assemblage soudé (1/2 échantillon, 10 000 éléments) (a) et réponse numérique sous chargement élasto-plastique monotone au point critique (méthode simplifiée, AEF) (b)

2.3 Prédiction du cycle stabilisé

La seconde étape de cette méthodologie consiste à déterminer l'évolution des contraintes/déformations au point critique de la structure jusqu'à l'obtention du cycle stabilisé. Cette prévision est réalisée exclusivement à partir de la méthode simplifiée (opérateur de localisation C). La Figure 5a montre la réponse ainsi obtenue sous chargement cyclique avec $\sigma_{a\text{ nom}} = 0.6\sigma_y$ et un rapport de charge $R_\sigma = 0.1$. La Figure 5b représente quant à elle le cycle stabilisé après 100 cycles de chargement. Pour le chargement considéré, une relaxation de la contrainte moyenne est observée.

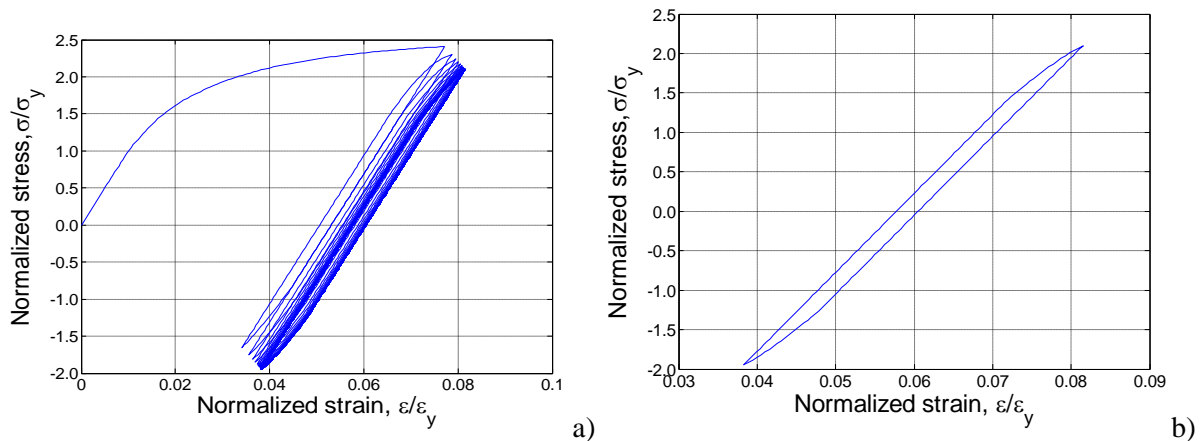


Figure 5 : Réponse numérique (a) et cycle stabilisé (b) au point critique de la structure (méthode simplifiée)

2.4 Prédiction de la durée de vie en fatigue

La troisième étape de la méthodologie consiste à introduire le cycle stabilisé obtenu dans un critère de fatigue afin d'estimer la durée de vie à l'amorçage d'une fissure et finalement de déterminer la courbe de Wöhler de l'assemblage soudé. La Figure 6a indique la réponse obtenue pour différentes épaisseurs. Les durées de vie expérimentales N_i sont présentées en fonction de l'amplitude du chargement appliqué $\sigma_{a\text{ nom}}$ adimensionnée par la limite d'élasticité σ_y du métal de base, pour les trois épaisseurs étudiées : 1.0t, 2.0t et 2.8t (Figure 6b).

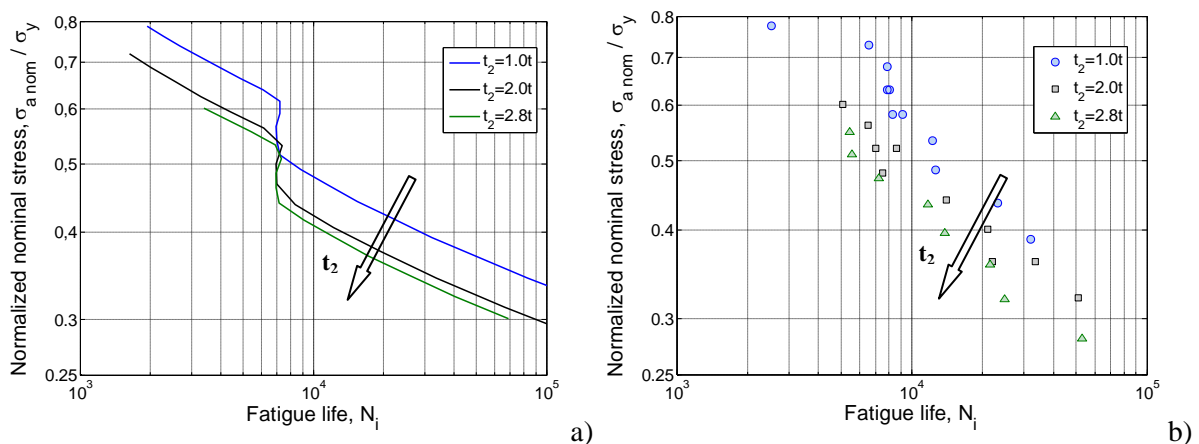


Figure 6 : Courbes de Wöhler numériques (a) et expérimentales (b) pour différentes épaisseurs

Pour l'ensemble des configurations étudiées, une allure en Z peut être observée. Celle-ci s'explique par l'existence de trois comportements distincts au point critique de la structure :

- une adaptation dès le premier cycle (aux faibles amplitudes de chargement) ;
- une adaptation après plusieurs cycles (relaxation partielle de la contrainte moyenne) ;
- une accommodation qui implique une relaxation de la contrainte moyenne (aux amplitudes de chargement importantes). Cette relaxation, combinée au critère de fatigue oligocyclique considéré, conduit à une augmentation soudaine des propriétés en fatigue.

Enfin, pour que cette méthode puisse être aisément applicable en bureaux d'études, une formulation paramétrique de l'opérateur de localisation C a été développée. Pour cela, des expressions paramétriques des coefficients de concentration de contrainte élastique (K_T) et élasto-plastique (K_σ) ont été proposées afin de pouvoir accéder instantanément à l'état de contraintes au point critique et par conséquent à la durée de vie correspondante [9].

Dans cette étude, les paramètres matériaux sont fixés (ZAT simulée). En s'appuyant sur les relevés de mesures (Table 1), le choix de valeurs représentatives introduites pour les prévisions numériques a porté sur la géométrie moyenne relevée, à l'exception du rayon de raccordement ρ . En effet, pour ce paramètre, qui possède le plus d'influence sur la concentration de contraintes rencontrée en pied de cordon, la valeur représentative a été choisie en utilisant les relations suivantes

$$\rho = \rho_{\text{moy}} - \bar{\sigma} \text{ pour } \frac{\rho_{\text{moy}}}{\sigma} \leq 4, \quad (4)$$

$$\rho = \rho_{\text{moy}} - 2\bar{\sigma} \text{ pour } \frac{\rho_{\text{moy}}}{\sigma} \geq 4 \quad (5)$$

3 Conclusion

Une méthode rapide de prévision de la durée de vie en fatigue oligocyclique d'assemblages soudés a été développée. Cette méthode, basée sur une technique de modélisation à deux échelles, permet d'accéder à l'état de contraintes/déformations au point critique de la structure et ainsi d'estimer sa durée de vie. Elle repose néanmoins sur un unique calcul par éléments finis non linéaire destiné à identifier l'opérateur de localisation, qui dépend de la géométrie locale de l'assemblage.

Afin de pouvoir déterminer l'opérateur de localisation en bureaux d'études (sans aucun calcul éléments finis), des abaques prenant en compte l'ensemble des paramètres décrivant la géométrie locale en pied de cordon, ont été proposés. Cette méthode a été appliquée à des assemblages soudés en T, sollicités en flexion quatre points, et a permis d'établir des courbes de Wöhler numériques pour différentes épaisseurs. Afin de réaliser une confrontation essais/calculs, des essais de fatigue ont également été menés sur des joints en T pour trois épaisseurs distinctes et ont permis de valider la pertinence de la méthode rapide proposée.

Références

- [1] T. Herbland, Une méthode de correction élasto-plastique pour le calcul en fatigue des zones de concentration de contraintes sous chargement cyclique multiaxial non proportionnel, Thèse de l'Ecole des Mines de Paris, 2009.
- [2] S. Plessis, Méthode d'estimation rapide de la tenue en fatigue oligocyclique d'une structure dans le cadre de la plasticité confinée : application aux assemblages soudés pour la construction navale, Thèse de l'Université de Bretagne Occidentale, 2013.
- [3] S.J. Maddox, The Effect of Plate Thickness on the Fatigue Strength of Fillet Welded Joints, The Welding Institute, 1987.
- [4] T.R. Gurney, The influence of thickness on fatigue of welded joints - 10 years, 8nd Int Conf on Offshore Mech and Arctic Eng, Vol. III, The Hague, The Netherlands, 1-8, 1989.
- [5] Matelect LTD. Practical Aspects of the ACPD Technique. User Manual.
- [6] S. Manson, Fatigue: a complex subject-some simple approximations. Exp. Mech., 193-226, 1965.
- [7] K.N. Smith, P. Watson T.H. Topper, A stress-strain function for the fatigue of materials. J. Mater., 5, 767-778, 1970.
- [8] E. Kröner, Zur plastischen Verformung des Vielkristalls, Acta Metall., 9, 155-161, 1961.
- [9] J. Raujol-Veillé, D. Thévenet, C. Doudard, S. Calloch, H. Minnebo, Rapid method for low cycle fatigue properties: thickness effect on the fatigue crack initiation life of welded joints, Fat. & Fract. Eng. Mat. Str., *in press*, 2015.