



**HAL**  
open science

# Méthode d'estimation rapide du comportement cyclique dans une zone de plasticité confinée : application aux assemblages soudés pour la construction navale

Sarah Plessis, Cédric Doudard, David Thevenet, Sylvain Calloch, Mikael Cazuguel

## ► To cite this version:

Sarah Plessis, Cédric Doudard, David Thevenet, Sylvain Calloch, Mikael Cazuguel. Méthode d'estimation rapide du comportement cyclique dans une zone de plasticité confinée : application aux assemblages soudés pour la construction navale. CFM 2013 - 21ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2013, Bordeaux, France. hal-03439033

**HAL Id: hal-03439033**

**<https://hal.science/hal-03439033>**

Submitted on 22 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.

# Méthode d'estimation rapide du comportement cyclique dans une zone de plasticité confinée : application aux éprouvettes entaillées

S. PLESSIS<sup>a,b</sup>, S. CALLOCH<sup>b</sup>, C. DOUDARD<sup>b</sup>, D. THEVENET<sup>b</sup>, H. MINNEBO<sup>a</sup>

a. DCNS, rue Choiseul, 56311 LORIENT Cedex

b. LBMS Ensta Bretagne, 2 rue François Verny, 29806 BREST Cedex 9

## Résumé :

*Les assemblages soudés sont largement utilisés dans le domaine de la construction navale. Ce procédé offre de nombreuses possibilités et de nombreux avantages pour la conception de structures complexes à partir d'éléments de base à géométrie simple (e.g. plaques, tubes, profilés...). Comme ce sont le plus souvent des éléments clés qui participent au maintien de l'intégrité de la structure, ils subissent en service des chargements mécaniques cycliques complexes, de forte amplitude. De plus, de par leur géométrie, les zones d'assemblage sont des concentrateurs de contraintes, notamment au voisinage des cordons de soudure. Elles sont donc des sites privilégiés où peut apparaître de la plasticité confinée, germe de fissures par fatigue.*

*Il est donc important que les bureaux d'études disposent de méthodes et d'outils performants leur permettant d'aborder le dimensionnement des assemblages soudés vis-à-vis des risques d'endommagement par fatigue. Cela passe nécessairement par la détermination de l'historique des contraintes et des déformations aux points jugés critiques. Pour éviter des calculs complets par éléments finis particulièrement longs, des méthodes d'estimations rapides du champ de déformation plastique de type « Neuber amélioré » sont souvent utilisées. Néanmoins ces méthodes manquent généralement de précision. Une nouvelle approche basée sur les techniques d'homogénéisation est proposée dans le cadre de ce travail [1]. Les prévisions issues de cette approche seront confrontées, d'une part, à des calculs numériques complets et d'autre part à des mesures expérimentales réalisées sur éprouvettes entaillées en acier à haute résistance pour structures navales pour lequel le comportement élasto-plastique du matériau a été préalablement identifié.*

## Abstract :

*Welded assemblies are commonly used in the shipbuilding industry. The welding process provides many possibilities and advantages for the design of complex structures from simple geometric elements. (e.g., plates, tubes...). They are usually key elements which contribute to the integrity of the structure and are subjected to complex and intense cyclic loading. Besides, welded assemblies contain geometrical discontinuities, which generate local stress and strain concentrations, and more particularly along the welding seam. Due to confined plasticity, nucleation of fatigue cracks can occur in these highly stressed regions and their growth could lead to fracture.*

*Shipbuilding engineering and design department therefore need to have efficient methods to predict the fatigue behavior of welded assemblies. Fatigue analysis requires calculation of elastic-plastic stresses and strains at the critical points of the structure (points of initiation for the fatigue crack). Elastic-plastic finite element analyses could be performed but since the computational cost is prohibitive, other quick estimation methods were developed. The local elastic-plastic behavior can be estimated using the purely elastic solution, (for instance Neuber's rule). However, the lack of accuracy for multiaxial loadings in these methods led to a new approach based on homogenization models which is used in this study. The stress and strain histories thus determined will be compared to finite element computations and to experimental results on double notched specimen for naval shipbuilding whose behavior law is known from previous testing.*

**Mots clefs :** Fatigue oligocyclique, plasticité confinée, assemblages soudés, calcul accéléré

# 1 Présentation de la méthode et comparaison avec les méthodes de Neuber et Molski-Glinka

## 1.1 Présentation de la méthode

Les méthodes de calcul accéléré du champ de contrainte  $\sigma$ , et du champ de déformation,  $\varepsilon$ , dans une zone de plasticité confinée, plus particulièrement au point critique, consiste à déterminer ces champs à partir du champ de contrainte,  $\sigma_M$ , et de déformation,  $\varepsilon_M$ , issus d'un calcul élastique. Herbland [1] a proposé d'assimiler ce problème à un problème d'homogénéisation (Kröner, [2]) : la zone de déformation plastique confinée est assimilée à l'inclusion et la matrice entourant cet élément de matière est le milieu équivalent (Figure 1 où  $K_T$  est le facteur de concentration de contrainte). Les tenseurs des contraintes,  $\sigma_H$ , au point critique est alors donné par

$$\underline{\sigma}_H = \underline{\sigma}_M - \underline{L} : \underline{\varepsilon}_H^p \quad (1)$$

Dans le cas d'un problème 1D (i.e., éprouvette plate avec une entaille), la relation précédente s'écrit

$$\sigma_H = \sigma_M - L' \cdot \varepsilon_H^p, \quad (2)$$

où  $L'$  est un paramètre à identifier (tous les autres termes du tenseur  $\underline{L}$  sont pris égaux à zéro). Il est déterminé en minimisant l'écart entre la réponse de la méthode proposée et le calcul numérique complet sur le premier quart de cycle. Plusieurs relations ont déjà été proposées dans la littérature pour estimer  $(\sigma, \varepsilon)$  en fonction de  $(\sigma_M, \varepsilon_M)$ , notamment celle de Neuber [3] décrite en Equation 3 et celle de Molski-Glinka [4] en Equation 4.

$$\sigma_N \varepsilon_N = \sigma_M \varepsilon_M, \quad (3)$$

$$2 \int \sigma_{MG} \varepsilon_{MG} = \sigma_M \varepsilon_M. \quad (4)$$

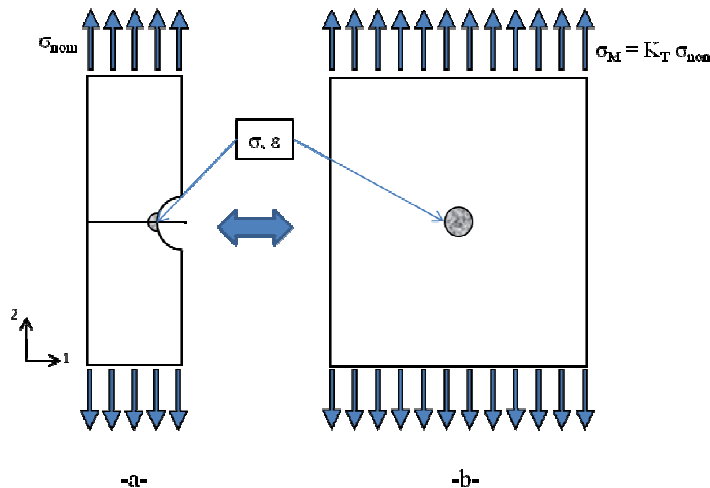


FIG. 1 – Equivalence plasticité confinée et Homogénéisation

On notera que ces deux dernières approches ne nécessitent pas d'identification de paramètres supplémentaires.

## 1.2 Mise en œuvre et comparaison

Un essai de traction sur éprouvette plate entaillée est utilisé pour illustrer la méthode simplifiée et la comparer avec les méthodes de Neuber et Molski-Glinka (M-G). La géométrie de l'éprouvette plate entaillée est représentée sur la Figure 2 ainsi que le maillage utilisé : 6115 nœuds pour 5944 éléments quadrangles à intégration réduite d'ordre linéaire en contraintes planes. Les paramètres du matériau correspondent à un

écrouissage cinématique non linéaire (Tableau 1).

Un chargement monotone de 180 MPa est appliqué à l'échantillon. Pour illustrer les erreurs de prévisions obtenues par les méthodes simplifiées classiques (Neuber et M-G), on propose de tracer les réponses de ces approches ainsi que la réponse obtenue avec un calcul EF complet, dans le plan ( $\epsilon_{22}^p$ ,  $\sigma_M$ - $\sigma_{22}$ ) (Figure 3). On observe un écart non négligeable : Neuber surestime la réponse en contrainte alors que M-G sous-estime celle-ci. La méthode proposée nécessitant l'identification du paramètre  $L'$  donne un résultat satisfaisant ; on propose d'identifier ce dernier à l'aide de la réponse du calcul complet pour ce chargement monotone (i.e.,  $L' = 104722$  MPa).

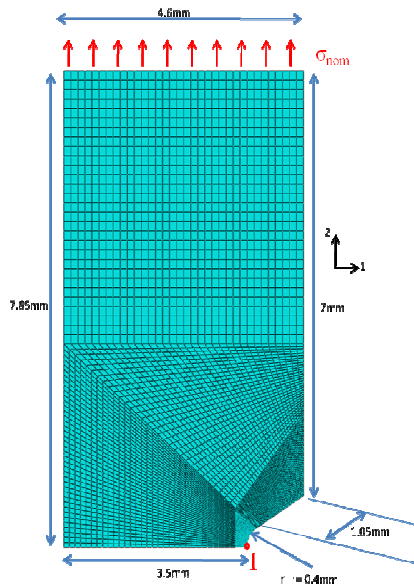


FIG. 2 – Géométrie et maillage de l'éprouvette entaillée

E	200 GPa
$\nu$	0,3
Re	250 MPa
C	312 500 MPa
$\gamma$	1250

TAB. 1 – Paramètres du matériau

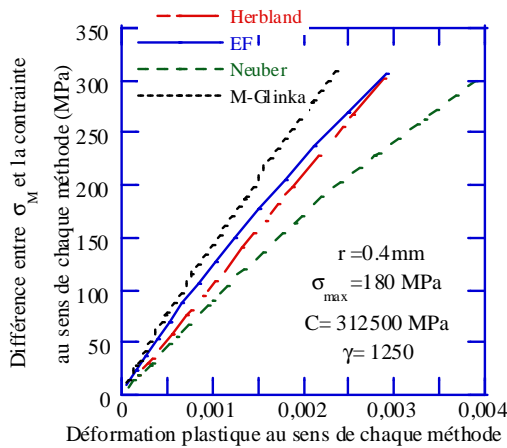


FIG. 3 – Comparaison des méthodes simplifiées sur un quart de cycle

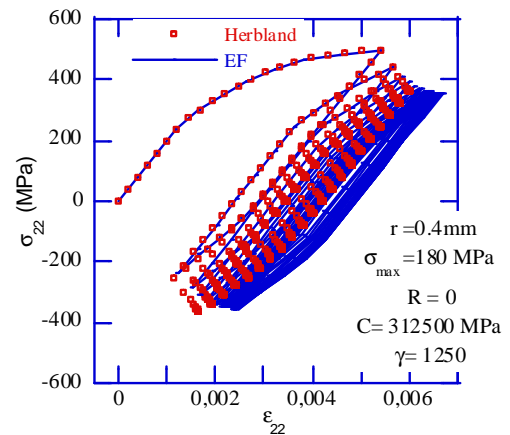


FIG. 4 – Comparaison EF/méthode simplifiée

L'approche considérée est alors validée en comparant la prévision de l'approche avec le résultat issu d'un calcul complet pour un chargement cyclique d'amplitude de 180 MPa et de rapport de charge nul. La courbe contrainte-déformation au point critique I prévue par la méthode proposée est très proche de celle obtenue par un calcul EF complet (Figure 4) sur 30 cycles. La relaxation de la contrainte moyenne est bien décrite. Il est important de noter que le résultat obtenu par la méthode simplifiée est obtenu en quelques secondes alors que le calcul EF non linéaire dure une quinzaine de minutes.

## 2 Application aux éprouvettes entaillées

### 2.1 Cas d'étude

La méthode simplifiée a ensuite été appliquée à une éprouvette entaillée en acier pour construction navale. Les paramètres du matériau utilisé dans le modèle EF a tout d'abord été défini pour cet acier à partir d'une campagne d'essais en traction cyclique sur éprouvettes axisymétriques (Figures 5 et 6). La géométrie de l'éprouvette plate entaillée est représentée sur la Figure 7 ainsi que le maillage utilisé (éléments quadrangles en contraintes planes).

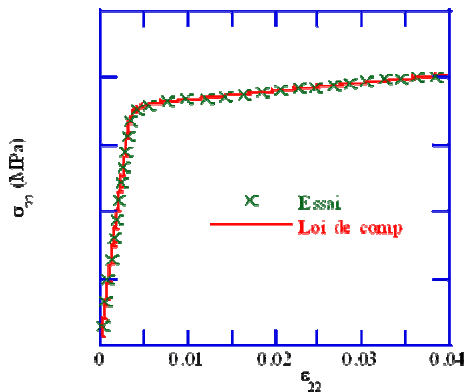


FIG. 5 – Comparaison Essai/Loi identifiée (traction monotone)

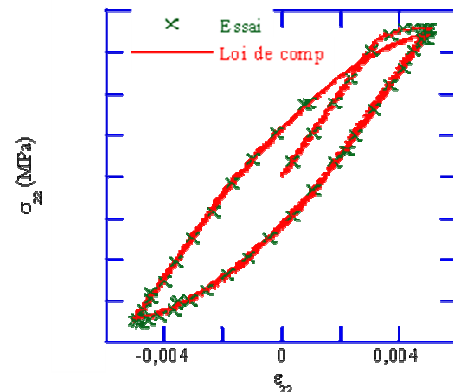


FIG. 6 – Comparaison Essai/Loi identifiée (traction cyclique)

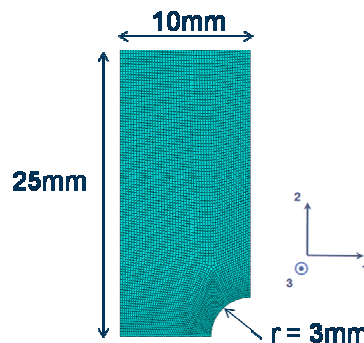


FIG. 7 – Géométrie et maillage de l'éprouvette entaillée

### 2.2 Comparaison des comportements cycliques obtenus par chaque méthode

Une comparaison essai/EF a été réalisée sur un essai de traction monotone (Figure 8). Le modèle EF établi a permis d'identifier l'opérateur de localisation de cette éprouvette entaillée. Le comportement en traction monotone obtenu par la méthode simplifiée est identique à celui obtenu par EF. Des essais de traction cyclique pilotés en effort à  $R = 0$  ont ensuite été effectués. Une comparaison entre les comportements cycliques en fond d'entaille obtenus par chaque méthode (EF, méthode simplifiée, expérimental) a pu être réalisée. La déformation expérimentale étant obtenue grâce à une jauge en fond d'entaille, la Figure 9 représente l'amplitude de déformation en fonction du nombre de cycles moyennée sur la longueur de cette jauge (5 éléments EF). La Figure 10 permet de comparer quant à elle l'amplitude de déformation au point critique de la structure obtenue par EF (1 élément) et par la méthode simplifiée. Les différentes méthodes (EF, méthode simplifiée, expérimental) donnent des résultats similaires en terme d'amplitude de déformation en fonction du nombre de cycles. Cet aspect est important pour le calcul de la durée de vie réalisé dans la partie suivante.

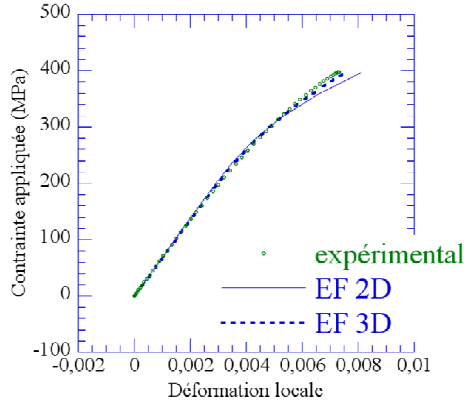


FIG. 8 – Comparaison Essai/EF sur éprouvette entaillée (traction monotone)

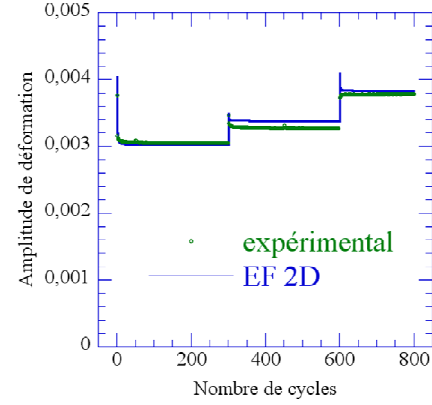


FIG. 9 – Comparaison Essai/EF sur éprouvette entaillée (traction cyclique)

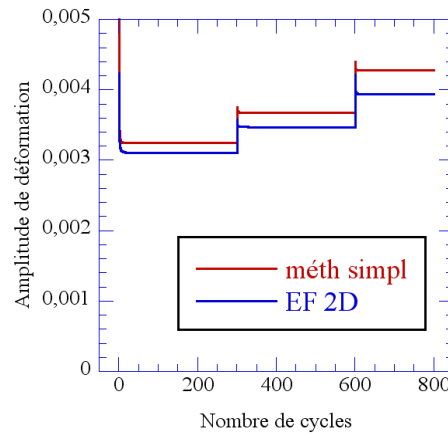


FIG. 10 – Comparaison EF/méthode simplifiée du comportement cyclique en fond d'entaille

### 2.3 Comparaison entre durée de vie théorique et durée de vie expérimentale

Les méthodes numériques (EF/méthode simplifiée) nous ont permis d'accéder à l'historique des contraintes et des déformations en fond d'entaille et donc au cycle stabilisé. Ce qui permet de connaître la durée de vie théorique de l'éprouvette par l'intermédiaire de deux critères de fatigue : le critère de Morrow (Equation 5) et celui de Smith-Watson-Topper (Equation 6), où  $\Delta\epsilon_t/2$  est l'amplitude de déformation totale du cycle stabilisé,  $E$  le module d'Young du matériau,  $N_r$  le nombre de cycles à rupture,  $\sigma'_f$ ,  $b$ ,  $\epsilon'_f$ ,  $c$  sont les coefficients de Manson-Coffin-Basquin (déterminés à partir de la courbe de fatigue à  $R_\epsilon = -1$ ),  $\sigma_m$  la contrainte moyenne et  $\sigma_{\max}$  la contrainte maximale du cycle stabilisé.

$$\frac{\Delta\epsilon_t}{2} = \frac{\sigma'_f - \sigma_m}{E} (2N_r)^b + \epsilon'_f (2N_r)^c \quad (5)$$

$$\frac{\Delta\epsilon_t}{2} \sigma_{\max} = \frac{\sigma'_f{}^2}{E} (2N_r)^{2b} + \sigma'_f \epsilon'_f (2N_r)^{b+c} \quad (6)$$

Des essais de fatigue avec détection de l'amorçage de fissure par ACPD (Figures 11 et 12) ont été réalisés sur les éprouvettes entaillées en acier pour construction navale. Un critère d'arrêt de l'essai a été fixé : on considère qu'il y a amorçage lorsque l'augmentation de la tension relevée dépasse 0,03 Volts. Ce critère correspond à une taille de fissure inférieure à 1 mm. Les durées de vie expérimentales ont ensuite été comparées aux durées de vie numériques calculées précédemment (Figure 13). Le modèle EF (et donc la méthode simplifiée) donne des résultats proches de l'expérience mais non conservatifs pour les trois derniers

points de sollicitation.

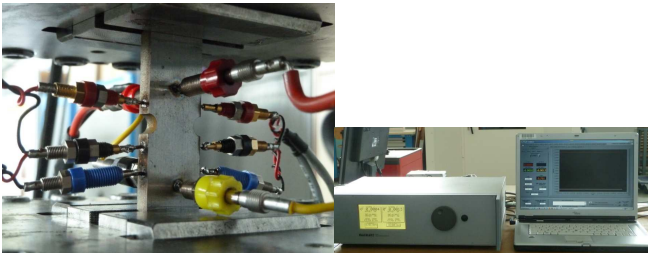


FIG. 11 – Dispositif ACPD sur éprouvette entaillée

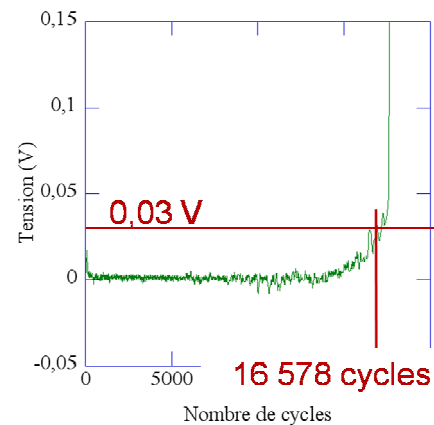


FIG. 12 – Allure de la tension au cours de l'essai de traction cyclique

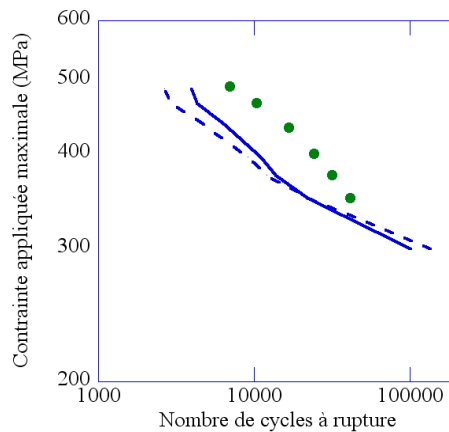


FIG. 13 – Comparaison EF/Essais des durées de vie

### 3 Conclusion

La méthode simplifiée [1] nécessite un calcul par éléments finis pour pouvoir être appliquée : un calcul élastoplastique monotone afin de déterminer l'opérateur de localisation  $L$ . Bien que la méthode simplifiée nécessite ce calcul, cela est moins long qu'un calcul élastoplastique sur des dizaines de cycles.

Sur l'exemple d'une éprouvette en acier pour construction navale, les résultats obtenus par la méthode EF sont satisfaisants par rapport aux essais. La méthode simplifiée reproduit bien quant à elle le comportement EF avec un gain de temps non négligeable (100 cycles EF prenaient 1h09min tandis que la méthode simplifiée générerait ces cycles en moins d'une minute).

### References

- [1] Herbland T., "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'école des Mines de Paris* (2009).
- [2] Kröner E., "Zur plastischen Verformung des Vielkristalls", *Acta Metall.*, vol. 9, (1961), pp. 155-161.
- [3] Neuber H., "Theory of stress concentration for shear-strained prismatic bodies with arbitrary non-linear stress-strain law", *J. of Applied Mechanics*, vol. 28, (1961), pp. 544-551.
- [4] Molski K., Glinka G., "A method of elastic-plastic stress and strain calculation at a notch root", *Material Material Science and Engineering*, vol. 50, (1981), pp. 93-100.