

Modélisation des effets d'histoire de chargement sur les propriétés en fatigue d'un acier à partir de mesures d'Auto-Échauffement

J. LOUGE^{a,b}, S. MOYNE^a, C. DOUDARD^a, S. CALLOCH^a, B. WEBER^b

a. Institut de Recherche Dupuy de Lôme (CNRS UMR 6027), UBS / UBO / ENSTA Bretagne / ENIB
2, rue François Verny 29806 BREST CEDEX 9

b. ArcelorMittal Centre Produits, Voie Romaine 57280 Maizières-lès-Metz

Résumé :

Dans le contexte de la fatigue à grand nombre de cycles, la caractérisation en fatigue est généralement réalisée à l'état vierge des matériaux (i.e., vierge de toute sollicitation). Cependant, les procédés de mise en forme et le caractère complexe des chargements en service ont pour conséquence la modification des propriétés en fatigue. L'étude de tous ces effets de chargement par une caractérisation en fatigue classique serait compliquée. Il est alors proposé d'utiliser des mesures d'auto-échauffement, qui ont pour but de déterminer rapidement, et avec une seule éprouvette, les propriétés en fatigue d'un matériau. Ces mesures sont basées sur l'observation de l'élévation de température du matériau sous sollicitations cycliques. Un modèle probabiliste à deux échelles a été développé afin de relier ces mesures aux propriétés en fatigue. Cependant, dans son état actuel, il ne permet pas de prendre en compte les effets d'histoire de chargement. L'objectif de cette étude est alors de proposer une amélioration de ce modèle, basée sur l'observation des résultats d'auto-échauffement après deux effets d'histoire : effet d'une pré-déformation plastique macroscopique initiale et effet d'un pré-chargeement cyclique initial. La réponse en dissipation du modèle correspond aux résultats expérimentaux obtenus et l'estimation de l'effet d'un pré-chargeement cyclique initial des courbes de fatigue est en adéquation avec les essais de fatigue à deux blocs réalisés.

Abstract :

In the context of high cycle fatigue, the experimental characterization of the fatigue properties is often performed by using specimens in a virgin state (i.e., without preliminary loading). However, the load history applied to a real structure is more complex and the fatigue life prediction remains a difficult task. Self-heating measurements, based on monitoring temperature evolution during cyclic loading and using one specimen only, seems to be an appropriate approach. A probabilistic two-scale model was developed from these measurements to characterize fatigue properties. However, this model is not able to predict load history effect on the fatigue properties. The goal of this study is to provide improvements of the model, based on self-heating measurements after two load history effects : macroscopic pre-straining effect and cyclic pre-loading effect. The results of this new model in terms of dissipation are consistent with the self-heating measurements and the estimation of a cyclic pre-loading effect on fatigue curves are in line with the experimental results.

Mots clefs : Fatigue HCF, acier HSLA, mesures d'auto-échauffement, effet d'histoire, modèle probabiliste à deux échelles

1 Introduction

La caractérisation en fatigue classique des aciers nécessite un certain nombre d'éprouvettes et plusieurs semaines à un mois d'essai. Dans le cadre des produits plats en acier, les essais d'auto-échauffement ont été développés dans le but de réduire ce temps de caractérisation [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Ces essais ont la particularité de mesurer l'évolution de la température du matériau sous sollicitation cyclique. À partir de ces mesures d'auto-échauffement, un modèle probabiliste à deux échelles a été développé afin de relier ces mesures aux propriétés en fatigue [1, 3]. Dans cette étude il est proposé d'étendre le cadre d'utilisation des mesures d'auto-échauffement sous chargement cyclique à l'étude des effets d'histoire sur les propriétés en fatigue. En effet, le modèle existant ne permet pas de rendre compte des effets d'histoire de chargement (*e.g.*, une pré-déformation plastique, chargement à amplitude variable, ...).

Dans un premier temps, le principe des mesures d'auto-échauffement est présenté ainsi que le modèle probabiliste à deux échelles initial. Ensuite, les effets d'une pré-déformation plastique initiale macroscopique et d'un pré-chargement cyclique sur les mesures d'auto-échauffement sont présentés. À partir de ces résultats expérimentaux, une modification du modèle est proposée pour rendre compte de ces résultats. Enfin, les courbes de fatigue estimées par le nouveau modèle avec et sans effet d'histoire sont comparées aux courbes de fatigue obtenues classiquement.

Tout au long de cette étude, le matériau considéré est un acier ferritique HSLA (High Strength Low Alloy) d'épaisseur 2mm, destiné à la conception automobile, dont sa limite d'élasticité macroscopique est d'environ 320 MPa et sa limite de fatigue moyenne à rapport de charge -1 est d'environ 210 MPa.

2 Mesures d'auto-échauffement

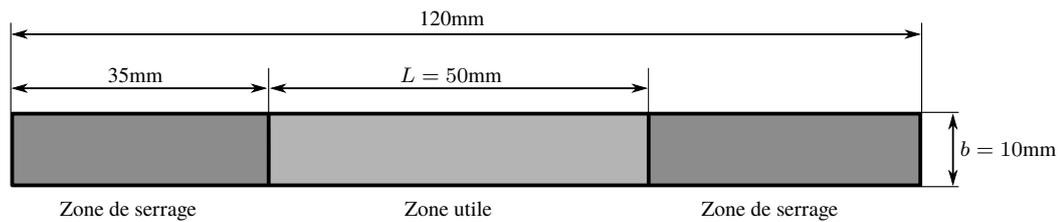
2.1 Principe des mesures

Le principe des mesures d'auto-échauffement consiste à appliquer une succession de blocs de chargement cyclique à contrainte moyenne nulle ($R = -1$) d'amplitude croissante (tout en gardant une amplitude constante au cours d'un bloc) sur une éprouvette à section constante de type barre (Fig.1). Cette géométrie permet d'obtenir une zone utile homogène et ainsi d'adopter une approche thermique 0D (*i.e.*, considérer un champ de température homogène dans la zone utile). Durant chaque bloc de sollicitation cyclique, la température est mesurée à l'aide de thermocouples positionnés respectivement au centre de la zone utile de l'éprouvette et sur chacun des mors hydraulique à proximité de l'éprouvette. Ces deux derniers permettant de prendre en compte les échanges thermiques entre les mors hydrauliques et l'éprouvette. Ainsi, l'élévation de la température de l'éprouvette due à l'auto-échauffement du matériau seul, notée θ , est alors déterminée par

$$\theta = T_{\text{ep}} - \frac{T_{\text{msup}} + T_{\text{minf}}}{2} \quad (1)$$

où T_{ep} représente la température au centre de la zone utile de l'éprouvette, T_{msup} et T_{minf} représentent respectivement les température des mors supérieur et inférieur. Avec une approche thermique 0D, l'équation de la chaleur peut alors s'écrire sous une forme simplifiée [8, 9, 10, 3], telle que

$$\frac{d\theta(t)}{dt} + \frac{\theta(t)}{\tau_{\text{eq}}} = S_t(t) \quad (2)$$

FIGURE 1 – Éprouvette homogène d’auto-échauffement (épaisseur $e = 2$ mm)

avec τ_{eq} le temps équivalent découlant des conditions limites et $S_t(t)$ le terme source.

L’élévation de la température θ mesurée est de forme exponentielle-saturante (Fig.2). La valeur à saturation est notée $\bar{\theta}$ et, dans le régime stationnaire, l’équation de la chaleur devient

$$\bar{\theta} = \tau_{eq} \bar{S}_t = \tau_{eq} \frac{f_r \bar{\Delta}}{\rho c} \quad (3)$$

où $\bar{\Delta}$ est la dissipation intrinsèque du matériau représentant la dissipation des mécanismes de micro-plasticité responsable de la fatigue au sein du matériau supposée constante par cycle, ρ et c sont des paramètres matériau et f_r la fréquence de sollicitation fixée à 20 Hz tout au long de l’essai. L’évolution de la température à saturation $\bar{\theta}$ en fonction de l’amplitude du bloc de sollicitation, notée Σ_0 est appelée courbes d’auto-échauffement. Dans un diagramme logarithmique, deux régimes, appelés respectivement régime primaire et secondaire, sont visibles (Fig.3).

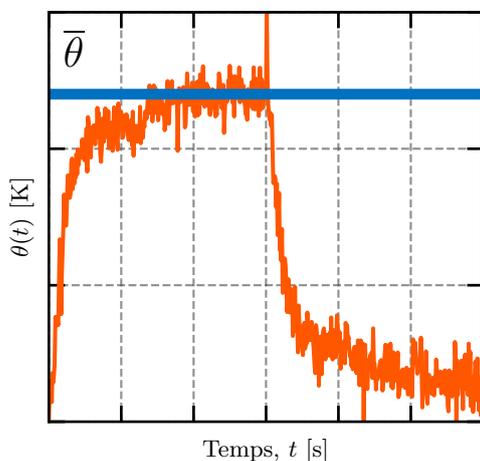
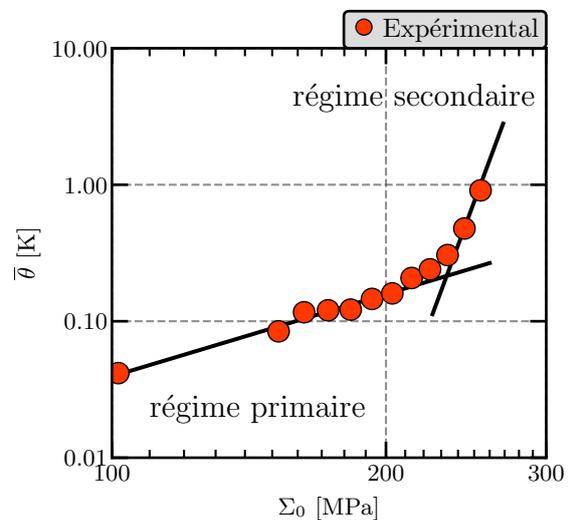
FIGURE 2 – Évolution de la température moyenne θ pendant un bloc de sollicitation

FIGURE 3 – Courbe d’auto-échauffement (échelle logarithmique)

2.2 Modèle probabiliste à deux échelles

Un modèle probabiliste à deux échelles a été développé afin de relier ces mesures thermiques aux propriétés en fatigue du matériau. Il est constitué d’un volume élémentaire représentatif (VER) composé d’une matrice élasto-plastique et d’une population de sites, également élasto-plastiques, s’activant en fonction de l’amplitude du chargement Σ_0 (Fig.4) [11, 12]. Avec cette représentation, l’élévation de la

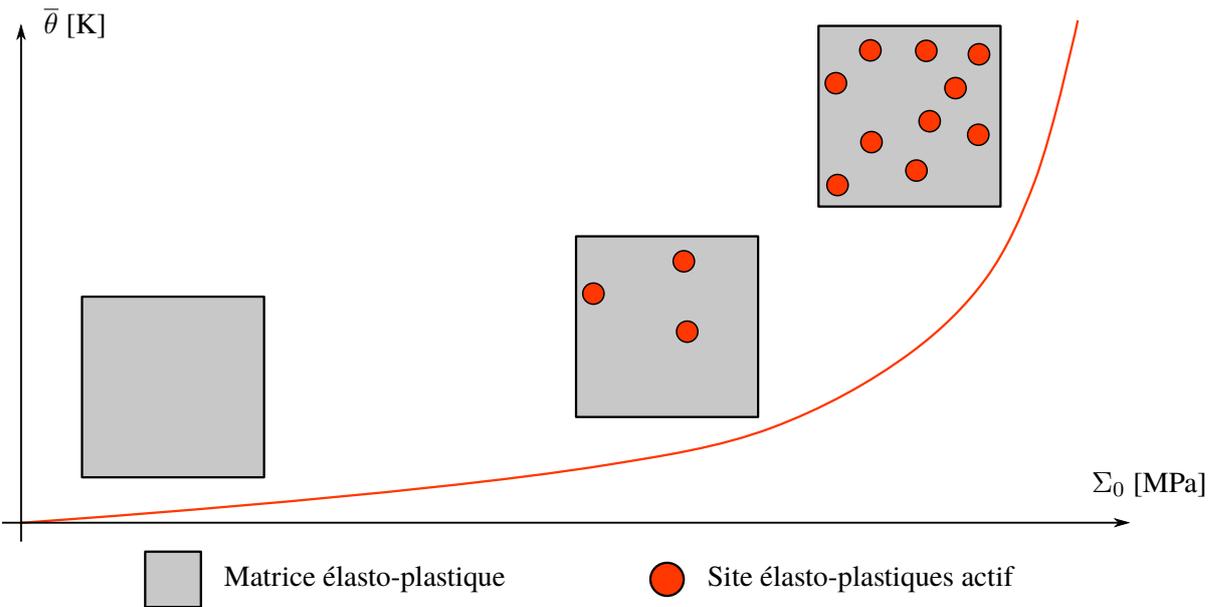


FIGURE 4 – VER considéré dans le modèle probabiliste à deux échelles

température du régime primaire $\bar{\theta}^{\text{RP}}$ est associée à la dissipation de la matrice seule, telle que [3]

$$\bar{\theta}^{\text{RP}} = \alpha \left(\frac{\Sigma_0}{\Sigma_{\text{max}}} \right)^2 \quad (4)$$

avec α représentant l'intensité du régime primaire et Σ_{max} l'amplitude maximale de l'essai d'auto-échauffement. L'élévation de la température du régime secondaire est associée à la dissipation d'une part de la matrice et, d'autre part, à la dissipation de la population des sites actifs [1, 3]. Un site est actif si l'amplitude du chargement Σ_0 dépasse sa limite d'élasticité microscopique σ_{site}^y , propre à chacun des sites. La dissipation d'un site actif est donnée par

$$\bar{\Delta}_{\text{site}} = \frac{4 \sigma_{\text{site}}^y}{h} \langle \Sigma_0 - \sigma_{\text{site}}^y \rangle \quad (5)$$

avec h un paramètre matériau. Afin de déterminer le nombre de sites actif N_{sites} pour une amplitude de chargement Σ_0 donnée, un Processus Ponctuel de Poisson (P.P.P.) est utilisé, tel que

$$N_{\text{sites}} = \frac{V_{\text{VER}}}{V_0} \left(\frac{\Sigma_0}{S_0} \right)^m \quad (6)$$

où V_{VER} et V_0 représentent respectivement le volume du VER et celui de tous les sites et les paramètres m et S_0 sont des paramètres matériau. La dissipation de la population des sites s'écrit alors

$$\bar{\Delta}_{\text{pop. sites}} = \frac{1}{V_{\text{VER}}} \int_0^\infty V_{\text{site}} \bar{\Delta}_{\text{site}}(\sigma_{\text{site}}^y) dN(\sigma_{\text{site}}^y) = \frac{4 m}{h S_0^m} \frac{\Sigma_0^{m+2}}{(m+1)(m+2)} \quad (7)$$

avec V_{site} le volume d'un site, ce qui permet d'écrire

$$\bar{\theta}_{\text{pop. sites}} = \beta \left(\frac{\Sigma_0}{\Sigma_{\text{max}}} \right)^{m+2} \quad (8)$$

avec $\bar{\theta}_{\text{pop. sites}}$ l'élévation de la température due aux sites actifs seuls. Ainsi, une courbe d'auto-échauffement peut être estimée par la relation

$$\bar{\theta}_{\text{mod}} = \alpha \left(\frac{\Sigma_0}{\Sigma_{\text{max}}} \right)^2 + \beta \left(\frac{\Sigma_0}{\Sigma_{\text{max}}} \right)^{m+2} \quad (9)$$

où α et β représentent respectivement les amplitudes des régimes primaire et secondaire et le paramètre m représente la pente du régime secondaire (Fig.5).

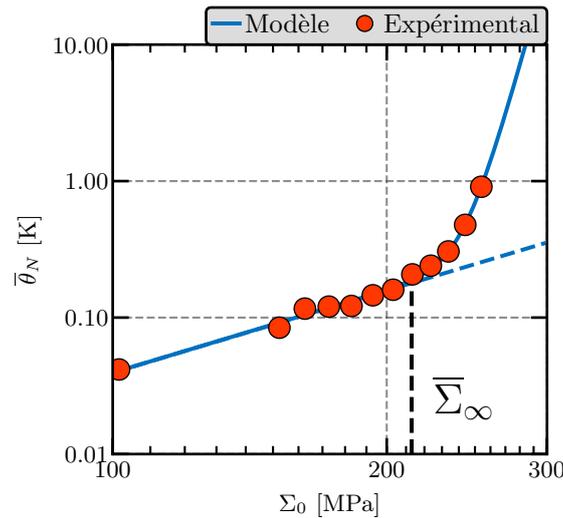


FIGURE 5 – Description de la courbe d'auto-échauffement par le modèle (échelle logarithmique)

Afin de relier les mesures d'auto-échauffement aux propriétés en fatigue, l'hypothèse du maillon le plus faible est adoptée. Cela signifie que si au moins un site est actif (*i.e.*, début du régime secondaire), alors il y aura rupture par fatigue. La limite d'endurance moyenne du matériau peut être ainsi identifiée (Fig.5) (ici $\bar{\Sigma}_\infty^{\text{AE}} \approx 210$ MPa, ce qui correspond à la valeur identifiée classiquement). Afin de prédire la courbe de fatigue (ou courbe S-N) un critère énergétique est utilisé, calculé à partir de la dissipation du maillon faible pour une probabilité de rupture P_F donnée, telle que

$$E_c(P_F) = N_f \bar{\Delta}_{\text{site}}(P_F) \quad (10)$$

où N_f représente le nombre de cycles à rupture. La dissipation du maillon faible, pour une probabilité de rupture P_F est donnée par

$$\bar{\Delta}_{\text{site}}(P_F) = \frac{4 \bar{\Sigma}_\infty(P_F)}{h} \langle \Sigma_0 - \bar{\Sigma}_\infty(P_F) \rangle \quad (11)$$

avec h un paramètre matériau. Alors, pour toute probabilité de rupture P_F , le nombre de cycles à rupture est donné par

$$N_f = \frac{A}{\bar{\Sigma}_\infty(P_F) \langle \Sigma_0 - \bar{\Sigma}_\infty(P_F) \rangle} \quad (12)$$

avec A une constante à déterminer à partir d'un point de rupture connu. Ainsi, la courbe S-N expérimentale et les courbes iso-probabilité peuvent être estimées (Fig.6).

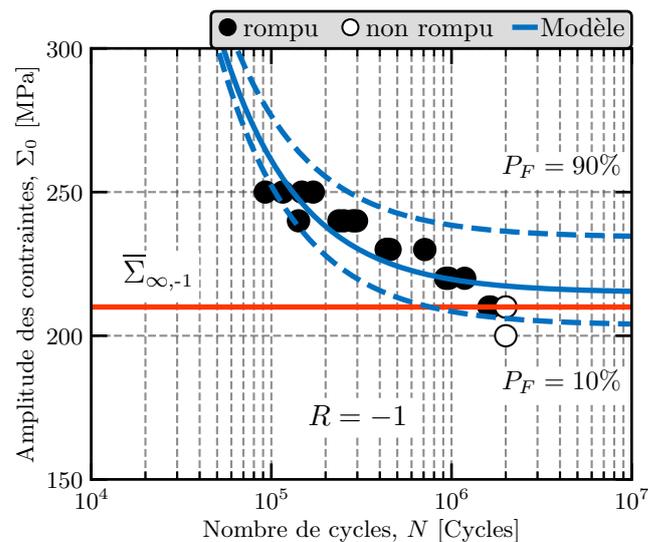


FIGURE 6 – Prédiction de la courbe S-N et des courbes d'iso-probabilité par le modèle

2.3 Effets d'histoire de chargement

Il a été montré que les effets d'histoire de chargement ont un impact non négligeable sur les propriétés en fatigue d'un matériau [1, 3]. Afin de pouvoir estimer l'évolution de ces propriétés, ces effets d'histoire de chargement sont étudiés à partir des mesures d'auto-échauffement. Ces essais vont permettre de donner des éléments supplémentaires afin d'enrichir la modélisation existante et de pouvoir prendre en compte les chargements d'histoire lors de la caractérisation en fatigue.

Deux effets d'histoire sont étudiés à partir des mesures d'auto-échauffement : celui d'une pré-déformation plastique initiale macroscopique (Fig.7) et celui d'un pré-chargement cyclique initial (Fig.9). Comme le régime secondaire seul permet d'identifier les propriétés en fatigue, le régime primaire n'est plus considéré pour la suite de cette étude. Alors, seul le régime secondaire des courbes d'auto-échauffement est présenté (le régime primaire est soustrait à la courbe expérimentale initiale pour obtenir finalement que le régime secondaire). Afin de pouvoir analyser l'évolution de ce régime secondaire des courbes d'auto-échauffement, la variable β_{norm} est introduite représentant l'évolution de la limite d'endurance moyenne du matériau (à 2×10^6 cycles) $\bar{\Sigma}_{\infty}^{\text{AE}}$ identifiée via les mesures d'auto-échauffement, telle que

$$\beta_{\text{norm}} = \frac{\bar{\Sigma}_{\infty}^{\text{AE}}(\text{histoire})}{\bar{\Sigma}_{\infty}^{\text{AE}}(\text{référence})} = \left[\frac{\beta(\text{référence})}{\beta(\text{histoire})} \right]^{1/m} \quad (13)$$

où l'essai de référence est celui sans aucun effet d'histoire. Ce paramètre montre une forte évolution de limite d'endurance moyenne du matériau pour de faibles niveaux de pré-déformation plastique initiale macroscopique puis une augmentation pour de plus forts niveaux (Fig.8). Un pré-chargement cyclique initial, composé de 50 000 cycles pour différentes amplitudes (inférieures à la limite d'élasticité macroscopique), conduit à une diminution de la limite d'endurance moyenne du matériau (Fig.10). Il est supposé que ce sont les déformations plastiques, à différentes échelles (macroscopique et microscopique) qui pilotent les effets d'histoire.

À partir de ces essais d'auto-échauffement, il est possible de déterminer l'évolution des propriétés en

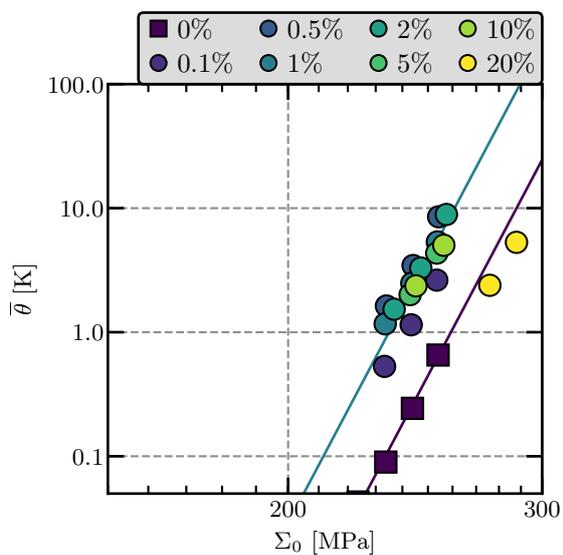


FIGURE 7 – Influence d’une pré-déformation plastique initiale macroscopique sur le régime secondaire d’auto-échauffement

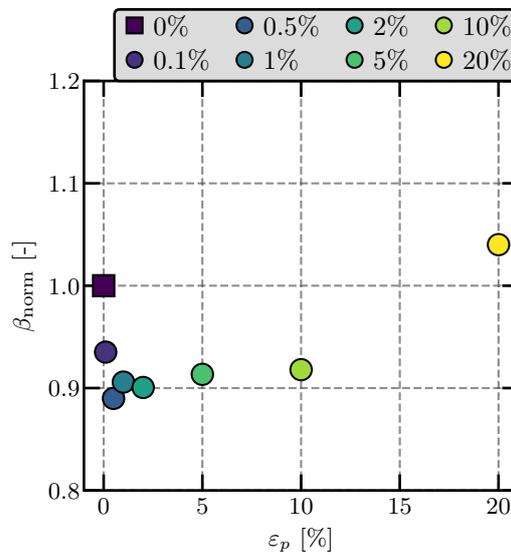


FIGURE 8 – Évolution du paramètre β_{norm} pour différents niveaux de pré-déformation plastique initiale macroscopique

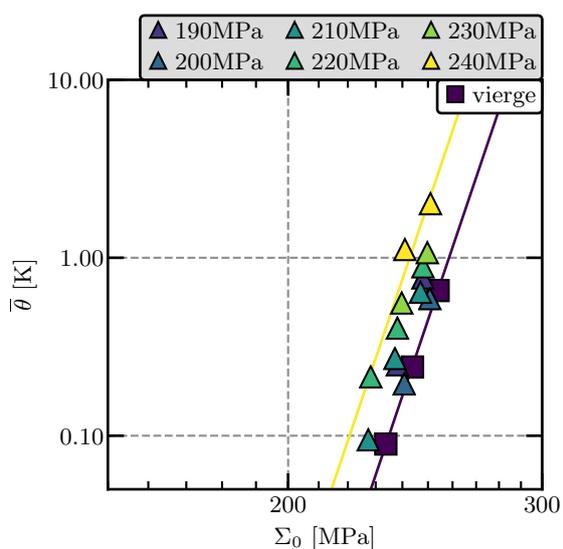


FIGURE 9 – Influence d’un pré-chargement cyclique initial sur le régime secondaire d’auto-échauffement

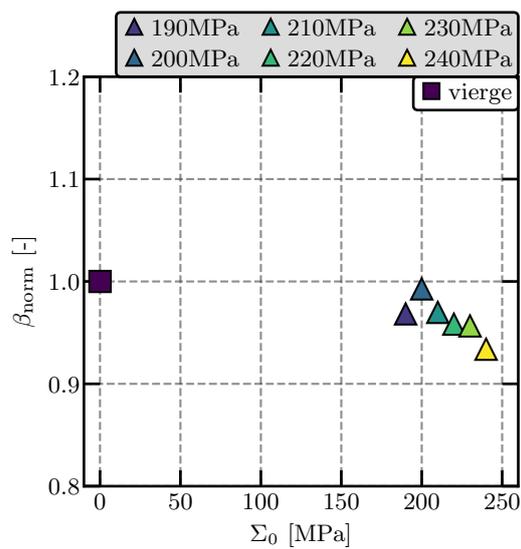


FIGURE 10 – Évolution du paramètre β_{norm} pour différentes amplitudes de pré-chargement cyclique initial ($N = 50\ 000$ cycles)

fatigue du matériau pour différents effets d'histoire grâce au paramètre β_{norm} . Ces résultats sont utilisés pour proposer une amélioration du modèle probabiliste à deux échelles existant afin d'estimer l'effet d'un chargement d'histoire sur les propriétés en fatigue au moyen d'une variable d'histoire.

3 Prise en compte des effets d'histoire dans la modélisation

3.1 Cadre de la modélisation

Dans le modèle probabiliste à deux échelles existant, aucune variable ne permet de rendre compte de l'histoire du chargement. Il est proposé dans cette étude de rendre le calcul du nombre de sites actifs dépendant de l'histoire de chargement, ce qui revient à modifier le processus d'activation des sites (*i.e.*, modifier le processus ponctuel de poisson). La notion d'histoire est introduite dans le paramètre S_0 qui devient alors variable au cours du chargement. Afin de pouvoir rendre compte d'un grand nombre d'effets d'histoire (grande déformation plastique, pré-chargeement cyclique, ...), le paramètre S_0 est alors supposé dépendre du niveau de déformation macroscopique maximal initial, $E_{p,\text{ini}}^{\text{max}}$, et de la déformation plastique cumulée au sein du VER, p_{VER} . D'après les relations (Eq.7) et (Eq.8), l'évolution du paramètre β_{norm} représente directement l'évolution du paramètre S_0 . Ainsi, à partir des résultats des essais d'auto-échauffement réalisés pour différents effets d'histoire (Fig.8 et Fig.10) l'évolution de S_0 peut se mettre sous la forme

$$S_0 \left(E_{p,\text{ini}}^{\text{max}}, p_{\text{VER}} \right) = a_{S_0} \left[1 + f_1 \left(p_{\text{VER}}, E_{p,\text{ini}}^{\text{max}} \right) + f_2 \left(E_{p,\text{ini}}^{\text{max}} \right) \right] \quad (14)$$

avec la fonction f_1 permettant de représenter l'évolution du paramètre S_0 pour de faibles niveaux de déformation plastique et après un pré-chargeement cyclique, telle que

$$f_1 \left(p_{\text{VER}}, E_{p,\text{ini}}^{\text{max}} \right) = -b_{S_0} \min \left\{ p_{\text{VER}} + c_{S_0} E_{p,\text{ini}}^{\text{max}}, p_{\text{seuil}}^{\text{VER}} \right\} \quad (15)$$

et la fonction f_2 permettant de représenter l'évolution du paramètre S_0 pour de forts niveaux de déformation plastique, telle que

$$f_2 \left(E_{p,\text{ini}}^{\text{max}} \right) = d_{S_0} \max \left\{ E_{p,\text{ini}}^{\text{max}} - E_p^{\text{seuil}}, 0 \right\} \quad (16)$$

où a_{S_0} correspond à la valeur de S_0 pour le grade de référence (*i.e.*, sans aucun effet d'histoire), E_p^{seuil} correspond au point de changement de pente sur la figure (Fig.8) (après pré-déformation plastique macroscopique), les paramètres (b_{S_0} , c_{S_0} , d_{S_0}) sont identifiés à partir des valeurs des pentes de la figure (Fig.8) (après pré-déformation plastique macroscopique) et $p_{\text{seuil}}^{\text{VER}}$ est identifié à partir du résultat après un pré-chargeement de 50 000 cycles à 240 MPa d'amplitude.

Les réponses en dissipation de cette nouvelle modélisation après différents niveaux de pré-déformation plastique macroscopique et après différents pré-chargeements cycliques sont comparées avec les résultats expérimentaux (seul le régime secondaire est considéré) (Fig.11) et (Fig.12). Les tendances des évolutions sont retrouvées avec cette nouvelle modélisation.

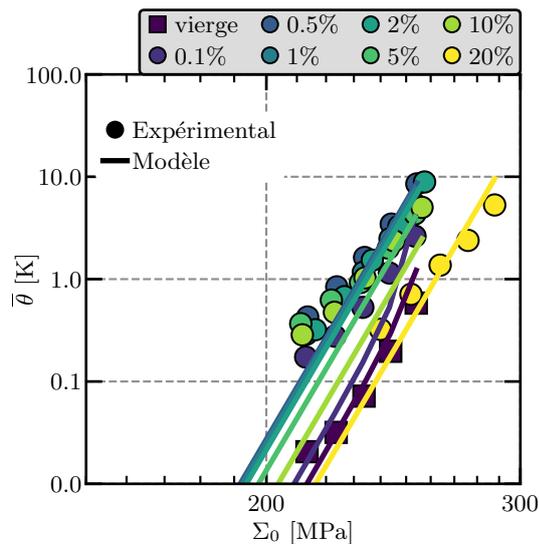


FIGURE 11 – Comparaison entre la nouvelle modélisation et les résultats expérimentaux après une pré-déformation plastique macroscopique (régime secondaire seul)

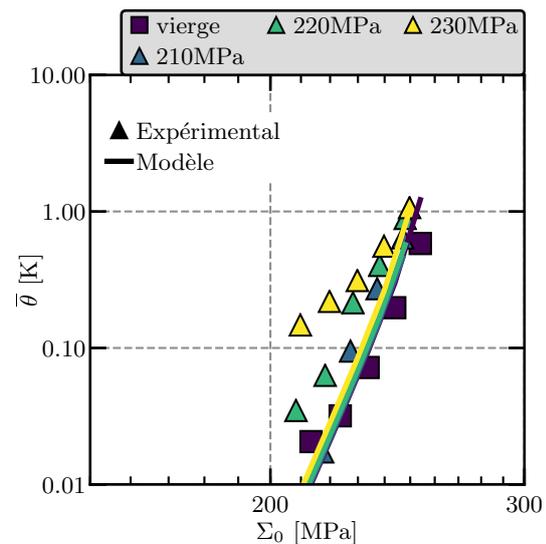


FIGURE 12 – Comparaison entre la nouvelle modélisation et les résultats expérimentaux après un pré-chargement cyclique (régime secondaire seul)

3.2 Validation

Afin de valider cette nouvelle approche, une comparaison est réalisée entre les courbes S-N expérimentales (sans effet d'histoire et après trois pré-chargements cycliques, essais de fatigue à deux blocs) et l'estimation de ces mêmes courbes de fatigue par la nouvelle modélisation. Cependant, comme le paramètre S_0 n'est plus constant, il évolue au cours des cycles, l'énergie dissipée critique du maillon faible (Eq.10) ne peut plus se calculer directement. La stratégie est de calculer l'évolution de l'énergie dissipée E au cours des cycles pour différentes amplitudes de chargement (Fig.13 en posant $E = A/a_c$ avec a_c une constante). L'énergie dissipée critique E_c (ou A_c) est déterminée à partir des points de fatigue pour une amplitude de 250 MPa. Ensuite, le nombre de cycles à rupture pour chacune des amplitudes peut

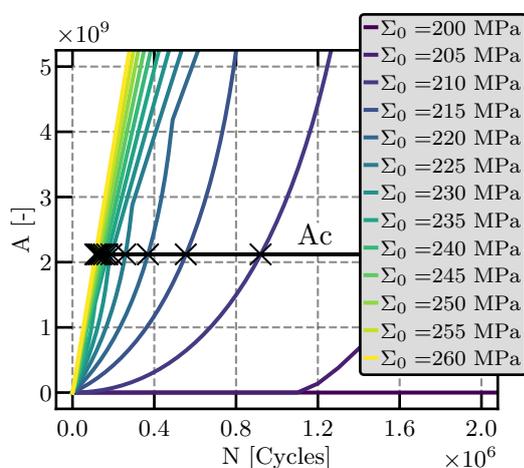


FIGURE 13 – Évolution de l'énergie dissipée E au cours des cycles pour différentes amplitudes (avec $A = E/a_c$)

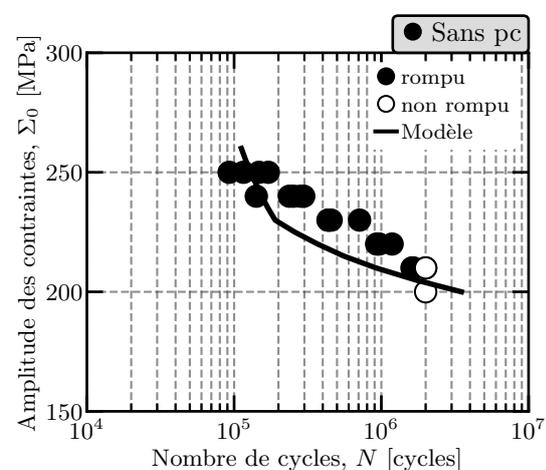


FIGURE 14 – Estimation de la courbe S-N pour le grade vierge

être déterminé (Fig.13). Ainsi, l'estimation de la courbe S-N pour le grade vierge est obtenue (Fig.14).

Ensuite, la même procédure est appliquée afin d'estimer l'impact d'un pré-chargement cyclique sur les courbes S-N. Pour cela, trois cas sont considérés et la réponse du modèle donne une estimation très correcte (Fig.15, Fig.16, Fig.17).

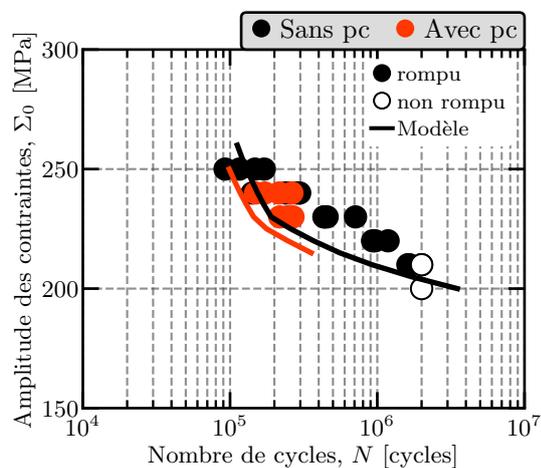


FIGURE 15 – Estimation de la courbe S-N après un pré-chargement de 500 000 cycles à 210 MPa d'amplitude

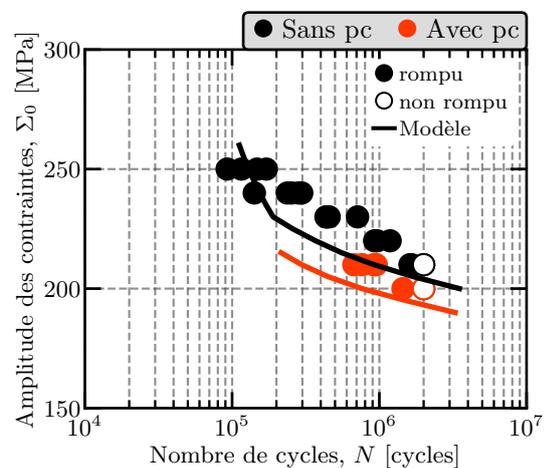


FIGURE 16 – Estimation de la courbe S-N après un pré-chargement de 50 000 cycles à 240 MPa d'amplitude

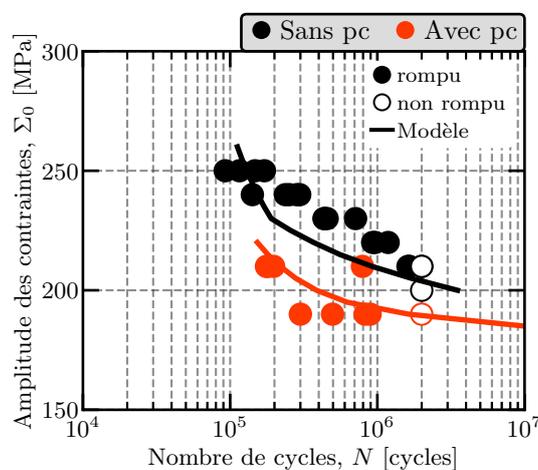


FIGURE 17 – Estimation de la courbe S-N après un pré-chargement de 50 000 cycles à 250 MPa d'amplitude

4 Conclusion

Dans le cadre de la fatigue à grand nombre de cycles des aciers, les mesures d'auto-échauffement sont une bonne alternative afin de caractériser en fatigue le matériau d'étude rapidement. Cette étude proposait d'étendre l'utilisation des mesures d'auto-échauffement sous chargement cyclique à la prise en compte des effets d'histoire sur les propriétés en fatigue. Pour cela, seul le régime secondaire d'auto-échauffement a été considéré. La notion d'histoire a été appliquée au calcul de la densité de site actif.

Les variables d'histoire considérées sont la déformation plastique macroscopique initiale et la déformation plastique cumulée au sein du VER. Les réponses de cette modélisation sur la dissipation sont en accord avec les résultats expérimentaux obtenus. Avec ce nouveau modèle, il est alors possible d'estimer l'impact d'un effet d'histoire sur l'évolution des courbes S-N.

Références

- [1] C. Doudard, Détermination rapide des propriétés en fatigue à grand nombre de cycles à partir d'essais d'échauffement, Thèse, ENS Cachan, 2004.
- [2] M. Poncelet, Multiaxialité, hétérogénéités intrinsèques et structurales des essais d'auto-échauffement et de fatigue à grand nombre de cycles, Thèse, ENS Cachan, 2007.
- [3] R. Munier, Etude de la fatigue des aciers laminés à partir de l'auto-échauffement sous sollicitation cyclique : essais, observations, modélisation et influence d'une pré-déformation plastique, Thèse, UBO, 2012.
- [4] A. Ezanno, Caractérisation rapide des propriétés à la fatigue à grand nombre de cycles des matériaux de fonderie à partir d'essais d'auto-échauffement : application aux alliages d'hélices marines, Thèse, UBO, 2013.
- [5] P. Florin, Caractérisation rapide des propriétés à la fatigue à grand nombre de cycle des assemblages métalliques soudés de type automobile : vers une nouvelle approche basée sur des mesures thermométriques, Thèse, UBO, 2015.
- [6] N. Graux, Caractérisation et modélisation des propriétés à la fatigue à grand nombre de cycles des aciers cémentés à partir d'essais d'auto-échauffement sous sollicitations cycliques, Thèse, UBO, 2017.
- [7] J. Louge, Apports des mesures d'auto-échauffement pour l'étude de la fatigue des aciers : effets d'histoire et cisaillement pur, Thèse, ENSTA Bretagne, 2019.
- [8] A. Chrysochoos, H. Louche, An infrared image processing to analyse the calorific effects accompanying strain localisation, *International Journal of Engineering Science*, 38(2000), 1759–1788.
- [9] T. Boulanger, A. Chrysochoos, C. Mabru, A. Galtier, Calorimetric analysis of dissipative and thermoelastic effects associated with the fatigue behavior of steels, *International Journal of Fatigue*, 26(2004), 221–229.
- [10] C. Doudard, S. Calloch, P. Cugy, A. Galtier, F. Hild, A probabilistic two-scale model for high-cycle fatigue life predictions, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 28(2005), 279–288.
- [11] C. Mareau, V. Favier, B. Weber, A. Galtier, M. Berveiller, Micromechanical modeling of the interactions between the microstructure and the dissipative deformation mechanisms in steels under cyclic loading, *International Journal of Plasticity*, 32(2012), 106–120.
- [12] R. Munier, C. Doudard, S. Calloch, B. Weber, Identification of the micro-plasticity mechanisms at the origin of self-heating under cyclic loading with low stress amplitude, *International Journal of Fatigue*, 103(2017), 122–135.