

Apports de l'analyse du couplage thermoélastique sous chargements cycliques pour la prévision des propriétés en fatigue d'assemblages soudés

L. CARTERON^{a,b,@}, C. DOUDARD^a, S. CALLOCH^a, B. LEVIEIL^a,
J. BEAUDET^b, F. BRIDIER^b

a. ENSTA Bretagne, UMR CNRS 6027, IRDL, 29200 BREST

b. Naval Group, 5 rue de l'Halbrane, 44340 BOUGUENAI

@ : loic.carteron@ensta-bretagne.org

Résumé :

La caractérisation des propriétés en fatigue des assemblages soudés est un axe de recherche complexe avec des objectifs industriels concrets. L'objectif est ici de présenter les apports de l'analyse du couplage thermoélastique sur la compréhension des phénomènes de fatigue intervenant sur une structure brute de soudage. Un protocole expérimental est mis en place pour réaliser des mesures de champ de température sur des éprouvettes soudées cruciformes sous chargement cyclique, à l'aide d'une caméra infrarouge. La variation de température liée au couplage thermoélastique est identifiée par optimisation d'une fonction particulière sur le signal de température de chaque pixel. Les cartographies de couplage thermoélastique ainsi obtenues peuvent être directement reliées à des cartographies du premier invariant du tenseur des contraintes. Le post-traitement du gradient du couplage thermoélastique permet de déterminer la part de contrainte due à la flexion dans l'éprouvette. L'influence de la conduction thermique sur l'évaluation de la contrainte locale en pied de cordon soudé est ensuite quantifiée à l'aide d'un modèle numérique tenant compte de la conduction. Enfin, l'analyse de l'évolution du couplage thermoélastique local permet le suivi de l'apparition et de la propagation de fissures en pied de cordon soudé.

Mots clefs : Assemblages soudés, Couplage thermoélastique, Contrainte locale, Suivi de fissures

1 Introduction

Les ruptures par fatigue des systèmes mécaniques représentent environ 80% des cas de rupture en service [1]. Les structures soudées n'échappent pas à la règle et les pieds de cordons de soudure, où l'initiation des premières fissures peut être observée, peuvent être considérés comme un de leurs points faibles. Le dimensionnement à la fatigue des structures soudées est donc un enjeu important dans de nombreux secteurs d'activités tels que les transports ou l'énergie. Dans l'industrie navale, la coque d'un bâtiment de surface représente une structure mécano-soudée soumise à des chargements d'amplitudes variables dépendantes principalement des conditions de mer. L'obtention de données expérimentales de fatigue sur les différentes configurations de joints soudés utilisées est donc

essentielle. Néanmoins, plusieurs problématiques interviennent lors de l'étude des joints soudés. En effet, de nombreux paramètres pilotent la durée de vie de l'assemblage [2], tel que la géométrie du pied de cordon, les contraintes résiduelles ou encore les défauts de soudage. Estimer le champ hétérogène des contraintes en pied de cordon devient alors nécessaire pour permettre le développement ou l'application de modèles pour la fatigue. Parmi les moyens expérimentaux existants, une méthode répandue consiste en l'utilisation de jauges de déformation mais ne fournit alors qu'une information ponctuelle. D'autres approches existent dont la méthode TSA (Thermoelastic Stress Analysis) qui permet à partir de la mesure d'un champ de température de remonter à une cartographie de champ de contraintes. Son niveau de développement est aujourd'hui considéré comme élevé [3] et son application a été illustrée à la fois sur des éprouvettes matériau [4] et sur des structures plus complexes [5]–[8]. Le but de cet article est l'application de cette technique à un détail de soudure couramment utilisé dans la construction navale et de mettre en avant les informations qui peuvent être obtenues. La théorie de la méthode basée sur l'analyse du couplage thermoélastique est tout d'abord rappelée. Le montage, les éprouvettes et le protocole expérimental utilisés sont ensuite présentés. Enfin, les résultats de l'analyse du couplage thermoélastique sont présentés et discutés selon trois axes : (i) la quantification de la flexion induite par la pré-déformée des éprouvettes (ii), l'évaluation d'une contrainte locale en pied de cordon, et (iii) la détection et le suivi de propagation de fissures.

2 Théorie : couplage thermoélastique

L'analyse du couplage thermoélastique, C_{the} , peut permettre une identification du champ des contraintes en surface. En effet, l'écriture des équations de thermoélasticité dans le cas d'un matériau homogène isotrope permet de relier l'amplitude de la variation de température due au couplage thermoélastique au premier invariant du tenseur des contraintes [9], [10]. Dans le cas d'un chargement sinusoïdal, le terme source associé au couplage thermoélastique peut alors s'écrire de cette manière

$$C_{the} = -2\pi f_s \alpha T_0 I_{1amp} \cos(2\pi f_s t), \quad (1)$$

avec f_s la fréquence de sollicitation, α le coefficient d'expansion isotrope, T_0 la température initiale et I_{1amp} l'amplitude du premier invariant du tenseur des contraintes. En résolvant l'équation de la chaleur avec l'hypothèse d'adiabaticité, l'expression suivante est obtenue [11],

$$\theta_{the}(t) = -I_{1amp} \frac{\alpha T_0}{\rho c} \sin\left(2\pi f t + \arctan\left(\frac{1}{2\pi f t}\right)\right), \quad (2)$$

avec

$$I_{1amp} = \Delta\theta_{the} \frac{\rho c}{\varepsilon \alpha T_0}, \quad (3)$$

en posant θ_{the} la variation de température associée au couplage thermoélastique, $\Delta\theta_{the}$ son amplitude et ε l'émissivité de la surface.

3 Protocole expérimental

3.1 Eprouvettes soudées cruciformes

Les éprouvettes testées dans cette étude sont des éprouvettes soudées cruciformes en acier DH36 couramment utilisé dans la construction navale. Leurs géométrie et dimensions sont présentées Figure 1. Un raidisseur a été soudé de chaque côté d'une grande plaque, avant tronçonnage de celle-ci en bandes de 50mm. Les opérations de soudage ont été réalisées sur le chantier naval de Naval Group Lorient pour avoir des conditions d'essais proches des conditions réelles.

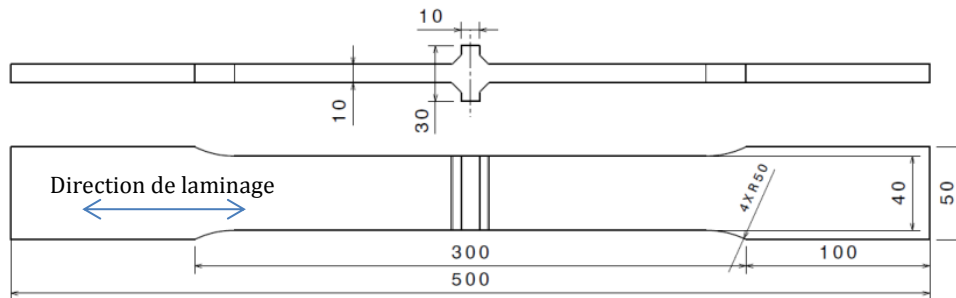


Figure 1 : Géométrie des éprouvettes soudées

Suite au soudage séquentiel des quatre cordons de soudure, les éprouvettes présentent une déformation de flexion, représentée sur la Figure 2. Les mesures thermographiques réalisées dans la suite ont été effectuées du côté concave des éprouvettes pour observer la face présentant la contrainte la plus importante.

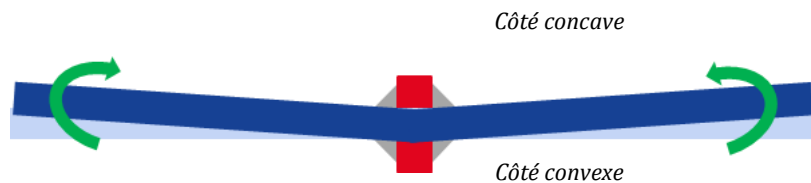


Figure 2 : Schématisation de la pré-déformée des éprouvettes induite par le soudage

3.2 Equipements et protocole expérimental

Les essais ont été menés sur une machine de traction MTS 250 (Figure 3). Un chargement de traction répétée à un rapport de charge $F_{\min}/F_{\max} = 0,1$ a été appliqué pour différents niveaux d'efforts. Lors de ces essais, une caméra infrarouge FLIR a été placée en face du détail de soudure pour obtenir le champ de température dans cette zone (Figure 4). La taille de pixel correspondant à ce positionnement de caméra est d'environ $160\mu\text{m}$. Une calibration constructeur réalisée pixel à pixel a été appliquée pour tenir compte de la température initiale du capteur [12]. La fréquence d'acquisition de la caméra est fixée à 1Hz tandis que celle de l'essai est de 10,02 Hz afin d'observer les cycles du couplage thermoélastique par effet stroboscopique.

De plus, plusieurs précautions thermiques ont été mises en place pour améliorer la qualité de la mesure de température. Tout d'abord, les échantillons ont été peints en noir mat pour augmenter l'émissivité de l'éprouvette. Ensuite, un système de refroidissement a été mis en place autour des mors pour limiter la dérive thermique pendant l'essai et le gradient de température entre les mors. Enfin, un drap de protection (Figure 3) a été installé autour de la zone d'étude pour minimiser les perturbations thermiques dues à l'environnement, à savoir la réflexion et les échanges thermiques par convection.

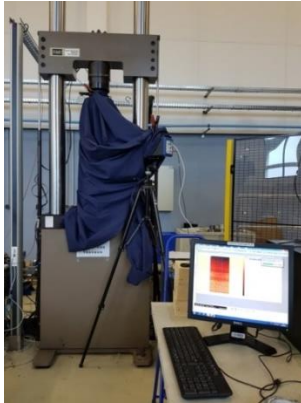


Figure 3 : Montage expérimental



Figure 4 : Cadrage de la caméra infra-rouge

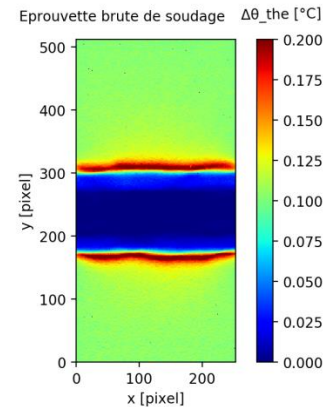


Figure 5 : Cartographie de $\Delta\theta_{the}$

L'identification de l'amplitude du couplage thermoélastique $\Delta\theta_{the}$ et d'un déphasage est ensuite effectuée sur le signal de température par optimisation (méthode des moindres carrés) d'une fonction construite comme la somme d'une fonction exponentielle et d'une fonction sinus déphasée [13]. Cette identification, réalisée pour chaque pixel de chaque image, permet alors l'obtention de cartographies de $\Delta\theta_{the}$ (Figure 5) directement liées à celles du premier invariant du tenseur des contraintes (§2).

4 Résultats et discussion

Dans cette section les résultats de l'analyse du C_{the} sont présentés et discutés selon trois axes : (i) la quantification de la flexion induite par la pré-déformée des éprouvettes, (ii) l'évaluation d'une contrainte locale en pied de cordon et (iii) la détection et le suivi de la propagation de fissures.

4.1 Quantification de la flexion induite par la pré-déformée des éprouvettes

Les recommandations pour la conception des assemblages soudés données par l'Institut International de la Soudure [2], définissent une contrainte dite géométrique ou structurelle, qui permet de tenir compte de la composante de membrane et de la composante de flexion de la contrainte appliquée à un joint soudé. Dans le cas des éprouvettes cruciformes de l'étude, bien que ces dernières soient symétriques, la pré-déformation issue des opérations de soudage entraîne un moment de flexion lors des essais de traction. La possibilité d'utiliser le couplage thermoélastique pour quantifier cette composante supplémentaire de flexion induite dans chaque éprouvette est évaluée dans ce paragraphe.

4.1.1 Modèle numérique

Pour valider les mesures expérimentales, un premier modèle éléments finis, réalisé sur Abaqus, est mis en place pour simuler le comportement purement mécanique d'une éprouvette cruciforme. En supposant l'existence de plans de symétries, seul un quart de la géométrie est considéré et un pilotage en effort est appliqué à son extrémité (Figure 6). La déformation de l'éprouvette est introduite par le positionnement du centre du détail en croix à une distance de 0,75 mm par rapport à l'axe des mors (Figure 6). Cette valeur est obtenue précédemment, par des mesures in-situ de stéréo-corrélation d'images.

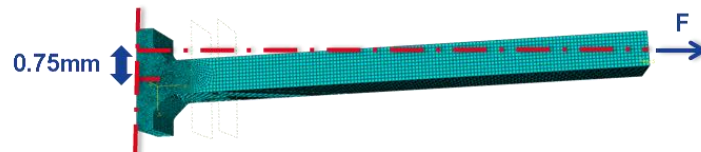
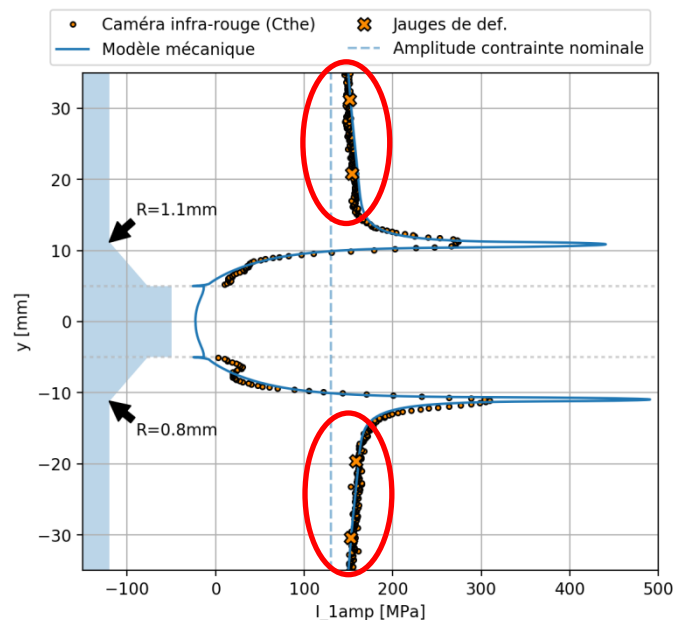


Figure 6 : Modèle éléments finis

Les rayons de raccordement au niveau des pieds de cordons (Figure 7) du modèle éléments finis sont définis à partir d'un scan 3D de l'éprouvette considérée. Le comportement du matériau est supposé élastique et une étude de convergence du maillage (C3D20R) est réalisée. Le profil de l'amplitude du premier invariant des contraintes est extrait le long du chemin central de l'éprouvette.

4.2.1 Corrélation essais/calcul mécanique

Dans la suite, les cartographies de $\Delta\theta_{\text{the}}$ sont projetées sur l'axe y (Figure 4) en considérant une moyenne du signal sur une dizaine de pixels au centre de l'éprouvette. Cette valeur est le compromis choisi entre réduction du bruit par moyenne spatiale et limitations des effets de bords. Un coefficient d'environ 1104 MPa/°C est ensuite appliqué pour permettre la confrontation au résultat du modèle mécanique. Cette valeur est obtenue par l'application numérique du terme $\frac{\rho C}{\varepsilon \alpha T_0}$ introduit dans l'équation (3), en utilisant les valeurs $\rho = 7803 \text{ kg.m}^{-3}$, $C = 426 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $\alpha = 1,267\text{E-}5 \text{ K}^{-1}$ mesurées pour l'acier DH36, ainsi qu'un coefficient d'émissivité ε estimé à 0.87 et une température mesurée T_0 de 293,15 K. Ces opérations permettent l'obtention d'un profil expérimental illustré par les points sur la Figure 7. Des points expérimentaux supplémentaires pour validation sont obtenus par quatre jauges de déformations (croix orange sur la Figure 7), collées du côté concave, à une fois et deux fois l'épaisseur de tôle depuis le pied de cordon. La mesure des jauges est traduite en contrainte suivant l'hypothèse élastique. La comparaison entre les mesures expérimentales et le résultat du calcul éléments finis mécanique est illustrée Figure 7.

Figure 7 : Quantification de I_{1amp} : comparaison essais/modèle

La Figure 7 montre une bonne corrélation entre les pentes du profil expérimental et du modèle numérique dans les intervalles $y \in [-30, -20 \text{ mm}]$ et $y \in [20, 30 \text{ mm}]$ (zones encadrées en rouge).

Ce résultat confirme que l'observation du couplage thermoélastique permet de capter et d'identifier l'influence de la composante de flexion des contraintes, induite ici par la déformation des éprouvettes.

4.2 Evaluation d'une contrainte locale en pied de cordon

L'observation d'une cartographie de couplage thermoélastique réalisée sur une éprouvette brute de soudage (Figure 5), met en évidence le caractère hétérogène du champ des contraintes sur ce type de structure. Les zones rouges sur cette cartographie soulignent la présence d'une concentration des contraintes au niveau du pied des cordons. Ce paragraphe présente une étude réalisée pour évaluer la contrainte locale en pied de cordon à partir des mesures thermiques.

4.2.1 Prise en compte de la conduction

L'observation du profil du modèle mécanique (Figure 7) met en évidence l'influence du rayon de raccordement sur la concentration de contrainte en pied de cordon. En effet, un petit rayon de raccordement implique une plus grande concentration de contrainte. Les profils de $\Delta\theta_{the}$ expérimental et du modèle mécanique présentent une forme similaire (Figure 7), mais les pics de concentration de contraintes captés par la caméra infra-rouge sont plus faibles que ceux du modèle mécanique (Figure 7). Le calcul du nombre de Fourier, défini comme le rapport du terme de conduction sur le terme de puissance calorifique [10], donne une valeur proche de 1 dans la zone en pied de cordon. Le terme de puissance calorifique et le terme de conduction sont donc du même ordre de grandeur et l'influence de la conduction de chaleur doit être prise en compte pour améliorer la modélisation. Le champ de contrainte du modèle éléments finis mécanique précédent est alors utilisé dans un second calcul élément finis en transfert de chaleur, avec un unique terme source de couplage thermoélastique.

4.2.2 Corrélation essais/calcul thermique

Le profil de l'amplitude de température stabilisée le long du chemin central de l'éprouvette est extrait puis représenté Figure 8. Une bonne corrélation de la courbe expérimentale et du modèle numérique thermique est obtenue au niveau des pieds de cordon.

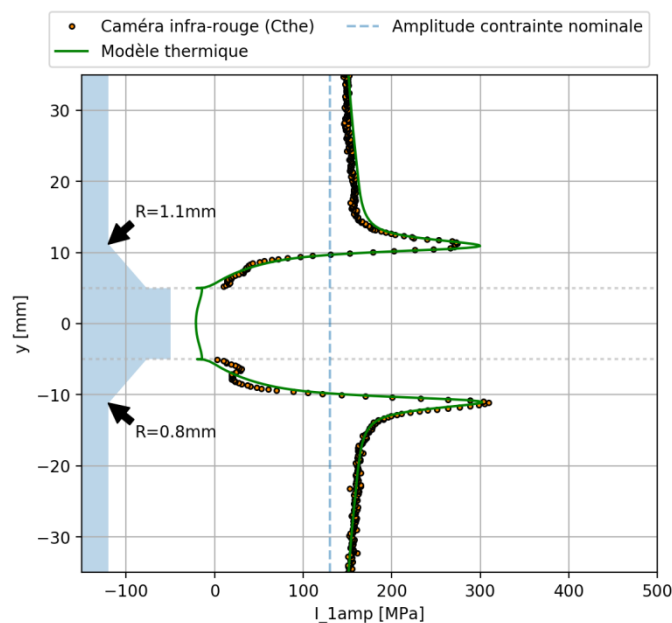


Figure 8 : Corrélation essai/calcul thermique

Une légère différence entre les pics du cordon supérieur peut néanmoins être remarquée. Cet écart peut être associé à la difficulté de déterminer un rayon de raccordement unique en pied de cordon d'un joint brut de soudage. Une étude additionnelle (non présentée ici), sur un joint usiné, à la géométrie mieux contrôlée, a permis d'obtenir une très bonne corrélation entre les données d'essais et le modèle thermique. Bien que la conduction agisse comme un filtre pouvant gommer l'influence de fortes concentrations de contrainte, l'utilisation de l'analyse du couplage thermoélastique comme moyen d'évaluer une contrainte locale en pied de cordon est donc réalisable. Une solution pour augmenter la précision de cette approche consiste à augmenter la fréquence de sollicitation de l'éprouvette pour permettre une description plus fine des pics de $\Delta\theta_{the}$. Une fréquence trop importante ajoutera néanmoins une influence de l'épaisseur de la couche de peinture [5].

4.3 Détection et suivi de fissures de fatigue

L'observation du couplage thermoélastique peut également être utilisée pour réaliser un suivi d'endommagements [14] ou l'apparition et la propagation de fissures de fatigue [15] et notamment sur les assemblages soudés [16]. L'évolution de la cartographie de $\Delta\theta_{the}$ lors d'un essai de fatigue sur une éprouvette brute de soudage est représentée Figure 9 et mise en regard avec l'évolution de la température moyennée sur toute l'éprouvette (courbe bleue). On remarque sur cette figure une apparition progressive de plusieurs sites (fissures) qui viennent interrompre la concentration de contraintes aux pieds de cordon (zones rouges).

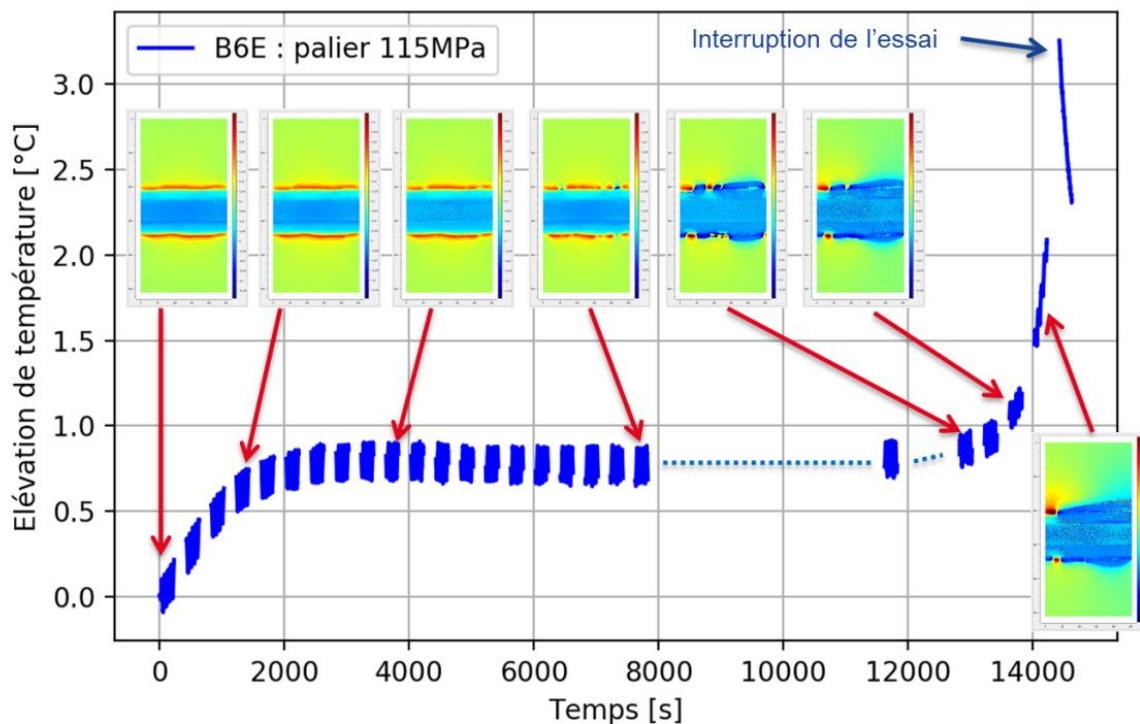


Figure 9 : Evolution des cartographies de $\Delta\theta_{the}$ lors d'un essai de fatigue

La Figure 9 permet également de remarquer que l'apparition des premières fissures peut être détectée dès le premier tiers de la durée de vie d'une éprouvette brute de soudage, confirmant la pertinence de prendre en compte la phase de propagation dans l'estimation de la durée de vie à rupture.

5 Conclusions

L'analyse du couplage thermoélastique permet d'acquérir des informations qualitatives sur la configuration d'un assemblage soudé. Tout d'abord, l'analyse des cartographies de $\Delta\theta_{\text{the}}$ permet de déterminer un gradient de contrainte associé au moment de flexion induit par la distorsion des éprouvettes après soudage. Deuxièmement, une contrainte locale en pied de cordon peut être estimée. La conduction de chaleur dans l'éprouvette a tendance à lisser le signal mais l'influence d'un rayon de raccordement peut tout de même être captée. Troisièmement, l'observation du couplage thermoélastique rend possible la détection de l'amorçage de plusieurs fissures ainsi que la propagation de ces dernières. L'observation, sur une configuration brute de soudage, de nombreux sites où des fissures deviennent observables pour différents pourcentage de durée de vie de l'assemblage, laisse penser qu'une approche probabiliste couplée à la mécanique de la rupture serait à même de représenter les mécanismes de fatigue.

Références

- [1] M. D. Sangid, "The physics of fatigue crack initiation," *Int. J. Fatigue*, vol. 57, pp. 58–72, 2013.
- [2] International Institute of Welding, "Recommandations Pour La Conception En Fatigue Des Assemblages Et Des Composants Soudés," no. September, 2013.
- [3] P. Stanley, "Beginnings and early development of thermoelastic stress analysis," *Strain*, vol. 44, no. 4, pp. 285–297, 2008.
- [4] P. Stanley, "Applications and potential of thermoelastic stress analysis," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 64, no. 1–3, pp. 359–370, Feb. 1997.
- [5] P. Florin, "Caractérisation rapide des propriétés à la fatigue à grand nombre de cycles des assemblages métalliques soudés de type automobile : vers une approche basée sur des mesures thermométriques," Université de Bretagne Occidentale, 2015.
- [6] N. Rajic, S. C. Galea, and D. Rowlands, "Thermoelastic Stress Analysis - Emerging Opportunities in Structural Health Monitoring," *Key Eng. Mater.*, vol. 558, pp. 501–509, Jun. 2013.
- [7] G. Allevi, M. Cibeca, R. Fioretti, R. Marsili, R. Montanini, and G. Rossi, "Qualification of additively manufactured aerospace brackets: A comparison between thermoelastic stress analysis and theoretical results," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 126, no. May, pp. 252–258, 2018.
- [8] R. C. Tighe, G. P. Howell, J. P. Tyler, S. Lormor, and J. M. Dulieu-Barton, "Stress based non-destructive evaluation using thermographic approaches: From laboratory trials to on-site assessment," *NDT E Int.*, vol. 84, pp. 76–88, Dec. 2016.
- [9] M. A. Biot, "Thermoelasticity and irreversible thermodynamics," *J. Appl. Phys.*, vol. 27, no. 3, pp. 240–253, 1956.
- [10] N. Ranc, "Couplage thermomécanique," *Tech. l'Ingénieur*, vol. 33, no. 0, 2003.
- [11] C. Doudard, "Détermination rapide des propriétés en fatigue et à grand nombre de cycles à partir d'essais d'échauffement," Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2004.
- [12] V. Le Saux and C. Doudard, "Proposition of a compensated pixelwise calibration for photonic infrared cameras and comparison to classic calibration procedures: Case of thermoelastic stress analysis," *Infrared Phys. Technol.*, vol. 80, pp. 83–92, 2017.
- [13] J.-C. Krapez, "Compared performances of four algorithms used for modulation thermography," *Proc. 1998 Int. Conf. Quant. InfraRed Thermogr.*, vol. 1, no. 1, 1998.
- [14] T. R. Emery and J. M. Dulieu-Barton, "Thermoelastic Stress Analysis of damage mechanisms in composite materials," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 41, no. 12, pp. 1729–1742, 2010.
- [15] L. Marsavina and R. A. Tomlinson, "A review of using thermoelasticity for structural integrity assessment," *Frat. ed Integrita Strutt.*, vol. 8, no. 27, pp. 13–20, 2014.
- [16] T. Ummenhofer and J. Medgenberg, "On the use of infrared thermography for the analysis of fatigue damage processes in welded joints," *Int. J. Fatigue*, vol. 31, no. 1, pp. 130–137, 2008.