



Conception en fatigue de joints soudés par friction malaxage dans les tabliers de pont en aluminium

Fleury, A.¹, St-Georges, L.¹, Rahem, A.¹, Walbridge, S.²

¹ Université du Québec à Chicoutimi, Canada

² University of Waterloo, Canada

15 janvier 2020

CONCEPTION EN FATIGUE DE JOINTS SOUDÉS PAR FRICTION MALAXAGE DANS LES TABLIERS DE PONT EN ALUMINIUM

Fleury, A.¹, St-Georges, L.¹, Rahem, A.¹, Walbridge, S.²

¹ Université du Québec à Chicoutimi, Canada

² University of Waterloo, Canada

Résumé : Dans la réhabilitation ou le remplacement de ponts routiers existants, les concepteurs pensent rarement à l'utilisation de l'aluminium comme matériau structural. Pourtant, sa légèreté, sa résistance à la corrosion et ses faibles coûts d'entretien sont des caractéristiques avantageuses comparativement à l'acier ou le béton armé. De plus, quelques cas réels en Amérique du Nord démontrent la vitesse et l'efficacité de remplacement d'un tablier de pont existant par un en aluminium. Un tablier en aluminium est assemblé en usine en soudant des profilés extrudés par friction malaxage.

Le soudage par friction malaxage (SFM) est un procédé d'assemblage à l'état solide parfaitement adapté pour les alliages d'aluminium. Cette singularité, en plus de la production automatisée du procédé, donne une meilleure qualité de joint comparée au soudage à l'arc conventionnel. Les industries de l'automobile, de l'aviation et plus récemment du génie civil utilisent cette technologie. Malgré tout, le comportement dynamique et en fatigue est peu règlementé dans les codes et standards, notamment dans l'*Aluminum design manual* (ADM), pour des applications structurales du SFM. Pour surmonter cette situation, l'objectif principal est de développer des bases pour le contrôle qualité et pour le dimensionnement en fatigue des joints SFM dans les tabliers de pont en aluminium.

Une caractérisation en fatigue de certaines configurations de soudure en alliage 6061-T651 a été entreprise sous des essais de chargement à amplitude constante et à amplitude variable. Un joint SFM optimisé donne des résultats en fatigue bien supérieurs aux courbes de conception existantes de l'ADM. Aussi, un défaut de type décalage axial des pièces inférieur à 1,0 mm réduit quelque peu la vie en fatigue. Finalement, un défaut de type trou de ver (vide interne) d'une taille inférieure à 0,9 mm a un effet négatif sur la vie en fatigue, sans toutefois être dramatique. Les critères de fatigue et de tolérances de défauts de soudage proposés dans cette étude permettront de contribuer à la promotion de l'aluminium dans l'industrie du génie civil.

1 INTRODUCTION

En Amérique du Nord, l'entretien des ponts existants nécessite en permanence des investissements majeurs. Aux États-Unis par exemple, quelques rapports démontrent qu'il y a bien une tendance vers l'amélioration, mais de plus en plus de structures surpassent leur durée de vie en service. Les données des rapports sont présentées au Tableau 1.1 [1, 2]. Au Québec, le pourcentage de ponts

en bonne condition augmente d'année en année, mais il reste encore du travail à effectuer. En 2018, 43 % des ponts étaient en mauvais état encore [3].

Tableau 1.1 - Condition du parc de ponts aux États-Unis [1, 2]

Année	Pourcentage de ponts cotés :		Pourcentage de ponts de 50 ans et plus
	défectifs	non fonctionnels	
2007	12,1 %	14,8 %	-
2012	11,0 %	13,9 %	30,0 %
2016	9,1 %	13,6 %	39,0 %

Une façon efficace de contribuer à l'amélioration du parc de ponts est de remplacer un tablier existant par un tablier en aluminium. Ce type de tablier est préfabriqué en usine à partir d'extrusions en aluminium assemblées par SFM. Les avantages indéniables de l'aluminium comparés à l'acier, comme sa légèreté et sa résistance à la corrosion, rendent cette technologie concurrentielle et bien séduisante pour ce type d'application. Il permettrait à un pont de faire face à une demande grandissante du trafic en plus d'augmenter sa durée de vie en service, sans entretien significatif.

Bien qu'un joint SFM optimisé soit d'excellente qualité, des phénomènes indésirables peuvent altérer ses propriétés. Les conditions initiales des pièces à souder (tolérance de l'épaisseur, distorsions) ou des problèmes d'espacement à la ligne de joint ou de décalage des pièces après fixation peuvent nuire à la qualité du produit. Des paramètres de soudage non optimisés peuvent aussi causer des défauts de surface ou interne. Il est alors important de comprendre le degré de sévérité de divers défauts de fabrication d'une soudure sur les propriétés physiques et mécaniques.

L'objectif principal de cette étude est de développer des critères de performances pour le contrôle qualité et pour la conception en fatigue des joints SFM. Le travail permettra d'établir une ligne directrice, des règles de calculs et des tolérances dans les codes pour l'utilisation d'une technologie innovatrice et avantageuse, donc de rendre plus accessible l'usage de l'aluminium dans la construction ou la réhabilitation de ponts. Ceci stimulerait en plus le marché de ce matériau.

Cette étude est un projet collaboratif entre l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC) et l'University of Waterloo (UW). Elle fait suite au travail effectué par l'étudiante Shi Hui Guo [4, 5] en plus d'être reliée à divers projets de recherche sur le soudage par friction malaxage [6-8].

2 REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1 Soudage par friction malaxage

Au début des années 1990, le soudage par friction malaxage (SFM) a été inventé au Royaume-Uni par *The Welding Institute*. Ce procédé, très bien adapté aux alliages d'aluminium, permet l'assemblage de métaux en demeurant à l'état solide. La méthode d'assemblage FSW, telle que montrée à la Figure 2.1, se produit en créant une plastification locale de la matière facilitant la combinaison des pièces fixes à l'aide d'un outil composé d'un épaulement et d'un pion. Le contact

entre l'épaulement en rotation et la surface des pièces génèrent un frottement qui réchauffe la matière, améliorant ainsi sa capacité à se déformer, en demeurant sous la température de fusion du matériau. Une partie de la matière étant plastifiée, l'épaulement la contient et le pion produit un écoulement circulaire dans la matrice pour recombinaison celle-ci le long de la ligne de joint. Après le passage de l'outil, la température du joint diminue et la soudure à l'état solide se consolide.

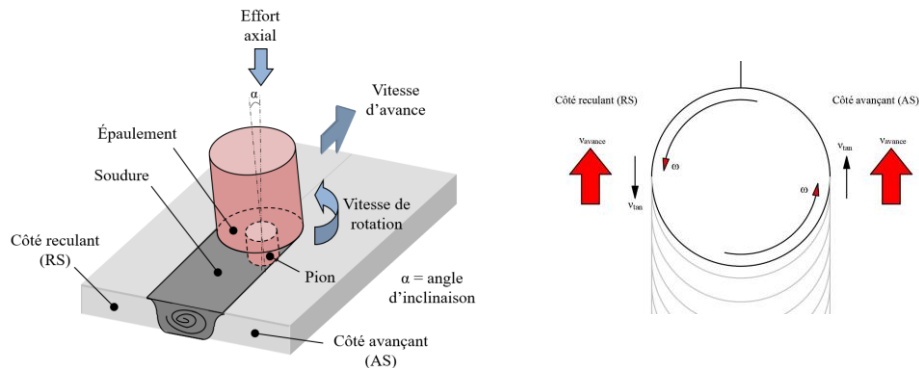


Figure 2.1 - Représentation du soudage par friction malaxage

Une particularité de ce type de soudure est que le joint est asymétrique. En considérant la vitesse de rotation tangentielle de l'outil comme à la Figure 2.1, le côté droit est dans la même direction que l'avance de l'outil alors que le côté gauche est dans la direction inverse. Ils se nomment respectivement le côté avançant (AS) et le côté reculant (RS).

En comparant ce procédé à différentes techniques de soudage par fusion, le SFM apporte plusieurs atouts bénéfiques aux assemblages. En voici quelques exemples.

- Faibles distorsions et faible retrait de soudage
- Soudure uniforme et continue
- Excellentes propriétés mécaniques
- Possibilité de souder une large variété de métaux (acier, alliages d'aluminium, cuivre, titanium, etc.)
- Possibilité de souder des matériaux dissimilaires
- Utilisation d'outils réutilisables et non consommables
- Aucune émission de fumée nocive ni rayon ultraviolet
- Productivité simplifiée et accrue
- Taille de la zone affectée thermiquement réduite

Quelques défis supplémentaires sont néanmoins imposés aux utilisateurs de cette technologie. Effectivement, les efforts en jeu lors du soudage sont très élevés, ce qui nécessite des équipements rigides et un bon système de fixation des pièces à assembler. De plus, les configurations des soudures sont plutôt limitées à des trajectoires linéaires, de sorte à conserver un effort axial constant sur toute la ligne de joint.

Cela n'empêche pas que diverses industries œuvrant dans différents domaines ont su reconnaître le potentiel de ce procédé. Le procédé SFM est par exemple utilisé dans des applications structurales, plus spécifiquement dans l'assemblage d'extrusions d'aluminium destinées à la fabrication de tablier de pont. Deux exemples d'applications existent au Saguenay-Lac-St-Jean, soient le tablier de la passerelle piétonnière sur la Petite Décharge à Alma et le tablier d'un pont secondaire à St-Ambroise. Ce deuxième est présenté à la Figure 2.2.



Figure 2.2 - Tablier de pont en aluminium a) soudage des extrusions b) installation c) produit fini [9]

L'optimisation des paramètres de soudage et une préparation présoudage rigoureuse des pièces sont essentielles à l'obtention d'une soudure de qualité. En négligeant ce travail, le procédé SFM n'est pas à l'abri de défaut de fabrication. Deux catégories de défauts seront ici discutées : les défauts sous la surface et les défauts de conditions initiales des pièces à souder.

Les défauts fréquemment observés sous la surface sont un manque de pénétration (KB), un trou de ver ou vide internes (WH) et une couche d'oxyde résiduelle (JLR), tous exposés à la Figure 2.3. D'abord, le manque de pénétration se présente sous forme de fissure à la racine où les deux pièces ne se sont pas soudées. Quelques études démontrent qu'un KB inférieur à 0,3 mm n'a pas d'effet significatif sur la fatigue [4, 5, 10]. Au-delà de cette longueur, une rupture prématurée s'initiant à la racine est plus susceptible de subvenir, ce qui réduit considérablement la vie en fatigue. Ensuite, le trou de ver est une conséquence d'un mauvais écoulement et d'une expulsion de matière [11]. Ce défaut diminue les propriétés en fatigue, puisqu'il possède deux points d'initiation et de propagation de fissures. Heureusement, il est difficilement fabricable lorsque la géométrie de l'outil et les paramètres opératoires sont optimisés [12]. Enfin, la couche d'oxyde résiduelle est présente lorsque l'outil n'est pas en mesure de briser efficacement la couche d'oxyde en surface des pièces. Une JLR est un chemin préférentiel à la propagation d'une fissure de fatigue.

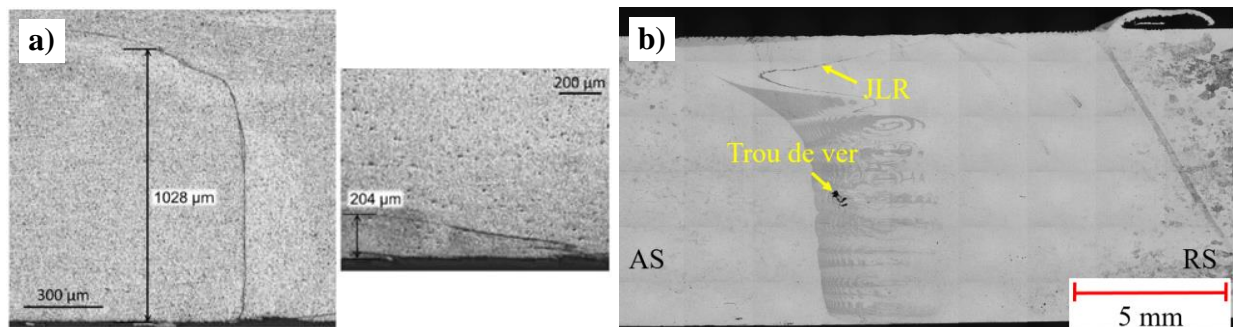


Figure 2.3 - Exemples de défauts sous la surface a) KB à la racine [4] b) WH et JLR

Les défauts de conditions initiales des pièces peuvent être problématiques en phase présoudage. Par exemple, les tolérances dans le procédé de fabrication par extrusion peuvent permettre de

légères distorsions initiales dans les pièces. De plus, un bridage et une installation inappropriés des extrusions peuvent aussi être la cause de décalage axial ou angulaire entre les pièces. Dans ce cas, quelques études prouvent l'existence d'une flexion supplémentaire au sein de la soudure. Ceci engendre soit une contrainte de tension ou de compression à la racine [6, 13]. La vie en fatigue d'une soudure diminuerait lorsque la racine est soumise à une tension supplémentaire, puisque cette zone est moins homogène que la surface supérieure et qu'il y a présence potentielle de MP.

2.2 Codes et normes existants

Certaines normes et règles donnent des informations de base sur le contrôle qualité et la préqualification des joints SFM. La norme canadienne CAN/CSA W59.2 sur les constructions soudées en aluminium est présentement en train d'adopter de telles notions. L'*Aluminium design manual* (ADM) [14] et l'*International institute of welding* (IIW) [15] présentent aussi des courbes de conception en fatigue pour des soudures par fusion en aluminium sous de multiples configurations de joint et de chargement. Utiliser ces courbes pour un joint SFM est une approche conservatrice, étant donné leur meilleur rendement en fatigue. Malgré cela, ces courbes serviront de base de référence à l'étude en fatigue.

Pour l'ADM à la Figure 2.4 a), plusieurs courbes de conception sont présentées. Deux courbes sont pertinentes comme base de référence. D'abord, il y a l'ADM Cat. A, appliquée pour le matériau aluminium de base soumis à un chargement axial ou en flexion. Enfin, la courbe ADM Cat. B est appliquée aux éléments en aluminium soudés par fusion dans une configuration bout à bout avec pénétration complète soumis à un chargement axial perpendiculaire à la soudure.

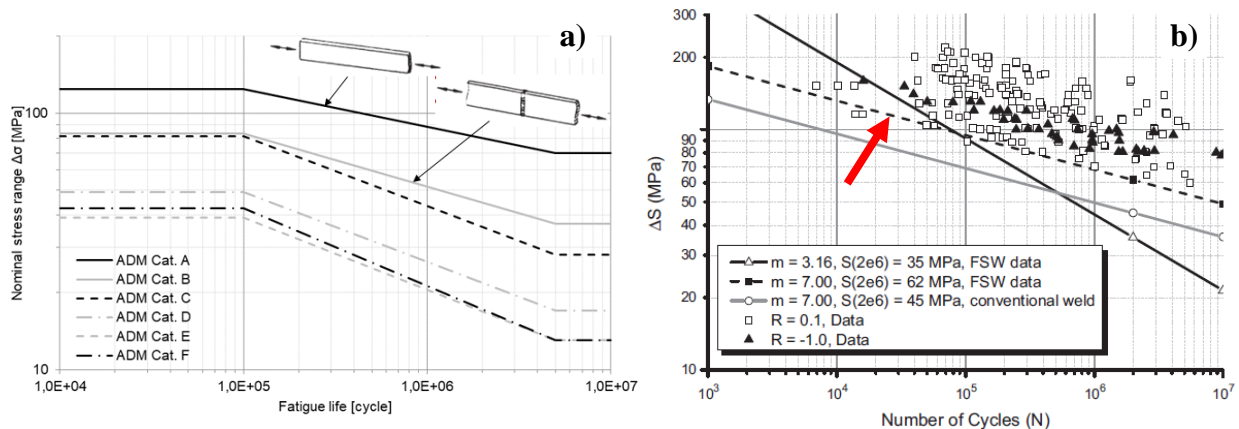


Figure 2.4 - Courbes de conception en fatigue a) soudures par fusion de l'ADM b) FAT62 pour des joints SFM

Pour l'IIW, plusieurs classes de fatigue (FAT) s'appliquent à de nombreuses configurations de joints d'aluminium soudées à l'arc et chargement. Toutefois la courbe FAT62 à la Figure 2.4 b) est plus appropriée pour des pièces d'aluminium soudées par friction malaxage. 62 MPa est la contrainte équivalente à 2×10^6 cycles et la pente de la courbe m est de 7,0. Cette proposition de Miranda et al. [7] a été faite selon une approche statistique de résultats d'essais de fatigue tirés de la littérature. Elle est plus permissive que si c'était des soudures conventionnelles par fusion, en raison des meilleures performances en fatigue des joints SFM.

3 MÉTHODOLOGIE

Une étude en fatigue de soudures par friction malaxage a été réalisée dans cette étude. Des barres extrudées de 9,53 mm d'épaisseur d'alliage 6061-T651 ont été soudées par le portique spécialisé du Centre de soudage par friction malaxage (CSFM-UQAC). Un outil triangulaire à trois plats en acier H13 d'une longueur de pion de 9,30 mm conçu à l'UW a été utilisé. Quatre configurations de joints sont mises à l'étude, soit une soudure de qualité optimisée (PW) comme référence, un défaut sous la surface de type trou de ver (WH), un décalage axial des pièces du côté avançant (MAS) et un décalage axial des pièces du côté reculant (MRS).

Les plaques soudées ont par la suite été usinées afin d'en tirer des échantillons de géométrie désirée. Ceux-ci ont permis de réaliser une caractérisation des propriétés en fatigue et des analyses de la métallurgie des soudures. Quatre échantillons pour les essais de fatigue et quatre autres pour les analyses métallurgiques ont été prélevés sur toute la longueur des plaques soudées. La géométrie des échantillons à la Figure 3.1 pour les essais de fatigue a été optimisée par Guo et ajustée selon les besoins des cadres d'essais.

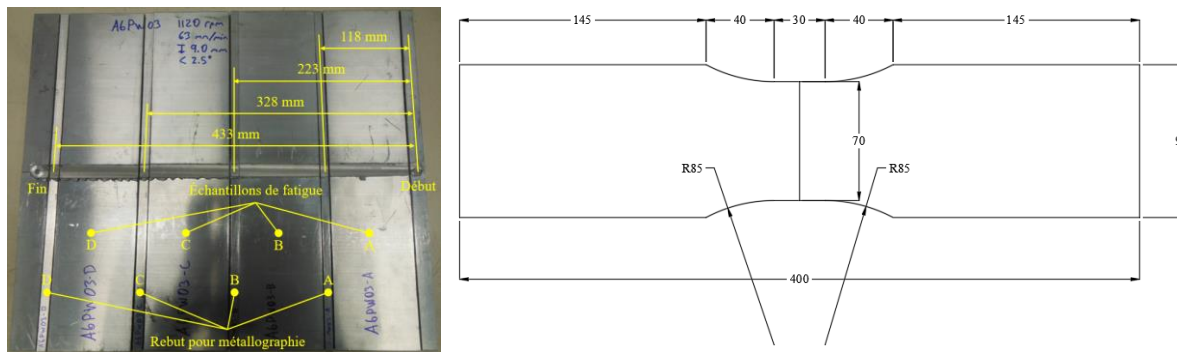


Figure 3.1 - Extractions et géométrie des spécimens pour les essais de fatigue (dimensions en mm)

Les essais de fatigue ont été réalisés à l'UW sur une presse hydraulique d'une capacité de 100 kN en chargement dynamique. Les essais ont été dirigés par les candidats au doctorat Rakesh Ranjan et Luqman Ahmad Shah. Les soudures sont soumises à un chargement en traction seulement dans un contrôle de force en boucle fermée et sous un chargement à amplitude constante (CA) et variable (VA). Pour tracer une courbe S-N significative, 6 à 12 échantillons de chaque configuration ont été testés à un rapport de contrainte ($R = \sigma_{max}/\sigma_{min}$) de 0,1. Pour les essais sous CA, le chargement est de forme sinusoïdale avec une charge maximale σ_{max} et minimale σ_{min} . Diverses étendues de contraintes ($\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$) ont été testées.

Pour les essais sous VA, l'historique de chargement de 1007 pics utilisé par Guo [4] a permis de faire des essais dans des conditions plus réalistes. En effet, des données ont été recueillies à partir d'un pont routier d'une portée de 15 m soumis au trafic ontarien. Pour réaliser des essais sur diverses étendues de contraintes équivalente ΔS_{eq} , il faut ajuster l'échelle en appliquant la sommation de Miner à l'équation (1) au chargement. Cette sommation permet d'évaluer le dommage cumulatif pour chaque cycle de chargement. Dans ce cas, ΔS_{eq} est la variable à modifier. Dans cette équation, la pente m tient compte du chargement et de la configuration du joint. Une soudure bout à bout soumise à un chargement axial transversal dans l'ADM se classe dans le *Detail*

Category B. La pente m pour ce détail est de 4,84. Comme donnée initiale, la section d'échantillon initiale est estimée à 666,75 mm².

$$\Delta S_{eq} = \left(\sum_{i=1}^k \frac{\Delta S_i^m \cdot N_i}{N_{tot}} \right)^{1/m} \quad (1)$$

où	ΔS_{eq}	Étendue de contrainte équivalente
	ΔS_i	Étendue de contrainte au cycle i
	n_i	Nombre de cycle pour une étendue de contrainte i
	N_i	Nombre de cycle à la rupture pour une étendue de contrainte i
	m	Pente de la courbe de conception en fatigue

À la suite des essais de fatigue, la banque de résultats a permis de faire une étude statistique. La méthode de régression linéaire recommandée par l'IIW [15] permet de définir une courbe S-N moyenne (en vert dans les graphiques) en plus d'établir des probabilités de défaillance. L'évaluation sur une distribution gaussienne, ou log-normal, permet de définir une courbe caractéristique de conception (en vert pointillé dans les graphiques), suivant une probabilité de rupture de 5 % et un intervalle de confiance de 75 %.

Les soudures ont été soumises à divers types d'inspection. D'abord, elles ont toutes été inspectées visuellement en surface et plusieurs sections ont été extraites pour étudier leur métallurgie. Ensuite, les soudures détenant un trou de ver ont été inspectées par un essai non-destructif aux ultrasons. Sans donner une idée de la taille du vide, cet essai s'avère efficace pour détecter ce défaut interne.

4 RÉSULTATS ET DISCUSSION

Pour les essais de fatigue, les résultats des essais sont présentés aux Figure 4.1 et Figure 4.2 pour chaque configuration de défauts. Dans chaque figure, PW, WH, MAS et MRS signifie les conditions du joint alors que CA signifie un chargement à amplitude constante et VA un chargement à amplitude variable. Aussi, la flèche noire signifie que l'essai a été interrompu, considérant le nombre de cycle déjà élevé. L'échantillon a en théorie une vie en fatigue « infinie ». La flèche rouge quant à elle signifie que l'échantillon a cassé dans le matériau de base (BM), et non dans le joint.

Il est constaté d'abord à la Figure 4.1a) que les soudures optimisées donnent d'excellents résultats. La plupart des échantillons ont une vie en fatigue supérieure aux courbes de conception présentées. Tous les essais à amplitude constante (PW - CA) sont même supérieurs à la courbe ADM Cat. A, qui se définit comme le matériau aluminium de base soumis à un chargement axial. La pente de la courbe S-N expérimentale égale à 7,61 est similaire à celle de la courbe de conception de l'ADM Cat. A ($m = 6,85$) et de la courbe FAT62 ($m = 7,0$), avec une faible dispersion. Les résultats des essais à VA sont assez faibles en comparaison aux résultats à CA. La courbe de la pente de l'équation (1) aurait dû être imposée à 7,61 plutôt qu'à 4,84.

Pour le défaut de type trou de ver, il est une zone de concentration de contrainte disposant de deux sites d'initiation de fissure. En consultant la courbe S-N de la Figure 4.1b), ce défaut diminue

significativement la vie en fatigue. Malgré cela, les résultats sont tout de même au-dessus des courbes ADM Cat. B et FAT62. La pente de la courbe S-N est égale à 7,00 avec une dispersion moyenne, et est légèrement sous l'ADM Cat. A. La courbe de conception superpose la courbe ADM Cat. B. Toutefois, les échantillons n'ont pas tous présenté des signes de trou de ver. Sur dix échantillons testés, la moitié a cassé dans le noyau au sein même du trou de ver (encadrés en rouge). Le reste a soit cassé dans la HAZ ou dans le matériau de base. De plus, le trou n'est pas constant. Selon des mesures du faciès de rupture de quelques échantillons prises au microscope à balayage électronique, la taille du vide varie entre 0,25 mm et 0,9 mm.

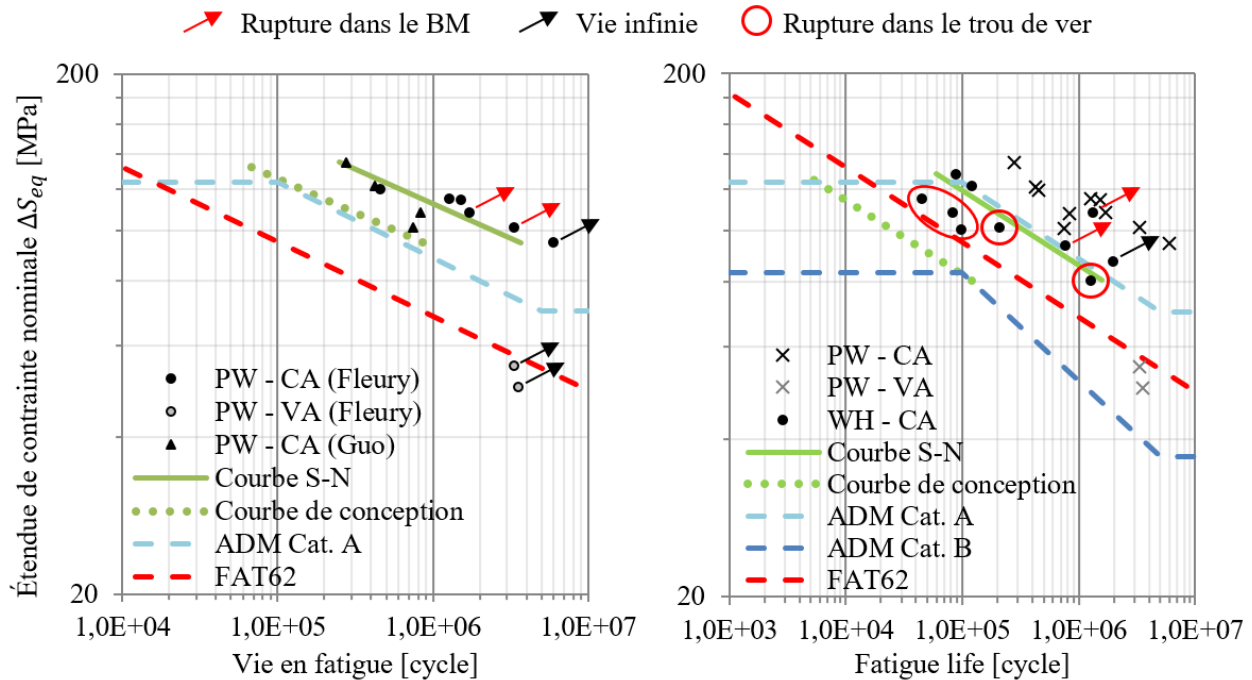


Figure 4.1 - Courbes S-N des soudures a) optimisées (PW) b) avec trou de ver (WH)

Pour un décalage axial inférieur à 1,0 mm avec la plaque du côté AS surélevée, la Figure 4.2 a) montre bien une diminution de la vie en fatigue, mais demeure tout de même près des soudures optimisées. La majorité des données est supérieure aux courbes de conception. La pente de la courbe S-N est égale à 7,71 avec une dispersion élevée, ce qui s'apparente fortement à la pente de la courbe S-N des joints optimisés PW. Toutefois, il y a un écart assez important dans les résultats des essais, qui peut être expliqué par le fait que le décalage n'est pas constant sur toute la longueur d'une soudure. Pour tous les essais réalisés, la hauteur du décalage se situe entre 0,4 mm et 1,0 mm (moins de 10 % de l'épaisseur initiale des plaques). Ceci fait en sorte que la courbe de conception en fatigue se situe sous la courbe ADM Cat. B. Sinon, tous les échantillons à un chargement CA ont cassé dans le bout de la soudure du côté AS, où il y a une forte concentration de contraintes au changement de géométrie à la surface supérieure.

À la Figure 4.2 b), c'est plutôt la pièce du côté reculant qui est surélevée, avec une hauteur de décalage variant entre 0,4 mm et 1,0 mm. Tous les résultats sont au-dessus des courbes de conception ADM Cat. B et FAT62 pour cette condition. Il y a une faible diminution de la vie en fatigue lorsque le décalage du côté RS est inférieur à 1,0 mm, donc environ 10 % de l'épaisseur

des pièces à souder. La courbe S-N est ceci dit légèrement supérieure à la courbe ADM Cat. A. Malgré la variabilité dans la mesure de la hauteur réelle du décalage, une pente de 5,68 pour la courbe S-N est assez droite avec une faible dispersion. Qui plus est, ce type de défaut est pourvu d'une bavure excessive sur toute sa longueur. À l'inspection visuelle, ceci ne serait pas accepté tel quel. Il faudrait enlever la bavure en usinant la surface par polissage ou en la coupant à la meuleuse portable. Ce sont des opérations supplémentaires qui engendrent des coûts additionnels de fabrication, mais pouvant être évités en optimisant la profondeur de pénétration ou la force axiale cible lorsqu'en contrôle de force.

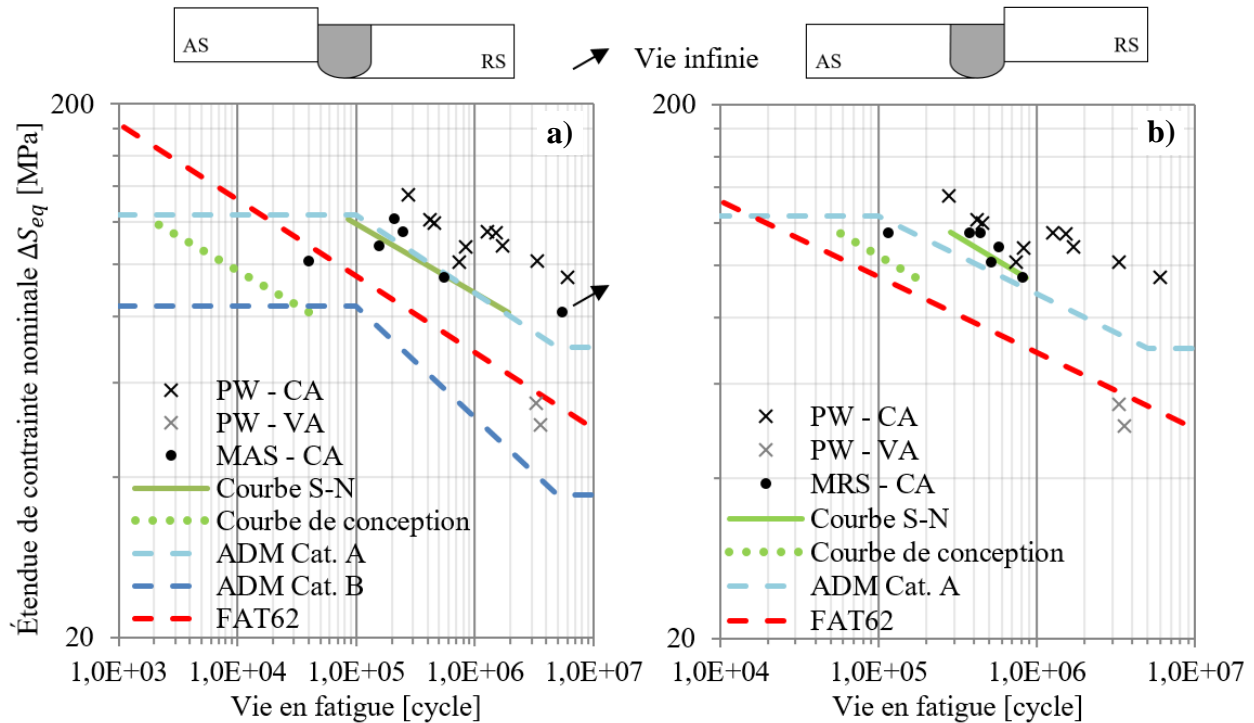


Figure 4.2 - Courbe S-N des soudures avec décalage inférieur à 1,0 mm a) côté AS (MAS) b) côté RS (MRS)

Il est recommandé de placer la pièce la plus épaisse du côté avançant lorsque deux pièces d'épaisseurs différentes doivent être soudées [16]. Selon l'expérience de cette étude, ceci est une question plutôt pratique. Un décalage du côté AS n'a pas de bavure, alors qu'une bavure excessive est présente sur toutes les soudures avec décalage du côté RS. Un défaut de ce type a un effet négatif sur la vie en fatigue, car la bavure agit comme zone de concentration de contrainte [5]. Toutefois, si les résultats en fatigue dans les deux conditions sont comparés (MAS et MRS), il est constaté qu'un décalage du côté AS produit une vie en fatigue légèrement plus faible avec une dispersion plus importante qu'un décalage du côté RS. Une explication peut être le changement de géométrie de la soudure, qui semble moins critique sur les pièces décalées du côté RS. Dans cette condition, le rayon de transition au bout de la soudure du côté surélevé est moins agressif que lorsque le décalage est du côté AS. Dans les deux cas, la rupture des échantillons survient généralement du côté de la pièce surélevée, à partir du changement de géométrie.

5 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

En somme, les joints soudés par friction malaxage possèdent de meilleures propriétés en fatigue que les joints soudés par procédé de fusion. Un travail d'optimisation des paramètres de soudage et des conditions permettrait d'obtenir des soudures sans défauts apparents, ni défauts sous la surface. Des conclusions et des recommandations peuvent être tirées des résultats de cette étude.

- Pour la configuration de soudure optimisée (PW), tous les résultats obtenus sont supérieurs à la courbe de conception de l'ADM Cat. A. En ajoutant les résultats de cette étude à ceux de Guo, la pente de la courbe S-N est égale à 7,61, ce qui s'apparente à celle de l'ADM Cat. A ($m = 6,85$) en plus de la courbe FAT62 ($m = 7,0$).
- Pour la condition de soudure avec décalage axial du côté avançant (MAS) inférieur à 1,0 mm, une diminution de la vie en fatigue par rapport aux soudures PW est observée. L'écart dans les données est plutôt considérable, ce qui engendre une courbe de conception en fatigue inférieure à la courbe de l'ADM Cat. B.
- Un décalage axial du côté reculant (MRS) inférieur à 1,0 mm donne des résultats en fatigue quelque peu supérieurs au décalage MAS, avec moins de dispersion. Ceci s'explique par la géométrie moins agressive au pied de soudure lorsque la plaque surélevée est du côté reculant. Une bavure excessive est toutefois présente, ce qui est inacceptable.
- En général, un défaut de décalage des pièces devrait être acceptable à hauteur maximale de 10 % de l'épaisseur initiale des pièces. Au-delà de cette hauteur, il y a des risques d'apparition de défauts de surface (bavure excessive et cavité) et la différence de niveau entre les deux pièces est embarrassante. La vie en fatigue est certes diminuée, mais les résultats sont généralement supérieurs à la courbe de conception de l'ADM Cat. B.
- Malgré le fait qu'il est difficile de créer un trou de ver dans une soudure avec des conditions idéales, un vide de taille inférieure à 0,9 mm pourrait être acceptable en termes de performance en fatigue. Il est aussi facilement détectable par inspection non-destructive aux ultrasons. Cependant, cette inspection ne permet pas d'en estimer sa taille. Ainsi, il est recommandé de rejeter la soudure s'il y a détection potentielle d'un vide interne durant une inspection aux ultrasons par un inspecteur qualifié.

6 REMERCIEMENTS

Les auteurs désirent remercier le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) et l'Association de l'aluminium du Canada (AAC) pour leur support financier. Merci au Groupe Canmec Inc. pour leur important partenariat dans ce projet. Merci à Rakesh Ranjan et à Luqman Ahmad Shah de l'University of Waterloo (UW) pour leur énorme travail. Merci au Centre de soudage par friction malaxage (CSFM-UQAC) et à Alexandre Maltais pour leur importante contribution. L'aide du personnel technique du CURAL et de l'UW est aussi reconnue. Finalement, merci au Centre d'expertise et d'innovation sur l'aluminium d'AluQuébec pour cette vitrine.

7 RÉFÉRENCES

- [1] American Society of Civil Engineering, "2013 Report card for America's infrastructure," 2013.

- [2] American Society of Civil Engineering, "2017 Report card for America's infrastructure," 2017.
- [3] Ministère des Transports, "Rapport annuel de gestion," Gouvernement du Québec, Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2018.
- [4] S. Guo, L. Shah, R. Ranjan, S. Walbridge, and A. Gerlich, "Effect of quality control parameter variations on the fatigue performance of aluminum friction stir welded joints," *International Journal of Fatigue*, vol. 118, pp. 150-161, 2019, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2018.09.004.
- [5] S. Guo, "Fatigue behavior of aluminum friction stir welds under highway bridge loading conditions," MASc, Mechanical and Mechatronics Engineering, University of Waterloo, 2018.
- [6] R. Ranjan, A. C. de Oliveira Miranda, S. Guo, S. Walbridge, and A. Gerlich, "Fatigue analysis of friction stir welded butt joints under bending and tension load," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 206, pp. 34-45, 2019, doi: 10.1016/j.engfracmech.2018.11.041.
- [7] A. C. d. O. Miranda, A. Gerlich, and S. Walbridge, "Aluminum friction stir welds: Review of fatigue parameter data and probabilistic fracture mechanics analysis," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 147, pp. 243-260, 2015, doi: 10.1016/j.engfracmech.2015.09.007.
- [8] L. H. Shah, S. Guo, S. Walbridge, and A. Gerlich, "Effect of tool eccentricity on the properties of friction stir welded AA6061 aluminum alloys," *Manufacturing Letters*, vol. 15, pp. 14-17, 2018, doi: 10.1016/j.mfglet.2017.12.019.
- [9] D. Beaulieu and J. Internoscia, "Chantier Infrastructures et Ouvrages d'art : Mission technique sur les ponts en aluminium," AluQuébec, Association de l'Aluminium du Canada,, 2015.
- [10] T. Dickerson and J. Przydatek, "Fatigue of friction stir welds in aluminium alloys that contain root flaws," *International Journal of Fatigue*, vol. 25, no. 12, pp. 1399-1409, 2003, doi: 10.1016/s0142-1123(03)00060-4.
- [11] B. T. Gibson *et al.*, "Friction stir welding: Process, automation, and control," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 16, no. 1, pp. 56-73, 2014, doi: 10.1016/j.jmapro.2013.04.002.
- [12] A. Fleury, R. Ranjan, L. Shah, L. St-Georges, A. Rahem, and S. Walbridge, "Fatigue design of friction stir welded joints in aluminium bridge decks," presented at the Canadian Society of Civil Engineering Annual Conference, Laval, Canada, June 12 -15, 2019, 2019.
- [13] S. Fowler, A. Toumpis, and A. Galloway, "Fatigue and bending behaviour of friction stir welded DH36 steel," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 84, no. 9-12, pp. 2659-2669, 2015, doi: 10.1007/s00170-015-7879-3.
- [14] The Aluminum Association, *Aluminum Design Manual Part I: Specification fo Aluminum Structures*. 2015.
- [15] A. F. Hobbacher, *Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components*. International Institute of Welding, 2016.
- [16] Y. Hovanski, "Automated production of aluminum tailor-welded blanks," in *12th International Symposium on Friction Stir Welding*, Saguenay, Canada, June 26th-28th 2018 2018.