



**Fatigue des joints soudés par friction-malaxage dans les tabliers de ponts en aluminium
d'alliage AA6061-T6**

Par

**Kenza Marianne Sipereh Tinguery, CPI
Sous la direction de Ahmed Rahem et la codirection de Mario Fafard et François Nadeau**

**Mémoire présentée à
L'Université du Québec à Chicoutimi en vue de l'obtention du grade
Maître ès sciences appliquées (M. Sc. A.) en ingénierie**

Octobre 2023

Jury:

Ahmed Rahem, Ph. D, Professeur, Université du Québec à Chicoutimi

Mario Fafard, Ph. D, Professeur, Université Laval/ AluQuebec

François Nadeau, M. Sc. A, CNRC-NRC

Lyne St-Georges, Ph. D, Professeure, Université du Québec à Chicoutimi

Mathieu Fiset, Ph. D, Professeur, Université du Québec à Chicoutimi

Québec, Canada

© Kenza Marianne Sipereh Tinguery, 2023

RÉSUMÉ

Au Canada, les ponts sont conçus pour une durée de vie de 75 ans. L'élément subissant le plus de dégradation et nécessitant le plus d'entretien est le tablier, car il est exposé aux éléments agressifs comme le passage des véhicules et camions, les intempéries, les sels de déglacage et les variations de température. L'aluminium est un matériel très peu utilisé en ingénierie civile pour la réfection ou la construction des tabliers de pont en raison des connaissances peu développées, mais aussi à cause du manque d'expérience pratique dans ce domaine. Dans la plupart des projets de conception de ponts, l'aluminium n'est pas le matériau du premier choix à cause du coût de construction élevée par rapport à une dalle de béton, pourtant, il possède de nombreuses propriétés avantageuses autant structurales qu'environnementales comparativement aux matériaux conventionnels couramment utilisés tels l'acier et le béton. De plus, sa capacité à être extrudé selon diverses formes permet d'avoir des profilés plus optimisés selon l'usage voulu. Les structures réalisées en béton ou en acier nécessitent des coûts d'entretien importants et récurrents afin de pérenniser l'ouvrage. Un platelage en aluminium serait une alternative durable, économique, plus légère et écologique sur le long terme pour la réhabilitation ou la construction de nouveaux tabliers. En effet, cela permettra une réduction des coûts d'entretiens, une facilité de mise en place lors de la construction et ainsi qu'un gain de longévité.

Il existe plusieurs méthodes d'assemblage efficaces pour l'aluminium tels les joints mécaniques, les adhésifs structuraux et le soudage. Le soudage par fusion est bien connu, mais le soudage par friction-malaxage (SFM) est mieux adapté pour l'assemblage de profilés épais sur de grandes longueurs. C'est un type de soudage qui permet d'assembler les pièces à l'état solide sans que ces dernières n'atteignent leur point de fusion. C'est un procédé mécanisé et automatisé qui permet d'obtenir de meilleures propriétés mécaniques que le procédé de soudage conventionnel par fusion. Il existe deux variantes de soudage par friction malaxage dont le soudage par friction malaxage standard et celui avec le pion à double épaulement. C'est une technologie beaucoup plus utilisée dans les domaines de l'aéronautique, de l'aérospatial et de l'automobile que dans le domaine du génie civil. En effet, les normes actuelles ne traitent pas des règles de conception ni du comportement en fatigue des joints assemblés par ce procédé. Il existe des normes et règlements sur l'aspect qualitatif des joints comme la norme ISO 25239 et la norme AWS D17.3. Les normes de conception existantes sont celles du soudage par fusion. Néanmoins, plusieurs études sur la fatigue portent sur le soudage par friction malaxage standard et démontrent de meilleurs résultats par rapport au soudage conventionnel par fusion.

Pour le soudage par friction-malaxage avec le pion à double épaulement, il y a très peu d'études qui portent sur le comportement en fatigue des joints assemblés par cette méthode. De ce fait, l'objectif principal de cette étude est de démontrer que les joints soudés à l'aide du pion à double épaulement donnent des résultats en fatigue supérieurs à ceux du soudage conventionnel et de pouvoir établir une courbe de fatigue qui pourrait servir de lignes directrices pour la mise en œuvre du SFM dans les codes de conception du génie civil.

La méthodologie est basée sur les normes qualificatives en vigueur afin de valider et d'optimiser les paramètres de soudage qui permettront d'obtenir des soudures sans défaut. L'optimisation des paramètres est une étape importante, car elle permet d'éviter des défauts qui affectent le comportement en fatigue. De ce fait, plusieurs essais qualitatifs ont été réalisés, dont les analyses par ultrasons, des essais de pliage, des essais de traction, et des analyses métallographiques. Dans le cadre de ce travail, il été question de souder une longue

extrusion avec des paramètres optimisés au préalable et d'extraire des échantillons pour l'évaluation des propriétés mécaniques. De ce fait, une extrusion de 3,3 m (10 pieds) d'alliage AA6061-T6 d'épaisseur 8 mm a été soudée avec des paramètres optimisés (850 rpm et 650 mm/min). Des gains de propriétés mécaniques en traction et en fatigue ont pu être obtenus. Les essais de fatigue ont été réalisés pour des amplitudes de contraintes comprises entre 100 MPa et 150MPa pour des cycles visés de 500 000 à 25 000 000 de cycles qui correspond approximativement à une durée de vie de 75 ans.

ABSTRACT

In Canada, bridges are designed to last 75 years. The element that suffers the most degradation and requires the most maintenance is the deck, as it is exposed to aggressive elements such as vehicle and truck traffic, weather, de-icing salts and temperature variations. Aluminum is a material that is rarely used in civil engineering for bridge deck refurbishment or construction, due to a lack of knowledge and practical experience in this field. In most bridge design projects, aluminum is not the material of first choice because of its high construction cost compared with a concrete slab, yet it has many advantageous properties, both structural and environmental, compared with conventional materials such as steel and concrete. What's more, its ability to be extruded into a variety of shapes means that profiles can be optimized to suit the intended use. Structures made of concrete or steel require significant and recurring maintenance costs to ensure the longevity of the structure. Aluminum decking would be a sustainable, economical, lighter and more environmentally friendly alternative for the long term, whether for refurbishment or new construction. This would reduce maintenance costs, make it easier to install during construction, and save time.

There are several effective joining methods for aluminum, such as mechanical joints, structural adhesives and welding. Fusion welding is well known, but friction stir welding (FSW) is better suited to joining thick sections over long lengths. This type of welding enables parts to be joined in a solid state without reaching their melting point. It's a mechanized, automated process that delivers better mechanical properties than conventional fusion welding. Friction stir welding comes in two variants: standard friction stir welding and double-shouldered pin welding. This technology is much more widely used in the aerospace and automotive industries than in civil engineering. Indeed, current standards do not address the design rules or fatigue behaviour of joints assembled using this process. There are standards and regulations on the qualitative aspect of joints, such as ISO 25239 and AWS D17.3. The existing design standards are those for fusion welding. Nevertheless, several fatigue studies have been carried out on standard friction stir welding, demonstrating better results than conventional fusion welding. In the case of friction stir welding using the double-shouldered stud, very few studies have been carried out on the fatigue behaviour of joints assembled using this method. As a result, the main objective of this study is to demonstrate that joints welded using the double-shouldered stud give fatigue results superior to those of conventional welding, and to be able to establish a fatigue curve that could serve as a guideline for the implementation of FSW in civil engineering design codes.

The methodology is based on current qualification standards, in order to validate and optimize the welding parameters required to obtain defect-free welds. Parameter optimization is an important step, as it helps avoid defects that affect fatigue behaviour. For this reason, several qualifying tests were carried out, including ultrasonic analysis, bending tests, tensile tests and metallographic analysis. This work involved welding a long extrusion with previously optimized parameters and extracting samples for mechanical property evaluation. A 3.3 m (10 ft) extrusion of 8 mm thick AA6061-T6 alloy was welded using optimized parameters (850 rpm and 650 mm/min). Improvements in both tensile and fatigue mechanical properties were achieved. Fatigue tests were carried out at stress amplitudes ranging from 100 MPa to 150 MPa for target cycles of 500,000 to 25,000,000 cycles, corresponding to a service life of approximately 75 years.

REMERCIEMENTS

J'adresse mes remerciements à l'Université du Québec à Chicoutimi en partenariat avec AluQuébec pour l'opportunité que m'ont offerte ces entités de travailler sur ce projet plein d'enrichissements, de découvertes et d'apprentissages.

Je remercie tout d'abord mon directeur, Ahmed Rahem, ing., Ph. D. et mes codirecteurs Mario Fafard ing., Ph. D. et François Nadeau, ing., M.Sc. pour leur supervision, leur encadrement, leur conseil et leur disponibilité tout au long de ce projet. Merci de m'avoir communiqué votre passion, car j'ai beaucoup appris tout au long de ce parcours. Je remercie également Alexandre Maltais pour son travail et sa disponibilité tout au long du projet.

De plus, j'adresse mes remerciements à MITACS et à AluQuébec pour m'avoir octroyé la bourse d'études pour mon parcours. Je remercie le Pr Mario Fafard du Centre de recherche sur l'aluminium-REGAL de l'Université Laval pour le soutien financier relié à l'achat de l'aluminium, aux tests de soudages et aux essais effectués au CNRC, à l'UQAC et à l'Université Laval.

Je remercie également le centre de recherche sur l'aluminium-CURAL pour leurs équipements et leur disponibilité à réaliser les divers tests en laboratoire.

Je remercie également le CNRC-CTA de Chicoutimi et de Winnipeg, mais aussi le parc technologique de l'UQAC pour le personnel et l'équipement mis à disposition pour réaliser les essais. Je remercie également l'Université de Laval pour leur collaboration et leur implication pour ce projet.

Je tiens à remercier également tout le personnel technique de l'UQAC, de l'Université Laval du CURAL et du CRNC-CTA de Chicoutimi/Winnipeg ainsi que tous les étudiants qui m'ont donné de leur disponibilité et de leur aide pour la réalisation des essais et me communiquer leur connaissance.

Je remercie enfin tous mes proches et ma famille pour leur soutien inconditionnel tout au long de mon parcours et leur encouragement en tout temps. Je remercie aussi toutes ces personnes que j'ai pu rencontrer au cours de ce parcours et qui m'ont permis d'enrichir et d'approfondir mes connaissances.

Table des matières

RÉSUMÉ	i
ABSTRACT	iii
REMERCIEMENTS	iv
LISTES DES FIGURES	vii
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS	xii
1. Chapitre 1 : INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1.1 Généralités	1
1.2 Problématique	5
1.3 Objectifs de l'étude	7
1.4 Organisation du mémoire	8
2. Chapitre 2 : REVUE DE LA LITTÉRATURE	10
2.1 Description et caractéristiques de l'aluminium	10
2.2 Types d'alliages d'aluminium	11
2.3 Propriétés de l'aluminium	13
2.4 Ingénierie civile à travers le monde	13
2.5 Quelques méthodes de soudage d'aluminium existantes	18
2.5.1 Soudage avec électrode réfractaire (GTAW ou TIG)	19
2.5.2 Soudage avec électrode consommable (GMAW ou MIG)	19
2.5.3 Soudage plasma (PAW)	20
2.5.4 Soudage par friction	20
2.5.5 Soudage par faisceau laser	21
2.5 Méthode de soudage par friction malaxage	21
2.5.1 Matériels utilisés	23
2.5.2 Configuration des joints soudés	24
2.5.2.1 Joints soudés bout à bout	25
2.5.2.2 Joints soudés par recouvrement ou par transparence	25
2.5.3 Géométrie des assemblages et outils utilisés pour le soudage	26
2.5.4 Avantages et inconvénients du procédé	30
2.5.5 Domaine d'application de la technique	32
2.6 Défaut dans les soudures en SFM	34
2.6.1 Hooking	34
2.6.2 Liaison faible (kissing bond)	35

2.6.3	Pénétration incomplète	35
2.6.4	Les trous de ver (wormhole) ou cavité interne ou porosité	36
2.6.5	Les bavures ou flashes	36
2.6.6	Distorsion angulaire	37
2.6.7	Décalage linéaire	37
2.7	Méthodes d'inspection des soudures	38
2.7.1	Méthode d'inspection visuelle	38
2.7.2	Méthode de radiographie	38
2.7.3	Méthode d'inspection par ultrason	39
2.7.4	Test de métallographie par macrographie (essai destructif)	39
2.7.5	Test de métallographie par micrographie (essai destructif)	39
2.8	Critères d'acceptation des soudures	40
2.9	Éléments essentiels pour caractériser les soudures	43
2.10	Impact de la technique sur la microstructure du joint	43
2.11	Méthode de mesure de la microstructure	45
2.12	Fatigue en SFM et dans les ponts en aluminium	48
2.14.1	Méthode de construction des courbes de fatigue	57
2.14.2	Norme et codes	58
2.14.3	Détail des courbes de fatigue selon la littérature	59
3.	Chapitre 3 : MÉTHODOLOGIE	67
3.1	Optimisation des paramètres	67
3.1.1	Matériel de soudage par SFM	70
3.1.2	Plan d'usinage des éprouvettes	72
3.2	Essais de traction	74
3.3	Matériels utilisés pour essais de traction	75
3.3.1	Le pied de coulisse	75
3.3.2	L'extensomètre	75
3.3.3	Presse servo-hydraulique pour essai de traction	75
3.3.4	Méthode de calcul de la limite élastique, l'allongement à la rupture et du pourcentage d'efficacité du joint.	76
3.4	Essais de pliage	78
3.5	Analyse par ultrasons	80
3.6	Principe de réalisation de l'essai de fatigue	82
3.6.1	Méthode de calcul des dimensions de l'éprouvette	82
3.6.2	Paramètres pour les tests de fatigue	84

3.6.3	Machines utilisées et réalisation des essais de fatigue	86
3.7	Métallographie	90
3.7.1	Matériel utilisé	91
3.8	Test de dureté Vickers	92
4.	Chapitre 4 : RÉSULTATS ET DISCUSSION	94
4.1	Paramètres de soudage	94
4.2	Inspection visuelle des soudures	96
4.3	Analyse par ultrason	98
4.3.1	Analyse par ultrason en bain d’immersion	98
4.3.2	Analyse par ultrason à sonde manuelle	101
4.4	Essais de pliage	102
4.5	Essais de traction	103
4.5.1	Test sur métal de base	103
4.5.2	Essais de qualification	104
4.5.3	Essais finaux	107
4.6	Résultats des tests de métallographie	109
4.7	Résultats des tests de dureté Vickers	112
4.8	Résultats des essais de fatigue	114
5.	Chapitre 5: Conclusion	95
5.1	Conclusion générale	95
5.2	Recommandations et travaux futurs.	123
A.	Annexe 1- Résultats des tests d’ultrasons à bain d’immersion	124
B.	Annexe 2 – Forces et moment de soudage	124
C.	Annexe 3- Forces, déplacements, faciès de rupture/localisation de zone de rupture	129
D.	Annexe 4-Résultats des tests de tractions détaillés	134
E.	Annexe 5- Résultats de métallographie	134

LISTES DES FIGURES

Figure 1.1	Pont d'aluminium d'Arvida au Saguenay	2
Figure 1.2	Méthode conventionnelle de soudage par friction malaxage [5]	4
Figure 1.3	Pion à double épaulement [7]	4
Figure 1.4	Vue d'ensemble du pont de St-Ambroise (photo gracieuseté M. Fafard)	5
Figure 1.5	Tablier du pont de St-Ambroise (photo gracieuseté M. Fafard).....	5
Figure 1.6	Macrostructure d'un joint soudé par friction malaxage [7].....	6
Figure 2.1	Passerelle de la rivière aux sables. [73]	16
Figure 2.2	Passerelle de la rivière Petite Décharge [73]	16

Figure 2.3 Principe du soudage par friction malaxage conventionnelle [15].....	21
Figure 2.4 Phases de soudage [6].....	22
Figure 2.5 Composante principale de la cellule de soudage [6].....	24
Figure 2.6 Types de joints soudés bout à bout [20]	25
Figure 2.7 Types de joint soudé bout à bout (suite) [20]	25
Figure 2.8 Type de soudure par recouvrement [20]	26
Figure 2.9 Géométrie de l'outil à simple épaulement [6]	26
Figure 2.10 (a) pion rond (b) pion fileté (c) pion cylindrique (d) pion carré (e) pion triangle [16]..	27
Figure 2.11 Pion rétractable	29
Figure 2.12 Pion à double épaulement (bobbin tool) [17]	29
Figure 2.13 Configurations géométriques des soudures [17].....	30
Figure 2.14 Illustration du hooking [19]	35
Figure 2.15 Illustration de la pénétration incomplète [19].....	35
Figure 2.16 Illustration des trous de ver [29, 19].....	36
Figure 2.17 Illustration des bavures [29]	37
Figure 2.18 Illustration de la distorsion angulaire [19].....	37
Figure 2.19 Illustration du décalage linéaire [19]	37
Figure 2.20 Microstructure de la zone de soudage en SFM [37]	43
Figure 2.21 Représentations de la dureté d'un échantillon soudé obtenue à l'aide de l'essai de dureté de Vickers (7075-T6, 2,3 mm d'épaisseur) [40]	46
Figure 2.22 Essai de dureté de Vickers (6061-T6, 19 mm) [41].....	47
Figure 2.23 Courbe de fatigue alliage AA6005C-T5 de 12 mm [37]	50
Figure 2.24 Comparaison des courbes de fatigue pour le matériel de base non soudé et des soudures SFM de l'alliage 2024-T4 (4 mm) [45]	51
Figure 2.25. Durée de vie en fatigue sur des joints SFM à faible vitesse de soudage (700mm/min) [46].....	52
Figure 2.26 Durée de vie en fatigue sur des joints SFM à haute vitesse de soudage (1400mm/min).....	53
Figure 2.27 Courbe de fatigue de l'alliage 5083 avec un défaut de liaison faible (kissing bond) [47]	54
Figure 2.28 Courbe de fatigue : Comparaison entre MIG et SFM [48]	55
Figure 2.29 Comparaison de courbe de fatigue en SFM et en MIG pour des alliages AA6061-T6 [41].....	56
Figure 2.30 Courbe de fatigue de Wöhler [50]	57
Figure 2.31 Contrainte cyclique constante [51]	58
Figure 2.32 Détails de fatigue selon la norme CSA-S6 [22] et la norme CSA-S157 [52].....	60
Figure 2.33 Détails de fatigue selon la norme ADM	62
Figure 2.34 Détails de fatigue selon la norme IIW-1823-07 [23].....	63
Figure 2.35 Courbe de fatigue selon la norme Eurocode-9 [24].....	64
Figure 2.36 Détails de fatigue selon la norme Eurocode-9	66
Figure 3.1 Méthodologie de l'étude.....	67
Figure 3.2. Extrusion d'aluminium d'alliage AA6061-T6.....	69
Figure 3.3 Équipements pour la soudure par SFM [59].....	70
Figure 3.4 Système de bridage.....	71
Figure 3.5 Pion à double épaulement utilisé pour le soudage	71
Figure 3.6 Plan d'usinage pour les tests de qualification (dimensions en mm)	72
Figure 3.7. Illustration du plan d'usinage sur les extrusions soudées.....	72
Figure 3.8 Plan d'usinage pour les tests finaux au centre de l'extrusion (dimensions en mm)	73
Figure 3.9 Plan d'usinage pour les tests finaux aux extrémités de l'extrusion (dimensions en mm)	74

Figure 3.10 Exemple d'éprouvette de traction (dimension en mm).....	74
Figure 3.11 Pieds de coulisse [54]	75
Figure 3.12 Modèle d'extensomètre [55]	75
Figure 3.13 Presse servo-électrique pour test de traction.....	76
Figure 3.14 Courbe contrainte déformation avec pente du module de Young.....	77
Figure 3.15 Éprouvette des essais de pliage selon la AWS D1-2 [44] (dimension en mm)	79
Figure 3.16 Poinçon utilisée pour essai de pliage	79
Figure 3.17 Matériel utilisé pour test ultrason : système manuel Sonatest (1) et système automatisé Tescan en bain d'immersion (2).....	80
Figure 3.18 Résultat du test d'ultrason	81
Figure 3.19 Éprouvette standard selon la ASTM E466 [72].....	82
Figure 3.20 Exemple d'éprouvette de fatigue (dimensions en mm).....	84
Figure 3.21 Machine d'essai de fatigue INSTRON 8801	87
Figure 3.22. Machine d'essai de fatigue MTS 370.10	88
Figure 3.23. Machine d'essai de fatigue Force Transducer	88
Figure 3.24. Échantillon de fatigue avec un défaut de planéité.	89
Figure 3.25. Extrusion non soudée.....	89
Figure 3.26.Extrusion après soudage	89
Figure 3.27 Machine pour enrobage des échantillons.....	91
Figure 3.28 Machine d'abrasion et de polissage	92
Figure 3.29 Machine pour essai de dureté Vickers	93
Figure 4.1. Force de forge (a), couple (b), force transversale (c) et force longitudinale (d).....	95
Figure 4.2 Illustration du décalage linéaire sur les deux extrusions soudées environ entre 500 mm et 1000 mm	96
Figure 4.3. Aspect visuel de soudure finale (avec paramètres optimaux).....	98
Figure 4.4 Exemple de résultats d'analyse par ultrason (Essai 3, 600 rpm-600 mm/min).....	99
Figure 4.5 Résultat de l'essai 1-2 : 850/ 650 avec décalage de 1,25 mm.....	100
Figure 4.6 Résultat de l'essai 10-2 800/800 avec décalage de 0,5 mm.....	100
Figure 4.7 Résultat de l'essai 10 800/800 avec un décalage de 1,4 mm.....	101
Figure 4.8. Résultats d'analyse par ultrasons pour les essais finaux.....	102
Figure 4.9. Limite ultimes et élastiques du métal soudé AA6061-T6.....	105
Figure 4.10 Allongement à la rupture du métal soudé AA6061-T6.....	105
Figure 4.11 Efficacité des joints du métal soudé AA6061-T6.....	105
Figure 4.12. Échantillons après abrasion et polissage.....	109
Figure 4.13 Métallographie pour des joints de soudure (paramètres optimisés 850 rpm-650 mm/min).....	110
Figure 4.14 Image en pixel de la métallographie.	111
Figure 4.15 Résultat des tests de Vickers.....	113
Figure 4.16 Courbes S-N des soudures	116
Figure 4.17 Échantillons rompus testés en fatigue.....	118
Figure 4.18 Faciès de rupture d'un échantillon (rupture dans la ZAT/ZATM).....	119
Figure 4.19. Faciès de rupture pour échantillon rompu dans le noyau (A) et échantillon rompu dans la ZAT/ZATM (B)	119
Figure A.1 Test d'ultrason pour échantillons de 500 mm test finaux (centre).....	133
Figure A.2. Test finaux 300 mm d'extrusion soudés (fin de la zone soudée).....	134
Figure A.3. Test finaux 300 mm d'extrusion soudés (début de la zone soudée)	134
Figure A.44. Test d'ultrason Essai 1 (400 rpm - 400 mm/min).....	135
Figure A.5. Test d'ultrason Essai 4 (850 rpm - 650 mm/min).....	136

Figure A.6. Test d'ultrason Essai 4-2 (500 rpm - 500 mm/min)	136
Figure A.7. Test d'ultrason Essai 3 (600 rpm - 600 mm/min).....	137
Figure B.1. Essai E1-2 : Moment, force de traverse, force de forge, cross force.....	139
Figure B.2. Essai E4-2 : Moment, force de traverse, force de forge, cross force.....	139
Figure B.3. Essai E1 : Moment, force de traverse, force de forge, cross force.....	140
Figure B.4. Essai E4 : Moment, force de traverse, force de forge, cross force.....	140
Figure B.5. Essai E10-2 : Moment, force de traverse, force de forge, cross force.....	141
Figure B.6. Essai E3 : Moment, force de traverse, force de forge, cross force.....	141
Figure B.7. Essai E10 : Moment, force de traverse, force de forge, cross force.....	142
Figure B.8. Essai E2 : Moment, force de traverse, force de forge, cross force.....	142
Figure C.1. DUM1. Échantillon retiré : rupture dans le matériel de base.....	144
Figure C.2. FF1-Rupture dans la ZM.....	144
Figure C.3. FM3-Rupture dans la TMZA/ZAT	145
Figure C.4. FM4- Pas de rupture.....	145
Figure C.5. FM7- Rupture dans la TMZA/ZAT	146
Figure C.6. FM8- Rupture dans la TMZA/ZAT	146
Figure C.7. FM10- Rupture dans la TMZA/ZAT	147
Figure C.8. FM11- Pas de rupture.....	147
Figure C.9. FM12- Pas de rupture.....	148
Figure C.10. Échantillon rompus	149
Figure C.11. FL2-Rupture dans ZATM/ZAT	150
Figure C.12. FL1-Rupture dans ZM	150
Figure C.13. FL4-Rupture dans ZATM/ ZAT	150
Figure C.14. FL3-Rupture dans ZM	150
Figure C.15. FL7- Rupture dans ZATM/ZAT	150
Figure C.16. FL6- Rupture dans ZATM/ZAT	150
Figure C.17. FL8- Rupture dans ZM	151
Figure C.18. FL9- Rupture dans ZM	151
Figure E.1- Métallographie de E1	156
Figure E.2 - Métallographie de E1-2.....	156
Figure E.3- Métallographie de E2.....	156
Figure E.4- Métallographie de E3.....	156
Figure E.5 - Métallographie de E4.....	157
Figure E.6- Métallographie de E4-2.....	157
Figure E.7- Métallographie de E10.....	157
Figure E.8 - Métallographie de E10-2.....	157
Figure E.9 - Métallographie de M2F.....	158
Figure E.10 - Métallographie de MM3	158

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Propriétés physiques de l'aluminium [52]	13
Tableau 2.2 Propriétés chimiques de l'alliage 6061-T6 [48].....	13
Tableau 2.3 Propriétés mécaniques de l'alliage 6061-T6 [52].....	13
Tableau 2.4 Liste de quelques ponts aux structures en aluminium [9]	15
Tableau 2.5 Types d'alliages et leurs caractéristiques [9]	17
Tableau 2.6 Classification des défauts selon la norme AWS D17.3 [19]	40
Tableau 2.7 Critères d'acceptation selon la norme ISO 25239 [20].....	41

Tableau 2.8 Critères d'acceptation selon la norme ISO 25239 [20] (suite).....	42
Tableau 2.9 Table des dimensions de la ZAT pour les soudures en fusion (MIG) [22]	48
Tableau 3.1. Paramètre de friction malaxage selon la littérature	68
Tableau 3.2 Paramètres de soudage réalisés	68
Tableau 3.3 Paramètres pour essais de fatigue.....	86
Tableau 4.1 Tableau des paramètres de soudage	94
Tableau 4.2 Observation visuelle des soudures	97
Tableau 4.3 Résultats des analyses par ultrason	101
Tableau 4.4 Résultats des tests de pliage	103
Tableau 4.5 Résultats des tests de traction sur métal non soudée AA6061-T6.....	103
Tableau 4.6 Allongement à la rupture du métal de base non soudé AA6061-T6	104
Tableau 4.7 Emplacements de rupture de traction des soudures AA6061-T6	106
Tableau 4.8 Résultats des tests de tractions pour échantillons soudés avec les paramètres optimisés	107
Tableau 4.9 Allongement à la rupture pour les pour échantillons soudés avec les paramètres optimisés	108
Tableau 4.10 Tableau des dimensions de la largeur moyenne pour les essais de qualification.	112
Tableau 4.11 Dimensions des largeurs de la zone affectée par la chaleur pour les joints soudés avec les paramètres optimisés (850 rpm-650mm/min).....	112
Tableau 4.12 Valeur caractéristique de k [23]	115
Tableau 4.13 Résultats des tests de fatigue avec localisation de la zone de rupture.....	117
Tableau D.1 Résultats des tests de traction sur le métal de base.....	153
Tableau D.2 Résultats des tests de traction pour essais finaux	153
Tableau D.3 Résultats des tests de traction sur métal soudé	154

LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS

SYMBOLE	DÉFINITION
AS	Côté avance (Advancing Side)
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
BT-FSW	Bobbin Tool Friction Stir Welding
CURAL	Centre Universitaire de Recherche sur l'Aluminium
CSA	Association canadienne de normalisation (Canadian Standard Association)
CSFM	Centre de Soudage par Friction malaxage
D	Limite d'endurance
E	Module élastique (Module de Young)
EC9	Eurocode 9
Fu	Limite ultime
Fy	Limite élastique
gf	Gramme-force
h	Hauteur
HV	Dureté de Vickers
Hz	Hertz
IIW	International Institute of Welding
ISO	Organisation internationale
K	Nombre de cycles faibles
kN	Kilonewton
m	Pente d'une courbe
MB	Métal de Base
ME	Test de microscopie (Macroscopique Test)
MIG	Metal Inert Gas
MHz	Mégahertz
MPa	Mégapascal
mm	Millimètre
mm/min	Millimètre par minute
N	Nombre de cycles
R	Rapport de contrainte
RS	Côté recul (Retreating Side)
RT	Test de radiographie (Radiographique Test)
rpm	Rotation tour par minute
SFM	Soudage par Friction Malaxage (Friction Stir Welding)
t	Épaisseur
TIG	Tungsten Inert Gas

UQAC	Université du Québec à Chicoutimi
UTS	Limite ultime (Ultimate Tensile Strength)
UT	Test d'ultrason (Ultrason Test)
UV	Ultra-Violet
VT	Test visuel (Visual Test)
Z	Nombre de cycles élevés
ZAT	Zone Affectée Thermiquement
ZATM	Zone Affectée Thermo mécaniquement
ZM	Zone de Malaxage
σ	Contrainte normale
τ	Contrainte de cisaillement
σ_m	Contrainte moyenne
$\Delta\sigma$	Amplitude de contrainte
σ_a	Contrainte alternée

1. Chapitre 1 : INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1 Généralités

L'aluminium est l'un des matériaux les plus présents de la planète avec un pourcentage de 8% de la masse des matériaux de la surface solide de notre planète. Généralement, ce métal n'existe pas à l'état pur dans la nature [1]. Il est extrait principalement de la bauxite qui est une roche sédimentaire de couleur blanchâtre, jaunâtre ou rougeâtre [2]. La bauxite contient environ 40% à 60% d'alumine (Al_2O_3), de la silice et de l'oxyde de fer [3].

La légèreté et la résistance ainsi que plusieurs autres avantages de l'aluminium font en sorte que c'est un matériau de plus en plus utilisé dans plusieurs domaines dont l'aéronautique, l'aérospatial, l'automobile et dans les années plus récentes, dans l'ingénierie civile. En effet, il est utilisé dans la construction de passerelles et de ponts en raison du rapport résistance/densité et de la grande résistance à la corrosion atmosphérique.

L'assemblage des pièces d'aluminium est réalisé soit par soudage, par boulonnage ou encore par rivetage selon l'usage voulu et des alliages d'aluminium dont on dispose. En effet, il existe des alliages dont la composition chimique leur permet d'être soudés comme les alliages AA6xxx et d'autres non comme les alliages AA2xxx et AA7xxx.

Dans les années antérieures, le rivetage était le procédé le plus utilisé pour assembler des pièces d'avion, de navire, mais aussi de pont. Par exemple, le pont d'Arvida a été construit dans les années 1950 dont la structure est entièrement en aluminium et complètement assemblé par rivetage et par boulonnage comme il est visible à la figure 1.1.



Figure 1.1 Pont d'aluminium d'Arvida au Saguenay

Le procédé d'assemblage par rivetage était privilégié et populaire à l'époque en raison de l'application facile, de la légèreté et des coûts d'application plus faibles. L'inconvénient de cette méthode principale était l'usure des rivets et la difficulté de les remplacer lors de la maintenance des structures.

Dans ces années, l'acier, le bois et le béton étaient les matériaux les plus utilisés dans la construction des ponts en raison des coûts avantageux, de la disponibilité et des connaissances du matériel. Par exemple, il a été constaté que les structures en acier présentent une problématique majeure comme la rouille et donc un coût d'entretien élevé.

Le pont d'Arvida a été réalisé entièrement en aluminium pour en faire la promotion, car dans ces années l'acier était plus utilisé. L'avantage d'utiliser l'aluminium est dû à sa capacité de recyclage, à son faible coût d'entretien ainsi qu'à sa légèreté comparativement à l'acier [8].

Le soudage est le procédé le plus adapté pour l'assemblage des platelages de pont. Il existe plusieurs types de soudage dont le soudage par fusion (TIG et MIG), le soudage par friction malaxage, le soudage laser, le soudage par résistance, etc. [8]. Le soudage par friction malaxage (SFM) est une technique de soudage innovatrice en raison de nombreux avantages

qu'il présente. La technique de soudage par friction malaxage plus connu sous son appellation anglaise « Friction Stir Welding » est un procédé qui a vu le jour autour des années 90 au Royaume-Uni. Elle a été brevetée par « The Welding Institute » en 1991 [4]. C'est un procédé particulièrement intéressant pour la soudure des alliages d'aluminium en raison de la possibilité qu'il offre de pouvoir souder des alliages de hautes résistances, qui étaient difficilement soudables à l'aide des méthodes conventionnelles [4].

L'avantage principal de l'utilisation du procédé SFM est de pouvoir souder les pièces à l'état solide en n'atteignant pas le point de fusion ce qui a pour effet de réduire l'affection de la microstructure et donc des propriétés mécaniques. Cette qualité fait qu'il peut être utilisé dans divers domaines comme l'industrie automobile, ferroviaire, maritime, aéronautique, mais aussi en ingénierie civile. Grâce à ce procédé innovant, on peut assembler des matériaux différents et obtenir des connexions de qualité supérieure, mais aussi réduire les contraintes résiduelles et la distorsion des assemblages soudés. Par comparaison aux procédés de soudage existants, le SFM ne requiert pas de matériel d'apport ou de gaz de protection et nécessite beaucoup moins d'énergie [5].

Le soudage par friction malaxage est réalisé à l'aide d'un outil possédant un épaulement et un pion qui est mis en rotation avant d'être pressé contre les pièces soudées jusqu'à ce que l'épaulement prenne appui sur la surface des pièces (figure 1.2). Quand l'épaulement en rotation est bien en contact avec le matériau, le frottement généré produit un échauffement de la matière le rendant ainsi facilement déformable. Les pièces assemblées par cette méthode ont des températures atteignant 0,8 à 0,9 fois la température du matériau en fusion sans toutefois l'excéder [6].

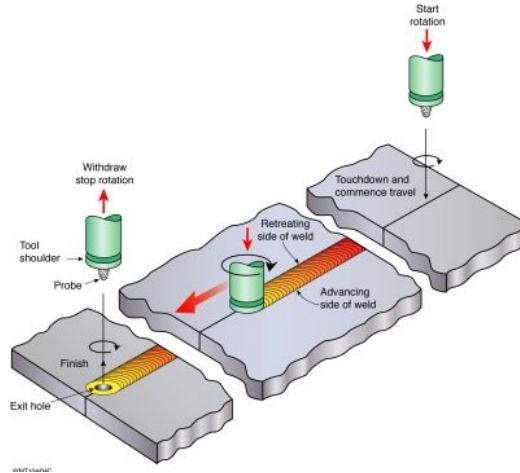


Figure 1.2 Méthode conventionnelle de soudage par friction malaxage [5]

Dans le cadre de cette étude, les soudures sont réalisées à l'aide d'un pion à double épaulement autrement appelé « bobbin tool ou self-reacting tool ». Le pion à double épaulement est un type de pion qui permet de solidariser les pièces entre elles avant de les souder (Figure 1.3). L'usage de cet outil ne requiert pas de plaque de stabilisation sous les pièces pour les maintenir pendant le soudage permettant alors d'éviter des défauts comme le manque de pénétration à la racine. Cela permet également un contrôle, une tolérance à la variation d'épaisseur et une faible distorsion.

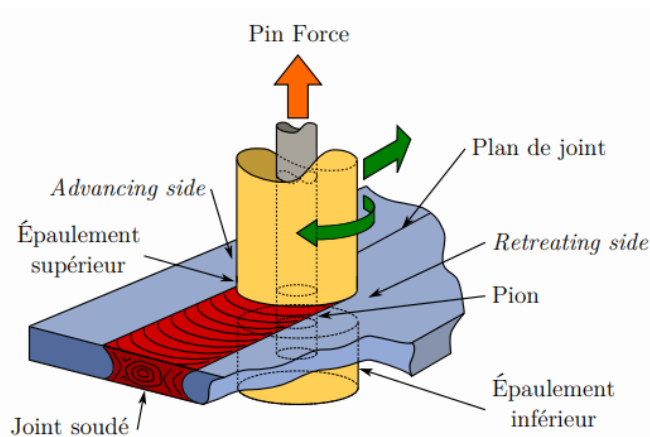


Figure 1.3 Pion à double épaulement [7]

Ils existent quelques ponts dont les tabliers ont été assemblés par le procédé de soudage par friction malaxage au Canada, comme le pont de Saint-Ambroise dont le platelage en aluminium a été entièrement assemblé par SFM et reposant sur des poutres en acier (figures 1.4 et 1.5).



Figure 1.4 Vue d'ensemble du pont de St-Ambroise (photo gracieuseté M. Fafard)



Figure 1.5 Tablier du pont de St-Ambroise (photo gracieuseté M. Fafard)

1.2 Problématique

Le soudage par friction malaxage est certes une méthode de soudage qui présente beaucoup d'avantages, mais qui reste quand même sujet à quelques défis notamment au niveau des défauts qui sont existants et de son impact sur la microstructure, notamment de la zone affectée thermiquement (ZAT). Les défauts dans les soudures constituent des points de concentration de contrainte, sources éventuelles d'amorçage des fissures lors des sollicitations en fatigue d'où le fait que les normes de qualification n'acceptent pas ce type

de défaut interne. La ZAT est une zone dont la dureté est plus faible que celle du métal de base. Elle représente donc une zone de faiblesse métallurgique et mécanique. La figure 1.6 représente les différentes zones d'un joint soudé par friction malaxage avec un pion à double épaulement.

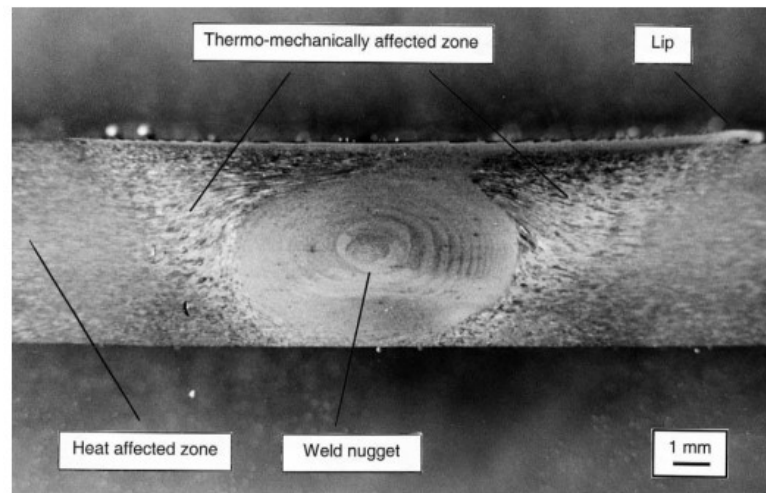


Figure 1.6 Macrostructure d'un joint soudé par friction malaxage [7]

À nos jours, il n'existe pas de norme régissant l'usage du procédé de soudage par friction malaxage en ingénierie civile notamment en matière de fatigue. Les normes existantes sont celles qui réglementent les processus de qualification du soudage par friction malaxage comme la norme AWS D17.3 [19] qui traite du soudage par friction malaxage en aérospatial pour les alliages d'aluminium et la norme ISO 25239 [20] qui traite du soudage par friction malaxage. Les études en fatigue des joints bout à bout soudés par friction malaxage à l'aide d'un pion à double épaulement existent peu. De plus, il n'existe pas de paramètres de soudage préétablis et optimisés qui permettent de garantir des soudures de bonne qualité pour des alliages AA6061-T6 d'épaisseurs 8 mm.

1.3 Objectifs de l'étude

Dans le cadre de cette étude, il sera question de réaliser l'analyse en fatigue de joints soudés bout à bout par friction malaxage à l'aide d'un pion à double épaulement d'une extrusion en alliage AA6061-T6 de 8 mm d'épaisseur. Il sera aussi question de pouvoir démontrer que ces joints donnent des propriétés mécaniques supérieures, notamment en fatigue, que les joints assemblés par méthodes de soudage conventionnel. Cette étude est une réalisation expérimentale qui permettra d'élaborer une courbe de fatigue qui servira de référence pour les futures études.

Les objectifs spécifiques sont les suivants :

- Déterminer des paramètres de soudage optimisés soit la vitesse d'avance et de rotation pour atteindre une productivité élevée lors de la fabrication d'éventuel tablier : choisir plusieurs paramètres de soudage principaux telles les vitesses de rotation et d'avance pour souder plusieurs extrusions. Puis, faire des essais de qualification qui permettront de choisir les meilleurs paramètres de soudage;
- Déterminer la dimension de la zone affectée thermiquement : faire des tests de dureté qui permettront de déterminer la dimension de la ZAT pour la comparer aux valeurs existantes des dimensions de la ZAT des soudures par fusion;
- Construire une courbe de fatigue : faire plusieurs tests de fatigue qui permettront de réaliser une courbe de fatigue qui sera comparée aux courbes de fatigue conventionnelle des soudures par fusion qui sont représentées dans les normes existantes.

1.4 Organisation du mémoire

Le mémoire est organisé en cinq (5) chapitres dans lesquels seront traités plusieurs aspects. Dans un premier temps, il y a le chapitre 1 qui est le chapitre introductif dans lequel est décrit le soudage par friction malaxage de façon générale, la problématique ainsi que les objectifs de l'étude.

Le chapitre 2 qui fait état de la revue littéraire est un chapitre dans lequel sont décrits de façon exhaustive plusieurs aspects tels que le procédé de soudage par SFM, ses origines et ses dérivés, les diverses techniques de validation des soudures, les détails sur l'aluminium, du phénomène de fatigue dans les ponts, des défauts existants dans les soudures. Ce chapitre permet une meilleure compréhension du sujet ainsi que de la méthodologie de travail et des résultats.

Le chapitre 3 présente la méthodologie qui a été employée pour la présente étude. Dans ce chapitre, il est décrit toutes les étapes réalisées qui permettent d'aboutir aux objectifs de l'étude, dont la méthode de soudage, les méthodes d'inspection et de validation des soudures, le type de machine utilisé pour les divers essais, les méthodes de calcul et la méthode de réalisation des tests de fatigue.

Le quatrième chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus à la suite des divers tests décrits dans le précédent chapitre, ainsi que de leur interprétation et leur analyse. Les premiers résultats sont ceux obtenus à la suite de l'optimisation des paramètres de soudures qui sont validés à l'aide des essais de qualification (traction, pliage, ultrasons, métallographie). Les résultats suivants sont ceux des essais de qualification des soudures finales (tractions, ultrasons, métallographie, test de dureté Vickers). Enfin, les derniers résultats sont ceux des essais de fatigue.

Le cinquième chapitre, qui est le dernier, est celui qui clôture le document. Il fait état des diverses conclusions émises à l'issue des résultats obtenus dans le précédent chapitre. De plus, il sera question de rappeler les objectifs de la recherche afin de voir s'ils ont été atteints. Plusieurs critiques et recommandations seront émises dans le but d'améliorer les travaux de recherches futures.

2. Chapitre 2 : REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1 Description et caractéristiques de l'aluminium

L'aluminium possède plusieurs caractéristiques intéressantes [8]. Comparativement à l'acier, l'aluminium possède une densité qui est approximativement trois (3) fois moindre. De plus, ce matériau possède des alliages ayant des résistances comparables à certaines nuances d'acier. Au contact de l'air, la surface de l'aluminium s'oxyde ce qui permet de résister plus facilement aux attaques atmosphériques même dans les milieux marins ou industriels. Cette caractéristique permet d'utiliser l'aluminium dans les domaines de la construction ou pour l'emballage. La conductivité électrique et thermique élevée de l'aluminium permet de l'utiliser pour réaliser les produits électriques et thermodynamiques. L'aluminium a l'avantage d'être facilement malléable. Il est possible de le laminier en feuille très mince, de le couler, de le forger, mais aussi de réaliser des profilés par extrusions. Il est possible d'élaborer plusieurs types d'alliages en raison du point de fusion modéré de l'aluminium ce qui implique qu'il est possible de trouver un alliage répondant à des critères de conception bien précis. La réflectivité de l'aluminium rend le matériau esthétique et décoratif. L'élasticité de l'aluminium est un atout majeur, car cela fait de lui un matériau ayant une grande résilience lui permettant d'être utilisé pour des structures soumises au choc comme des glissières ou des pare-chocs. L'aluminium est un matériau écologique, car il est facilement et totalement recyclable.

2.2 Types d'alliages d'aluminium

Il existe plusieurs types d'alliage d'aluminium [8]. La série 1000 est composée à 99% d'aluminium. Cet alliage possède une bonne résistance à la corrosion, une bonne conductivité électrique et une bonne conductibilité thermique. Le bémol de cet alliage est sa faible résistance mécanique le rendant très malléable. Le fer et le silicium sont les principales impuretés de cet alliage. Les alliages 1100, 1350 et 1050 de cette série sont les plus utilisés. L'élément principal de la série 2000 est le cuivre. Cet élément permet une augmentation considérable de la résistance en traction à l'aide de traitement thermique. Certains alliages de la série 2000 sont plus résistants que certains aciers doux. Malgré ces avantages, la présence du cuivre a un impact négatif sur la résistance à la corrosion de telle sorte que pour pallier ce problème l'aluminium est protégé par anodisation. Ce type d'alliage est difficilement soudable. Il est donc assemblé par rivetage ou par boulonnage. On retrouve ce type d'alliage dans plusieurs domaines, dont l'aviation, le transport militaire et civil. Les alliages 2017, 2021, 2618 sont les plus courants.

La série 3000 est principalement constituée de manganèse qui a pour particularité d'augmenter la résistance mécanique sans affecter la ductilité ni la résistance à la corrosion. Ce type d'alliage n'est pas traitable thermiquement, mais possède une facilité de soudage. Cet alliage est utilisé pour la fabrication des tôles de toiture, des réservoirs d'entreposage ou des articles ménagers. Les alliages 3003 et 3004 sont les plus utilisés.

Le principal élément de la série 4000 est le silicium qui permet d'augmenter de façon modérée la résistance mécanique en plus d'avoir la capacité d'abaisser le point de fusion réduisant ainsi les risques de fissuration à chaud pendant le soudage. Les plus répandues sont les alliages 4043, 4195, 4032, 4047. La série 4000 est utilisée par exemple pour la

construction des moteurs de bateau, des pistons et des moteurs d'automobiles. Ce type d'alliage n'est pas traitable thermiquement.

L'élément principal de la série 5000 est le magnésium. Cet élément permet d'accroître les propriétés mécaniques de façon significative par travail à froid. Cette série est intraitable thermiquement, mais possède une haute résistance à la traction et à la corrosion ce qui la rend favorable à l'usage dans les environnements marins. De plus, elle est utilisée pour des applications structurales (bâtiments et ponts), car elle offre un potentiel de soudabilité significative. Parmi les alliages les plus utilisés figurent 5082, 5056, 5454, 5754, 5154, 5086, 5083.

La série 6000 est majoritairement constituée de magnésium et de silicium. Leur combinaison permet d'augmenter les propriétés mécaniques de l'aluminium. Il se prête mieux à la production par extrusion et possède une bonne résistance à la corrosion. Les alliages les plus disponibles sont 6061, 6005, 6070, 6351, 6105, 6463. Cette série est très souvent retrouvée dans le domaine de la construction, dans l'industrie navale et dans des applications architecturales.

L'élément principal de la série 7000 est le zinc. Cet élément procure à cet alliage les propriétés mécaniques les plus élevées parmi tous ceux existants. Il est pourtant difficile à fabriquer et à produire. Ils sont utilisés dans la fabrication des pièces d'avion, des pare-chocs automobiles, ou même de pièces de fusée. Les alliages les plus rencontrés sont les alliages 7020 et 7075. Ce ne sont pas des alliages soudables et leur résistance à la corrosion est moindre que celle des séries 5000 et 6000.

2.3 Propriétés de l'aluminium

Les propriétés physiques de l'aluminium sont présentées dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1 Propriétés physiques de l'aluminium [52]

Coefficient de dilatation thermique (α)	24 x10 ⁶ /°C
Module élastique (E)	70000 MPa
Coefficient de poisson (μ)	0,33
Module de cisaillement (G)	26000 MPa
Masse volumique (ρ)	2700 kg/m ³

Dans le cadre de cette étude, l'alliage utilisé est le 6061-T6 qui est le plus commun dans l'ingénierie civile. La composition chimique est présentée dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2 Propriétés chimiques de l'alliage 6061-T6 [48]

Aluminium (Al)	95,8-98,6
Chrome (Cr)	0,04-0,35
Cuivre (Cu)	0,15-0,40
Fer (Fe)	≤ 0,70
Magnésium (Mg)	0,80-1,20
Manganèse (Mn)	≤ 0,15
Silicium (Si)	0,40-0,80
Titane (Ti)	≤ 0,15
Zinc (Zn)	≤ 0,25
Autres	≤ 0,2

Les propriétés mécaniques de l'alliage 6061-T6 sont résumées dans le tableau 2.3.

Tableau 2.3 Propriétés mécaniques de l'alliage 6061-T6 [52]

Alliage	Type	Épaisseurs	F _{umin}	F _{ymin}	F _{wumin}	F _{wymin}
6061-T6	Extrusion	Tous	260	240	165	105

2.4 Ingénierie civile à travers le monde

L'usage de l'aluminium dans les ponts à travers le monde remonte au début des années 30. La première pièce en aluminium d'un pont fut un tablier construit en 1933 à Pittsburgh

lors du remplacement d'un tablier d'un pont acier-bois. L'alliage utilisé à cette époque était le 2014-T6 jusqu'en 1967 puis, remplacé par l'alliage 6061-T6 qui offre une meilleure résistance à la corrosion [9]. En 1946, la première travée de 30,5 mètres de long d'un pont fut construite toute en aluminium dans l'état de New York. Ce pont était un pont ferroviaire composé de plusieurs travées en acier conventionnel et d'une travée en aluminium [9]. De là, plusieurs autres ponts en aluminium ont vu le jour dans plusieurs parties du monde, dont le pont Sunderland en Angleterre (1949), le pont Aberdeen en Écosse (1953) et le pont d'Arvida au Québec (1950) qui à ce jour est le pont d'aluminium le plus long au monde (154 m). Le premier pont en aluminium réalisé en Europe continentale fut le pont Schwansbell en Allemagne (1956). Ce pont était un pont de type treillis en une seule travée de 44,2 mètres qui était préfabriqué en usine et installé en chantier [9].

Aux États-Unis, entre les années 1958 et 1963, sept ponts routiers ont été réalisés dont celui de la route 86 en Idaho qui a été le premier pont soudé en aluminium [9]. Dans les années plus récentes, en 1996, le pont routier Forsmo en Norvège fut construit entièrement en aluminium dont la portée est de 39 mètres avec une travée composée de deux poutres caissons. Les alliages utilisés sont ceux des séries 5000 et 6000 en raison de leur bonne résistance mécanique [9].

En 1999 et en 2003, au pays bas, le pont Helmond et le pont Riekerhavenburg qui sont des ponts à bascule ont été érigés [9]. L'aluminium est utilisé pour ce type de pont en raison de sa légèreté. En plus des ponts à bascule, qui sont réalisés en aluminium, des ponts flottants, des ponts amovibles ont été construits [9]. La manière d'intégrer l'aluminium dans la construction des ponts routiers de nos jours est en remplaçant les tabliers lors des réfections par des tabliers en aluminium [9]. Par exemple, dans la ville de Sandisfield au Massachusetts, des tabliers en aluminium ont été utilisés dans le cadre du remplacement du tablier d'un pont

en 2012. Cette structure a une portée totale de 17,7 mètres et une largeur de 4,2 mètres. Elle est composée d'un tablier en aluminium extrudé et assemblé par soudage par friction-malaxage. Le tablier repose sur quatre poutres d'acier galvanisé [9]. Le tableau 2.4 est un résumé de quelques caractéristiques de ponts construits à travers le monde, leur portée, l'année de réalisation et le type d'alliage utilisé.

Tableau 2.4 Liste de quelques ponts aux structures en aluminium [9]

Emplacement	Type de pont	Application	Nbre de voies	Portée(s) (m)	Année	Alliage
Pont, Rue Smithfield Pittsburgh, PA, É-U	Pont-trellis avec tablier orthotrope en aluminium	Routière/Tramway	2+2 Voies	2@111	1933, 1967	2014-T6 (1933) 6061-T6 (1967)
Pont de la rivière Grasse Massena, NY, É-U	Poutre rivetée	Ferroviaire	1 Voie	30.5	1946	2014-T6
Pont Sunderland Angleterre	Pont levis riveté à double-vantaux	Routière/Ferroviaire	1+1 Voie	37	1949	2014-T6 6151-T6
Pont Arvida Saguenay, QC, Canada	Pont arqué riveté	Routière	2	5@6.1, 88.4, 5@6.1	1950	2014-T6
Pont Aberdeen Écosse	Pont levis riveté à double-vantaux	Routière/Ferroviaire	1+1 Voie	30.5	1953	2014-T6 6151-T6
Pont Schwansbell Allemagne	Poutre rivetée à treillis de type Warren	Routière	1	44	1956	6351-T6
Route 86 au dessus de I-80 Des Moines, IA, É-U	Tablier de béton sur des poutres en plaque d'aluminium soudée	Routière	2	12, 21, 21, 12	1958	5083-H113
Pont Banbury Angleterre	Pont levis rivetée	Routière	1	3	1959	6351-T6
I-495 au dessus de l'échangeur Jerico Jerico, NY, USA	Tablier de béton sur des poutres en plaque d'aluminium soudée	Routière	4 (2 Ponts)	23	1960	6061-T6
Route 36 (Rivière Appomattox) Petersburg, VA, É-U	Tablier de béton sur poutres-caissons en aluminium boulonnées	Routière	2	30	1961	6061-T6
Pont Gloucester Angleterre	Pont levis rivetée	Routière	1	12	1962	6351-T6
Route 110 au dessus de l'aut. Sunrise Amityville, NY, É-U	Tablier de béton sur poutres-caissons en aluminium rivetées	Routière	6 (2 Ponts)	9, 23, 23, 9	1963	6061-T6
Route 32 (Rivière Patapsco) Sykesville, MD, É-U	Tablier de béton sur poutres-caissons en aluminium rivetées	Routière	2	28, 29, 32	1963	6061-T6
Pont de la rivière Saone Montmerle, France	Pont-trellis en aluminium	Routière	N/A	79.9, 79.9	1973	A-SGMT 6
Pont de la rivière Rodan Groslee, France	Tablier de béton sur des poutres triangulées en aluminium	Routière	N/A	174	1977	6082-R31
Pont Chamalières Chamalières, France	Poutre en aluminium	Routière	4	N/A	1978	N/A

En plus des ponts routiers, l'aluminium est aussi utilisé dans la fabrication de passerelle qui peut supporter des poids de piétons et de véhicules légers. Au Québec, il existe plusieurs passerelles en aluminium comme la passerelle de la Rivière aux Sables qui mesure 80 m de longueur et 6 m de largeur (figure 2.1). Cette passerelle construite en 1998 est dédiée aux piétons et aux cyclistes et se situe dans la ville de Saguenay (Arrondissement de Jonquière) [73].



Figure 2.1 Passerelle de la rivière aux sables. [73]

Plus récemment en 2016, la passerelle en aluminium de la Rivière Petite Décharge a été construite à Alma (Figure 2.2). Elle a une portée de 120 m et a été assemblée par soudage par friction malaxage [73].



Figure 2.2 Passerelle de la rivière Petite Décharge [73]

Le tableau 2.5 présente les alliages couramment utilisés pour la construction des ponts et des passerelles.

Tableau 2.5 Types d'alliages et leurs caractéristiques [9]

Trempe d'alliage	Produit	Gamme d'épaisseur		Résistance minimum (MPa)			
		(mm)		Tel que reçu		Dans les régions soudées	
		Min.	Max.	F_u	F_y	F_{wu}	F_{wy}
5052-H32	Feuille, plaque	0.4	50	215	160	170	65
5083-H116	Feuille, plaque	1.6	40	305	215	270	115
5086-H116	Feuille, plaque	1.6	50	275	195	240	95
5086-H321	Feuille, plaque	1.6	8	275	195	240	95
6005A-T61	Extrusion	—	25	260	240	165	90
6063-T5	Extrusion	—	12.5	150	110	115	55
6063-T6	Extrusion	—	25	205	170	115	55
6061-T6, -T6510, -T6511	Extrusion	All	—	260	240	165	80*/105**
6061-T6	Feuille	0.15	6.3	290	240	165	105
6061-T651	Feuille, plaque	6.3	100	290	240	165	80*/105**
6082-T6, -T6511	Extrusion	5	150	310	260	190	110

*Lorsque soudé avec un apport 4043 sur des épaisseurs d'au moins 9.5mm

**Lorsque soudé avec un apport 5356 ou avec un apport 4043 sur des épaisseurs d'au plus 9.5mm

Concernant le dimensionnement des ponts et passerelles en aluminium, plusieurs aspects doivent être pris en compte tels que la résistance, la rigidité, les propriétés thermiques, la corrosion, la fatigue, les coûts et l'impact environnemental. En effet, pour les méthodes d'assemblage, il faut tenir compte de l'impact des soudures conventionnelles par fusion, car elle entraîne une perte locale significative de la résistance. Cette perte peut être minimisée en privilégiant par exemple les soudures longitudinales aux soudures transversales [9]. De plus, en tenant compte du rapport de résistance-rigidité des alliages d'aluminium qui est plus élevé que celui de l'acier, les limites de flèche et de vibration sont des critères limitant lors du dimensionnement des éléments structuraux des tabliers de pont.

Le coefficient de dilatation thermique de l'aluminium qui vaut environ deux (2) fois celui du béton ou de l'acier est un aspect à prendre en compte lors du dimensionnement, car il a un impact sur les variations des longueurs dues au changement de température. Il est alors nécessaire de dimensionner correctement les joints de dilatation ou de trouver d'autres moyens comme en utilisant des ponts intégraux [9]. Une attention particulière doit être portée

pour les structures mixtes en aluminium-béton, car les variations liées à la température ne sont pas les mêmes pour les deux matériaux. Quant à la résistance à la corrosion, c'est une propriété intéressante des alliages 5000 et 6000 surtout pour des applications de pont routier au Canada en raison de l'application de grande quantité de sel de déglacage durant l'hiver.

Pour ce qui ait des impacts des effets de fatigue dans les ponts en aluminium, dans les débuts, les recommandations pour le dimensionnement étaient établies en prenant en compte les mêmes différences de contrainte que ceux de l'acier que l'on divisait par trois. Par la suite, ces hypothèses ont été raffinées au fil du temps et des courbes S-N avec des pentes différentes existent pour les différentes catégories de détail. En se basant sur les récentes recherches dans le domaine, il a été remarqué que le phénomène de fatigue est plus critique dans les structures en aluminium soudées que dans celle en acier doux.

Pour réduire certains problèmes en fatigue, il est possible d'utiliser des extrusions qui font toute la longueur du tablier permettant ainsi de supprimer les soudures des tôles laminées. L'usage des extrusions permet d'augmenter l'épaisseur à certains points critiques pour réduire les concentrations de contraintes et augmenter le rendement en fatigue [9].

2.5 Quelques méthodes de soudage d'aluminium existantes

Il existe plusieurs techniques de soudage de l'aluminium dont le soudage MIG, le soudage TIG, le soudage par friction malaxage, le soudage laser et le soudage par résistance. Les autres procédés de soudage sont dérivés des procédés traditionnels dont le soudage linéaire, le soudage par faisceau d'électrons, le soudage par explosion, le soudage par ultrason, le soudage par impulsion magnétique, le soudage plasma ou soudage par arc. Quelques méthodes énumérées plus haut seront décrites dans les sections suivantes.

2.5.1 Soudage avec électrode réfractaire (GTAW ou TIG)

Le soudage TIG (Tungsten Inert Gas) est un procédé qui consiste à utiliser une électrode de tungstène non fusible sous protection d'un gaz inerte permettant de souder sans ou avec métal d'apport. Pour cette technique, du courant continu ou alternatif est utilisé. Cette technique consiste à produire un arc électrique entre une électrode réfractaire en tungstène et l'élément à souder sous couvert d'un gaz inerte qui est habituellement de l'argon, de l'hélium ou un mélange des deux gaz. Pour le soudage des pièces d'acier inoxydable, le courant continu est utilisé tandis que pour les pièces en alliage d'aluminium, le courant alternatif est utilisé. [8]

Cette technique permet d'assembler des pièces mesurant entre 1 et 6 mm. C'est un procédé qui peut être automatisé, mais difficilement réalisé par robotisation. En utilisant l'hélium comme gaz protecteur, cela permet de souder des pièces pouvant varier de 10 à 12 mm. Cette méthode n'est possible qu'en procédé automatisé à cause de la difficulté de maintenir l'arc de soudage à une hauteur de plus ou moins 0,5 mm. La version manuelle du procédé ne permet que le soudage de pièces de petites dimensions et de faible épaisseur [8].

2.5.2 Soudage avec électrode consommable (GMAW ou MIG)

Le soudage MIG (Metal Inert Gas) est un procédé qui consiste à utiliser une électrode fusible sous protection de gaz inerte pour fusionner les matériaux tout en évitant les contaminations. Cette technique ne nécessite pas un métal d'apport et requiert l'utilisation d'un courant continu négatif. Pour ce procédé, le fil d'aluminium est utilisé à la fois comme électrode et matériel d'apport. Le courant continu est utilisé comme source d'énergie pour le soudage. Cette technique sert à souder des pièces dont l'épaisseur est supérieure à 2,5 mm. De plus, dans sa version manuelle ou semi-automatique elle est la plus utilisée, car elle

permet d'obtenir des soudures de meilleure qualité avec un rapport coût-qualité performant. C'est une méthode qui est utilisée pour les soudures complexes ou lorsque les dimensions et les épaisseurs ne justifient pas l'usage d'un procédé automatisé [8].

2.5.3 Soudage plasma (PAW)

Le soudage par plasma est un procédé de soudage semblable à celui du soudage TIG, mais dans ce cas la dimension de l'arc est réduite par un bec refroidi à l'eau. Cette réduction a pour effet d'accroître la densité de l'énergie, la stabilité directionnelle et le foyer de l'arc plasma. Ce procédé utilise un apport d'énergie en courant continu et les surfaces de soudage doivent être nettoyées au préalable. Il est avantageux pour des soudures à pénétration profonde et plus grande comparativement au soudage TIG. De plus, elle est plus rapide que le soudage TIG. Plusieurs caractéristiques entrent en jeu afin de choisir le procédé de soudage adéquat comme l'épaisseur des pièces à souder, l'apparence finale, la quantité de soudage, les distorsions que cela induit et la mécanisation de la technique [8].

2.5.4 Soudage par friction

Le soudage par friction est un type de soudage par pression à chaud dans lequel les pièces sont assemblées par frottement ce qui induit une hausse de température. Cette méthode permet de souder des pièces de divers matériaux comme le cuivre et aluminium. Il permet de souder des alliages qui habituellement sont difficilement soudables comme les séries 2000 et 7000. La variante de cette méthode est le soudage par friction malaxage ou soudage par agitation. Ce type de soudure sera abordé de façon plus exhaustive dans les sections subséquentes [8].

2.5.5 Soudage par faisceau laser

Cette technique à l'inverse du soudage par faisceau d'électrons peut être réalisée à l'air libre et sans gaz protecteur. Les lasers CO₂ offrent de meilleures performances. Les vitesses de soudage varient entre 5 m/min à 3m/min pour des épaisseurs respectivement inférieures à 3mm et 6 mm. La plupart des alliages d'aluminium sont soudables par cette méthode en raison des bonnes compatibilités qu'elle offre.

2.5 Méthode de soudage par friction malaxage

Le soudage par friction malaxage est un type de soudage à froid qui permet d'assembler des matériaux à des températures en deçà des températures de fusion. Cette technique permet d'éviter des défauts associés au soudage par fusion. La figure 2.3 illustre le procédé du soudage par friction malaxage à l'aide du pion conventionnel.

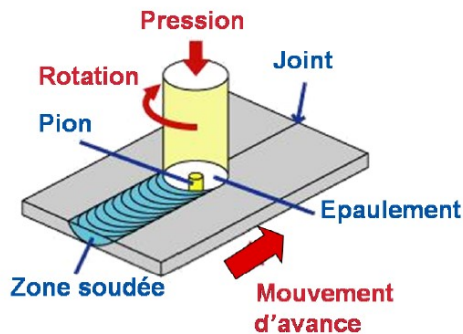


Figure 2.3 Principe du soudage par friction malaxage conventionnelle [15]

Le soudage par friction malaxage conventionnel est réalisé de façon séquentielle dûment défini dont :

- **La phase de plongée** : C'est la phase initiale du soudage durant laquelle l'outil pénètre dans les pièces et atteint sa profondeur optimale [6]. L'outil dans un mouvement de rotation pénètre le début de la soudure. Puis dans un mouvement

de translation verticale, l'épaulement et la partie supérieure de la soudure sont mis en contact [15].

- **La phase d'attente et de stabilisation ou phase de chauffe** : C'est lorsque l'épaulement entre en contact avec les surfaces des pièces et est pressé contre le matériau avec une certaine force ce qui permet de ramollir le matériel et le souder [6, 15].
- **La phase d'avance** : C'est la phase durant laquelle l'outil est graduellement accéléré dans la direction longitudinale afin d'atteindre la vitesse d'avance recommandée et pouvoir effectuer le mouvement de translation. En effet, en plus du mouvement de rotation du pion, l'outil avance pour réaliser la soudure [15].
- **La phase de retrait de l'outil** : Une fois que la soudure est complétée, le déplacement de l'outil est arrêté tout en le maintenant en rotation. L'outil peut donc être retiré des pièces par un mouvement normal à la surface de soudage [6].

La figure 2.4 illustre les diverses phases énumérées ci-dessus.

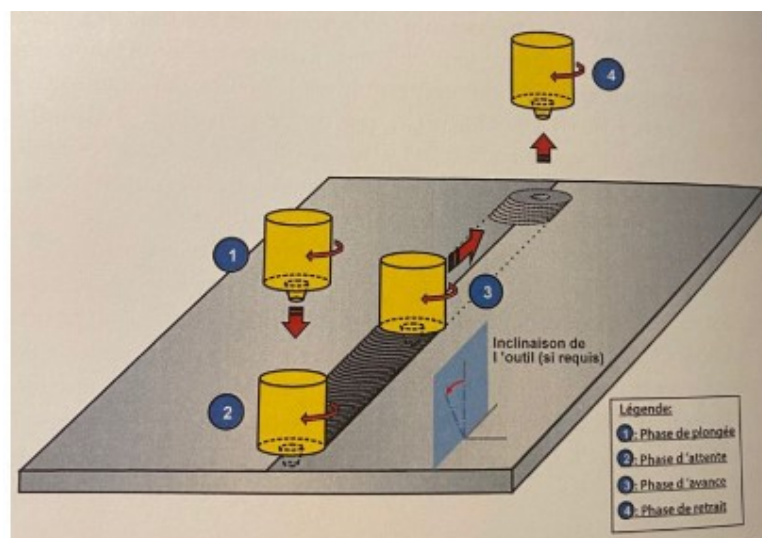


Figure 2.4 Phases de soudage [6]

2.5.1 Matériels utilisés

Afin de réaliser le procédé du soudage par friction malaxage conventionnel, plusieurs éléments sont utilisés pour composer une cellule de soudage qui sont [6] :

- **L'outil de soudage :**

L'outil de soudage est utilisé en fonction du matériau à souder, de la géométrie, mais aussi de la profondeur de la pénétration de la soudure

- **L'équipement principal de soudage :**

L'équipement de soudage est utilisé pour produire et contrôler le mouvement de l'outil de soudage. Le rôle de l'équipement est de mettre en rotation l'outil, mais aussi de pouvoir assurer le déplacement de ce dernier dans les pièces à souder. De plus, il doit être en mesure d'appliquer des forces, couples et puissances mécaniques en maintenant la trajectoire prescrite à l'intérieur des limites autorisées. Il doit aussi permettre de produire un déplacement avec un certain nombre de degré de liberté afin de réaliser des soudures droites ou courbes sur des longueurs variables. Les équipements de soudage sont choisis en fonction de la robustesse, de la flexibilité du mouvement, de la taille et de la forme de la soudure ainsi que des modes de contrôle souhaités.

- **Le système de fixation ou de bridage des pièces à assembler :**

Il est nécessaire que le système de fixation (indiqué en bleu à la figure 2.5) soit suffisamment rigide pour maintenir en place les pièces à assembler lors du soudage, assurer leur positionnement, permettre le passage de l'outil et de la tête de soudage qui maintient l'outil. Ce système permet aussi de soutenir tous les efforts appliqués à l'équipement de soudage sur les pièces. Idéalement, ce système doit pouvoir s'adapter aux diverses conditions

de soudage, de permettre une certaine versatilité des assemblages et faciliter le mode opératoire.

- **La surface de support sous les pièces :**

La surface de support a pour rôle de soutenir la force axiale de forgeage, permettre d'éviter la déformation de façon excessive ou importante, de favoriser une condition adéquate de transfert de chaleur afin d'avoir une surface lisse pour ne pas détériorer le fini de surface sous les pièces soudées. Dans le cas du soudage par friction malaxage avec le pion à double épaulement le support sous les plaques n'est pas nécessaire (indiqué en vert sur la figure 2.5).

La figure 2.5 illustre les composantes utilisées dans la cellule de soudage.

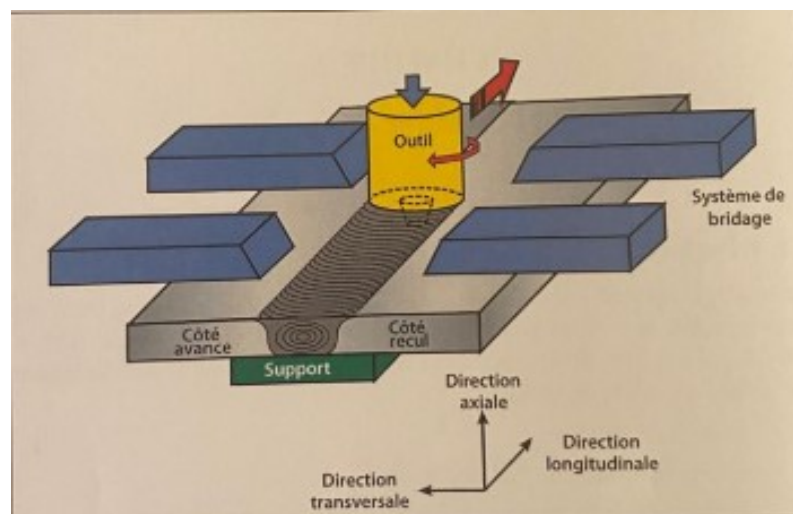


Figure 2.5 Composante principale de la cellule de soudage [6]

2.5.2 Configuration des joints soudés

Il existe deux types de configuration de joints : les joints bout à bout et les joints par recouvrement ou par transparence.

2.5.2.1 Joints soudés bout à bout

Les soudures bout à bout sont les types de soudures les plus fréquemment réalisés. Dans ce cas de figure, les pièces sont placées l'une à côté de l'autre. Il existe plusieurs types de configurations de soudage bout à bout comme illustrées aux figures 2.6 et 2.7 :

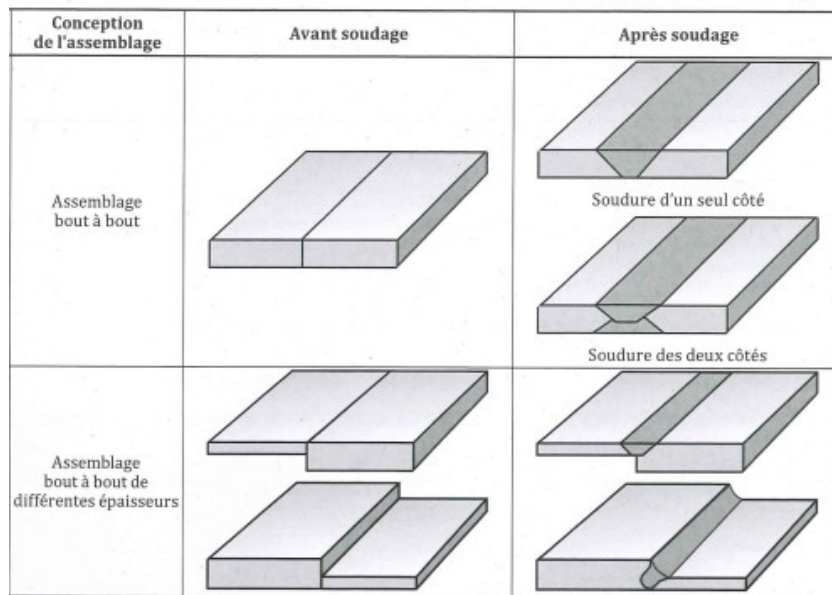


Figure 2.6 Types de joints soudés bout à bout [20]

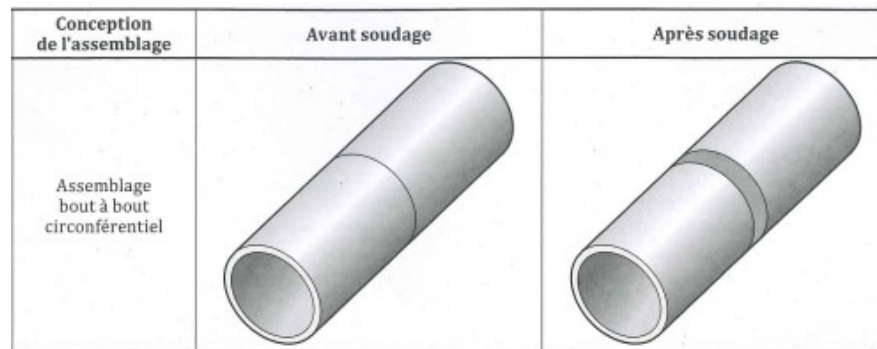


Figure 2.7 Types de joint soudé bout à bout (suite) [20]

2.5.2.2 Joints soudés par recouvrement ou par transparence

C'est un type de soudure dans lequel les pièces sont superposées et assemblées. Il existe plusieurs types de configuration de soudure en recouvrement qui sont illustrés sur les images de la figure 2.8.

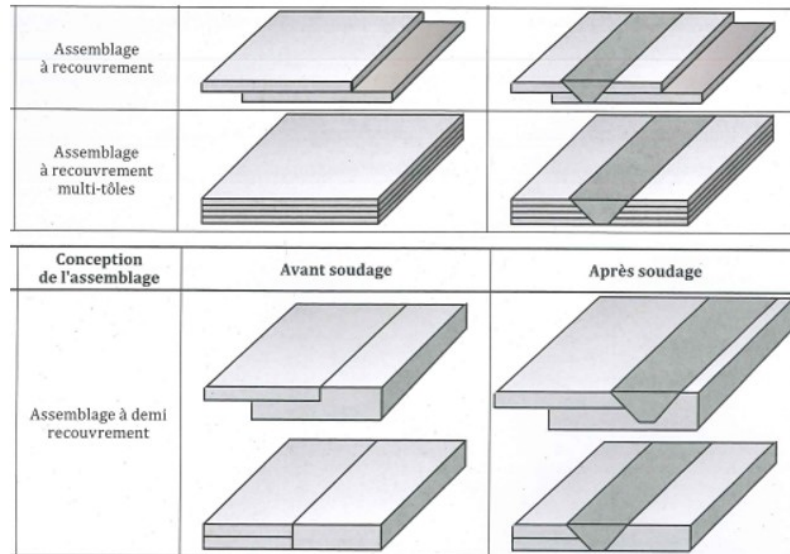


Figure 2.8 Type de soudure par recouvrement [20]

2.5.3 Géométrie des assemblages et outils utilisés pour le soudage

Pour le soudage par friction malaxage, les outils sont utilisés en fonction de la géométrie des assemblages, des matériaux à souder et du matériel de soudage disponible. Les outils principaux sont l'épaulement et le pion pour la méthode de soudage conventionnel. Ces éléments sont représentés à la figure 2.9.

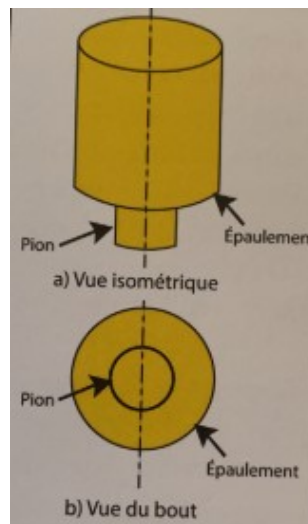


Figure 2.9 Géométrie de l'outil à simple épaulement [6]

Il existe plusieurs paramètres qui influencent la qualité de soudage dont les vitesses d'avance et de rotation qui sont exprimés respectivement en mm/min et en rpm/min, l'épaisseur des pièces, la nature du matériel, la géométrie de l'outil, la configuration des pièces, la vitesse et la profondeur de plongée, l'angle d'inclinaison et la force axiale [6]. La vitesse de rotation exerce une influence sur la qualité de la soudure. Elle a un impact sur des aspects comme la génération de la chaleur, la taille des grains, la formation des défauts ou l'usure des outils. Il existe plusieurs types de pions qui sont illustrés à la figure 2.10 :

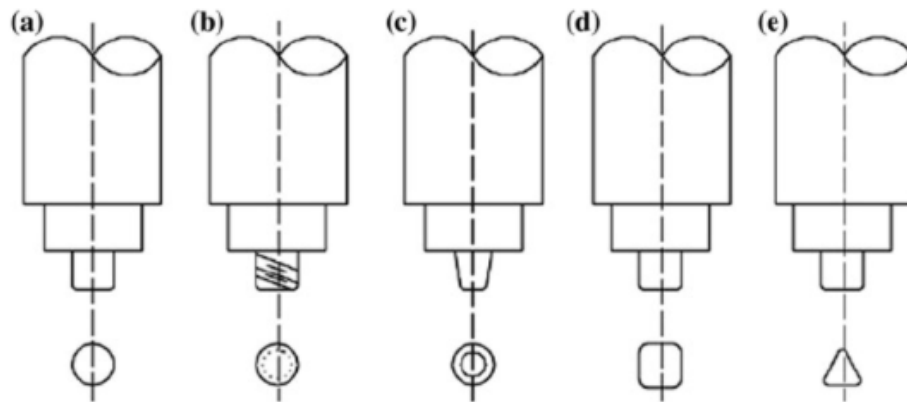


Figure 2.10 (a) pion rond (b) pion fileté (c) pion cylindrique (d) pion carré (e) pion triangle [16]

Les études de S. Emamian et al. sur l'influence de la géométrie du pion dans le soudage par SFM ont permis de mettre en évidence que la géométrie du pion a un impact sur la qualité de la soudure. Elle a un impact sur la génération de chaleur. Il a été conclu que parmi toutes les formes de géométrie considérées certaines donnent des soudures appropriées comme les pions carrés, les pions cylindriques filetés ou coniques filetés [16]. Le soudage conventionnel prend en compte plusieurs paramètres dont la vitesse de rotation, la vitesse de soudage et la force de plongée.

Selon l'étude de M. A. Wahab et al. [25], il existe trois types de soudage dépendamment de la force de plongée, de la vitesse de rotation et de la vitesse de soudage : le soudage à

chaud, le soudage à froid et le soudage nominal. En effet, de cette référence, le soudage à chaud est défini par une force de plongée élevée, une vitesse de rotation du pion élevée et une vitesse de soudage faible. Le soudage à froid quant à lui est défini par une force de plongée faible, une vitesse de rotation du pion faible et une vitesse de soudage élevée. Le soudage nominal est considéré comme la soudure optimale, car les valeurs de la force de plongée, de la vitesse de rotation du pion et la vitesse de soudage permettent d'avoir une soudure sans défauts.

Lorsque l'on soude à chaud, trop de chaleur est apportée dans le joint ce qui implique une perte considérable des propriétés mécaniques. Cependant, lorsque l'on soude à froid, il n'y a pas assez de chaleur dans le joint, cela génère des défauts internes comme les cavités, défauts qui ne sont pas acceptables par les normes.

Il existe également d'autres types d'outils, dont un outil à pion rétractable et un outil à pion à double épaulement.

Le pion rétractable (figure 2.11) permet d'éviter l'apparition d'un trou de serrure en fin de soudure, car il se rétracte progressivement. Cet outil est utilisé plus souvent pour les soudures circonférentielles ou longitudinales de tube. Il permet aussi d'avoir un meilleur contrôle sur la soudure en faisant varier la profondeur de pénétration du pion le long de la soudure.



Figure 2.11 Pion rétractable

La méthode de soudage par friction malaxage régulière présente de nombreux avantages, mais également quelques inconvénients dont la création de liaison faible (kissing bond) ou des défauts à la racine comme le manque de pénétration du pion. Afin de réduire l'apparition de ce défaut, on utilise un outil de soudage à double épaulement (figure 2.12) qui permet de faire la soudure sur les deux faces simultanément. Cette technique présente plusieurs avantages dont la réduction de l'apparition des défauts à la racine de la soudure, une tolérance à la variation d'épaisseur et une faible distorsion. De plus, l'usage de cet outil ne nécessite pas de mettre un appui en dessous des deux pièces pour les solidariser.

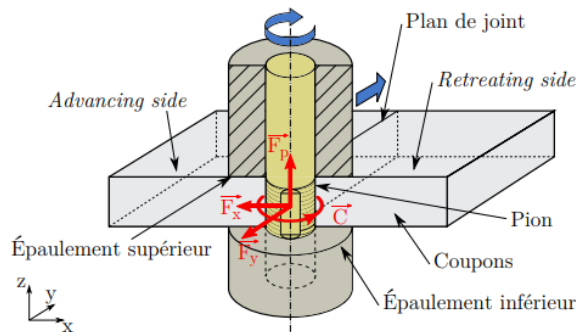


Figure 2.12 Pion à double épaulement (bobbin tool) [17]

Il existe plusieurs types d'assemblage qui peuvent être joints par friction malaxage. La géométrie des pièces est similaire à celle utilisée pour des soudages par fusion pour les assemblages en recouvrement ou en bout à bout. Les autres configurations quant à elles nécessitent une modification géométrique pour permettre une adaptation de l'équipement. Les différentes configurations sont représentées à la figure 2.13.

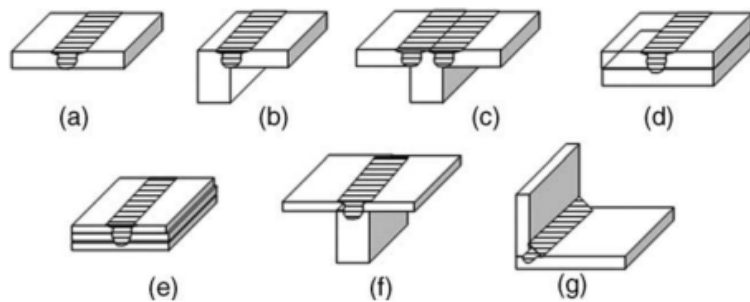


Figure 2.13 Configurations géométriques des soudures [17]

2.5.4 Avantages et inconvénients du procédé

La méthode de soudage par friction malaxage est une méthode de soudage qui présente plusieurs avantages qui se distinguent selon deux types : les avantages liés à l'absence de phase liquide et à la faible température ainsi que les avantages opérationnels [4].

Pour les avantages liés à l'absence de phase liquide et à la faible température :

- L'absence de porosité et des soufflures;
- L'absence de fissuration de solidification;
- L'absence de fumée ;
- L'absence de rayonnement UV ;
- Aucun gaz de protection requis surtout pour les matériaux ayant une température de fusion peu élevée;
- Un procédé silencieux ;

- Une réduction des distorsions et des retraits ;
- Excellentes propriétés mécaniques des assemblages produits en tension, en flexion ou en fatigue.

Pour les avantages liés à l’outillage et à l’opération :

- L’absence d’arc électrique donc une réduction d’équipement de protection;
- Possibilité de souder dans plusieurs positions;
- Une haute efficacité énergétique;
- Consommation faible de l’outil et bonne durée de vie;
- Pas de métal d’apport ni de flux requis;
- Procédé tolérant au jeu entre les pièces et à une faible présence d’oxyde sur les faces à joindre;
- Moins de préparation avant soudage;
- Possibilité de souder des pièces en aluminium ayant une épaisseur supérieure à 50 mm en une seule opération;
- Possibilité de souder des matériaux différents et des matériaux similaires;
- Équipement automatisé;
- Permet de remplacer l’assemblage par rivetage et boulonnage.

Cette technique présente également quelques limitations qui sont les suivantes :

- Les géométries doivent être simples avec des surfaces relativement planes dans la zone soudée;
- Usage d’un système rigide de maintien des pièces;
- Nécessité d’un support sous les pièces à souder sauf dans le cas d’un outil à double épaulement;

- Présence d'un trou à la fin du processus sauf en cas d'usage de pion rétractable;
- Encombrement de la tête de soudage pouvant limiter l'accès à certains endroits.

2.5.5 Domaine d'application de la technique

2.5.5.1 Application dans le transport naval

Dans le domaine naval et marin, le SFM a été utilisé pour la première fois sur des bateaux de pêche pour réaliser l'assemblage des panneaux creux en aluminium qui devaient servir à surgeler du poisson. Cette technique est avantageuse dans ce domaine à cause de sa grande reproductibilité, des faibles distorsions induites. Ces avantages ont permis d'avoir un impact économique significatif. Des ponts et des parois latérales de navire en aluminium ont été assemblés par cette méthode de soudage.

Le plus grand navire assemblé par cette méthode est le Super liner Ogasawara qui a une capacité de 740 personnes et 210 tonnes de marchandises. Plusieurs entreprises dans la construction navale utilisent ce procédé de soudage pour créer de grands panneaux d'aluminium pouvant atteindre jusqu'à des dizaines de mètres. La limitation dans l'usage de ce procédé dans ce domaine est le coût élevé de l'équipement de soudage [6].

2.5.5.2 Applications aéronautiques et aérospatiales

Dans le domaine aéronautique, le soudage par friction malaxage est une alternative pour le rivetage des alliages d'aluminium de haute résistance qui ne sont pas soudables par des méthodes conventionnelles. Pour les fuselages des avions, les alliages utilisés sont joints par rivetage ou boulonnage. L'usage des rivets crée une problématique. En effet, il réduit l'intégrité des pièces, car les trous qui sont créés deviennent des lieux favorables à la dégradation et à la corrosion. Cette méthode permet donc d'éliminer à peu près de 60% des

rivets ainsi que la problématique qu'elle induit, mais aussi d'augmenter la durée de vie des pièces. Par exemple, les sociétés Space X ont utilisé cette méthode pour la fabrication des réservoirs en aluminium pour la fusée Falcon 9. Les soudures en SFM permettent d'amincir les parois, d'alléger le poids de la soudure tout en garantissant l'étanchéité presque parfaite [18].

La norme AWS D17.3/D17.3M [19] établit par l'American Welding Society qui encadre le soudage par SFM dans le domaine de l'aéronautique et de l'aérospatiale. Cette norme a été établie à la suite de la fabrication et du lancement de la fusée Delta II. Dans les débuts des années 2000, les premières applications importantes du SFM pour la fabrication d'avion a eu lieu au Nouveau-Mexique aux É.-U. Aussi, le procédé a été approuvé dans la fabrication d'un avion commercial (Éclipse 500) pour la première fois par la Federal Administration Aviation. Des compagnies aériennes et aérospatiales comme Boeing, Airbus ou Lockheed Martin utilisent maintenant cette technique pour la fabrication de certaines pièces telles que les sections de fuselage et les ailes d'avion [6].

2.5.5.3 Application ferroviaire

Dans le domaine ferroviaire, le SFM est utilisé pour réaliser les assemblages des profilés creux et solides placés dans les planchers, les toitures et les panneaux latéraux. Vers la fin des années 90, ont vu le jour les premières applications ferroviaires du SFM. Les premières utilisations du SFM pour la fabrication des panneaux de toit ont été faites par les compagnies d'extrusion scandinaves Sapa et Hydro aluminium. Par exemple, des compagnies comme Hitachi au Japon ont pu produire des enveloppes à paroi double pour des wagons de trains. D'autres compagnies japonaises comme Nippon Sharyo utilisent le SFM afin d'assembler des panneaux de plancher de train express et de train à hautes vitesses [6].

2.5.5.4 Application dans les structures fixes (génie civil)

L'usage de cette méthode en ingénierie civile est moins documenté que dans les autres domaines. Cette technique est notamment utilisée pour assembler des poutrelles ou des tabliers de ponts. Des études ont été réalisées par l'université d'Osaka au Japon et l'association japonaise sur l'aluminium. Ces derniers ont développé un tablier composé de poutrelles extrudées en aluminium A6005-T5. D'autres études sont réalisées afin de pouvoir utiliser cette technique en ingénierie civile (Pont) [6]. De plus, au Québec un platelage de pont en aluminium a été réalisé par friction malaxage dans la localité de Saint-Ambroise. Ce platelage est composé d'extrusion multicellulaire de 203 mm de hauteur. Ce pont qui est une première dans la province était un projet pilote dans le but d'en étudier le comportement en conditions réelles et d'évaluer si un tel platelage pourrait être utilisé pour d'autres projets routiers [74].

2.6 Défaut dans les soudures en SFM

Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine des défauts dans les soudures en SFM dont les paramètres de soudage (vitesse d'avance, vitesse de rotation) et la configuration de l'outillage [25]. Les défauts qui sont les plus fréquemment rencontrés sont énumérés et décrits dans les sections suivantes.

2.6.1 Hooking

Ce défaut se produit lorsque l'interface entre les deux feuilles de jonction est remuée dans la feuille supérieure réduisant efficacement la section transversale de la feuille supérieure. Ce type de défaut survient dans la ZAT (Zone Affectée Thermiquement). Ce défaut est typique du soudage par recouvrement ou par transparence (Figure 2.14).

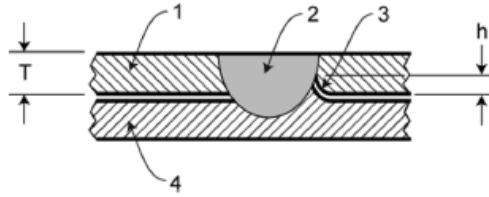


Figure 2.14 Illustration du hooking [19]

2.6.2 Liaison faible (kissing bond)

Ce défaut survient lorsque l'interface entre les deux métaux de jonction est insuffisamment chauffée et agitée ce qui entraîne la formation d'une couche d'oxyde résiduelle. C'est une À l'interface, il peut y avoir très peu ou pas de liaison, augmentant la contrainte locale dans la soudure lors de sollicitation.

2.6.3 Pénétration incomplète

Le manque de pénétration se caractérise sous forme de fissure à la racine de la soudure. C'est la zone où les deux pièces ne sont pas soudées. Ce défaut à un grand impact sur la tenue en fatigue ou en traction, car cette zone représente une zone de concentration de contrainte ce qui favorise l'initiation et la propagation de fissure [26].

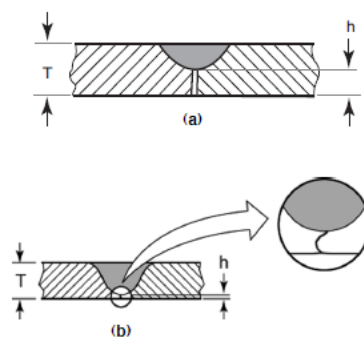


Figure 2.15 Illustration de la pénétration incomplète [19]

2.6.4 Les trous de ver (wormhole) ou cavité interne ou porosité

Les trous de ver sont de longue région semblable à des tubes avec un manque de liaison au-dessus ou en dessous de la soudure [27]. Ils sont une conséquence d'un mauvais écoulement et d'une expulsion de matière exprimée par des paramètres non idéaux comme la faiblesse de rotation, une vitesse de déplacement élevée qui entraîne un faible apport de chaleur [27, 26].

Ce type de défaut est difficilement détectable en raison de la limitation du nombre de méthodes utilisées pour la modélisation dynamique des écoulements (Threadgill, Leonard, Shercliff et Withers, 2009) [27]. Les trous de ver de surface comme illustré à la figure 2.16 sont observés de façon visuelle alors que ceux internes sont difficiles à détecter par contrôle non destructif. D'après les études de Huang et al. [28], l'apport de chaleur diminue avec l'augmentation de la vitesse de soudage ce permet de réduire la taille de ce type de défaut.

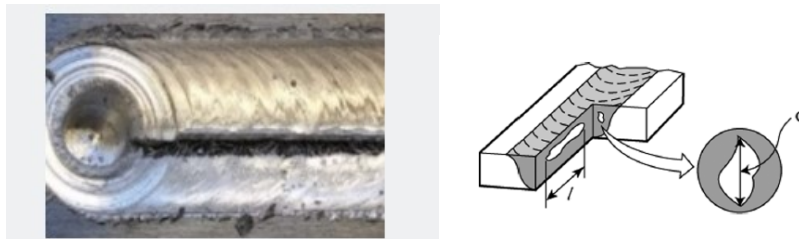


Figure 2.16 Illustration des trous de ver [29, 19]

2.6.5 Les bavures ou flashs

Ce type de défaut est causé par une grande profondeur de plongée de l'outil ou à un apport élevé en chaleur lorsque le rapport entre la vitesse d'avance sur la vitesse de rotation est élevée (Kim et al 2006; Threadgill et al 2009) [30]. La figure 2.17 illustre ce défaut.



Figure 2.17 Illustration des bavures [29]

2.6.6 Distorsion angulaire

La distorsion angulaire peut être définie par un retrait transversal qui peut se traduire par une rotation des pièces due à l'effet de pliage qui lui est dû aux écarts des retraits dans les diverses couches de l'épaisseur. La figure 2.18 illustre ce défaut.

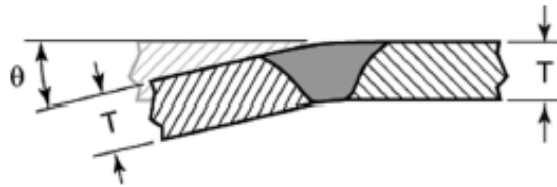


Figure 2.18 Illustration de la distorsion angulaire [19]

2.6.7 Décalage linéaire

Le décalage linéaire peut se traduire comme un désalignement entre deux pièces soudées du à une différence de hauteur entre les deux pièces comme l'illustre la figure 2.19.

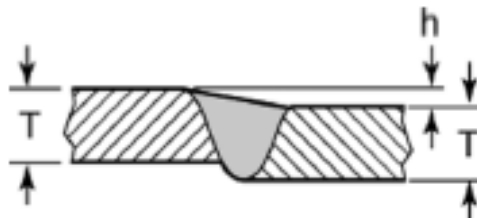


Figure 2.19 Illustration du décalage linéaire [19]

2.7 Méthodes d'inspection des soudures

Le but de l'inspection des soudures est d'évaluer la qualité des soudures et d'identifier les défauts externes et internes et si possible de les éliminer. Il existe des méthodes d'inspection destructives et non destructives. L'inspection non destructive n'entraîne pas une modification de l'apparence des pièces soudées tandis que ceux destructifs entraînent une destruction de l'échantillon. Il existe diverses façons de contrôler les soudures, dont les méthodes chimiques, mécaniques, physiques et des méthodes d'inspection visuelle. Quelques méthodes seront décrites dans les sections subséquentes.

2.7.1 Méthode d'inspection visuelle

Le test visuel est une inspection à l'œil nu ou à l'aide d'une loupe qui permet de déceler des défauts visibles comme les fissures, le manque de pénétration ou les bavures. C'est une méthode qui est inscrite dans les catégories de méthode d'inspection de la norme ISO 25239 [20] et AWS.D17.3 [19].

2.7.2 Méthode de radiographie

Les essais de radiographie sont des essais non destructifs qui permettent de détecter des défauts internes des soudures métalliques à l'aide de rayonnement. La méthode est basée sur l'exposition d'un récepteur par un faisceau de rayonnement X ou gamma dans le matériau. Dans la méthode, le joint et la source de rayonnement sont positionnés l'un en face de l'autre. L'absorption du rayonnement est en fonction de la nature et de la densité du matériau. Cela permet d'obtenir une image en niveau de gris de la projection du contenu du matériau sur le récepteur. Lorsqu'il y a présence d'un défaut, il y'a apparition de teintes plus foncées ou plus claires dépendamment de la présence d'air ou d'inclusions solides par exemple [32].

2.7.3 Méthode d'inspection par ultrason

Cette méthode est semblable à une méthode de contrôle acoustique ce qui permet d'identifier des défauts comme les fissures ou des pores de gaz et des défauts qui ne sont pas détectés par radiographie. Elle consiste à émettre des ondes sonores qui seront réfléchies par la suite. Pour cette méthode, on utilise une sonde composée d'un seul élément piézoélectrique capable de se déformer et de générer des ondes sonores à haute fréquence qui se propagent dans un matériau spécifique dépendamment de la vitesse attribuée. Cette technique est utilisée pour les soudures à pénétration complète, pour les mesures des épaisseurs, pour la détection des luminations et de la corrosion [32]. L'inspection par ultrason est réalisée selon la norme ASTM E164 [33] et la norme ISO 17640 [34].

2.7.4 Test de métallographie par macrographie (essai destructif)

Le test de métallographie par macrographie permet de mettre en évidence des aspects de métallurgie comme la profondeur de pénétration, l'étendue de la zone affectée thermiquement, les porosités et autres. La procédure de réalisation de l'essai se déroule en plusieurs étapes dont la préparation de l'éprouvette, le polissage de l'éprouvette, l'attaque chimique par réactif, le rinçage et le séchage de l'éprouvette puis enfin l'observation de l'éprouvette à l'œil nu ou à l'aide d'une binoculaire. La valeur du grossissement dans cet essai est inférieure à G X 50 [35].

2.7.5 Test de métallographie par micrographie (essai destructif)

Ce test est un examen micrographique qui permet de mettre en évidence la structure métallographique du joint de soudure, des aspects comme la grosseur du grain, les microfissures et les inclusions. Il faut appliquer un réactif chimique ou un électrolyte sur une surface polie au préalable ce qui permettra de révéler les hétérogénéités physiques et

chimiques de la surface métallique par dissolution à vitesse inégale. Cet essai se réalise en plusieurs étapes dont la préparation de l'éprouvette, le polissage de l'éprouvette, l'application du réactif chimique puis la phase d'observation au microscope optique. La valeur de grossissement est supérieure à G X 100 [36].

2.8 Critères d'acceptation des soudures

Le critère d'acceptation des soudures sont établis afin de valider la qualité la soudure ou de les rejeter selon les diverses classes. En se basant sur la norme AWS D17.3 [19]et ISO 25239 [20], les critères d'acceptations des soudures sont résumés dans le tableau 2.6.

Tableau 2.6 Classification des défauts selon la norme AWS D17.3 [19]

Défaut	Classe A	Classe B	Classe C
Fissure	Non accepté	Non accepté	Non accepté
Pénétration incomplète du joint	Non accepté	Non accepté	Non accepté
Cavité interne ou cavité ouverte (trou de verre)	Non accepté	Non accepté	Rejet uniquement les cavités ouvertes en surface
Inclusions			
a) Taille individuelle (maximum)	0,33 T ou 0,06 po la moindre des deux valeurs est retenue	0,50 T ou 0,09 la moindre des deux valeurs est retenue	Non applicable
b) Espacement (minimum)	4 fois la taille de la plus grande discontinuité adjacente	2 fois la taille de la plus grande discontinuité adjacente	Non applicable
c)Longueur accumulée dans n'importe quel 3 po de soudure (maximum)	1,33 T ou 0,24 po, la moindre des deux valeurs est retenue	1,33 T ou 0,24 po, la moindre des deux valeurs est retenue	Non applicable
Décalage linéaire ou défaut d'alignement	1,05 fois l'épaisseur du métal de base	1,075 fois l'épaisseur du métal de base	Non applicable
Distorsion angulaire (Maximum accepté)	3 degrés	3 degrés	Non applicable
Sous remplissage (application uniquement si la face de la soudure ne peut pas être usinée après soudure)			
a) Pour toute la longueur de la soudure (profondeur maximum)	0,05 T	0,075 T	0,10 T
b) Défaut individuel (profondeur maximum)	0,07 T ou 0,03 in (0,76 mm)	0,10 T ou 0,03 in (0,76 mm)	0,125 T ou 0,03 in (0,76 mm)
c)Longueur accumulée dans n'importe quel 3 pouces de soudure (maximum)	0,20 po (5,1 mm)	0,60 po (15 mm)	1 po (25 mm)
Chevauchement			
Bavure (flash)			

Les défauts comme les chevauchements et les bavures (flash) doivent être enlevés après inspection visuelle, mais avant d'autres examens non destructifs. Le retrait de ces défauts doit être réalisé sans dégrader le joint de soudure ou les propriétés du métal. La norme ISO 25239 [20], a établi également des critères d'acceptation des soudures selon les classes de soudure B, C, D qui sont approximativement équivalents respectivement aux classes A, B, et C de la norme AWS.D17.3 [19]. Les tableaux 2.7 et 2.8 présentent les critères d'acceptation de la norme ISO 25239 [20] :

Tableau 2.7 Critères d'acceptation selon la norme ISO 25239 [20]


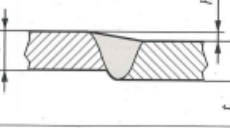



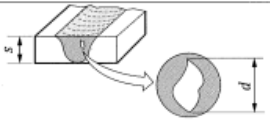
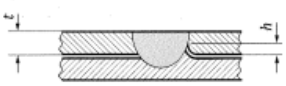

Désignation du défaut	Remarques	Essais et contrôles dans l'ISO 25239-4 ^a	Niveaux d'acceptation		
			D	C	B
Défauts de surface Type I (n'affectant pas l'épaisseur de la section de soudure)^d					
Bavure au niveau du bord de la soudure		VT, ME	— ^b		
Défaut d'alignement		VT, ME	$h \leq 0,3t$ ou 4 mm, la plus petite des deux valeurs étant retenue	$h \leq 0,2t$ ou 2 mm, la plus petite des deux valeurs étant retenue	$h \leq 0,1t$ ou 1 mm, la plus petite des deux valeurs étant retenue
Défaut angulaire		VT, ME	Non applicable	$h \leq 3^\circ$	$h \leq 2^\circ$
Déformation de la zone du joint		VT, ME	$h \leq 0,5t$ ou 4 mm, la plus petite des deux valeurs étant retenue	$h \leq 0,4t$ ou 2 mm, la plus petite des deux valeurs étant retenue	— ^b
Surface irrégulière	Rugosité de surface excessive	VT	— ^b		
Défauts de surface Type II (affectant l'épaisseur de la section de soudure)^d					
Manque de métal		VT, ME	— ^b	$h \leq 0,2 + 0,1s$	$h \leq 0,1s$
Cavité	Cavité débouchante	VT, ME	Non autorisé		

Tableau 2.8 Critères d'acceptation selon la norme ISO 25239 [20] (suite)

Désignation du défaut	Remarques	Essais et contrôles dans l'ISO 25239-4 ^a	Niveaux d'acceptation		
			D	C	B
Défauts internes					
Cavité	 <p>deux cavités adjacentes dont la distance est inférieure à "d" de la plus petite cavité doivent être considérées comme une seule cavité.</p>	ME, RT, UT	— ^b	$d \leq 0,2s$ ou 4 mm, la plus petite des deux valeurs étant retenue	Non autorisé
Remontée d'interface		ME	— ^b	$h \leq 0,2 + 0,1t$ (à prendre en compte seulement si la remontée d'interface réduit la partie chargée du joint)	$h \leq 0,1t$ (à prendre en compte seulement si la remontée d'interface réduit la partie chargée du joint)
Manque de pénétration	 <p>La pénétration est moindre que celle requise ou spécifiée</p>	ME, RT, UT	— ^b	$h \leq 0,2s$	Non autorisé
Inclusion solide	<p>Les inclusions multiples trouvées dans une section transversale sont additionnées: $l = l_1 + l_2 + \dots$</p> <p>Les inclusions inférieures à 0,2 mm ne doivent pas être prises en compte</p>	ME, RT, UT	— ^b	$l \leq 0,2s$	Non autorisé

Dans ce tableau, les termes VT, ME, UT, RT signifient respectivement contrôle visuel, contrôle macroscopique, contrôle par ultrasons, contrôle par radiographie. Dans les tables précédentes, « s » est l'épaisseur nominale de la soudure, « h » est la hauteur ou inclinaison d'un défaut, « t » est l'épaisseur nominale du métal de base. La note b indique que les niveaux d'acceptation doivent se situer dans les limites spécifiées dans les exigences pertinentes ou dans la spécification de conception. En comparant les critères d'acceptation selon la norme ISO 25239 [20] et AWS D17.3 [19] beaucoup de similarités sont observables. Pour certains défauts, les normes présentent plus ou moins des tolérances différentes. Par exemple, le manque de pénétration est un défaut qui est non toléré dans toutes les classes, mais qui a une certaine tolérance pour les classes B et C équivalentes de la norme ISO 25239 [20].

2.9 Éléments essentiels pour caractériser les soudures

Pour les soudures en SFM selon la norme AWS D17.3 [19] et la norme ISO 25239 [20], les dessins techniques ou les documents référencés doivent avoir des précisions sur les éléments comme :

- Le type d'alliage d'aluminium et son état au moment du soudage;
- La spécification du métal de base;
- La préparation de présoudage non définie dans la spécification du mode opératoire de soudage;
- L'emplacement de la soudure ainsi que l'étendue de la soudure;
- Les contours de la soudure finale et les exigences de finition de la soudure;
- Le classement des soudures (classe A, B et C pour la norme AWS D17.3 et les classes B, C et D pour la norme ISO 25239);
- Le type de traitement thermique post-soudage si applicable.

2.10 Impact de la technique sur la microstructure du joint

La microstructure de la soudure montre plusieurs zones métallurgiques observées dans les soudures bout à bout. Il est alors possible de distinguer quatre zones distinctes comme l'illustre la figure 2.20.

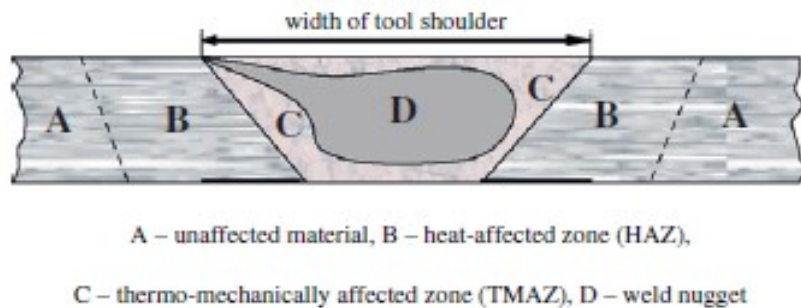


Figure 2.20 Microstructure de la zone de soudage en SFM [37]

- **La zone A : le matériau de base (MB)**

Le matériau de base est localisé dans la périphérie de la soudure et présente la même microstructure que celle du matériel non soudé, car elle très peu ou pas du tout affecté par le processus d'assemblage. De façon générale, aucune modification des propriétés mécaniques par rapport au matériel d'origine n'a été remarquée. De plus, aucun défaut n'est détectable dans cette zone sauf en présence de contraintes résiduelles internes qui entraînent des distorsions et des contraintes secondaires dans cette zone [6].

- **La zone B : la zone affectée thermiquement (ZAT)**

C'est une zone dans laquelle le matériau subit un échauffement sans déformation entraînant une modification de la microstructure. Elle est située entre la zone affectée thermomécaniquement et le matériel de base [18]. L'échauffement peut entraîner une augmentation de la taille des grains et modifier l'état de précipitation. Les modifications ont un impact assez important sur la résistance, la ductilité et la résistance à la corrosion. La ZAT est de façon générale de taille plus réduite dans les soudures SFM que dans les soudures à fusion. De plus, plusieurs études ont démontré que la rupture sous tension se produit dans cette zone pour les joints soudés par friction malaxage (Mahoney et al., 1998) [30].

- **La zone C : la zone affectée thermomécaniquement (ZATM)**

Cette zone est localisée de part et d'autre de la zone de malaxage. C'est une zone dans laquelle le matériel subit une déformation plastique et une hausse de température. Le matériel est déformé de façon irréversible par les forces appliquées, car il est chauffé de façon suffisante de façon à réduire une limite élastique. Dans certaines circonstances, la zone malaxée est difficilement distinguable de la zone affectée thermomécaniquement, car aucune recristallisation n'est observée dans la soudure [6].

- **La zone D : la zone malaxée ou zone de malaxage (ZM)**

C'est la zone qui subit directement l'effet du pion. Le mouvement du pion et de l'épaulement génère des déformations importantes et une augmentation de la température qui produisent une recristallisation dynamique de la microstructure. En effet, les atomes se réagencent en un assemblage de grains complètement nouveaux qui sont équiaxes, plus fins que ceux du matériel de base et orienté de façon aléatoire confèrent ainsi une nature isotrope au matériau. La recristallisation réduit la densité des dislocations et se produit lorsque la température atteint un niveau suffisant dans la zone de malaxage c'est-à-dire de 0,5 fois la température de fusion. De plus, cette zone est caractérisée par la présence d'anneaux circulaires ou elliptiques concentriques qui est appelée « rondelles d'oignons ». La présence de cette caractéristique est due au mouvement de rotation de l'outil [6].

2.11 Méthode de mesure de la microstructure

La dureté des matériaux est évaluée à l'aide de plusieurs méthodes qui sont notamment les essais dureté de Rockwell, les essais de dureté de Vickers, les essais de dureté de Knoop, les essais de dureté de Brinell. L'essai de dureté se définit comme étant un essai de détermination de la résistance qu'un matériau offre contre la déformation permanente par pénétration d'un matériau plus dur. Cet essai permet d'évaluer les propriétés d'un matériau comme sa ductilité, sa résistance à l'usure, mais aussi de déterminer le matériau qui convient à l'usage voulu.

L'essai Vickers est l'essai standard qui est utilisé pour caractériser la microstructure des joints de soudure. Il permet d'évaluer la dureté de la soudure spécialement celle autour de la zone affectée thermiquement (ZAT). En effet, l'évaluation de cette dureté autour ou dans la ZAT peut permettre d'évaluer la fragilité de la soudure et donc de mesurer la dimension de

celle-ci. Cet essai est le plus souvent utilisé et le plus facile à réaliser, car il peut être exécuté sur un appareil d'essai universel de microdureté. Le même pénétrateur, un diamant pyramidal peut être utilisé pour tous les matériaux, peu importe leur dureté.

La dureté de Vickers est calculée en réalisant une mesure optique des longueurs des deux diagonales de l'empreinte du pénétrateur. Ces mesures sont ensuite converties en unité HV (HV5 et HV10) au moyen d'une table ou d'une formule [38]. Un $HV = 1854,4 L / d^2$: dans cette formulation « L » qui est exprimée en gramme-force (gf) est la force appliquée et « d » est la moyenne des diagonales en micromètre (μm) [39]. Pour les alliages d'aluminium à durcissement structural, les courbes de dureté ont un profil en forme de W comme l'illustre la figure 2.21 [30].

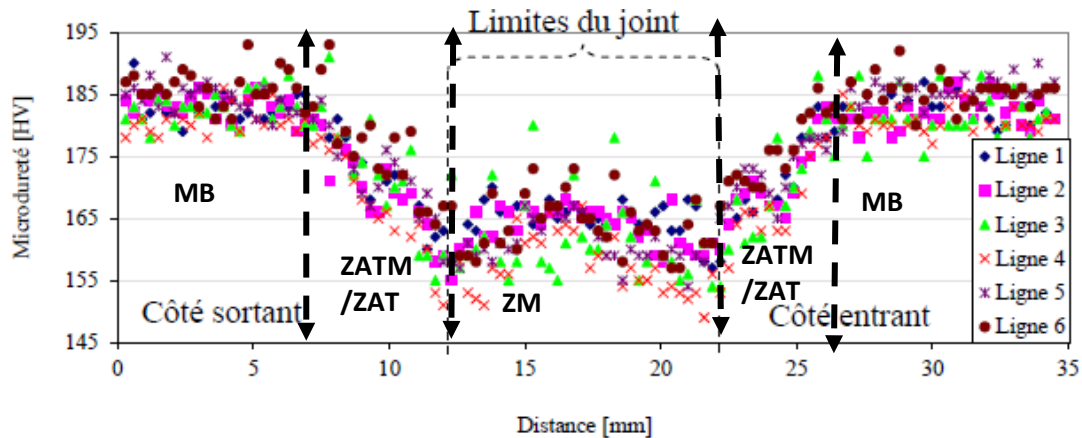


Figure 2.21 Représentations de la dureté d'un échantillon soudé obtenue à l'aide de l'essai de dureté de Vickers (7075-T6, 2,3 mm d'épaisseur) [40]

La figure 2.21 permet d'observer que la zone dont la microdureté est en variation croissante jusqu'à la dureté maximale est la zone affectée par la chaleur (ZATM/ZAT). De ce schéma, on peut déduire que la dimension de la zone affectée par la chaleur du côté sortant varie approximativement entre 7,5 mm et 12,5 mm soit 5 mm de longueur et du côté entrant la dimension varie approximativement entre 22,5 mm et 27,5 mm soit une longueur de 5 mm. La ZAT dans cet échantillon mesure donc approximativement 5 mm en faisant la moyenne

des deux intervalles. Selon la norme CSA-S6, pour des épaisseurs inférieures à 6 mm la dimension de la ZAT est de 20 mm pour les soudures en fusion [22]. De cette étude, il est possible de déduire que le soudage par friction-malaxage permet d'avoir une réduction de la zone affectée thermiquement.

Les auteurs Texier D et al [41] ont effectué une étude comparative sur l'amorçage des fissures et le comportement en fatigue des joints soudés en SFM et en MIG. L'analyse de la dureté représentée à la figure 2.22 permet de déduire la dimension de ZAT dans la soudure SFM qui est d'environ de 19 mm.

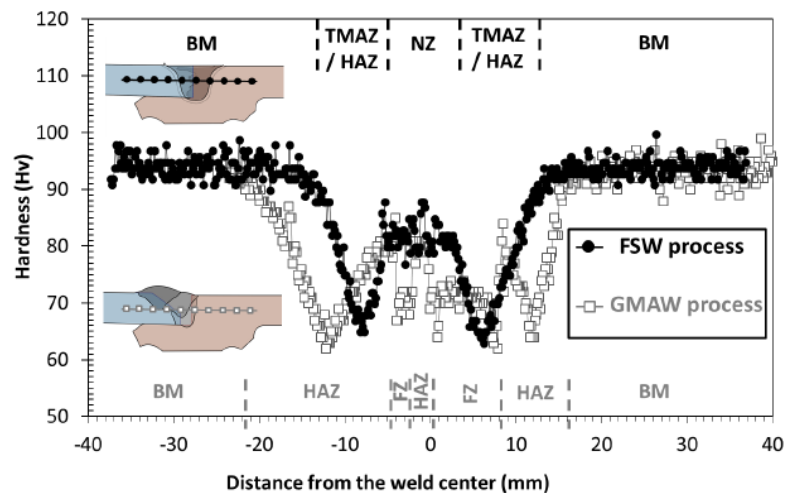


Figure 2.22 Essai de dureté de Vickers (6061-T6, 19 mm) [41]

Les valeurs de la ZAT pour les soudures en fusion d'épaisseur située entre 12 et 25 mm sont de 35 mm comme l'indique le tableau 2.9 [22]. Pour la soudure MIG, la dimension totale de la ZAT est environ de 36 mm. Il est alors possible de conclure que la dimension dans la ZAT dans la soudure MIG est plus importante que dans les soudures SFM. Comme la littérature le stipule, l'avantage de soudage SFM c'est de réduire la dimension de la ZAT. De plus, il est possible de remarquer que la zone thermomécaniquement affectée est confondue à la ZAT dans les soudures MIG.

Tableau 2.9 Table des dimensions de la ZAT pour les soudures en fusion (MIG) [22]

$t \leq 6 \text{ mm}$	$b_{\text{haz}} = 20 \text{ mm}$
$6 < t \leq 12 \text{ mm}$	$b_{\text{haz}} = 30 \text{ mm}$
$12 < t \leq 25 \text{ mm}$	$b_{\text{haz}} = 35 \text{ mm}$
$t > 25 \text{ mm}$	$b_{\text{haz}} = 40 \text{ mm}$

2.12 Fatigue en SFM et dans les ponts en aluminium

La fatigue est un phénomène qui est à la base de la rupture des éléments qui sont soumis à des chargements dynamiques, tels que les vibrations et les charges cycliques. C'est un aspect relativement critique, car la rupture peut survenir de façon ductile ou fragile sans indices après une certaine durée de vie. C'est une problématique très importante dans la conception des joints soudés, car plusieurs paramètres peuvent être à la base de la rupture en fatigue de la soudure.

Le comportement en fatigue est réparti en trois types dépendamment du nombre de cycles : la fatigue de longue durée (nombre de cycles supérieurs à 10^5 cycles, déformations élastiques, fréquence élevée, basse amplitude de contrainte), la fatigue de courte durée (nombre de cycles inférieurs à 10^5 cycles, déformations plastiques, fréquences faibles, hautes amplitudes de contrainte) et la fatigue thermomécanique (variation importante de température, expansion ou contraction d'un élément). Le mécanisme physique de la défaillance d'un joint en fatigue s'effectue en plusieurs étapes, dont l'amorçage de la fissure, la propagation de la fissure et la rupture finale [42]. Dans le cas de l'aluminium, les sites d'amorçage des fissures de fatigue sont en fonction de l'état de la surface du joint et du type d'alliage d'aluminium. Le taux de propagation de la fissure de fatigue dépend du rapport de contrainte R [40].

En ingénierie civile, plus précisément dans la conception des ponts, la fatigue est un aspect très important, car le pont est soumis à des chargements cycliques et aux vibrations. Ces

ouvrages de grande envergure doivent être conçus pour des durées de vie prescrites par la norme (75 ans) [22].

La technique de soudage par friction malaxage dans les ponts est très rarement utilisée en raison des normes en qui ne sont pas bien établies dans ce domaine. Plusieurs auteurs ont effectué des études sur le comportement en fatigue des joints soudés en SFM des alliages d'aluminium. La plupart des études concernent les domaines aéronautiques, ferroviaires, ou navals. Il existe peu d'études concernant le comportement en fatigue des joints soudés en SFM dans les sections de pont.

Les auteurs Laszlo Gergely et Ichoro Okura [37] ont mené une étude sur le comportement en fatigue d'un tablier de pont soudé par friction malaxage. Ils ont conçu un système de pont orthotrope en alliage Al-Mg-Si composé de profilé extrudé relié dans la direction transversale par SFM. La poutre a été soumise à un effort de flexion et à un chargement transversal afin d'en étudier le comportement en fatigue et d'en déduire une courbe d'endurance qui est illustrée à la figure 2.23.

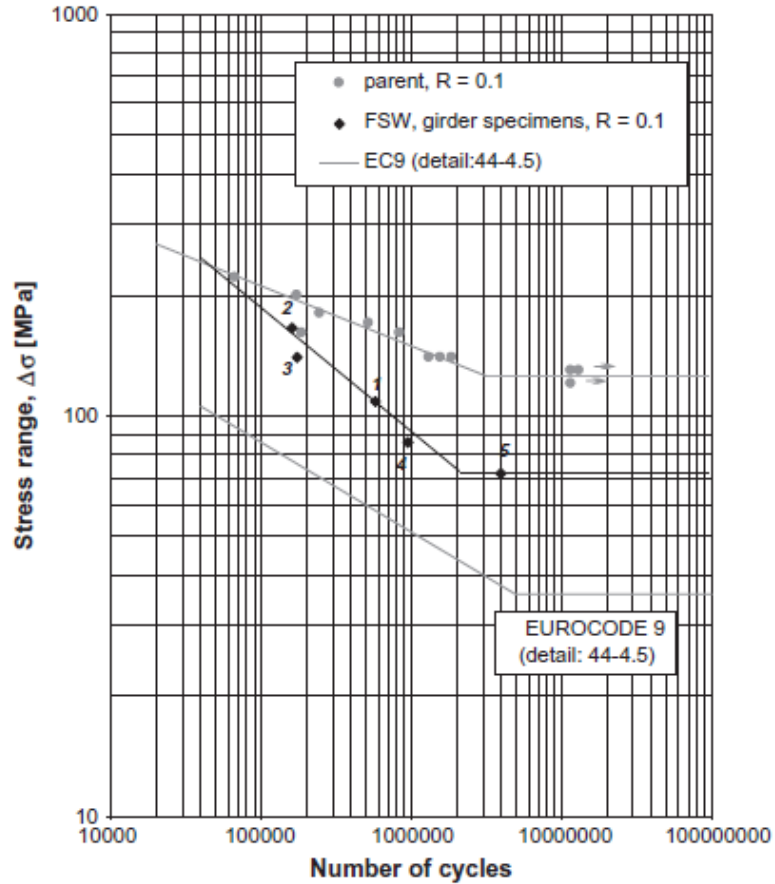


Figure 2.23 Courbe de fatigue alliage AA6005C-T5 de 12 mm [37]

Les courbes de fatigue à la figure 2.23 permettent de constater que la résistance à la fatigue des soudures SFM est supérieure à celle de la norme Eurocode 9 de détail 44-4.5. Les conclusions de cette étude ont permis de savoir que les zones critiques de la soudure sont la frontière ZAT/ZATM et que les fissures de fatigue s’amorcent dans la zone de la soudure. Certaines littératures indiquent que la rupture par fatigue se produirait dans la frontière ZAT-ZATM, car ce serait la zone critique de la soudure.

Amira et al. (2018) ont permis de mettre en évidence que pour le soudage des extrusions longues comme celles d’un pont, le défaut que l’on peut rencontrer est la déviation de l’outil dans la trajectoire de la soudure [43].

C'est dans ce même sens que Trimech. M. et al. (2021) [31] ont également mené une étude sur les défauts et le contrôle des joints soudés en SFM sur les tabliers de pont en aluminium. Cela a permis de mettre en évidence des défauts comme le jeu du joint et le décalage de l'outil dans le sens de l'avance et du recul. Ils ont pu conclure que pour un jeu de 1,5 mm, un décalage dans le sens du recul de 1,5 mm et un décalage dans le sens de l'avance de 5 mm les critères d'acceptation respectaient les normes et codes du SFM en vigueur soit l'ISO 25239 [20], la AWS D1.2 [44] et la AWS.D17.3 [19]. De plus, ces caractéristiques n'engendraient pas de défaut apparent sauf une couche d'oxyde en zigzag dans le noyau de la soudure visible par analyse métallographique.

Shusheng Di et al. (2006) [45], avaient mené une étude comparative sur les propriétés en fatigue des soudures SFM entre les joints soudés par SFM et le matériel de base non soudé de l'alliage AA2024-T4 (figure 2.24). Cette étude a permis de démontrer que la couche d'oxyde en zigzag avait un effet de réduction de la résistance à la fatigue dans le matériel de base non soudé comme dans la soudure de 23,4%. On constate que les joints soudés ont une résistance plus élevée que les joints soudés par fusion (courbe de fatigue IIW FAT 40 [23] et Eurocode 9- 55-6 [24]).

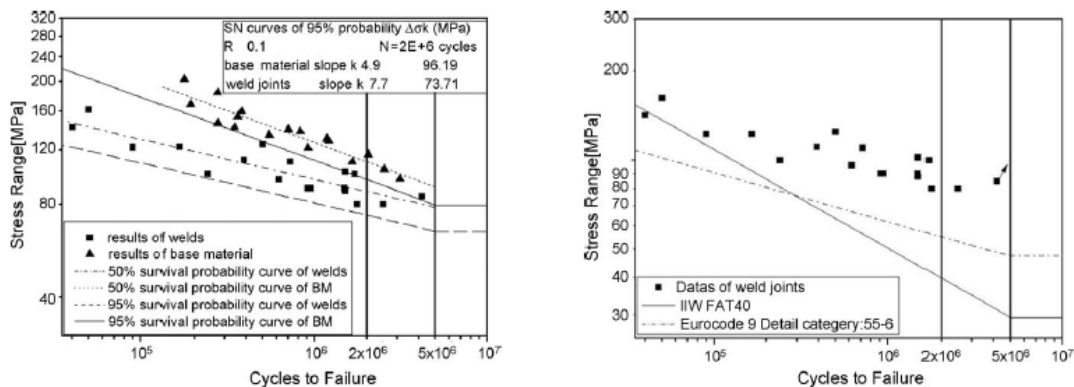


Figure 2.24 Comparaison des courbes de fatigue pour le matériel de base non soudé et des soudures SFM de l'alliage 2024-T4 (4 mm) [45]

Dans la littérature, plusieurs facteurs peuvent influencer la résistance à la fatigue comme les défauts internes tels que les trous de ver, la présence de film d'oxyde continu dans la soudure qui limite la force de liaison entre pièces, les défauts de surfaces, les paramètres de soudages et d'outillage. M. Ericsson et R. Sandstom (2003) [46] ont effectué une étude comparative sur l'influence de la vitesse de rotation sur la fatigue des joints SFM, MIG ou TIG. Dans ce cas, les éprouvettes de fatigue ont des dimensions de 260 mm, 70 mm, 4 mm qui sont respectivement la valeur de la longueur, la largeur et l'épaisseur. La conclusion de cette étude est que la résistance à la fatigue des échantillons soudés à SFM est supérieure à celle des soudures MIG ou TIG (figure 2.25 et figure 2.26).

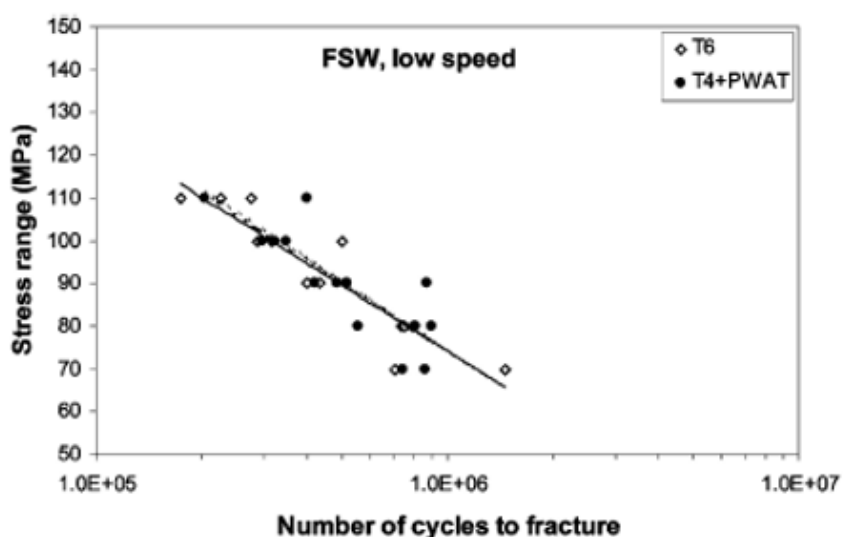


Figure 2.25. Durée de vie en fatigue sur des joints SFM à faible vitesse de soudage (700mm/min) [46]

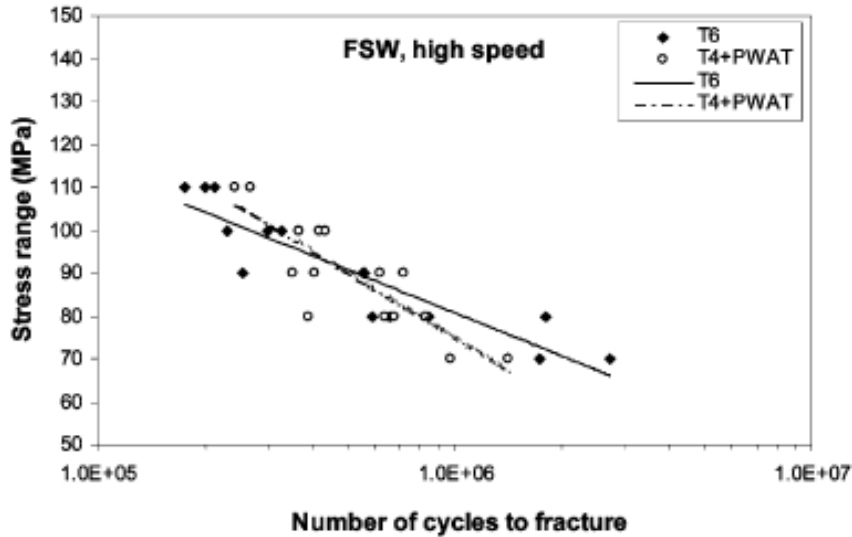


Figure 2.26 Durée de vie en fatigue sur des joints SFM à haute vitesse de soudage (1400mm/min)

[46]

Les paramètres SFM de soudage qui ont été utilisés sont des vitesses d'avance de 700 mm/min pour la basse vitesse et de 1400 mm/min pour la haute vitesse, la vitesse de rotation de 2500 tr/min pour la plus grande vitesse et de 2200 tr/min pour la basse vitesse. La vitesse de soudage TIG était de 120-140 mm/min et de 525 mm/min pour le soudage MIG. Il a été conclu que la vitesse de soudage n'a pas d'effet majeur sur le comportement en fatigue entre la plage testé (700 – 1400 mm/min, 2200 -2500 rpm). Cependant, en deçà cette plage, soit à une vitesse de 350 mm/min, les performances de fatigue ont été améliorées soit un gain de 10 MPa.

Ruiji Wang et Peng Mi (2020) [47] ont effectué une étude sur la résistance en fatigue des joints SFM présentant un défaut de liaison faible (kissing bond). Le défaut de liaison faible est un défaut interne de la soudure défini précédemment. La conclusion de cette étude était que ce défaut serait une zone de rupture par fatigue, car il s'apparente à une fissure donc une zone de concentration de contraintes. En effet, de la figure 2.27, il est possible de constater que le défaut de liaison faible a un impact sur la vie en fatigue des joints soudés,

car la majorité des échantillons se sont rompus à moins de 10^5 cycles pour des contraintes entre 80 MPa et 40 MPa.

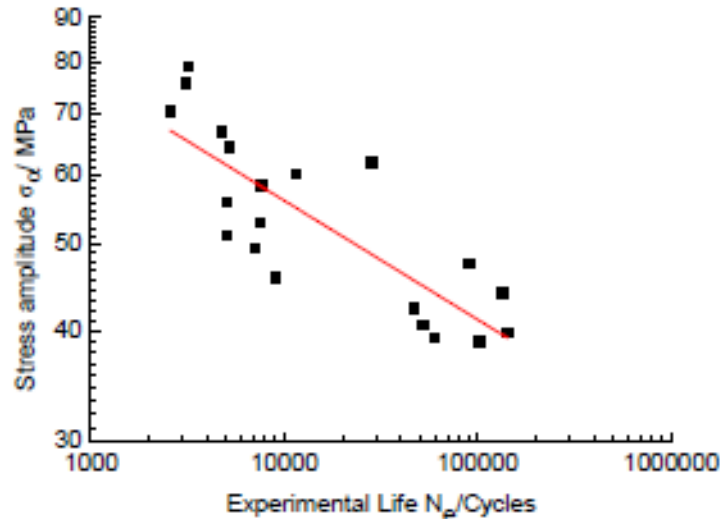


Figure 2.27 Courbe de fatigue de l'alliage 5083 avec un défaut de liaison faible (kissing bond) [47]

Le défaut de liaison faible (kissing bond) est difficilement détectable à l'aide des méthodes de contrôle non destructives [27]. D'après les études de GUO (2018) [27], dépendamment de la quantité de bavures et du sous-remplissage correspondant, la résistance à la fatigue peut être considérablement affectée en raison de la discontinuité du matériau de la réduction de la section transversale le long du joint. Plusieurs études ont permis de démontrer l'efficacité des soudures SFM par rapport à celle MIG. Le soudage MIG est un type de soudage par fusion ce qui affaiblit les propriétés mécaniques de la soudure notamment celle en fatigue.

Une étude de Moreira et al [48], a permis de mettre en évidence que pour des échantillons de 3 mm d'épaisseur pour des alliages d'aluminium AA6082-T6 et AA6061-T6 en soudage MIG et en SFM, les contraintes de rupture sont plus faibles dans la soudure que dans le matériel de base non soudé. De plus, les soudures conduisent à une réduction des propriétés mécaniques encore plus prononcées dans les soudures MIG. Par comparaison des

courbes d'endurance, des soudures en SFM et en MIG, il a été constaté que la durée de vie en fatigue est moins élevée pour les échantillons MIG que pour ceux des échantillons SFM (figure 2.28).

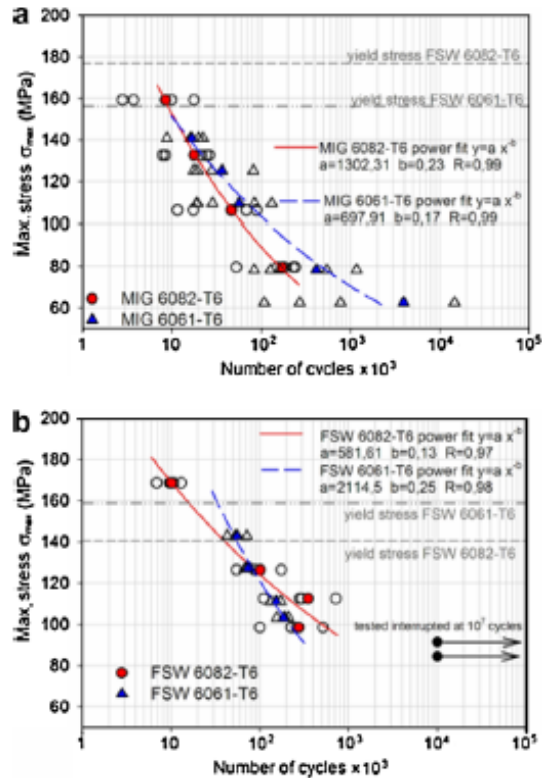


Figure 2.28 Courbe de fatigue : Comparaison entre MIG et SFM [48]

Les échantillons MIG AA6082-T6 présentait une tolérance en fatigue moins élevée que pour les échantillons MIG AA6061-T6. Les échantillons SFM AA6061-T6 présentait une durée de vie inférieure à celle de l'échantillon SFM AA6082-T6 quand ils sont testés sous contraintes inférieures à 130 MPa.

Selon D. Texier et al. [41], qui ont mené une étude comparative sur le comportement en fatigue entre des échantillons de 19 mm soudés en MIG et en SFM des alliages AA6061-T6; il en est ressorti que le soudage par SFM permettait d'obtenir un gain de 25 % en résistance à la fatigue par rapport au soudage MIG. La comparaison des courbes d'endurance

(figure 2.29) pour les soudures en SFM et les soudures MIG permet de déduire que la rupture en fatigue survient plus rapidement dans le cas des soudures MIG que SFM pour une amplitude de contrainte maximale de 35 MPa.

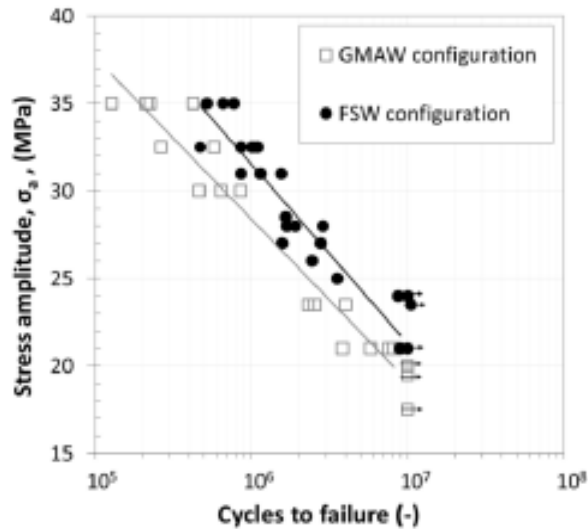


Figure 2.29 Comparaison de courbe de fatigue en SFM et en MIG pour des alliages AA6061-T6 [41]

De l'étude de Moreira et al [48] sur la propagation des fissures dans les alliages d'aluminium AA6082-T6 et AA6061-T6, il a été constaté que les vitesses de propagation des fissures dans les soudures SFM des deux alliages sont inférieures à celles dans le matériel de base. Cela peut être expliqué par la compression des contraintes résiduelles qui se sont développées au voisinage de la fissure. Les contraintes résiduelles se produisent en raison d'un échauffement local par friction malaxage à l'interface de l'outil et du matériau.

L'étude de Michael B et al. [49] sur la mesure des contraintes résiduelles dans des alliages d'aluminium dissimilaires en friction malaxage a permis de conclure que les contraintes résiduelles même à faible amplitude affectent les comportements en fatigue.

2.14.1 Méthode de construction des courbes de fatigue

Les courbes de fatigue sont réalisées en se basant sur les modèles de Wöhler (Figure 2.30). Les courbes de Wöhler permettent d'indiquer la somme des chargements de charges tolérables jusqu'à la rupture du matériau. Elles permettent de lire le nombre maximum de chargements selon une amplitude de charge déterminée. Ce nombre de chargements est dépendant des propriétés du matériau, de la force appliquée et du type de chargement. La courbe de Wöhler est subdivisée en trois parties, dont la fatigue à faible nombre de cycles K (10^4 à 10^5 cycles), la fatigue à grand nombre de cycle Z (10^4 à 2×10^6 cycles), la limite d'endurance D (jusqu'à l'infini) [50].

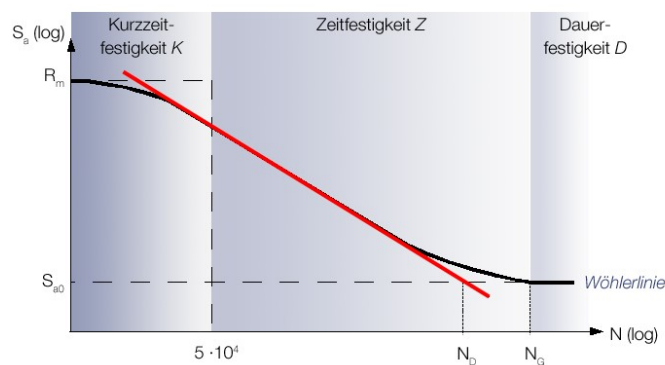


Figure 2.30 Courbe de fatigue de Wöhler [50]

Pour obtenir la courbe de fatigue, une contrainte cyclique est appliquée sur l'éprouvette à température constante. Cette dernière subit une déformation allongement/compression ou une déformation en tension jusqu'à la rupture. Les paramètres qui sont utilisés dans l'élaboration de cette courbe sont la contrainte minimale (σ_{min}), la contrainte maximale (σ_{max}), la contrainte moyenne (σ_m), l'amplitude de contrainte ($\Delta\sigma$) et le rapport de charge du test (R) [51]. La figure 2.31 illustre ces paramètres ainsi que les équations (2.1) à (2.4).

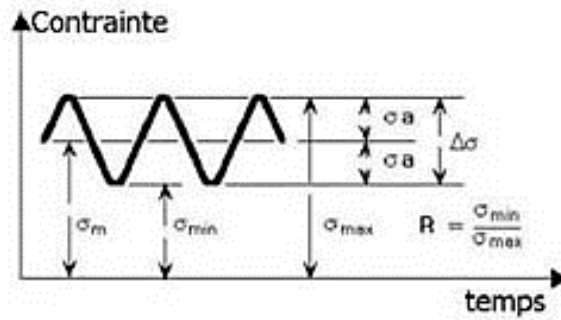


Figure 2.31 Contrainte cyclique constante [51]

Les équations suivantes permettent de calculer les paramètres énumérés précédemment :

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{min} + \sigma_{max}}{2} \quad (2.1)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (2.2)$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (2.3)$$

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (2.4)$$

2.14.2 Norme et codes

Ils existent plusieurs réglementations qui permettent de définir la qualité des soudures dont l'ISO 25239 [20] et la AWS.D17.3 [19] qui préconisent des essais à faire pour qualifier les soudures, mais aussi des critères d'acceptation des défauts. Ces deux normes présentent des nomenclatures et des tolérances différentes sur quelques points. Selon la norme AWS.D17.3 [19], les joints sont distingués selon trois (3) classes en fonction de leur usage qui sont la classe A, B et C qui sont du plus critique au moins critique. Les joints de classe A (critiques) sont ceux dont la défaillance peut entraîner un danger important pour les personnes comme la perte de véhicule aérien, la perte de contrôle ou la perte d'un système. Les joints de classe B (semi-critiques) sont ceux dont la défaillance du joint peut réduire les

performances globales du matériel. Les joints de classe C (non critiques) sont ceux dont la défaillance du joint n'affecterait pas l'efficacité du système ou la mise en danger des personnes. Tandis que selon la norme ISO 25239 [20], il existe également trois classes de joint, mais qui sont dénommés classe D, C, et B qui sont classés respectivement du plus critique au moins critique. Les normes qui interviennent en matière de conception de fatigue pour les joints soudés sont l'aluminium design manual (ADM) [21], le code canadien sur les ponts routiers (CSA-S6) [22], l'International Institute of Welding (IIW-1823-07) [23], l'Eurocode 9 [24]. Ces normes proposent des conceptions selon les techniques de soudage par fusion.

Les conceptions recommandées pour les joints soudés bout à bout selon les normes sont décrites dans la section 2.14.3. Ces normes ne sont pas optimales pour une analyse structurale du soudage par friction malaxage, mais restent une méthode conservatrice.

2.14.3 Détail des courbes de fatigue selon la littérature

Comme indiqué plus haut, il existe plusieurs courbes selon les normes en vigueur sur la fatigue dont la norme CSA-S6 [22], IIW [23], l'Eurocode 9 [24] et l'ADM [21].

- **CSA-S157 [52] et la CSA-S6 [22]**

Selon la norme CSA S157 [52] et la norme CSA-S6 [22], il existe plusieurs catégories de design de courbes de fatigue dont les catégories A, B, C, D et E dépendamment du type de sollicitation et du type de soudure. Chaque catégorie est caractérisée par une valeur de résistance à la fatigue pour 2 millions de cycles. Le critère de conception de fatigue est illustré par l'équation (2.5) et (2.6) pour une amplitude à charge constante:

$$F_{SR} \geq F_{SRT} \quad (2.5)$$

où

F_{SR} est la résistance à la fatigue

F_{SRT} est le seuil de gammes de contraintes à amplitude constante

La résistance à la fatigue est exprimée selon la formulation de l'équation 2.6 :

$$F_{SR} = \left(\frac{\gamma}{n * N} \right)^m \quad (2.6)$$

où

m est la constante de résistance à la fatigue

n est le nombre de cycles de la gamme de contraintes

N est le nombre de charges appliquées.

γ une constante de résistance à la fatigue.

Les constantes m , γ , et F_{SRT} sont des constantes qui dépendent de la catégorie de conception.

Dans cette présente étude, le type de sollicitation (sens transversal de la soudure) est similaire au détail 8 (exemple 8 sur la figure 2.32) correspondant au métal de base et métal fondu soudé sur préparation à pénétration complète pour les soudures à fusion. La courbe de conception recommandée pour le pour le détail 8 est la catégorie B.

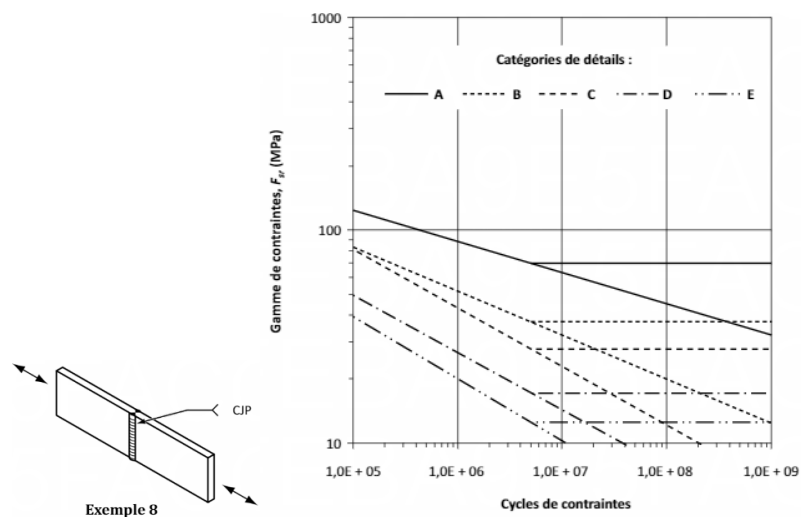


Figure 2.32 Détails de fatigue selon la norme CSA-S6 [22] et la norme CSA-S157 [52]

- **Aluminium Design Manual (2005) [21]**

Selon cette norme, il existe plusieurs catégories de conception de courbes de fatigue dont les catégories A, B, C, D et E dépendamment du type de sollicitation et les types de soudure. Dans cette norme, les maximums et les minimums de contrainte qui sont utilisés pour calculer la plage de contrainte sont des contraintes normales qui sont déterminées par des méthodes élastiques standards. Pour le critère de conception de fatigue, il est illustré par l'équation 2.7 et 2.8 pour une amplitude à charge constante:

$$S_{ra} \leq S_{rd} \quad (2.7)$$

où

S_{ra} est l'amplitude de contrainte appliquée. C'est la différence algébrique entre le minimum et le maximum de la contrainte calculée dans la membrure. La résistance à la fatigue est exprimée par l'équation (2.8) :

$$S_{rd} = C_f * N^{-1/m} \quad (2.8)$$

où

m est la pente de la courbe de fatigue

C_f et m sont des constantes de fatigue

N est le nombre de cycles

S_{rd} est la plage de contrainte acceptable

Les constantes m et C_f sont dépendant des différentes catégories de conception et sont calculées pour un nombre de cycles de 5 millions. La figure 2.33 illustre le type de courbe et le détail de conception en fatigue (détail 9).

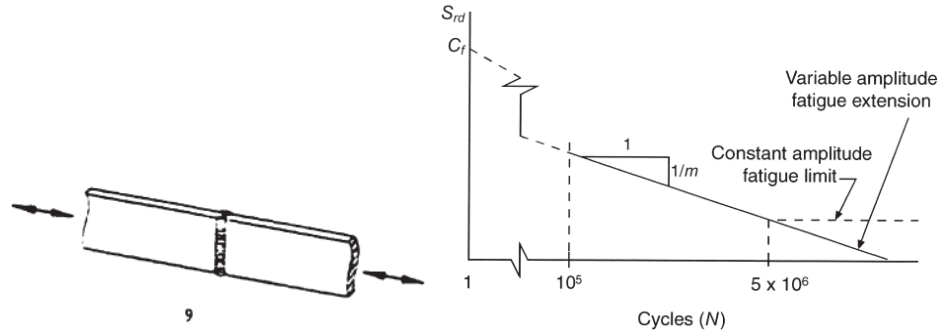


Figure 2.33 Détails de fatigue selon la norme ADM [21]

- **IIW-1823-07 (International Institute of Welding: Recommendations for fatigue design of welded joints and components.) [23]**

Dans cette norme, chaque courbe de fatigue S-N est identifiée par une résistance à la fatigue caractéristique du détail de conception pour 2 millions de cycles (figure 2.34). Cette valeur est appelée classe de fatigue (FAT). La pente des courbes de fatigue S-N est évaluée pour les détails de conception sur la base des contraintes normales. La valeur de cette pente est de trois (3) sauf indication contraire. Le point d'inflexion de la courbe assumé est à 10^7 cycles. L'équation (2.9) permet d'évaluer le nombre de cycles en fonction de la pente, de la contrainte.

$$N = \frac{C}{\Delta\sigma^m} \text{ ou } N = \frac{C}{\Delta\tau^m} \quad (2.9)$$

où

N est le nombre de cycles

C est une constante de fatigue

m est la pente de la courbe

$\Delta\sigma$ est l'amplitude de contrainte normale

$\Delta\tau$ est l'amplitude de contrainte de cisaillement

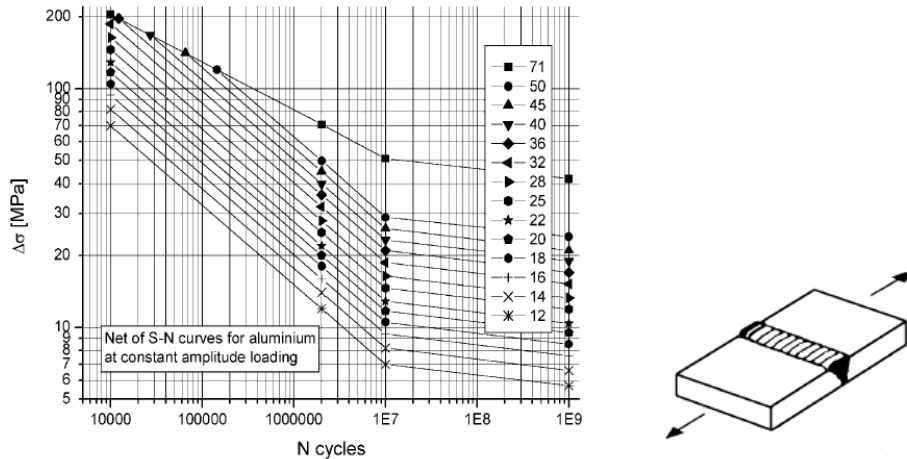


Figure 2.34 Détails de fatigue selon la norme IIW-1823-07 [23]

Le type de sollicitation ici est un joint bout à bout transversal avec une pénétration complète. Il s'applique si le désalignement des plaques est inférieur à 10% de leur épaisseur. La classe de fatigue utilisée est la FAT 28. Le nombre 28 ici désigne la valeur de la contrainte normale à 2 millions de cycles.

- **Eurocode 9 [24]**

Selon la norme Eurocode 9, il existe également plusieurs catégories de conception qui sont A, B, C, D, E et qui varient selon le type de sollicitation. Dans cette norme, dans la conception de la courbe, il existe deux pentes distinctes m_1 et m_2 selon la plage du nombre de cycles. On peut constater en observant la figure 2.35, trois parties de la courbe 1, 2 et 3. La partie 1 (nombre de cycles est compris entre 10^5 et 5×10^6) a une pente m_1 , la partie 2 (nombre de cycles compris entre 5×10^6 cycles et 10^8 cycles) a une pente m_2 et la partie 3 (nombre de cycles compris entre 10^8 cycles à l'infini) a une pente m de zéro.

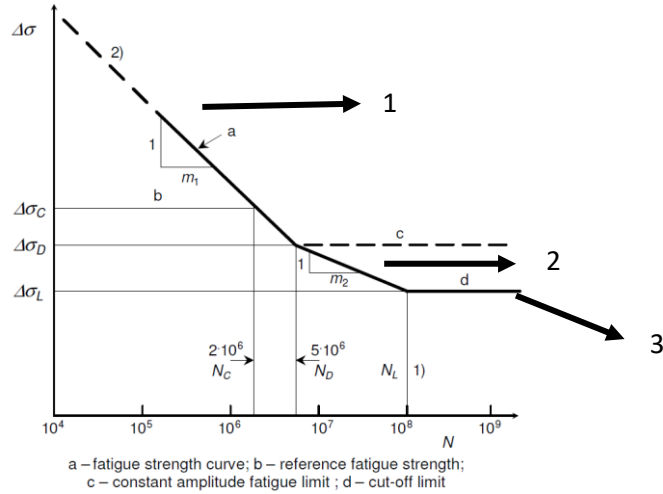


Figure 2.35 Courbe de fatigue selon la norme Eurocode-9 [24]

Dans le schéma illustré à la figure 2.35, on peut observer plusieurs valeurs représentatives qui sont :

$\Delta\sigma_C$, $\Delta\sigma_D$, $\Delta\sigma_L$, N_C , N_D , et N_L qui sont respectivement les valeurs de la résistance à la fatigue à 2 millions de cycles (contrainte de référence), la valeur de la contrainte à la limite de fatigue à amplitude constante (5 millions), la valeur de la contrainte à la limite de rupture, le nombre de cycles de référence définie à 2 millions, le nombre de cycles à la limite de fatigue à amplitude constante définie à 5 millions et le nombre de cycles à la rupture définie à 10^8 . Pour un nombre de cycles compris entre 10^5 et 5×10^6 , la courbe de fatigue est définie par l'équation (2.10).

$$N_i = 2 * 10^6 * \left(\frac{\Delta\sigma_C}{\Delta\sigma_i} * \frac{1}{\gamma_{Ft} * \gamma_{MT}} \right)^{m_1} \quad (2.10)$$

Pour un nombre de cycles compris entre 5×10^6 cycles et 10^8 cycles, la courbe de fatigue est définie par l'équation (2.11).

$$N_i = 5 * 10^6 * \left(\frac{\Delta\sigma_C}{\Delta\sigma_i} * \frac{1}{\gamma_{Ft} * \gamma_{MT}} \right)^{m_2} * \left(\frac{2}{5} \right)^{\frac{m_2}{m_1}} \quad (2.11)$$

où

N_i est l'endurance sous l'amplitude de contrainte $\Delta\sigma_i$

m_1 est la valeur de la pente (m) pour des nombres de cycles inférieurs à 5×10^6 cycles.

m_2 est la valeur de la pente (m) pour des nombres de cycles compris entre 5×10^6 cycles et 10^8 cycles. ($m_2 = m_1 + 2$)

$\Delta\sigma_c$ est la contrainte normale de référence pour 2 millions de cycles dépendamment du détail de catégories

$\Delta\sigma_i$ est l'amplitude de contrainte nominale

γ_{Ft} est un facteur partiel pour l'intensité de la charge de fatigue (ce facteur tient compte des incertitudes dans le spectre de chargement et l'analyse de la réponse)

γ_{MT} est un facteur partiel de la résistance à la fatigue (ce facteur tient compte des incertitudes dans les matériaux et dans l'exécution).

m est la pente inverse constante de $\log \Delta\sigma - \log N$ de la courbe de fatigue ou taux de propagation des fissures.

\log est le logarithme de base 10

Les valeurs de γ_{Ft} et de γ_{MT} sont assumés être de 1.

Le détail de conception (figure 2.36) pour la configuration de joint dans cette étude correspond au détail 45-4,3 ce qui correspond à une valeur de contrainte à 2 millions de cycles de 45 MPa et une valeur des pentes m_1 et m_2 de 4,3 et 6,3.

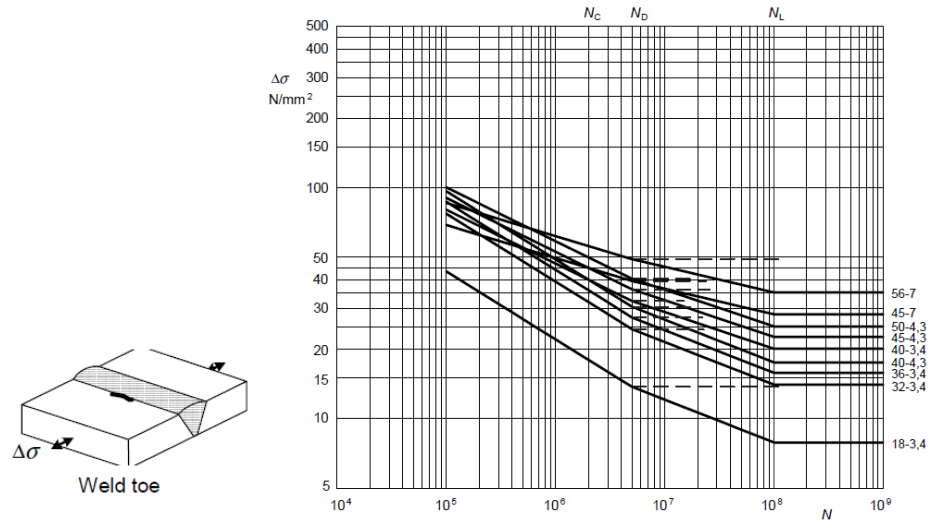


Figure 2.36 Détails de fatigue selon la norme Eurocode-9 [24]

3. Chapitre 3 : MÉTHODOLOGIE

La méthodologie du travail est élaborée de façon détaillée afin de mieux comprendre les stratégies qui ont été mis en place pour atteindre les objectifs du projet. Elle est illustrée à l'aide du schéma de la figure 3.1.

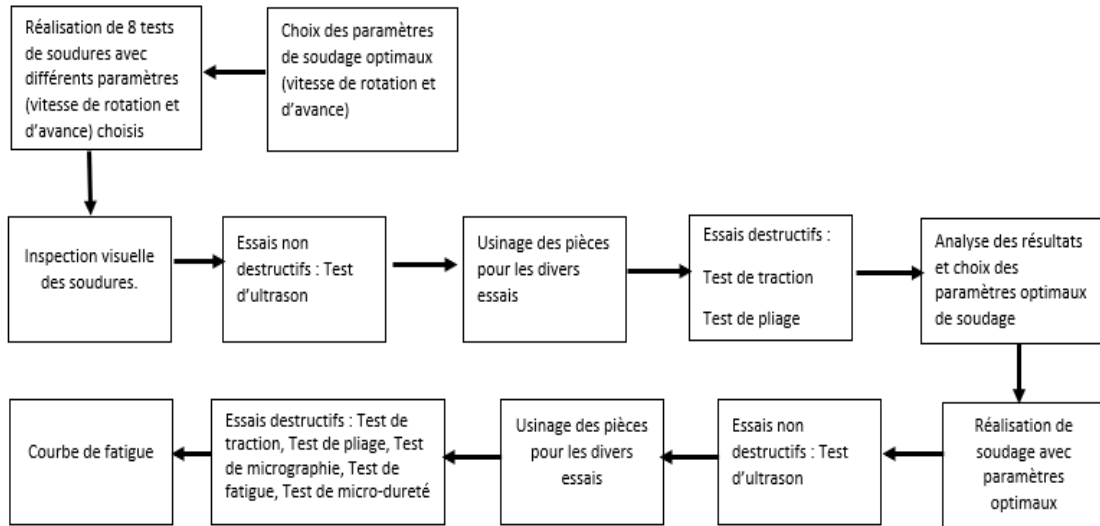


Figure 3.1 Méthodologie de l'étude

3.1 Optimisation des paramètres

L'optimisation des paramètres de soudage vise notamment la vitesse d'avance dans l'optique de diminuer le temps de fabrication éventuellement de tablier de pont par SFM. Dans cette étude, le choix des paramètres a été établi en fonction des connaissances acquises par l'analyse bibliographique et l'expérience des intervenants. Durant cette étape, les soudures ont été validées à l'aide des méthodes d'inspection et d'acceptation décrites dans les sections précédentes. Le tableau 3.1 est un récapitulatif de quelques études avec les paramètres optimisés pour des soudures par friction malaxage avec le pion à double épaulement.

Tableau 3.1. Paramètre de friction malaxage selon la littérature

Auteurs	Alliages	Épaisseurs (mm)	Vitesse de rotation (rpm)	Vitesse de soudage (mm/min)
Elangovan and Balasubramanian [61]	AA6061-T6	6	1200	70
Trueba et Al [67]	AA6061-T6	8	450	508
Liu et al [63]	AA6061-T6	5	1500	800
Esmaily et al [66]	AA6005	10	500-900	500-1200
Chen S. et al [64]	AA6061-T6	8	350-700	10-170
Mohammed S. [65]	AA6061-T6	8	300-600	100-200
Zhe Liu et al. [63]	AA6061-T6	8	200-600	60-500

Le tableau 3.2 est un récapitulatif des différents paramètres de soudage utilisés afin de trouver ceux qui sont optimaux. Le décalage linéaire a été noté pour chacun des essais afin d'en évaluer l'impact sur la qualité de la soudure. C'est la différence de hauteur entre les deux extrusions. Cette valeur a été notée avant le début du soudage.

Tableau 3.2 Paramètres de soudage réalisés

Indice	Vitesse de rotation (tr/min)	Vitesse d'avance (mm/min)	Décalage linéaire (mm)	Facteur k (mm/tr)
Essai 1	400	400	0,4	1
Essai 2	500	500	0,7	1
Essai 3	600	600	0,5	1
Essai 4	850	650	0,5	0,8
Essai 4-2	500	500	0,5	1
Essai 10	800	800	1,3	1
Essai 10-2	800	800	0,5	1
Essai 1-2	850	650	1,4	0,8

La qualité de la soudure dépend de la vitesse de la rotation de l'outil, car cela a un impact sur la température maximale obtenue dans la zone soudée, donc sur la qualité finale

du joint. Le rapport k est le ratio de la vitesse d'avance sur la vitesse de rotation est un rapport de chaleur et est un indicateur clé du taux de refroidissement obtenu durant le soudage. Certaines études comme celle de Esmaily et al [66] ont permis de mettre en évidence que lorsque la vitesse de rotation est trop élevée, 900 rpm pour 10 mm d'épaisseur d'extrusion d'aluminium, cela génère une hausse de la température dans le joint dû à l'effet des deux épaulements du pion à double épaulement (bobbin tool). À des vitesses de rotation trop faibles, il peut y avoir l'apparition des défauts comme les trous de vers dû à une insuffisante plasticité du matériel comme le conclut l'étude Zhou et al [62]. La figure 3.2 illustre le type d'extrusion utilisé pour l'étude ainsi que les dimensions de celle-ci. Des extrusions de forme I de 8 mm d'épaisseur ont été utilisées, car le présent travail se veut d'étudier la fatigue des joints soudés pour les tabliers de pont. Les poutrelles en I ont été utilisées en représentation des tabliers de pont. L'alliage AA6061-T6 a été utilisé, car en raison des propriétés que cet alliage présente (détail dans la section 2.2) et en raison du fait que c'est l'alliage le plus utilisé en ingénierie civile.

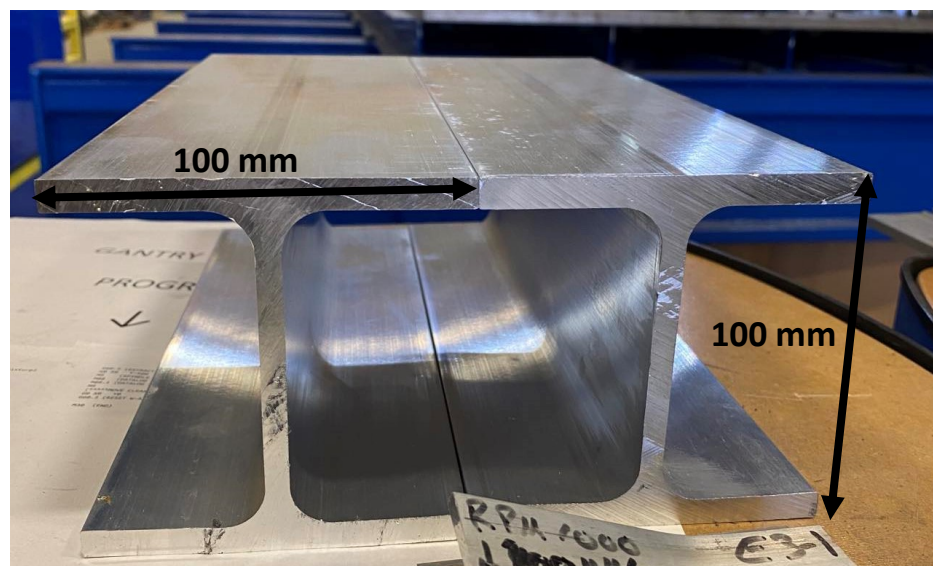


Figure 3.2. Extrusion d'aluminium d'alliage AA6061-T6

3.1.1 Matériel de soudage par SFM

La machine utilisée pour souder les pièces en SFM est un équipement de type portique GG7 de Bond Technologies (figure 3.3) qui a les caractéristiques suivantes :

- Épaisseur maximale de soudure : 15 mm ;
- Longueur maximale soudable : 19,3 m ;
- Largeur maximale soudable : 3,5 m;
- Vitesse de rotation maximale : 3000 rpm;
- Vitesse d'avance maximale : 6000 mm/min;
- Force maximale applicable : 65 000 N.



Figure 3.3 Équipements pour la soudure par SFM [59]

Afin de réaliser le soudage, un système de bridage est utilisé pour maintenir les pièces. C'est une partie très importante, car les efforts générés durant le SFM sont plus élevés que pour le soudage par fusion. Le système de bridage selon l'axe XY est illustré à la figure 3.4 composée d'un bridage mobile d'une part et rigide d'une autre afin d'avoir un degré de liberté dans la direction transversale. Un système trop rigide peut entraîner une déformation des pièces avant même l'opération de la soudure. Il permet d'éviter l'écartement des pièces et

d'éviter le glissement des pièces pendant l'opération de soudage. En effet, ce système permet de contrer la force transversale qui est appliquée durant le soudage. Les brides (Figure 3.4) permettent quant à elle d'éviter le soulèvement des pièces dû à la force appliquée. Si l'étape du bridage est mal réalisée, elle pourra avoir un impact important sur la qualité de la soudure [53].

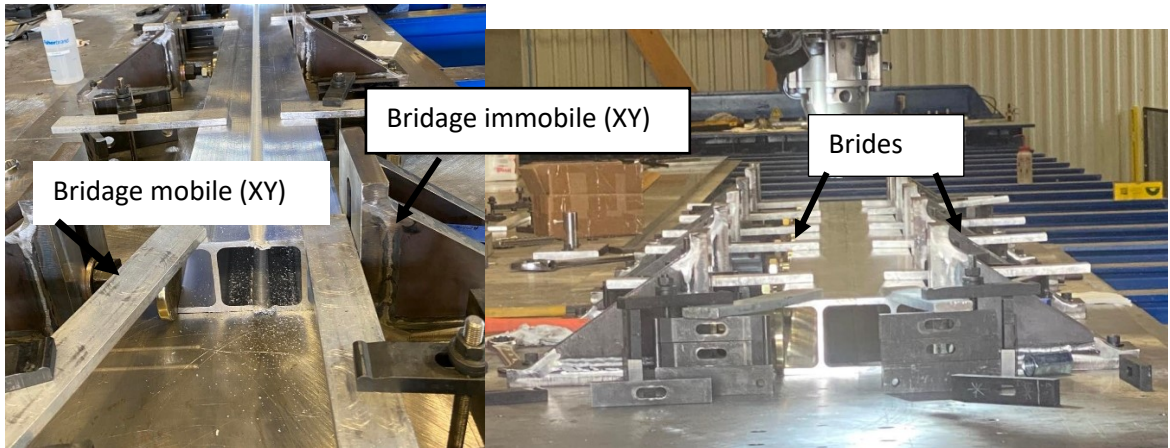


Figure 3.4 Système de bridage

Le pion à double épaulement fixe utilisé est un type de pion conique fileté illustré à la figure 3.5. Il peut souder une épaisseur maximale de 12 mm.

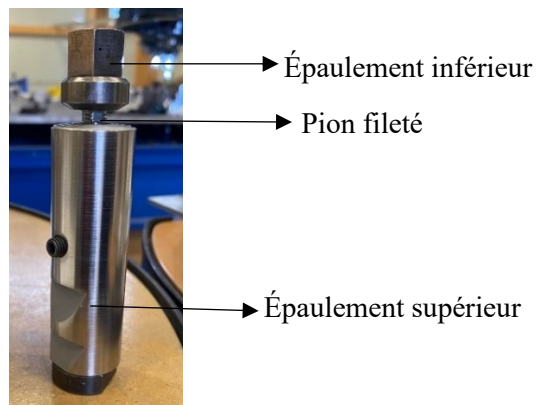


Figure 3.5 Pion à double épaulement utilisé pour le soudage

3.1.2 Plan d'usinage des éprouvettes

L'usinage des pièces est réalisé afin de pouvoir faire les divers essais de qualification. Selon la norme ISO 25239 [20], pour réaliser le test de qualification d'une soudure, il faut faire deux tests de pliage, deux tests de traction, un test de métallographie et en option, un test non destructif (ex. ultrason). Selon cette même norme, une zone de rejet d'un minimum de 50 mm est utilisée au départ et à la fin de l'échantillon final soudé. Cette zone est considérée comme une zone potentielle non constante des paramètres de soudage. Les échantillons ont été retirés dans les ailes des extrusions soudées. La figure 3.6 est celle du plan d'usinage pour les tests de qualification. Les échantillons pour les divers tests ont été usinés dans la direction transversale de la soudure comme l'illustre la figure 3.7.

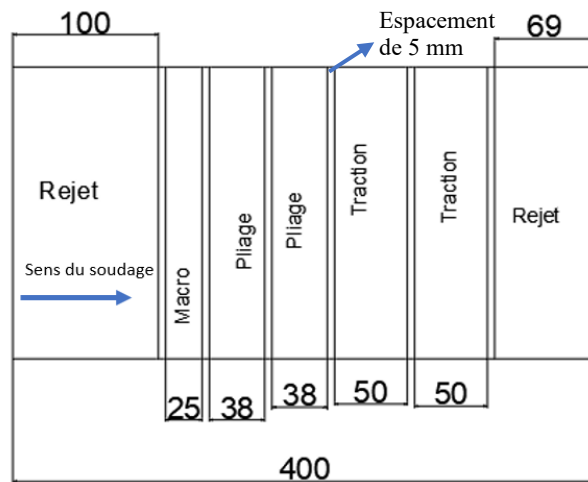


Figure 3.6 Plan d'usinage pour les tests de qualification (dimensions en mm)

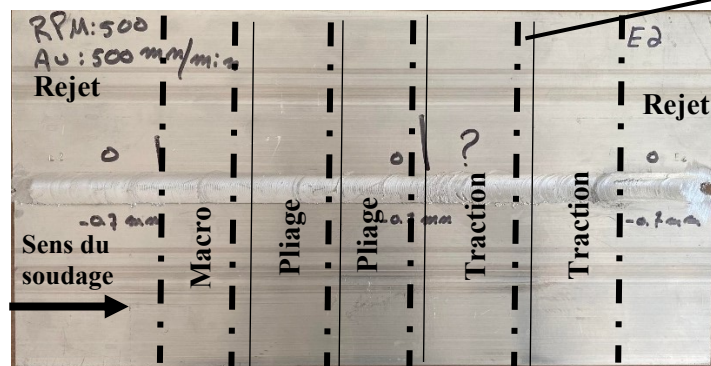


Figure 3.7. Illustration du plan d'usinage sur les extrusions soudées

Cette opération a été effectuée de part et d'autre de l'extrusion soudée. Dans la figure 3.6 et 3.7, il est possible d'observer un espacement de 5 mm entre chaque échantillon. Cet espacement est une contrainte due à la machine d'usinage de l'Université du Québec à Chicoutimi. Les tests de qualifications ont été utilisés pour l'optimisation des paramètres de soudage. Pour les tests de qualification, deux extrusions de 400 mm ont été soudées. Ces tests ont permis de valider la qualité des soudures et de sélectionner les meilleurs paramètres de soudage qui ne donnaient pas de défauts. Pour les tests finaux, les plans d'usinage sont représentés à la figure 3.8 et à la figure 3.9. Pour les tests finaux, deux extrusions de 3,3 m ont été soudées avec les paramètres optimisés qui ont été choisis à la suite des tests de qualification. De cette extrusion soudée ont été extraits un morceau de 500 mm au centre, un morceau de 300 mm à partir du début de la soudure et un morceau de 300 mm à partir de la fin de la soudure à des fins d'usinage.

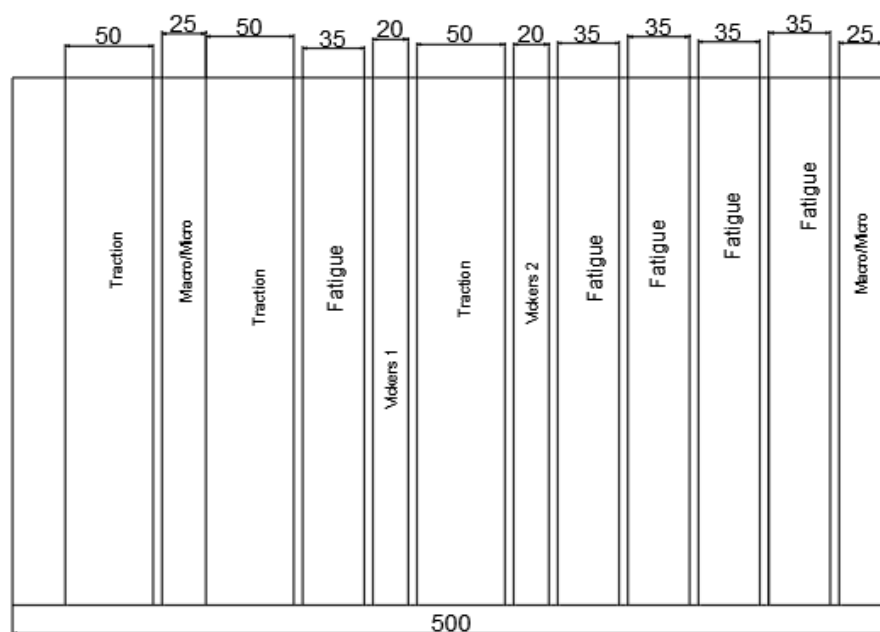


Figure 3.8 Plan d'usinage pour les tests finaux au centre de l'extrusion (dimensions en mm)

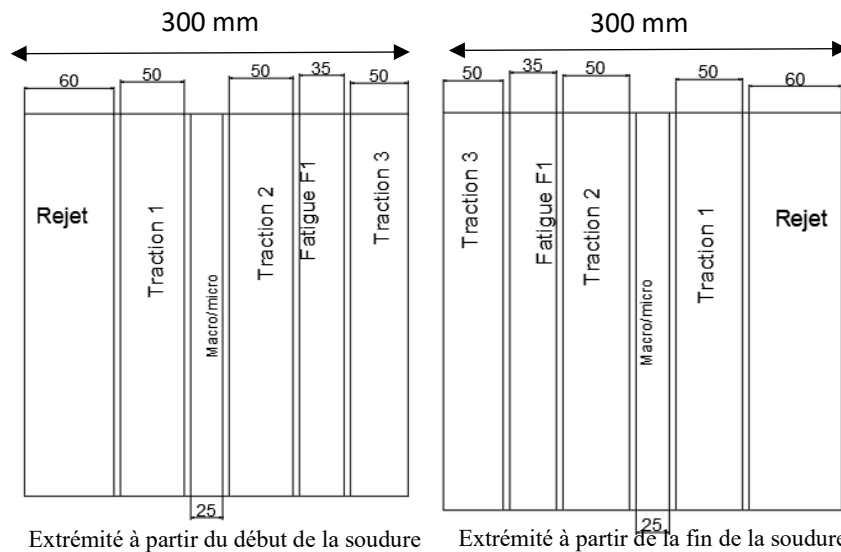


Figure 3.9 Plan d'usinage pour les tests finaux aux extrémités de l'extrusion (dimensions en mm)

3.2 Essais de traction

Pour la qualification des soudures, deux éprouvettes sont prélevées de l'extrusion soudée pour les essais de traction. Concernant le critère d'acceptation des essais de traction selon l'ISO 25239 [20], pour des alliages traités thermiquement dont l'épaisseur est supérieure à 5 mm, le coefficient de joint qui est le rapport entre la résistance à la traction de la soudure et la résistance à la traction du métal de base doit être minimalement de 0,60. Selon la norme américaine AWS D1.2 [44], les dimensions standards de l'éprouvette sont illustrées à la figure 3.10:

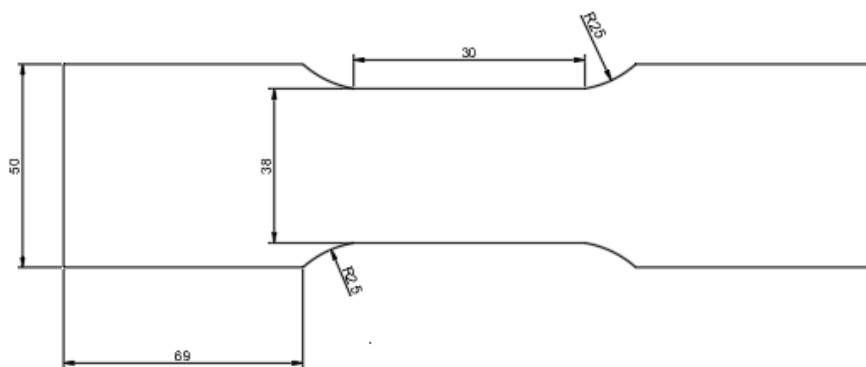


Figure 3.10 Exemple d'éprouvette de traction (dimension en mm)

3.3 Matériels utilisés pour essais de traction

3.3.1 Le pied de coulisse

Le pied de coulisse qui a été utilisée pour réaliser les mesures est de modèle IDI, de numéro de série GS35730 avec une précision 0,01 mm (figure 3.11). Les mesures de l'épaisseur et de la largeur de chaque échantillon ont été réalisées avant le début de l'essai.



Figure 3.11 Pieds de coulisse [54]

3.3.2 L'extensomètre

Un extensomètre a été utilisé pour mesurer les déformations de la section réduite. Le modèle utilisé est de la marque MTS de numéro de modèle 632.24.F-50 et de numéro de série 1382940 (figure 3.12). La longueur de la jauge est de 25 mm et le niveau de précision est de 0,001 mm. L'extensomètre est placé au centre de la section réduite avant le début de l'essai.



Figure 3.12 Modèle d'extensomètre [55]

3.3.3 Presse servo-hydraulique pour essai de traction

La machine utilisée pour l'essai de traction (figure 3.13) est une presse (MTS), de modèle Alliance RT avec une capacité de 100 KN. La précision sur la force appliquée est de ± 1 KN. La machine est composée de plusieurs éléments, dont une cellule de charge, un

système hydraulique, un système électrique, un système d'acquisition des données. La vitesse de charge appliquée pour l'essai est de 1,5 mm/min. Cette vitesse a été obtenue en se basant sur la longueur de l'extensomètre et l'ordre de déformation. Cette vitesse permet d'obtenir des déformations de l'ordre de 10^{-3} .

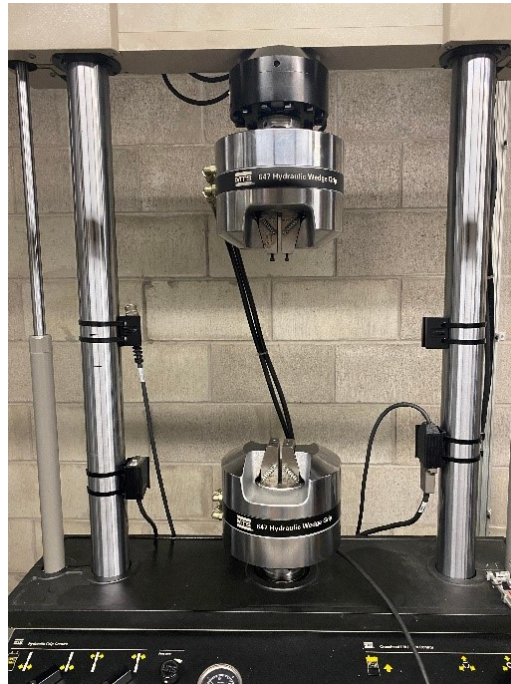


Figure 3.13 Presse servo-hydraulique pour test de traction

3.3.4 Méthode de calcul de la limite élastique, l'allongement à la rupture et du pourcentage d'efficacité du joint.

- **Limite élastique (F_y)**

La limite élastique est calculée en se basant sur la méthode de calcul de la norme ASTM E8/E8M [56]. D'abord, plusieurs points sont choisis dans la partie linéaire de la courbe contrainte déformation (partie élastique) pour construire une droite. Cette droite doit avoir comme pente le module de Young de l'aluminium qui est d'environ de 70 GPa (70000 MPa). Puis, il faut tracer une droite avec une pente égale au module de Young qui passe par l'abscisse 0,2% (axe des x). La figure 3.14 montre un exemple d'une courbe complète

contrainte-déformation obtenue. L'intersection entre la droite orange à 0,2% et la courbe contrainte déformation a permis d'obtenir la valeur de la limite élastique (F_y) qui donne une valeur de ≈ 108 MPa. Cette méthode de calcul a été adoptée pour le calcul de la limite élastique pour tous les tests de traction.

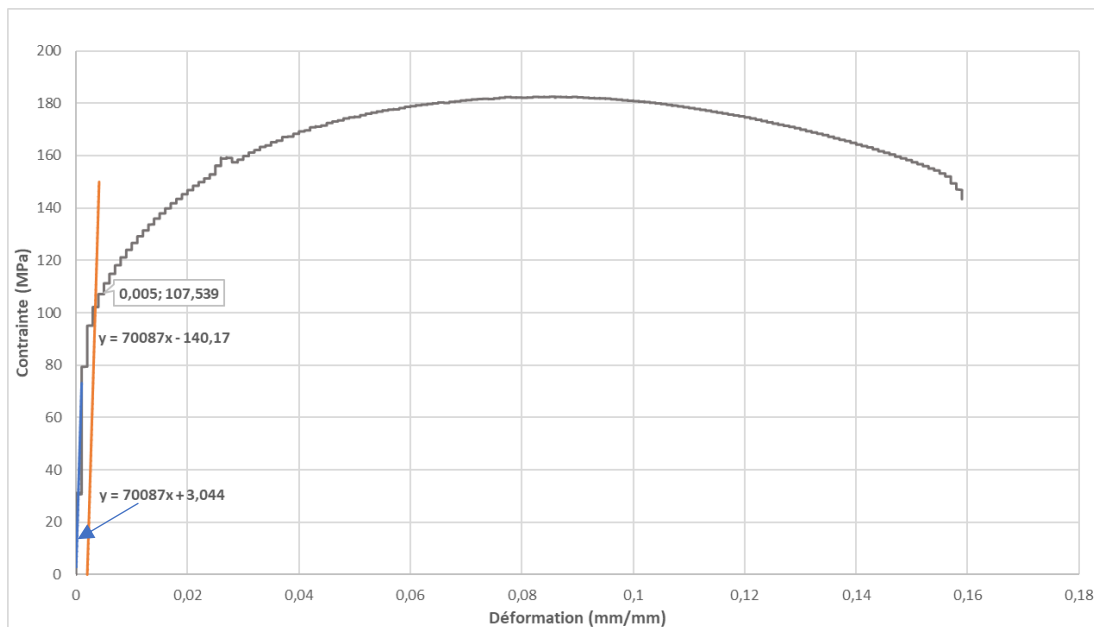


Figure 3.14 Courbe contrainte déformation avec pente du module de Young

- **Pourcentage d'allongement à la rupture (Δl)**

Le calcul de la valeur de l'allongement à la rupture est évalué conformément à la norme ASTM E8 [56]. En effet, cette valeur correspond à l'allongement (Δl) lorsque la contrainte maximale (F_u) subit une baisse de 10%. Dans cette étude, la valeur de baisse de la contrainte maximale est calculée suivant l'équation (3.1):

$$Fu_{10\%} = Fu - (10\% * Fu) \quad (3.1)$$

où

F_u est la valeur de la contrainte ultime

$Fu_{10\%}$ est 90% de la valeur de la contrainte ultime

Le pourcentage d'allongement est calculé quant à lui est calculé suivant l'équation (3.2) :

$$\% \Delta l = \left(\frac{\Delta l}{l_{ext}} \right) * 100 \quad (3.2)$$

où

Δl est la valeur de l'allongement à la rupture

l_{ext} est la valeur de la longueur de l'extensomètre

- **Pourcentage d'efficacité du joint.**

Le pourcentage d'efficacité du joint est la valeur du rapport de la valeur de la limite ultime du joint par rapport à celui du métal de base. Il se calcule suivant l'équation (3.3) :

$$\%_{eff. joint} = \left(\frac{Fu_{joint}}{Fu_{m\acute{e}tal de base}} \right) * 100 \quad (3.3)$$

où

Fu_{joint} est la limite ultime du joint

$Fu_{m\acute{e}tal de base}$ est la limite ultime du métal de base.

3.4 Essais de pliage

L'essai de pliage est un test qui consiste à soumettre une éprouvette à une déformation plastique par pliage. L'éprouvette est pliée jusqu'à l'obtention d'un angle spécifique. Dans ce cas, l'angle de pliage est de 180 degrés [22]. Le test de pliage requis est un pliage envers. Dans ce cas, la racine de la soudure est placée vers l'ouverture. Cet essai permet de mettre en évidence les fissures ou des discontinuités qui débouchent à la surface. Pour la qualification de la soudure, la norme ISO 25239 requiert 2 échantillons pour cet essai [22]. La figure 3.15 illustre les dimensions de l'éprouvette de pliage.

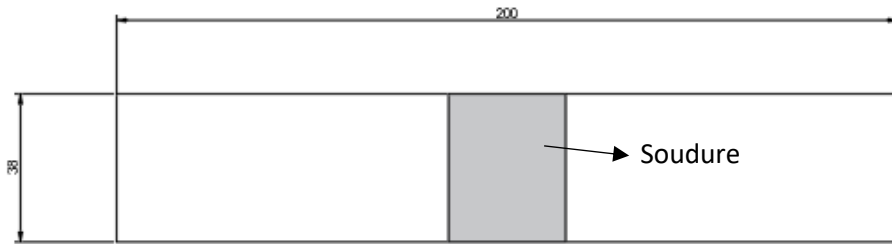


Figure 3.15 Éprouvette des essais de pliage selon la AWS D1-2 [44] (dimension en mm)

L'essai de pliage permet de détecter des défauts comme les défauts à la racine de la soudure. Les côtés d'avance et de recul doivent être marqués avant l'essai de pliage. Pour un allongement (allongement du métal de base) supérieur à 5%, on applique la formule suivante pour le diamètre du poinçon à utiliser pour l'essai [22]. L'équation (3.4) permet de calculer le diamètre minimal du poinçon :

$$d = \frac{100 * ts}{\Delta l} - ts \quad (3.4)$$

Où

d est le diamètre du poinçon

ts est l'épaisseur de l'échantillon

Δl est l'allongement du métal de la base en pourcentage

Pour réaliser l'essai, un poinçon de diamètre de 50,8 mm (2 pouces) a été utilisé. Il est illustré à la figure 3.16 :



Figure 3.16 Poinçon utilisée pour essai de pliage

3.5 Analyse par ultrasons

L'analyse par ultrasons a été réalisée en mode multi-éléments avec une sonde plane de 10 MHz avec un système Sonatest manuel (figure 3.17-1) et une sonde focalisée de 10 MHz dans un bain d'immersion avec un système automatisé Tecscan (figure 3.17-2). Le bain d'immersion peut être utilisé pour des longueurs d'échantillons maximums d'un (1) mètre. Pour des longueurs supérieures à 1 mètre, la sonde manuelle doit être utilisée.

Pour la sonde manuelle, c'est une méthode de détection par contact. En effet, il faut utiliser un gel qui sert de liant entre le matériel et la sonde ce qui facilite son passage et la détection des défauts. Cette méthode permet de visualiser les résultats en deux dimensions selon une vue transversale ou longitudinale. Il existe plusieurs types de sondes dépendamment du type de défauts qui veut être observé et de la fréquence de la sonde.

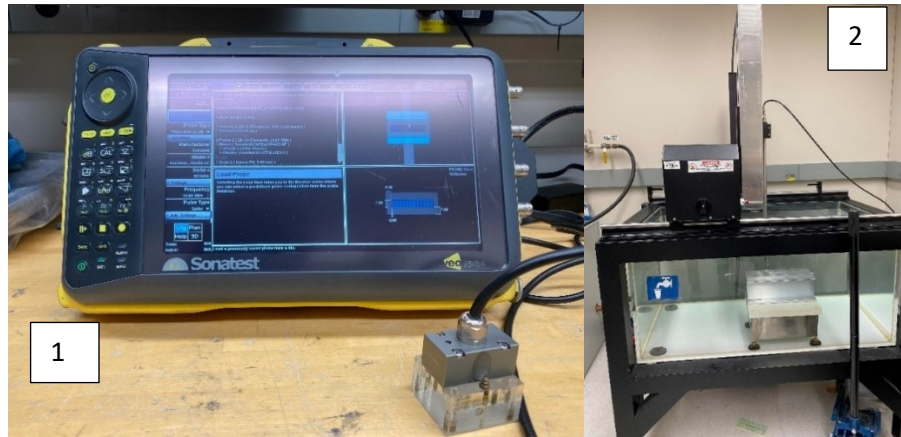


Figure 3.17 Matériel utilisé pour test ultrason : système manuel Sonatest (1) et système automatisé Tecscan en bain d'immersion (2)

Le résultat du test d'ultrason se présente tel que représenté à la figure 3.18.

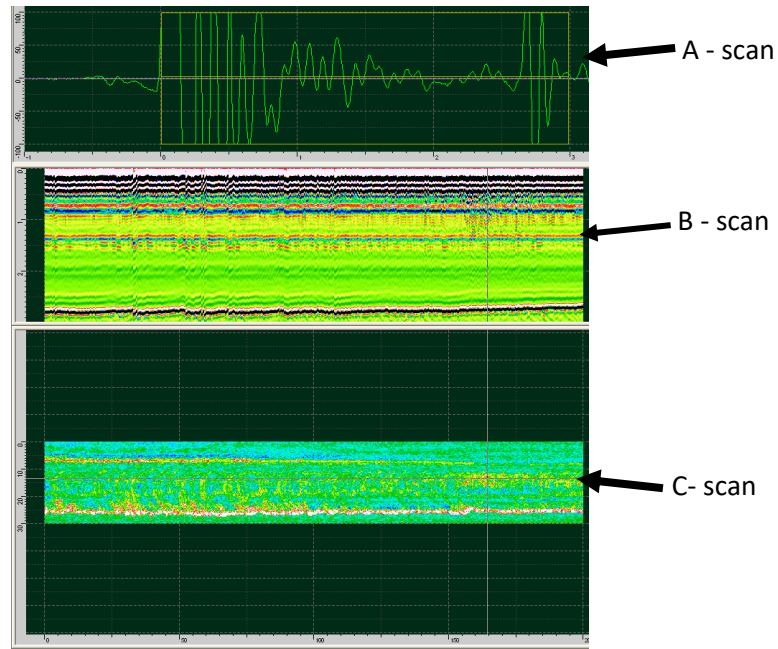


Figure 3.18 Résultats du test d'ultrason

La figure ci-dessus permet d'observer plusieurs aspects de la soudure vus par ultrason. La première partie appelée A-scan est une représentation graphique de l'amplitude en fonction du temps. C'est une représentation unidimensionnelle qui permet d'afficher la réponse du faisceau sonore pour une position donnée de la sonde. Lorsque l'amplitude est à son pic (100%), cela représente une zone d'instabilité aussi appelée zone de bruit. En excluant cette zone de perturbation, il est possible de distinguer une zone à faible amplitude qui est la zone de soudure. Si dans cette zone on constate un pic d'amplitude apparent, cela peut indiquer la présence d'un défaut ou toute autre perturbation s'assimilant à un défaut.

Le B-scan est comparable à un film radiographique dans lequel les détails externes sont projetés sur le plan de l'interface. Les réflexions du défaut sont les seules qui sont projetées. C'est une vue plane de l'objet à tester. Un système de coordonnées a été créé selon les axes O_x et O_y qui indiquent la position du défaut. L'amplitude de l'écho ou de la profondeur du défaut peut être affichée par un changement d'intensité de couleurs.

L'affichage C-scan montre la vue dessus de la soudure. Elle permet de voir le haut et le bas de la soudure et ainsi voir les défauts existants lorsque la sonde se déplace le long de l'axe de la soudure. Cette représentation est avantageuse, car elle permet de révéler la position en profondeur du défaut sous la surface. Sur l'écran de la machine d'acquisition des données, une intensité de couleur ou d'échelle de gris est utilisée pour afficher l'amplitude de l'écho. Lorsque la soudure est uniforme sans défaut, une uniformité de couleur est visible dans le C-scan. Lorsque la soudure présente des défauts, des points de couleur rouge sont observés dans le C-scan.

3.6 Principe de réalisation de l'essai de fatigue

3.6.1 Méthode de calcul des dimensions de l'éprouvette

L'essai de fatigue est réalisé en se basant sur la norme ASTM E466 [72]. L'essai de fatigue par force axiale est utilisé pour déterminer l'effet des matériaux, de géométrie, d'état de surface, de contrainte, etc. Dans cet essai, la résistance à la fatigue des matériaux métalliques est obtenue dans un régime de fatigue où les déformations sont élastiques à la fois lors du chargement initial et tout au long de l'essai [72]. La figure 3.19 est une représentation de la géométrie standard d'une éprouvette de fatigue selon la norme ASTM E466 [72]. De cette norme, il est possible de déterminer les dimensions de l'éprouvette de fatigue en fonction de la largeur (w) et de l'épaisseur (t) comme l'indique l'équation (3.5).

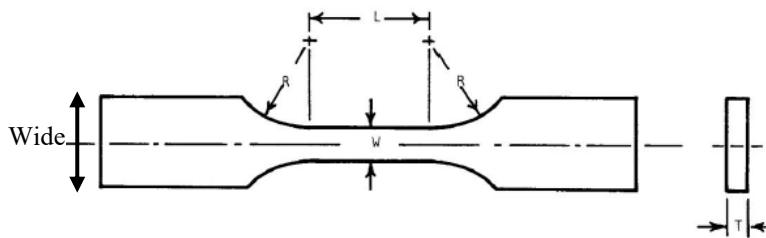


Figure 3.19 Éprouvette standard selon la ASTM E466 [72]

$$2 < \frac{Wide}{t} < 6 \quad (3.5)$$

où

Wide est la largeur de l'éprouvette et *t* son épaisseur qui est de 8 mm.

De l'équation 3.5 :

$$2 * t < Wide < 6 * t$$

$$16 \text{ mm} < Wide < 48 \text{ mm}$$

La largeur de l'échantillon choisi est de **35 mm**.

Selon la norme ASTM E466, l'aire de la section réduite est comprise entre 19,4 mm² et 645 mm². Elle est calculée selon l'équation (3.6).

$$19,4 \text{ mm}^2 \leq W \times L \leq 645 \text{ mm}^2 \quad (3.6)$$

où

W est la largeur de la section réduite

L est la longueur de la section réduite

Selon la norme ASTM E466, la longueur de la section réduite doit être deux à trois fois sa largeur [58]. Il est question d'évaluer les cas de figure : lorsque la longueur (*L*) est égale à deux fois la largeur (*W*) et lorsque la longueur (*L*) est égale à trois fois la largeur (*W*).

- Cas 1 : ($L = 3 \times W$)

L'aire de la section à pour formule (section rectangulaire) : $L \times W$.

L'équation (3.6) devient :

$$19,4 \text{ mm}^2 \leq 3 \times W^2 \leq 645 \text{ mm}^2$$

$$2,54 \text{ mm} \leq W \leq 14,66 \text{ mm}$$

La valeur de la longueur est :

$$7,62 \text{ mm} \leq L \leq 43,98 \text{ mm}$$

La largeur de la section réduite (*W*) choisie est de **14 mm**.

La longueur de la section réduite (L) est donc de **42 mm**.

- Cas 2 : ($L = 2 \times W$)

L'équation (3.6) devient :

$$19,4 \text{ mm}^2 \leq 2 \times W^2 \leq 645 \text{ mm}^2$$

$$3,11 \text{ mm} \leq W \leq 17,96 \text{ mm}$$

La valeur de la longueur est :

$$6,23 \text{ mm} \leq L \leq 35,92 \text{ mm}$$

La largeur de la section réduite (W) choisie est de **17 mm**.

La longueur de la section réduite (L) est donc de **34 mm**.

Les valeurs du #cas 1 ont été choisies pour réaliser les dimensions l'éprouvette. Les valeurs des dimensions sont également dépendantes de la machine qui sera utilisée pour les essais.

La figure 3.20 est une représentation de la géométrie de l'éprouvette de fatigue utilisée pour les essais.

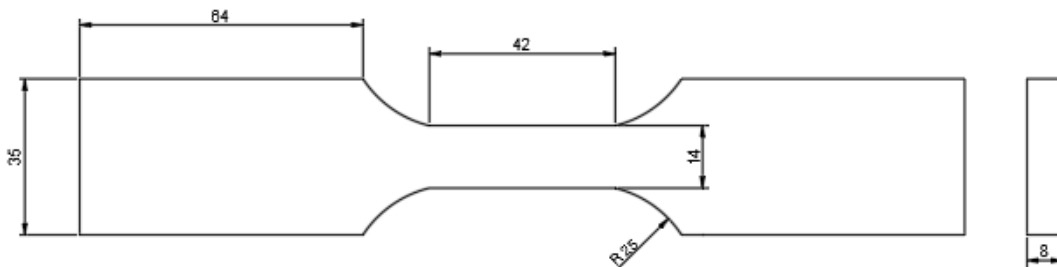


Figure 3.20 Exemple d'éprouvette de fatigue (dimensions en mm)

3.6.2 Paramètres pour les tests de fatigue

Pour réaliser les tests de fatigue, un lot de 23 échantillons seront testés. Selon la norme IIW [23], pour une bonne analyse statistique de la fatigue, il faut un minimum de 10 échantillons testés. Les éprouvettes sont testées pour des cycles visés entre 500 000 et 25 millions de cycles. L'amplitude de contrainte est évaluée en fonction des catégories de

conception des normes en vigueur. Ces valeurs peuvent être réajustées au cours de l'essai. Le calcul de la force appliquée est évalué en fonction de la contrainte et de l'aire de la section réduite selon l'équation (3.7).

$$F = \sigma \times A \quad (3.7)$$

Où

F est la force appliquée

σ est la contrainte

A est l'aire de section.

L'aire de section qui reprend la force est déduite des dimensions de l'éprouvette de fatigue. Elle est évaluée selon l'équation (3.8).

$$A = W * t \quad (3.8)$$

où

A est l'aire de la section

W est la largeur de la section critique de l'éprouvette (14 mm)

t est l'épaisseur de l'éprouvette (8 mm)

Les valeurs de la contrainte moyenne, de la contrainte alternée et de l'amplitude ont été calculées à l'aide des équations (2.1), à (2.4). Les paramètres de fatigue sont résumés dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3 Paramètres pour essais de fatigue

Identification de l'éprouvette	Contrainte (MPa)	Force max (kN)	Force min (kN)	Contrainte moyenne σ_m (MPa)	Amplitude $\Delta\sigma$ (MPa)	Contrainte alternée σ_a (MPa)	Fréquence (Hz)
FF1	140	16	2	77	126	63	30
FM3	120	13	1	66	108	54	30
FM4	100	11	1	55	90	45	30
FM7	115	13	1	63	104	52	30
FM8	115	13	1	63	104	52	30
FM10	120	13	1	66	108	54	30
FM11	110	12	1	61	100	50	30
FM12	120	13	1	66	108	54	30
FU9	125	14	1	69	113	56	30
FU4	130	15	2	72	112	59	30
FU2	145	16	2	80	131	65	30
FU1	135	15	2	74	122	61	30
FU6	130	15	2	72	112	59	30
FU7	140	16	2	77	126	63	5
FL1	155	17	2	85	140	70	5
FL2	155	17	2	85	140	70	5
FL3	150	17	2	83	135	68	5
FL4	150	17	2	83	135	68	5
FL6	145	16	2	80	131	65	5
FL7	140	16	2	77	126	63	5
FL8	140	16	2	77	126	63	5
FL9	135	15	2	74	122	61	5
FL5	105	12	1	58	98	47	5

3.6.3 Machines utilisées et réalisation des essais de fatigue

Afin d'optimiser le temps des essais de fatigue, les essais ont été réalisés à plusieurs endroits soit à l'Université du Québec à Chicoutimi, à l'Université Laval et au CNRC sur le site de Winnipeg. Les essais réalisés au CNRC et à l'Université du Québec à Chicoutimi ont été réalisés à des fréquences de 30 Hz. Quant aux essais réalisés à l'Université Laval, ils ont été réalisés avec une fréquence de 5 Hz parce que la machine utilisée ne pouvait pas aller au-delà de cette valeur. Il a fallu réduire la largeur des échantillons afin qu'ils puissent être installés dans les mors de la machine utilisée à l'Université Laval. Les échantillons avaient

une largeur de 25 mm au lieu de 35 mm comme pour les autres essais. La réduction de la largeur n'avait pas d'impact sur les dimensions de la section réduite qui sont restées les mêmes sur tous les échantillons.

À l'Université du Québec à Chicoutimi, la machine utilisée est une machine servo hydraulique INSTRON 8801 à chargement sinusoïdal d'amplitude constante (figure 3.21). Le cycle traction-compression est appliqué à l'échantillon à température ambiante jusqu'à la rupture. La machine est programmée pour stopper l'essai à des cycles de 10^7 . Pour des échantillons qui n'auront pas atteint la rupture une fois cette valeur de cycle atteinte sera considérée comme des échantillons ayant une limite d'endurance infinie [9].



Figure 3.21 Machine d'essai de fatigue INSTRON 8801

Pour l'essai de fatigue réalisé au CNRC de Winnipeg, la machine utilisée est une presse MTS 370.10 Landmark avec une cellule de charge de 100 kN et un logiciel MTS Flex Test 60 (figure 3.22).



Figure 3.22. Machine d'essai de fatigue MTS 370.10

Pour les essais de fatigue réalisés à l'Université Laval, la machine utilisée est de type Force Transducer, modèle 661 20 E-03 Version 3 avec une capacité de 100 kN (figure 3.23). Pour l'usage de cette machine, il a fallu réduire la taille de la largeur de l'éprouvette à 25 mm. La réduction de la largeur de l'éprouvette n'a pas eu d'impact sur les dimensions de la zone critique de l'éprouvette qui était la zone cible de l'essai.

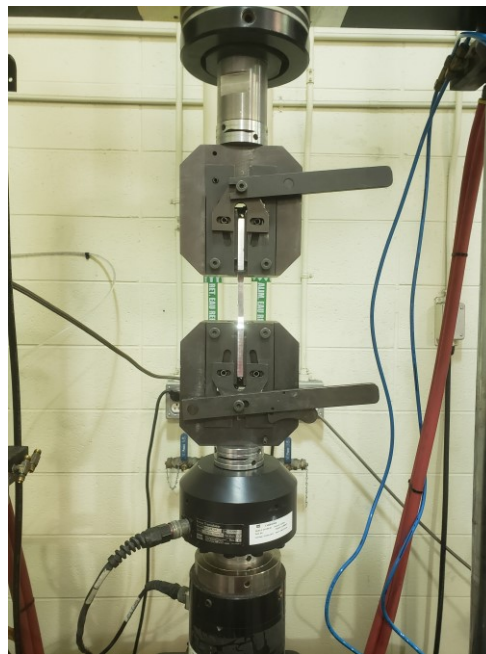


Figure 3.23. Machine d'essai de fatigue Force Transducer

La première étape de réalisation de l'essai est le polissage des côtés de l'échantillon (section réduite) à l'aide de papier monté sur un outil rotatif jusqu'à obtention d'un fini de surface miroir. Le polissage permet de retirer les imperfections et les irrégularités de surface sur les côtés et éviter une amorce de fissures non causée par la soudure SFM. Cette étape a été réalisée au CNRC de Chicoutimi. Il a été remarqué que les échantillons usinés présentaient des déformations importantes dues à la présence du décalage linéaire présent avant le soudage (voir figure 3.24).



Figure 3.24. Échantillon de fatigue avec un défaut de planéité.

En effet, avant la réalisation du soudage, un décalage linéaire avait été observé comme on peut le voir à la figure 3.25 sur la face 2 ce qui correspond environ à une hauteur 0,05 mm par rapport à la surface plane. Ce défaut a donc persisté après le soudage. En effet, à la figure 3.26, sur la face 2, il est possible d'observer que ce défaut n'a pas pu être corrigé étant donné la rigidité importante des extrusions.

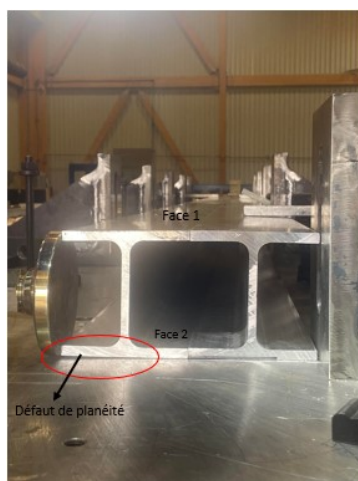


Figure 3.25. Extrusion non soudée

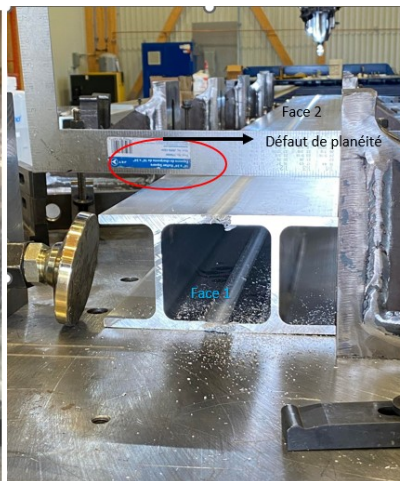


Figure 3.26. Extrusion après soudage

Avant les essais, les largeurs et épaisseurs ont été mesurées dans la section la plus petite de la soudure à l'aide d'un pied à coulisse. Afin d'atteindre les contraintes visées entre 100 MPa et 140 MPa, la force a été calculée dans la section la plus petite de la soudure. Un ratio de contrainte de 0,1 a été appliqué pour l'essai c'est-à-dire que l'application de la force s'est faite selon une courbe sinusoïdale alternant entre 10% et 100% de la force maximale. Les échantillons sont installés entre les mors hydrauliques qui sont alimentés par une pression de 10,3 MPa (1500 PSI). Dans le but de limiter l'application de moments de flexion durant l'essai, l'espacement entre les mors a été ajusté afin de serrer sur les sections les moins épaisses des têtes des échantillons. Un butoir a été utilisé pour assurer le centrage des échantillons. Pour causer l'arrêt de l'essai lorsqu'une fracture survient, des limites déplacement ont été imposés.

3.7 Métallographie

Les dimensions de l'échantillon selon la norme ASTM E3-11 varient entre 12 et 25 mm pour les échantillons rectangulaires [58]. Ce test permet de détecter tous les types de défauts (porosité, inclusions, fissures). La métallographie a été réalisée à l'aide d'un électrolyte chimique. L'attaque électrolytique de type Barker's (acide fluoborique HBF_4) est un procédé utilisé sur les matériaux faits d'aluminium avec une tension de 24 V et un temps de réaction de 1 à 2 minutes. Au cours de ce procédé, une couche anodisée est formée à la surface de l'échantillon préalablement poli et l'échantillon est mis en observation sous une lumière polarisée. Cette attaque nécessite un échantillon conducteur qui doit être homogène. L'échantillon sert d'anode dans une cellule électrochimique produisant ainsi l'enlèvement de la matière à la surface. L'avantage de cette technique est qu'il engendre moins de déformations et permet la visualisation des grains [60].

3.7.1 Matériel utilisé

Afin de réaliser le test de métallographie, plusieurs étapes de préparation sont requises. D'abord la phase de découpe des échantillons. À l'aide d'une scie électrique paramétrée, les échantillons ont été découpés à des largeurs d'environ 25 mm de long et de 8 mm de large. Ensuite, les échantillons sont enrobés dans de la résine verte. Cette étape dure 15 minutes. Elle est réalisée à l'aide la machine Struers illustrée à la figure 3.27. L'échantillon est placé sur la plateforme (1), puis glissé vers le bas. Il faut y insérer une à deux cuillérées (10 ml) de résine verte (2). Cette machine paramètre la force appliquée, le temps de chauffe et le temps de refroidissement. La machine est réglée de la façon suivante : une force de 30 N (3), un temps de chauffage de 6 min (4) et un temps de refroidissement de 9 min (5).

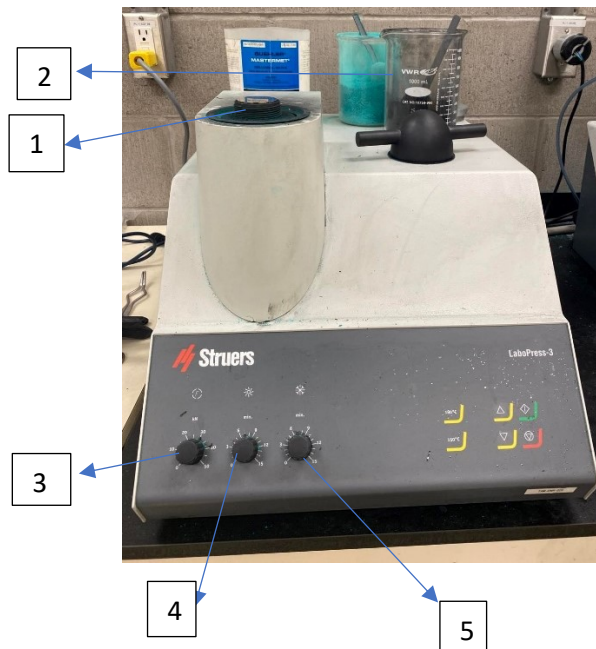


Figure 3.27 Machine pour enrobage des échantillons

L'étape suivante est l'abrasion des échantillons. Pour ce faire, plusieurs papiers abrasifs sont utilisés de façon séquentielle du plus abrasif au moins abrasif. D'abord, le papier de rugosité 120 μm est utilisé, puis le papier 360 μm , le papier 400 μm , le papier 600 μm et

enfin le papier 800 μm . La machine utilisée pour l'abrasion est représentée à la figure 3.28. La phase d'abrasion dure 3 minutes à 120 tours/min avec une force de 10 N sous jet d'eau. La dernière phase est la phase de polissage. Elle se fait en trois étapes. La première étape c'est le polissage des échantillons avec un tapis de polissage de 6 μm . Il faut pulvériser une solution diamantée de 6 μm et une solution lubrifiante sur le tapis. Cette étape dure 5 minutes à 150 tours/min avec une force de 10 N. Au cours de ces 5 minutes, il faut pulvériser la solution lubrifiante chaque 30 secondes. Puis les échantillons sont rincés à l'eau et l'éthanol et séchés à l'air pour passer à l'étape suivante. L'échantillon est ensuite poli au 1 μm par le même procédé. Enfin, l'échantillon est poli 0,5 μm . Cette étape dure 10 minutes à 150 tours/min avec une force de 10 N. On utilise uniquement la solution diamantée sans la solution lubrifiante. Toutes les 2 minutes, il faut activer le jet d'eau pendant 30 secondes et rajouter la solution diamantée jusqu'à la fin.

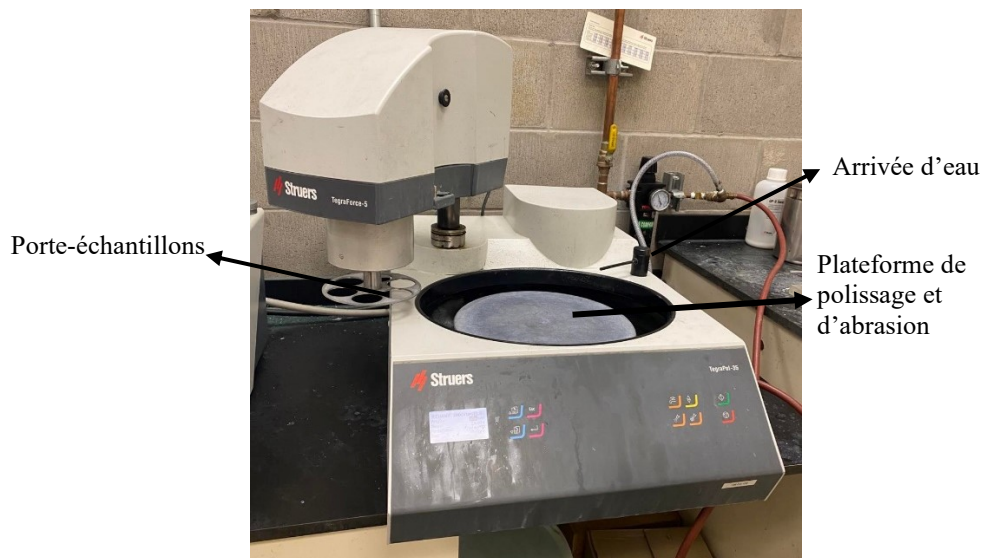


Figure 3.28 Machine d'abrasion et de polissage

3.8 Test de dureté Vickers

Le test de dureté Vickers permet de mesurer la dureté du matériau. Afin de le réaliser, il faut préparer l'échantillon comme décrit dans la section 3.7.1. Trois échantillons de 25 mm

de largeur ont été produits. La figure 3.29 est la représentation de la machine utilisée pour réaliser cet essai. Après avoir placé l'échantillon sur la plateforme (1), il faut ajuster la position des axes et l'objectif du microscope intégré (2). Pour l'essai, une force de 0.025 kgf est utilisée pour l'indentation de chaque point pendant 20 secondes. Sur chaque échantillon, une trentaine de points ont été testés.



Figure 3.29 Machine pour essai de dureté Vickers

4. Chapitre 4 : RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 Paramètres de soudage

Le tableau 4.1 résume les différents paramètres de soudages qui ont été utilisés pour les essais de qualification et d'optimisation des paramètres ainsi que le décalage linéaire associé. Le décalage linéaire est un défaut avec un critère d'acceptation selon la norme ISO 25239 [20] et la norme AWS D17.3 [19]. Ce critère est fonction de la classe choisie. La présente étude se rapportant au domaine des ponts, les classes les plus sévères sont utilisées soit les classes B pour la norme ISO et A pour la norme AWS D17.3. La norme ISO 25239 plus générale sera utilisée, car la norme AWS D17.3 se rapporte plus au domaine aérospatial et est beaucoup plus sévère.

Tableau 4.1 Tableau des paramètres de soudage

Indice	Vitesse de rotation (rpm)	Vitesse d'avance (mm/min)	Décalage linéaire (mm)
Essai 1 (E1)	400	400	0,4
Essai 2 (E2)	500	500	0,7
Essai 3 (E3)	600	600	0,5
Essai 4 (E4)	850	650	0,5
Essai 4-2 (E4-2)	500	500	0,5
Essai 10 (E10)	800	800	1,3
Essai 10-2 (E10-2)	800	800	0,5
Essai 1-2 (E1-2)	850	650	1,4

Le portique utilisé pour réaliser le soudage permet de mesurer la force selon les trois directions principales de la machine de SFM (O_x , O_y , O_z) et le moment. La force longitudinale est celle selon la direction O_y , la force de forgeage est la force verticale dans la direction O_z , la force transversale est la force dans la direction O_x . Ces forces ne sont pas appliquées avant l'essai, elles sont générées au cours de l'essai en fonction des paramètres de soudage appliqués. Ces données permettent une meilleure compréhension du processus. À l'aide de ces données, il est possible d'identifier des irrégularités ou des anomalies dans la

soudure. Pour ces essais de qualification et d'optimisation des paramètres, les valeurs moyennes des efforts générés variaient entre 0,5 kN et 2,5 kN pour les forces appliquées et le couple entre 50 et 70 N.mm. Ces données sont des valeurs moyennes provenant des graphiques illustrés à l'annexe 2. Les forces longitudinales et transverses ainsi que le couple étaient relativement constants pendant le soudage. Quant à la force de forgeage, elle présentait des inconstances (voir annexe 2). Pour les essais finaux, afin de souder l'extrusion de trois (3) mètres, une force de forgeage de 200 N a été appliquée afin d'améliorer la constance de la soudure. De la figure 4.1, il est possible d'observer une constante du procédé du soudage. En effet, de 0 à 3 mètres, le moment est de 60 N.m et une force de 400N comme force verticale. Pour la force transversale ainsi que la force longitudinale, entre 500 et 1000 mm, une irrégularité de la force est observable ce qui peut s'expliquer par un décalage linéaire entre les deux extrusions de 0.5 mm comme on peut l'observer à la figure 4.2.

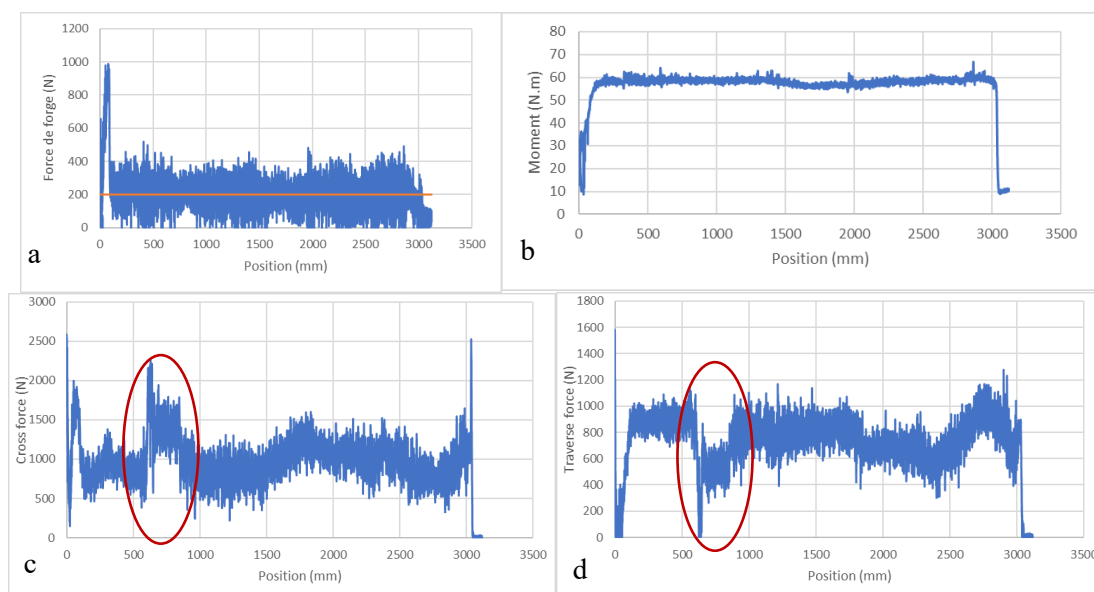


Figure 4.1. Force de forge (a), couple (b), force transversale (c) et force longitudinale (d)

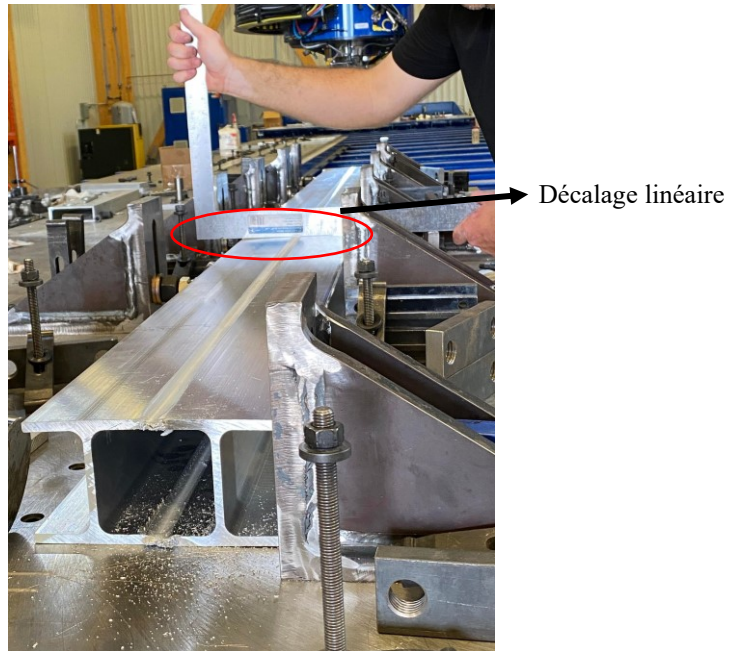


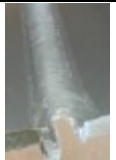











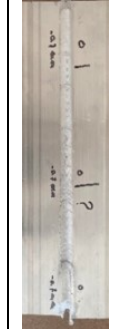



Figure 4.2 Illustration du décalage linéaire sur les deux extrusions soudées environ entre 500 mm et 1000 mm

4.2 Inspection visuelle des soudures

La première inspection qui est réalisée est celle visuelle, car elle permet de constater des bavures et des défauts flagrants apparents comme des grosses fissures. Les images du tableau 4.2 sont celles des observations des diverses soudures réalisées et identifiées dans les sections plus hautes.

Tableau 4.2 Observations visuelles des soudures

Soudure	E-1	E1-2	E-3	E-10	E10-2	E-4	E-2	E4-2
Paramètres de soudage (rpm-mm/min)	400-400	500-500	600-600	800-800	800-800	850-650	850-650	500-500
Décalage linéaire (mm)	0,4	0,7	0,5	1,25	0,5	0,5	1,4	0,5
Visuel des soudures (intérieur de l'extrusion)								
Visuel des soudures (Vue de dessus)								

Il est observable que les soudures qui présentent le plus de bavures sont celles nommées E1, E1-2, E-2 dont les paramètres sont respectivement 400 rpm-400 mm/min, 850 rpm-650 mm/min, 500 rpm-500 mm/min avec des décalages axiaux qui sont respectivement de 0,4 mm ; 1,4 mm ; 0,7 mm. De plus, en observant les prises de vues de dessus, il est visible qu'il n'y a pas de défauts apparents à l'exception des soudures E2 et E4 qui ne présentent pas de belles finitions et des légères bavures. Le décalage linéaire détecté est dû à la différence de hauteur entre les deux extrusions. En effet, la norme ISO 25239 admet un décalage linéaire inférieur ou égal à 0,8 pour les classe B, ces soudures seront donc rejetées. Ces bavures sont localisées du côté recul de la soudure et peuvent être causées par le décalage linéaire ou dues à un apport de chaleur élevé.

Un apport de chaleur élevé à de faibles vitesses de soudage produit un flux de matériau hors de la zone de joint lorsque l'outil commence à se déplacer ce qui est connu sous le nom de perte d'entrée ou sous forme de bavure [62]. Ce défaut peut être minimisé en

augmentant la vitesse de déplacement linéaire et en réduisant la vitesse de rotation. Par conséquent, des paramètres de processus optimaux sont essentiels pour générer une chaleur de friction suffisante pour plastifier le matériau.

Pour le dernier essai de soudage avec les paramètres de soudage optimaux, très peu de bavures ont été observées comme il est possible de le voir à la figure 4.3. Un décalage linéaire moyen de 0,5 mm a été noté tout le long de l'extrusion. En se basant sur les critères d'acceptation de la norme ISO 25239, ce défaut est acceptable.



Figure 4.3. Aspect visuel de soudure finale (avec paramètres optimaux)

4.3 Analyse par ultrason

4.3.1 Analyse par ultrason en bain d'immersion

Les analyses par ultrasons ont été réalisées sur une portion de l'extrusion soudée de 100 mm x 200 mm pour les quatre (4) extrusions soudées. La figure 4.4 illustre un résultat de test d'ultrason sans défaut détecté.

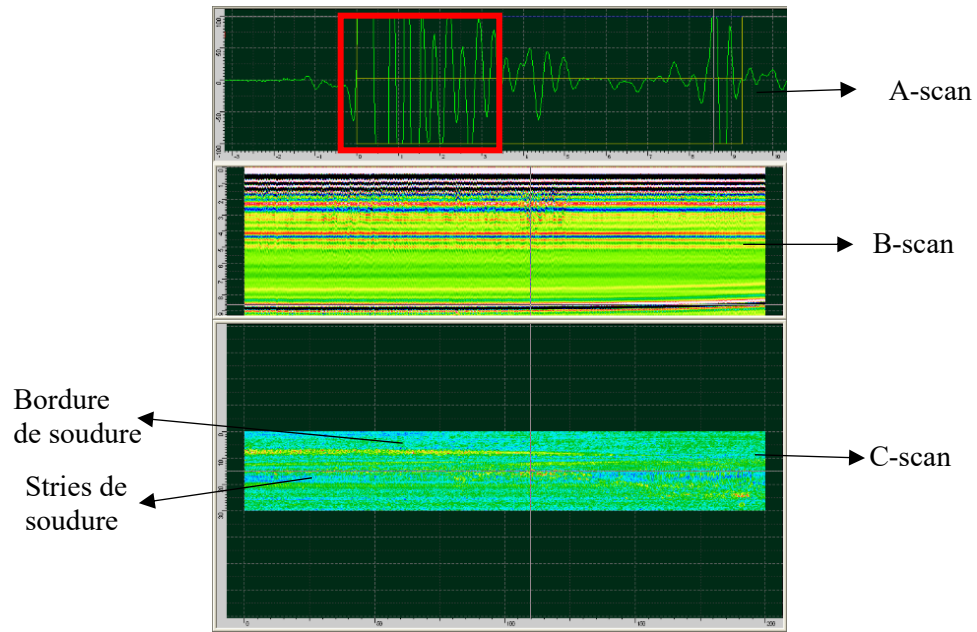


Figure 4.4 Exemple de résultats d'analyse par ultrason (Essai 3, 600 rpm-600 mm/min)

Comme expliqué plus haut, les divers scans qui sont le A-scan, le B-scan, et le la C-scan sont observable. Il est possible d'observer également que la partie en rouge illustre une zone bruitée en surface du signal correspondant aux stries de la soudure. Il a été constaté qu'il n'y avait aucune irrégularité au niveau de couleur des stries de la soudure dans le C-scan. Il est possible d'en conclure qu'il n'y a possiblement aucun défaut dans la soudure. Les figures 4.5, 4.6 et 4.7 sont des illustrations des résultats des essais dans lesquelles des possibles défauts ont été détectés. À l'aide des analyses par ultrason, il a été constaté que les défauts ont été détectés dans les essais E10-2 (figure 4.6) et E10 (figure 4.7) avec les paramètres de soudage 800 rpm et 800 mm/min. Lors du soudage avec ces paramètres, la machine a commencé à vibrer, ce qui indique une instabilité de soudage généré par des forces probablement plus élevées. Ces paramètres ont utilisé la vitesse d'avance la plus élevée du plan d'expérience (800 mm/min) indiquant possiblement un manque de chaleur. Ils ont donc été éliminés. De plus, il est constaté également la détection d'un défaut à l'essai 1-2 (figure 4.5) qui semble être dû au décalage linéaire. Aucun lien apparent entre les forces induites et

l'apparition des défauts n'ont été observés. Les parties encadrées dans les divers scans indiquent la présence d'un possible défaut dans la soudure. En effet, un changement de pigmentation dans les stries de la soudure peut être constaté.

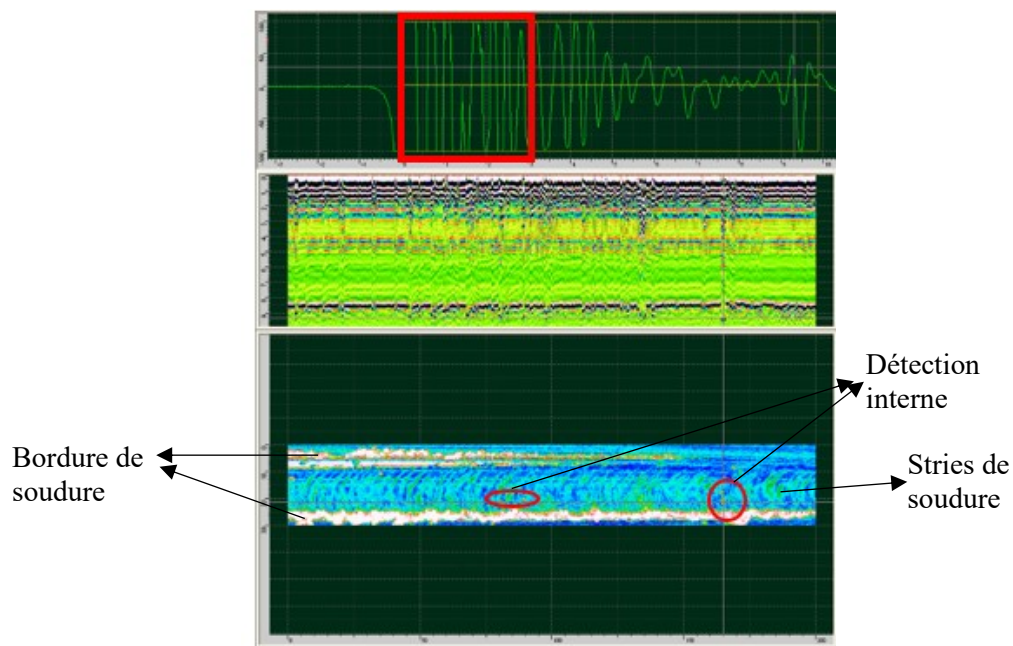


Figure 4.5 Résultat de l'essai 1-2 : 850/ 650 avec décalage de 1,25 mm

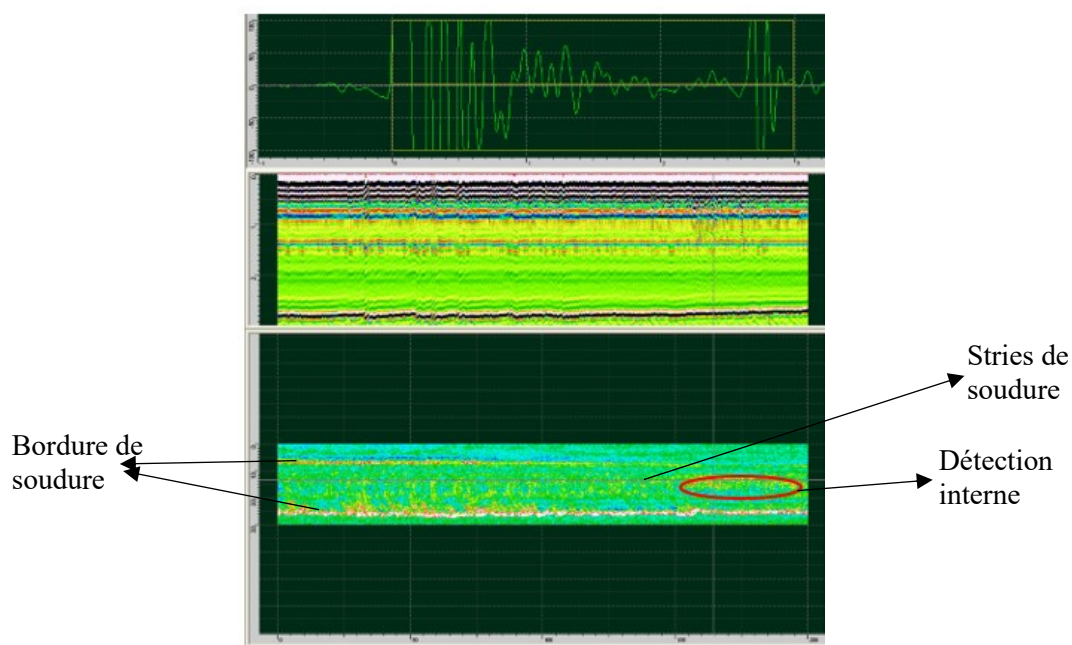


Figure 4.6 Résultat de l'essai 10-2 800/800 avec décalage de 0,5 mm

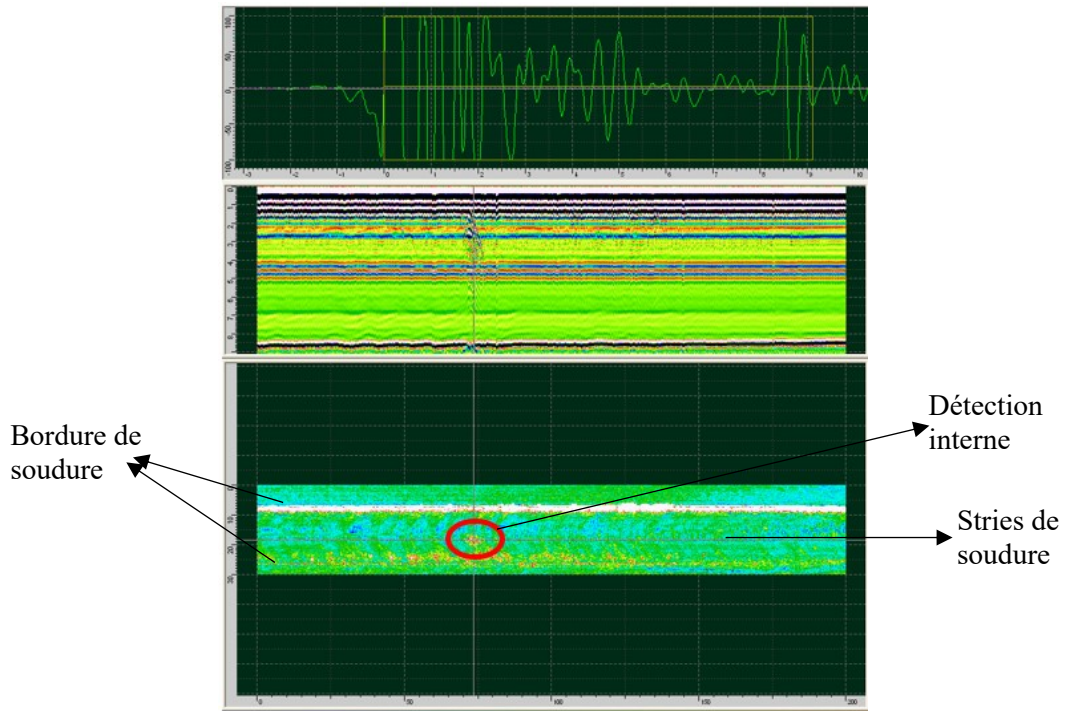


Figure 4.7 Résultat de l'essai 10 800/800 avec un décalage de 1,4 mm

Le tableau 4.3 est un résumé des résultats des tests d'inspection par ultrason sur les éprouvettes soudées.

Tableau 4.3 Résultats des analyses par ultrason

Échantillons	Vitesse de rotation (rpm)	Vitesse d'avance (mm/min)	Décalage linéaire (mm)	Test d'ultrason
Essai 1 (E1)	400	400	0,4	Aucun défaut
Essai 2 (E2)	500	500	0,7	Aucun défaut
Essai 3 (E3)	600	600	0,5	Aucun défaut
Essai 10 (E10)	800	800	1,25	Défaut interne possible détecté
Essai 10-2 (E10-2)	800	800	0,5	Défaut interne possible détecté
Essai 4 (E4)	850	650	0,5	Aucun défaut
Essai 1-2 (E1-2)	850	650	1,4	Défaut interne possible détecté
Essai 4-2 (E4-2)	500	500	0,5	Aucun défaut

4.3.2 Analyse par ultrason à sonde manuelle

Pour les essais finaux, deux extrusions de 3,3 mètres ont été soudées avec les paramètres optimaux de 850 rpm et 650 mm/min (E4). Afin de vérifier qu'il n'y avait pas de défauts internes, l'analyse par ultrason à l'aide d'une sonde manuelle a été réalisée. En

observant la figure 4.8, il est possible de remarquer que la présentation des résultats est différente de celle du système automatisé en bain d'immersion. Dans ce cas, les défauts sont définis dans un plan à deux dimensions.

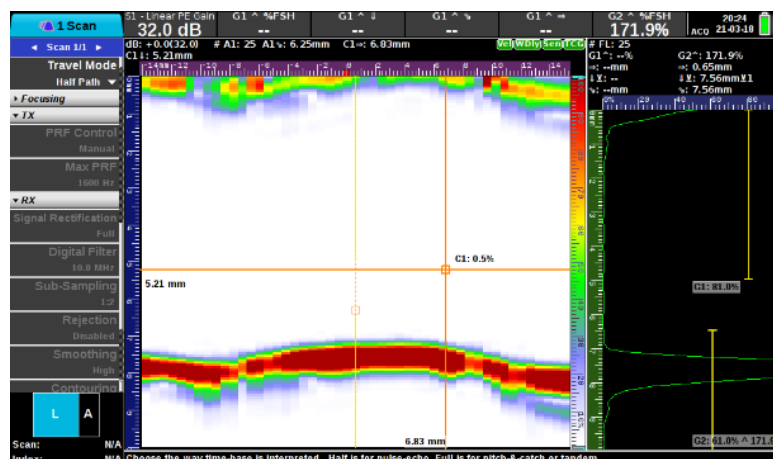







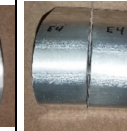


Figure 4.8. Résultats d'analyse par ultrasons pour les essais finaux

Aucun défaut interne apparent n'a été constaté. Cette méthode est très pratique, rapide et adaptée pour de grandes pièces. Afin de rendre l'inspection encore plus précise, l'extrusion a été divisée en plus petit morceau de 400 mm. Ces morceaux ont été inspectés par le système en bain d'immersion. Cela a permis de confirmer qu'il n'y avait aucun défaut interne.

4.4 Essais de pliage

L'essai de pliage a été réalisé sur une totalité de 16 éprouvettes. Ces éprouvettes ont été prélevées sur la face supérieure et inférieure de l'extrusion soudée. Le tableau 4.4 présente les résultats des tests de pliage réalisés.

Tableau 4.4 Résultats des tests de pliage

Soudure	E-1	E1-2	E-3	E-10	E10-2	E-4	E-2	E4-2
Paramètres de soudage (rpm-mm/min)	400-400	500-500	600-600	800-800	800-800	850-650	850-650	500-500
Test de pliage								
Observations	Aucun défaut	Aucun défaut	Aucun défaut	Fissure à la racine détectée	Aucun défaut	Aucun défaut	Aucun défaut	Aucun défaut

L'analyse a permis de détecter qu'il n'y avait aucun défaut à la racine sauf pour l'éprouvette E10 qui présentait une fissure à la racine. Cela a permis de confirmer le défaut interne détecté à l'aide de l'analyse par ultrason.

4.5 Essais de traction

4.5.1 Test sur métal de base

Les essais de traction ont été réalisés afin de déterminer les propriétés mécaniques des joints soudés par friction malaxage et du métal de base intact. Pour les tests de traction sur le métal de base, les échantillons ont été retirés dans l'aile de l'extrusion pour des fins de comparaison. Les échantillons des joints soudés ont été également retirés dans les ailes des extrusions soudées. Les résultats à la figure 4.9 et au tableau 4.5 sont ceux des tests de traction du métal de base non soudé. Les résultats des tests de traction ont été établis aux fins d'étude qualitative des soudures.

Tableau 4.5 Résultats des tests de traction sur métal non soudée AA6061-T6

Échantillons	Limite ultime (MPa)	Limite ultime moyenne (MPa)	Écart-type (limite ultime)	Limite élastique (MPa)	Limite élastique moyenne (MPa)	Écart-type (limite élastique)
E1	290	291,3	1,5	276	276,7	1,2
E2	291			276		
E3	293			278		
MB1	296	296,0	1,0	283	283,3	1,5
MB2	297			282		
MB3	295			285		

Les valeurs des limites élastiques et des limites ultimes des six échantillons sont sensiblement proches ce qui atteste de l'uniformité de l'extrusion. La moyenne globale pour la limite ultime et la limite élastique sont respectivement de 294 MPa et 280 MPa. Il a été noté qu'il y'a eu un gain au niveau de la limite ultime et de la limite élastique par rapport au minimum indiqué dans la norme CSA S157 [52] et CSA-S6 [22] pour l'alliage 6061-T6.

Le tableau 4.6 et à la figure 4.10 sont ceux de l'allongement à la rupture du métal non soudé.

Tableau 4.6 Allongement à la rupture du métal de base non soudé AA6061-T6

Échantillons	Allongement à la rupture (%)	Allongement à la rupture moyen (%)	Écart-type (Allongement à la rupture)
E1	16	18,0	1,7
E2	19		
E3	19		
MB1	17	18,7	2,1
MB2	21		
MB3	18		

Selon la norme Eurocode 9 (1-1. FA100347) [23], pour des épaisseurs inférieures ou égales à 20 mm, le pourcentage d'allongement minimum est de 8%. Le pourcentage d'allongement obtenu à une moyenne de 18% pour les six (6) échantillons ce qui est de 10% plus élevé que le minimum.

4.5.2 Essais de qualification

Pour les essais de qualification, pour chacun des paramètres, deux échantillons ont été soumis à la traction et une moyenne des valeurs a été retenue. Les résultats moyens des essais de traction sont présentés aux figures 4.9, 4.10 et 4.11.

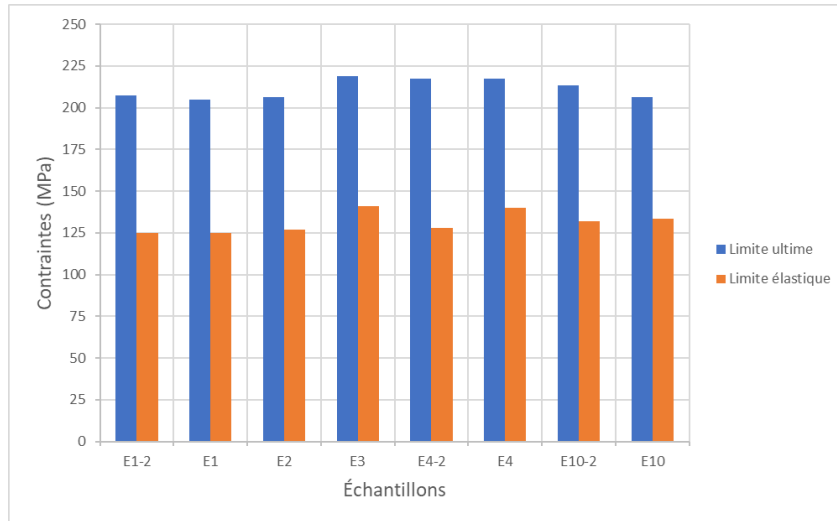


Figure 4.9. Limites ultimes et élastiques du métal soudé AA6061-T6

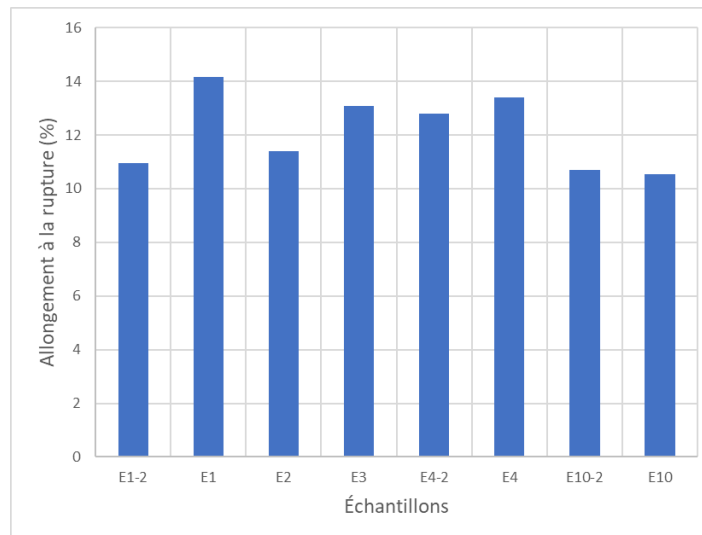


Figure 4.10 Allongement à la rupture du métal soudé AA6061-T6

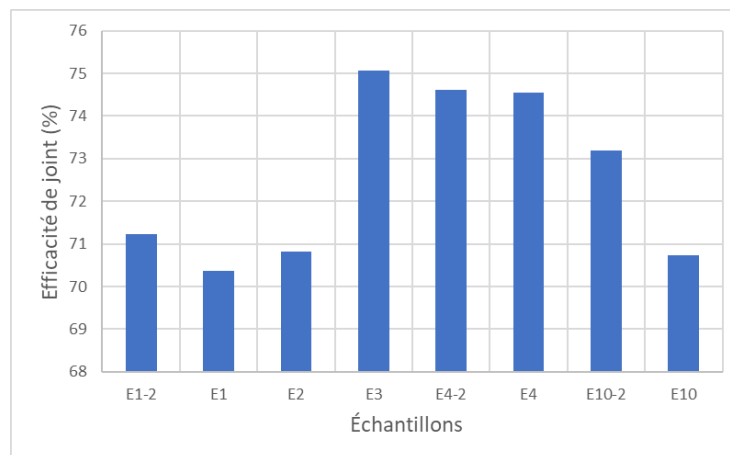






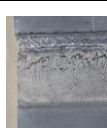



Figure 4.11 Efficacité des joints du métal soudé AA6061-T6

La limite d'élasticité a été mesurée en utilisant la méthode décrite et conforme à la norme ASTM E8. De plus, les soudures E2, E3, et E4-2 donnent la meilleure efficacité de joint soit un gain de 14% par rapport à la valeur minimale de la norme ISO 25239 qui est de 60%. Du tableau 4.7, il est possible de voir que pour tous les échantillons, la fracture par traction est située à la lisière du joint de soudure entre la zone affectée thermomécaniquement (ZATM) et la zone affectée thermiquement (ZAT). Il n'y a pas de différence significative entre les valeurs de résistance ultime, mais aussi ceux de la limite d'élasticité.

Tableau 4.7 Emplacements de rupture de traction des soudures AA6061-T6

Soudure #	E-1	E1-2	E-3	E-10	E10-2	E-4	E-2	E4-2
Paramètres de soudage (rpm-mm/min)	400-400	500-500	600-600	800-800	800-800	850-650	850-650	500-500
Observations								
Zone de rupture	AS	RS	RS	AS	RS	RS	AS	AS

L'étude de Rouis. M [65] sur le comportement du joint bout à bout de soudage par friction malaxage avec le pion à double épaulement (bobbin-tool) a obtenu 184 MPa pour la résistance ultime avec 300 tr/min-100 mm/min. Cette étude a été réalisée sur les mêmes types d'extrusion AA6061-T6 que celles utilisées pour la présente étude avec le même équipement de soudage. Par conséquent, l'augmentation de la vitesse de soudage permet une augmentation de la vitesse de refroidissement et favorise des propriétés mécaniques plus élevées. Les paramètres de soudure ont donc un effet sur les propriétés mécaniques, dont la limite élastique, la limite ultime et l'allongement à la rupture.

4.5.3 Essais finaux

Pour les tests finaux, les tests de traction ont été réalisés avec les paramètres optimaux pour déterminer les propriétés mécaniques. Les résultats sont présentés au tableau 4.8 pour les limites ultimes et élastiques ainsi que le pourcentage d'efficacité du joint.

Tableau 4.8 Résultats des tests de tractions pour échantillons soudés avec les paramètres optimisés

Échantillons	Limites ultimes (MPa)	Limite ultime moyenne (MPa)	Écart-type (limite ultime)	Limite élastique (MPa)	Limite élastique moyenne (MPa)	Écart-type (limite élastique)	% d'efficacité du joint (limite ultime)	% d'efficacité du joint moyen (MPa)	Écart-type (% d'efficacité du joint)
TD1	217	212,7	3,8	121	124,5	9,4	74	73,0	1,3
TD2	212			127			73		
TD3	208			111			71		
TD4	217			137			74		
TD6	210			126			72		
TF2	215			216,4			1,2		
TF3	216	138	74						
TF4	217	136	74						
TF6	218	140	75						
TM1	210	214,6	5,3		129	125,2		8,0	72
TM2	207			118	71				
TM3	215			121	74				
TM4	216			139	74				
TM5	221			128	76				
TM6	219			118	75				
T2	214	216,2	5,0	143	139,9	9,5	74	74,2	1,7
T3	209			142			72		
T4	212			141			73		
T5	210			150			72		
T6	214			141			74		
T7	221			128			76		
T8	224			142			77		
T9	216			145			74		
T10	219			126			75		
T11	221			126			76		
T12	217			155			75		

Les valeurs de la limite ultime et élastique moyenne de tous les échantillons sont respectivement de 215 MPa et de 132 MPa ce qui est supérieur aux valeurs minimales de la limite ultime et élastique pour un échantillon soudé d'alliage AA6061-T6 de la norme CSA-S6 [22] qui sont respectivement de 165 MPa et de 105 MPa. De plus, il est possible de remarquer que les valeurs des limites ultimes et élastiques présentent un écart-type global respectivement de 1,7 et de 8,1. Il est possible de conclure que les échantillons sont relativement homogènes. De plus, l'efficacité du joint moyen obtenu est de 74 % ce qui est similaire à ceux obtenus pour les essais de qualification pour les paramètres 850/650. Le

tableau 4.9 présente le pourcentage d'allongement moyen à la rupture des échantillons ainsi que l'écart-type.

Tableau 4.9 Allongement à la rupture pour les pour échantillons soudés avec les paramètres optimisés

Échantillons	Pourcentage d'allongement (%)	Pourcentage d'allongement moyen (%)	Écart-type (Pourcentage d'allongement)
TD1	13	12,1	2,1
TD2	10		
TD3	10		
TD4	14		
TD6	13		
TF2	11	12,0	1,5
TF3	11		
TF4	14		
TF6	13		
TM1	12	12,4	1,0
TM2	12		
TM3	12		
TM4	14		
TM5	11		
TM6	13		
T2	9	11,2	1,4
T3	11		
T4	10		
T5	10		
T6	10		
T7	14		
T8	12		
T9	11		
T10	12		
T11	12		
T12	12		

Le pourcentage d'allongement à la rupture moyen obtenu est de 12% avec un écart-type de 0,5, ce qui montre que les valeurs sont sensiblement proches. Pour tous les échantillons, la rupture est survenue dans la zone ZAT/ZATM ce qui corroborent les résultats obtenus précédemment et rejoignent la littérature. En effet, la localisation de la fracture en tension est dépendante des paramètres de soudage et des défauts dans le joint. Les joints avec des défauts présentant des défauts internes se fracturent souvent dans la zone de malaxage. Ceux sans

défauts se fracturent dans la zone affectée thermiquement qui est la zone avec la plus faible en dureté [62].

4.6 Résultats des tests de métallographie

Afin de réaliser les observations métallographiques, les échantillons ont été abrasés et polis au préalable. Les échantillons pour la métallographie ont été prélevés dans le sens longitudinal de la soudure afin d'obtenir les différentes zones de la soudure. La figure 4.12 est une illustration des échantillons préparés. Il est possible de constater que les échantillons donnent un effet miroir, ce qui atteste de la bonne préparation de l'échantillon. Certaines études utilisent le réactif de Keller comme agent réactif, mais Tamadon et al. [62] dans son étude a démontré son inefficacité, surtout pour les alliages tempérés comme le AA6061-T6. En effet, pour l'attaque chimique de ces échantillons des tentatives vaines ont été réalisées à l'aide de ce dernier d'où l'usage du réactif Barker's.



Figure 4.12. Échantillons après abrasion et polissage

La macrographie à l'aide de l'attaque chimique de Barker's sous lumière polarisée a permis d'obtenir la métallographie illustrée à la figure 4.13.

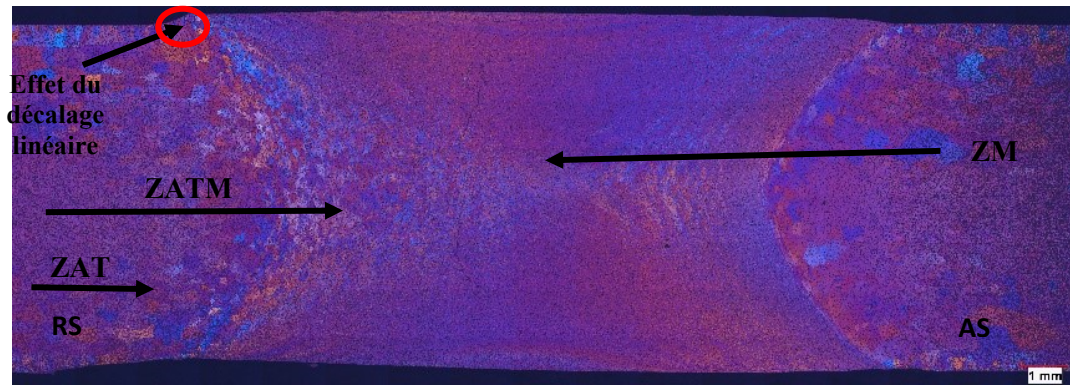


Figure 4.13 Métallographie pour des joints de soudure (paramètres optimisés 850 rpm-650 mm/min)

En observant la figure 4.13, il est possible de distinguer clairement les diverses zones de soudure ainsi que la grosseur des grains. Le test de Barker's permet grâce aux différentes colorations d'indiquer les différentes orientations des grains et donc permet de distinguer leur grosseur. De plus, un arrondi est observé dans le coin du joint (en rouge sur la figure 4.13). Cet arrondi illustre le décalage linéaire. Il est possible de distinguer trois zones, dont la zone affectée thermiquement (ZAT), la zone affectée thermomécaniquement (ZATM) et la zone de malaxage (ZM). Dans la ZAT les grains sont grossiers, ce qui atteste de la croissance des grains dans cette zone ce qui a un impact sur la dureté. Puis, il est possible d'observer un changement de la taille des grains qui semblent devenir plus petits et plus homogènes dans la ZATM. Dans la ZM, la taille des grains semble plus petite ce qui témoigne de la recristallisation dynamique des grains dans cette zone. En se basant sur l'échelle indiquée sur les images, la relation de 3,5 pixels pour 1 mm est notée et il est possible d'en déduire que la largeur totale de l'échantillon est approximativement de 23,4 mm et de 7,8 mm de hauteur (figure 4.14). Cette méthode a été utilisée pour estimer la valeur de la zone affectée par la chaleur. Selon la norme CSA-S6 [22], pour un joint soudé bout à bout, l'étendue de la zone affectée par la chaleur (b_{haz}) est mesurée à partir du centre de la soudure. De ce fait, cette zone est mesurée à partir du centre la zone de malaxage.

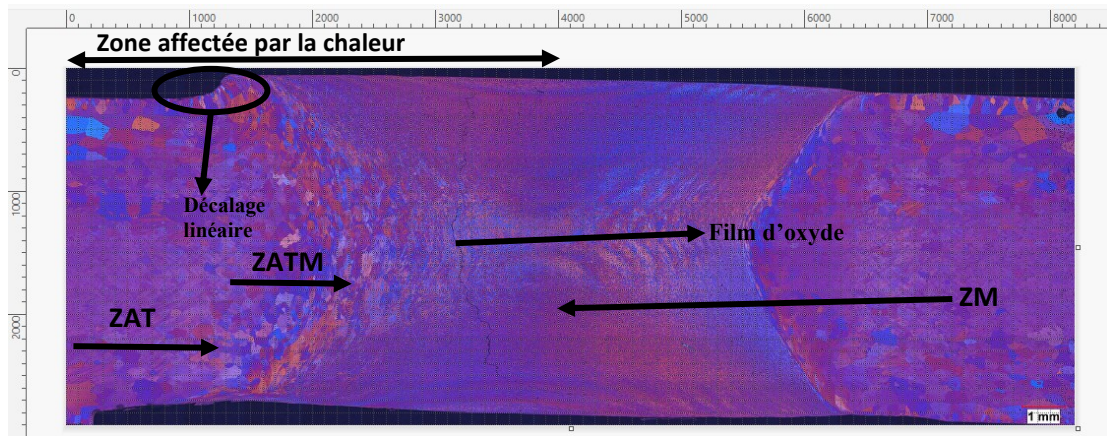


Figure 4.14 Image en pixel de la métallographie.

La largeur de la zone affectée par la chaleur est évaluée à environ 11,7 mm \approx 12 mm soit la moitié de la largeur du joint soudée déduite. De plus, ces essais ont permis de montrer qu'il n'y avait pas de défauts dans les soudures hormis le décalage linéaire qui est visible dans à la figure 4.14. Également, il est possible d'observer sur cette figure une ligne d'oxyde dans la zone de malaxage. La présence de la ligne d'oxyde est due à la présence d'oxyde présent sur la surface de contact et peut dans certains cas entraîner une faiblesse dans le joint si durant le processus de soudage elle n'est pas suffisamment rompue. De plus, il a été remarqué que pour des joints bout à bout soudés par SFM avec le pion à double épaulement, des lignes d'oxyde étaient observées lorsque la vitesse de rotation était faible et la vitesse d'avance élevée [62]. Les valeurs du tableau 4.10 montrent que la largeur moyenne de la zone affectée par la chaleur déduite est de 12 mm. Ces valeurs sont les mêmes pour tous les échantillons avec les différents paramètres de soudage (vitesse d'avance et de rotation). De là, il est possible de conclure que les paramètres de soudage n'ont pas d'effet sur la largeur de la zone affectée par la chaleur. Par comparaison aux largeurs de la zone affectée par la chaleur pour les soudures MIG dans la norme CSA (S6) [22], ces valeurs sont plus petites. En effet, pour une épaisseur de 8 mm, la largeur de zone affectée par la chaleur (b_{haz}) est de 30 mm.

Tableau 4.10 Tableau des dimensions de la largeur moyenne pour les essais de qualification.

Échantillons	Paramètres (rpm-mm/min)	Largeur moyenne de la zone affectée par la chaleur b_{haz} (mm)
E1-2	850/650	12
E4-2	500/500	12
E3	600/600	12
E1	400/400	12
E4	850/650	12
E10-2	800/800	12
E10	800/800	12
E2	500/500	12

Le tableau 4.11 est le résumé des valeurs estimées de la zone affectée par la chaleur pour les échantillons qui ont été soudés avec les paramètres optimisés (850 rpm – 650 mm/min).

Tableau 4.11 Dimensions des largeurs de la zone affectée par la chaleur pour les joints soudés avec les paramètres optimisés (850 rpm-650mm/min)

Échantillons	Paramètres (rpm-mm/min)	Largeur moyenne de la zone affectée par la chaleur b_{haz} (mm)
MM3	850/650	12
M2F	850/650	12

Ces valeurs sont similaires à celles déduites au tableau 4.6. Le soudage par friction malaxage à l'aide du pion à double épaulement permet une réduction de la zone affectée thermiquement.

4.7 Résultats des tests de dureté Vickers

Les tests de Vickers ont été réalisés sur trois échantillons de 25 mm de largeur et sur chaque échantillon, une trentaine de points ont été testés à moins de 1 mm de distance. Les valeurs de micro-dureté varient entre 101,4 HV et 65,1 HV. Les points avec les zones de dureté les plus faibles sont les zones de la ZAT. La figure 4.15 illustre le profil des joints SFM avec le pion à double épaulement. Il est possible de constater que la valeur de micro-dureté dans la ZATM semble similaire à celle de la zone affectée thermiquement ce qui peut s'expliquer

par des soudures plus rapides et donc un refroidissement plus rapide. Dans plusieurs articles, pour les résultats de dureté de Vickers, le profil du joint est en forme de W, car les vitesses de soudage sont plus lentes.

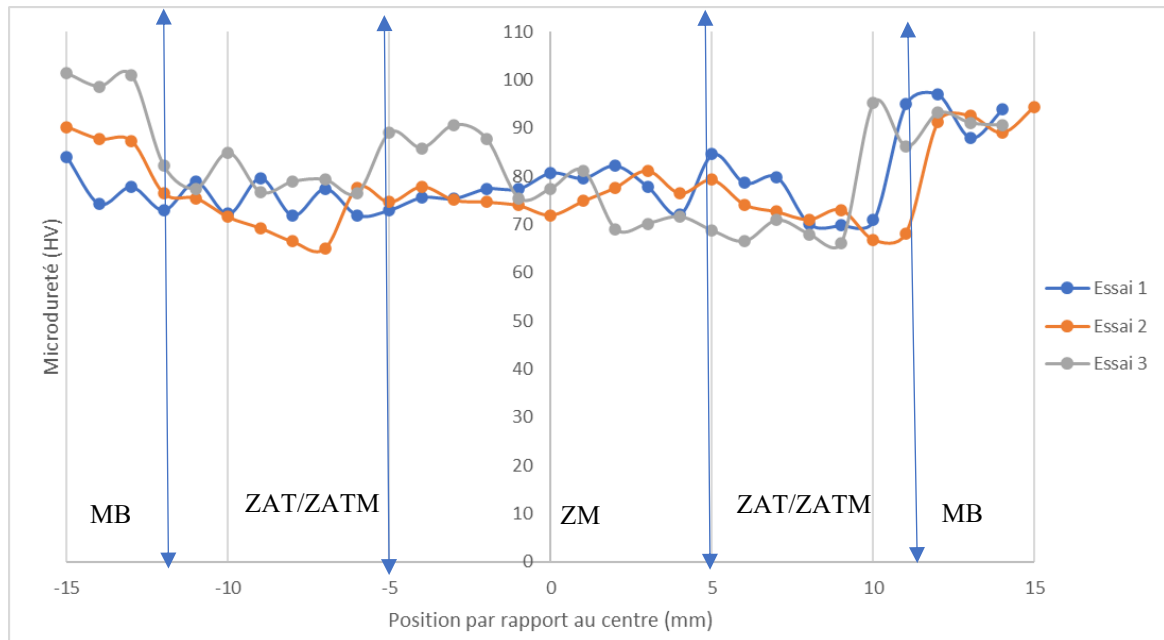


Figure 4.15 Résultat des tests de Vickers

La valeur de micro-dureté est dépendante de la vitesse de soudage [62]. Les valeurs les plus faibles sont celles de la zone affectée thermiquement (ZAT). Cette zone est une zone probable de rupture par fatigue si aucun défaut interne n'est détecté. Ici, la largeur de la zone affectée thermiquement à partir de l'axe de la soudure est environ équivalente à 12 mm ce qui est inférieur à celle du soudage par fusion pour la même épaisseur. De l'étude de Okura et al. Pour les soudures par SFM conventionnel, la zone affectée thermiquement est inférieure à 20 mm à partir de l'axe de la soudure [71]. Les soudures friction-malaxage avec le pion à double épaulement permettent une réduction de la ZAT par rapport au soudage par friction-malaxage conventionnel.

4.8 Résultats des essais de fatigue

Pour les essais de fatigue, un total de 23 échantillons a été testé. Un premier échantillon a été testé à 93 MPa. Il a été éliminé, car il présentait un résultat aberrant. En effet, cet échantillon s'est rompu dans le métal de base proche de la zone des mors. Cela a été probablement dû à un effort de flexion induit lors de l'essai à cause d'un défaut géométrique. Le test de fatigue a été effectué sur la base de la norme ASTM E466 en utilisant les paramètres de processus optimaux déterminés 850 rpm et 650 mm/min. Dans ce test, la résistance à la fatigue des matériaux métalliques est obtenue dans un régime de fatigue où les déformations sont élastiques à la fois pendant le chargement initial et tout au long de l'essai. Fleury A. a établi un modèle de prédiction de la vie en fatigue basée sur un modèle linéaire de mécanique de rupture pour les soudures avec un décalage linéaire ou un trou de ver [26]. De son étude, il a déterminé une valeur de la pente de prédiction de la courbe SN de 7,0 pour les soudures avec un décalage linéaire inférieur à 1 mm. Dans les présentes soudures, un décalage linéaire inférieur à 1 mm a été identifié. Il est donc possible d'utiliser la courbe de prédiction de cette étude pour comparer avec celle obtenue expérimentalement. Comme expliqué précédemment, selon les normes de conception de fatigue en vigueur, deux paramètres sont pris en compte sont m et C qui sont les paramètres de la loi de Paris-Erdogan. Ce sont les paramètres de résistance qui dépendent du matériau. La norme IIW [23] propose une méthode pour évaluer les paramètres C et m pour des populations échantillons supérieures à 10 et qui permet de proposer une courbe de conception. L'approche de calcul se fait par analyse des données de fatigue par régression linéaire en prenant $\text{Log}_{10}(N)$ comme valeur dépendante. Pour calculer les constantes m et C , l'équation (4.1) est utilisée. Par

régression linéaire, en prenant la contrainte comme variable indépendante c'est-à-dire que $\log N = f(\log \Delta \sigma)$, il est possible de déduire la pente m .

$$\text{Log}N = \text{Log}C - m\text{Log}\Delta\sigma$$

Puis les valeurs de la moyenne x_m et de l'écart-type $stdv$ de $\text{Log}C$ sont calculées avec les équations (4.2) et (4.3) avec n le nombre d'échantillons testés.

$$x_m = \frac{\sum \text{Log}C_i}{n} \quad (4.2)$$

$$stdv = \sqrt{\frac{\sum (x_m - \text{Log}C)^2}{n - 1}} \quad (4.3)$$

Les équations (4.1) et (4.2) ont permis d'obtenir une pente de -11,28 avec un écart-type de 0,489. Ensuite la valeur caractéristique de k est tirée du tableau 4.8.

Tableau 4.12 Valeur caractéristique de k [23]

n	10	15	20	25	30	40	50	100
k	2.7	2.4	2.3	2.2	2.15	2.05	2.0	1.9

Pour 23 échantillons, la valeur de k est d'environ de 2,25. Avec cette valeur, il est possible de proposer une courbe de conception. L'équation (4.4) permet de déduire la valeur de $\text{Log}C$.

$$x_k = x_m - k * Stdv \quad (4.4)$$

Cette valeur a permis de construire la courbe de conception illustrée à la figure 4.16. Elle présente la courbe S-N où 23 éprouvettes ont été testées à des valeurs de contraintes comprises entre 100 MPa et 155 MPa. Parmi ces 23 échantillons, quatre ne se sont jamais rompus comme indiqué à la figure 4.16 avec une flèche noire.

(4.1)

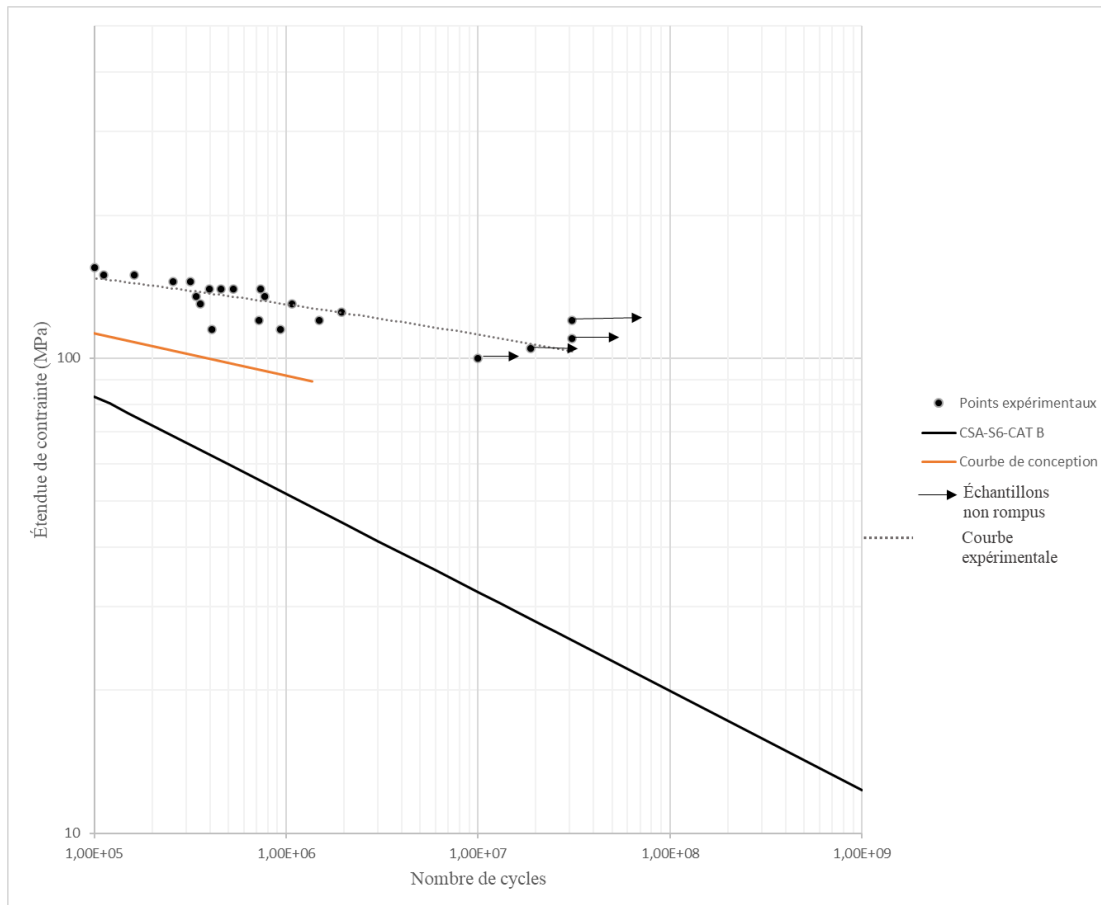


Figure 4.16 Courbes S-N des soudures

À la figure 4.16, il est possible d’observer une comparaison entre la courbe existante dans la norme CSA-S6 de catégorie B et la courbe de conception obtenue. La courbe de conception obtenue est supérieure à la courbe normative. Plusieurs causes peuvent affecter les performances de fatigue des joints SFM telles que les valeurs de micro-dureté minimum dans la ZAT ou les défauts géométriques (ex. sous-remplissage, bavure). La rupture par fatigue se produit généralement en raison de défauts géométriques tels qu’un décalage linéaire ou des défauts de planéité de l’échantillon qui créent des contraintes de flexion pendant les essais de fatigue et propagent la fissure initiée par la fatigue. Le tableau 4.13 présente tous les échantillons soumis à la fatigue ainsi que leur zone de rupture. De plus, l’annexe 3 résume les figures de toutes les éprouvettes et leur zone de rupture.

Tableau 4.13 Résultats des tests de fatigue avec localisation de la zone de rupture

Identification de l'éprouvette	Contrainte (MPa)	Zone de rupture	Nombre de cycles	Fréquence (Hz)
FF1	140	ZM	731 856	30
FM3	120	ZATM/ZAT	1 490 478	30
FM4	100	PAS DE RUPTURE	10 000 097	30
FM7	115	ZATM/ZAT	933 013	30
FM8	115	ZATM/ZAT	409 616	30
FM10	120	ZATM/ZAT	718 783	30
FM11	110	PAS DE RUPTURE	30 900 000	30
FM12	120	PAS DE RUPTURE	30 919 766	30
FU9	125	ZM	1 944 458	30
FU4	130	ZM	357 059	30
FU2	145	ZATM/ZAT	257 155	30
FU1	135	ZATM/ZAT	775 859	30
FU6	130	ZM	1 067 701	30
FU7	140	ZATM/ZAT	395 762	30
FL1	155	ZM	100 749	5
FL2	155	ZATM/ZAT	86 960	5
FL3	150	ZM	161 999	5
FL4	150	ZATM/ZAT	111 744	5
FL6	145	ZATM/ZAT	317 366	5
FL7	140	ZATM/ZAT	528 450	5
FL8	140	ZM	458 760	5
FL9	135	ZM	337 680	5
FL5	105	PAS DE RUPTURE	18 763 000	5

Dans cette étude, environ 80 % des échantillons dont la rupture par fatigue s'est produite au niveau de la ZAT/ZATM qui est la zone qui présente la plus faible dureté d'après les essais Vickers. Cette zone correspond également à la zone de rupture des échantillons testés par traction. L'étude de Gariépy et al. sur l'investigation sur la rupture de fatigue pour les joints de soudage par friction-malaxage conclut que les fissures ont été trouvées à l'origine dans la zone affectée thermomécaniquement parce que l'état microstructural complexe dans cette région pourrait contribuer à la rupture du joint [68]. Dans cette étude, il est possible d'observer qu'il n'y a pas de lien apparent entre la contrainte appliquée et la localisation de la rupture dans les essais de fatigue comme l'illustre le tableau 4.13. De plus, il est possible de constater dans ce tableau qu'il y a eu certains essais avec une fréquence de 30 Hz et d'autres avec une fréquence de 5 Hz. En observant les échantillons FF1, FU7, FL8 et FL7

qui ont été testés à 140 MPa a des fréquences de 30 Hz et de 5 Hz, il est constaté que la fréquence n'a pas d'impact sur le nombre de cycles. La fréquence a un impact sur la durée de l'essai; plus la fréquence de l'essai est basse, plus l'essai est long et inversement.

La figure 4.17 est une illustration de quelques échantillons rompus et non rompus.



Figure 4.17 Échantillons rompus testés en fatigue

La figure 4.18 illustre un exemple de faciès de rupture d'un échantillon qui a été rompu dans la ZAT/ZATM. Dans ce cas, les fissures s'initient à la surface du joint par la présence de nombreuses lignes de rivière. Les lignes de rivière marquent les débuts des fissures dus aux sollicitations par fatigue. Les 20% restant des échantillons se sont rompus dans la zone de malaxage. Dans ce cas, les fissures semblent s'initier dans les stries de la soudure puis se propager.



Figure 4.18 Faciès de rupture d'un échantillon (rupture dans la ZAT/ZATM)

La figure 4.19 illustre les échantillons FF1 et FM10 après leur rupture ainsi que leur faciès de rupture.

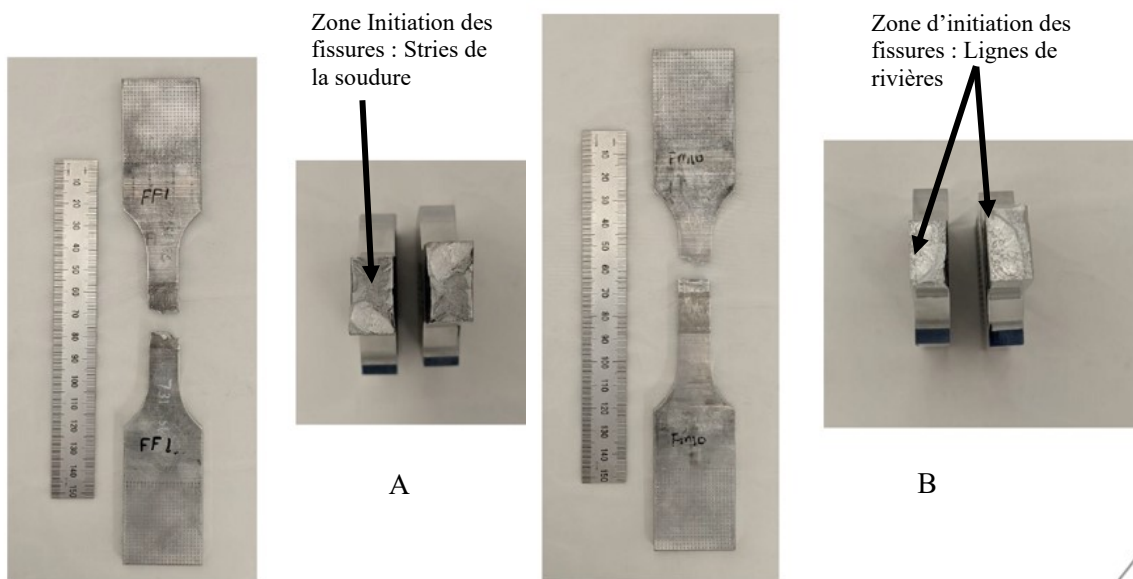


Figure 4.19. Faciès de rupture pour échantillon rompu dans le noyau (A) et échantillon rompu dans la ZAT/ZATM (B)

Dans l'étude de M. Rouis sur les comportements des joints soudés avec le pion à double épaulement avec des paramètres de soudage de 300 rpm-100 mm/min, il a pu atteindre un nombre de cycles de 354 299 pour une contrainte de 84,03 MPa et un cycle 10^7 sans rupture pour une contrainte de 78.74 MPa [65]. En augmentant la valeur de ces paramètres de soudage, c'est à dire en passant de 300 rpm -100 mm/min à 850 rpm-650 mm/min, un gain important au niveau de la résistance en fatigue est observé.

Chaque éprouvette de fatigue SFM avec le pion à double épaulement (23 au total) supporte plus de 100 MPa en fatigue jusqu'à 30 000 000 cycles. Cette durée de vie à la fatigue est généralement plus élevée par rapport à d'autres études en utilisant des SFM conventionnels sur des alliages d'aluminium AA6061-T6 où des valeurs de fatigue cyclique élevée entre 70-80 MPa sont rapportées [69-70]. En raison des imperfections qui existent dans les pièces soudées, les fissures s'y initient et se propagent. Il est possible de détecter les zones d'initiation à l'aide des méthodes d'inspections conventionnelles.

5. Chapitre 5: Conclusion

5.1 Conclusion générale

Dans cette étude, l'objectif principal était de démontrer que les joints soudés par SFM avec le pion à double épaulement offrent de meilleures propriétés mécaniques et en fatigue que les joints soudés conventionnellement. Pour ce faire, plusieurs objectifs spécifiques étaient visés :

- L'optimisation des paramètres de soudage;
- Analyse de la dureté du joint et détermination de la zone affectée thermiquement;
- L'élaboration d'une courbe de fatigue.

Cette étude a permis d'émettre plusieurs conclusions concernant le comportement mécanique et en fatigue des joints soudés par friction malaxage avec le pion à double épaulement (bobbin-tool). L'optimisation des paramètres est une étape cruciale, car elle permet d'avoir des soudures quasiment sans défauts apparents internes et en surface ce qui a un impact sur les propriétés mécaniques et en fatigue. La conclusion générale est que les joints soudés par SFM avec le pion à double épaulement donnent des propriétés en fatigue nettement supérieures aux joints soudés par fusion.

Les principales conclusions sont :

- Les paramètres optimaux étaient une vitesse de rotation de 850 tr/min et une vitesse de soudage de 650 mm/min qui donnaient la meilleure qualité de soudage sans défauts internes : les tests de qualification pour valider la qualité des soudures ont été concluants et ont permis la sélection des paramètres optimisés. Ces paramètres ont été choisis, car ils pourraient être utilisés pour la production.

- Les valeurs moyennes de la limite ultime et de la limite élastique du joint non soudé sont respectivement de 294 MPa et de 280 MPa avec un pourcentage d'allongement moyen à la rupture de 18%. Ces valeurs sont supérieures au minimum requis dans la norme CSA-S6 pour les alliages AA6061-T6.
- Les valeurs moyennes de la limite ultime et de la limite élastique du joint soudée par friction-malaxage avec le pion à double épaulement avec les paramètres optimisés sont respectivement de 215 MPa et de 132 MPa avec un pourcentage d'allongement moyen à la rupture de 12%.
- L'efficacité du joint de soudure avec les paramètres optimisés a atteint 74 %, ce qui représente une augmentation de 14 % par rapport à la valeur minimale (60 %) de la norme ISO 25239.
- Tous les échantillons soudés ont rompu dans la ZAT/ZATM lors des essais de traction.
- Les tests de métallographie ont permis de déduire la largeur de la zone affectée par la chaleur (b_{haz}) : la largeur moyenne de la zone affectée par la chaleur est de 12 mm ce qui est inférieur à la valeur émise par la norme CSA-S6 pour les mêmes épaisseurs de soudure. Le soudage par SFM avec le pion à double épaulement permet donc une réduction de cette zone.
- Les essais de dureté de Vickers ont permis de déterminer la microdureté des joints dans les différentes zones de soudure dont la ZM, la ZAT/ZATM et le MB. Celles-ci varient entre 101,4 HV et 65,1 HV. La zone qui présente la plus faible

dureté est celle de la zone affectée par la chaleur ZAT/ZATM. La zone qui présente une microdureté plus élevée est le métal de base.

- Les propriétés de fatigue des joints soudés par friction-malaxage avec le pion à double épaulement, par rapport aux diverses normes en vigueur soit la CSA (Catégorie B), l'ADM CAT B, la IIW FAT28 sont beaucoup plus élevées atteignant environ 125 MPa à 2 000 000 cycles.
- Les échantillons de fatigue se sont rompus dans la ZAT/ZATM et dans la zone de malaxage : la fissure s'est amorcée en surface et s'est propagée à l'intérieur. 80% des échantillons ont rompu dans la ZAT/ZATM et les 20% des échantillons ont rompu dans la zone de malaxage.

Comme les données sur la résistance en fatigue des joints soudés bout à bout par SFM avec le pion à double épaulement dans la littérature sont limitées, cette présente étude fournit des valeurs initiales à l'aide de ce procédé de soudage basé sur la production qui pourrait éventuellement servir de lignes directrices pour la mise en œuvre du SFM avec le double épaulement dans les codes de conception du génie civil.

5.2 Recommandations et travaux futurs.

Pour approfondir et améliorer cette présente étude, plusieurs recommandations et suggestions sont proposées :

- Pour une analyse plus poussée des échantillons rompus testés par fatigue, une analyse fractographique par microscopie électronique à balayage (MEB) serait intéressante, car elle permettrait d'avoir des informations plus encore plus approfondies sur les caractéristiques du joint. Cette analyse permettra de mieux comprendre les zones d'amorçage de fissures et leur propagation. L'analyse avec le microscope à balayage

électronique n'a pas pu être effectuée dans le cadre de cette étude par manque de temps.

- Pour les essais de fatigue, afin de réaliser une analyse comparative, le matériel de base non soudé pourrait être testé également. Cela permettrait une comparaison pertinente entre les données en fatigue des joints SFM avec le pion à double épaulement et le matériel de base non soudé.
- Pour les mesures de dureté de Vickers, elle pourrait être réalisée sur du matériel de base non soudé pour avoir une valeur moyenne du matériel de base afin qu'elle soit comparée à celle du joint soudé. Également, il serait intéressant de mesurer la dureté des échantillons de fatigue rompus par fatigue. Cela permettrait d'avoir une analyse comparative entre les joints soudés non testés et les joints soudés testés à la fatigue.
- Cette étude s'est limitée à une vitesse d'avance maximum de 650 mm/min. L'expérience a permis de constater que le maximum de la vitesse d'avance de la machine de soudage était de 800 mm/min pour une épaisseur de 8 mm. En effet, cette vitesse entraînait la vibration de la machine. Il serait donc intéressant que pour les mêmes épaisseurs, la vitesse soit de 700 ou 750 mm/min. Augmenter la vitesse de soudage serait intéressant pour aller en production.
- Le procédé de soudage par friction malaxage avec le pion à double épaulement se veut être appliqué dans le futur pour l'assemblage de platelage de pont. Il serait donc intéressant que l'expérimentation se poursuive pour des épaisseurs d'extrusion plus élevées comme 10 mm ou 12 mm.

Références

- [1] Groupe installux (n.d). *Origine et histoire de L'aluminium*. Repéré le 08 Mars 2023 à <https://www.groupe-installux.com/laluminium/>
- [2] Bédard,P. (2016). *Bauxite-Identification des roches*. Repéré le 08 Mars 2023 à <https://cours.polymtl.ca/PBedard/g1q1100/roches/bauxite/bauxite.html>
- [3] Chevalier, P., & Baker, N. (2020). *Aluminium au Canada*. Dans *l'Encyclopédie Canadienne*. Repéré à <https://www.thecanadianencyclopedia.ca/fr/article/aluminium>
- [4] Thibeault,F. (2012). *Étude numérique et expérimentale du soudage par friction malaxage* [Mémoire de maîtrise]. Université du Québec à Chicoutimi. <https://constellation.uqac.ca/2541/>.
- [5] Institut belge de la soudure asbl. (n.d). *Soudage par friction malaxage*. Repéré le 08 Mars 2023 à <https://bil-ibs.be/fr/soudage-par-friction-malaxage>
- [6] St-Georges, L & Lászlo.I.K. (2015). *Le soudage par friction malaxage : principes et applications*. Chicoutimi, QC : Les presses de l'aluminium.
- [7] Guerin, B. (2010). *Soudage d'alliages d'aluminium par la technologie Friction Stir welding Bobbin Tool* [Thèse de doctorat]. École national supérieure des Mines à Saint-Etienne. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01127650/file/2010EMSE0567.pdf>
- [8] Beaulieu, D. (2003). *Calcul des charpentes d'aluminium*. Chicoutimi, QC : Les presses de l'aluminium.
- [9] Walbridge, S & Chevrotière, A. (2012). *Possibilités d'utilisation de l'aluminium dans la construction de ponts routiers et de viaducs* [Rapport de recherche]. https://aluminium.ca/uploader/publications/possibilites_utilisation_aluminium_ponts_viaducs.pdf
- [10] Zeppelin (s.d) *Dans wikipédia, l'encyclopédie libre*. Repéré le 08 Mars 2023 à https://fr.wikipedia.org/wiki/Zeppelin#/media/Fichier:First_Zeppelin_ascent.jpg
- [11] AluQuébec. (n.d). *L'aluminium dans l'aéronautique*. Repéré le 08 Mars 2023 à <https://aluquebec.com/ceial/secteurs-d-activite/transport/aeronautique>

- [12] AluQuébec. (n.d). L'aluminium dans le domaine routier. Repéré le 08 Mars 2023 à <https://aluquebec.com/ceial/secteurs-d-activite/transport/transport-routier>
- [13] Gagnon, M-C. (2011). *Utilisation de l'aluminium dans les flottes navales [Rapport de recherche]*.
- [14] Chaumes, P. (2017). Construction Navale et croisières/ L'aluminium, hier et demain. *L'aluminium dans les structures aéronautiques, N°489*. <https://www.mines-paris.org/fr/revue/numeros/construction-navale-et-croisieres-l-aluminium-hier-et-demain/131>
- [15] Lorrain, O. (2010). *Analyse expérimentale et numérique du procédé de soudage par friction malaxage FSW*. [Thèse de doctorat]. L'école National Supérieur d'Arts et Métiers. <https://theses.hal.science/pastel-00515112v1>
- [16] Emamian, S., Awang, M., Yusof, F., Hussain, P., Mehrpouya, M., Kakooei, S., Moayedfar, M., & Zafar, A. (2017). *A Review of Friction Stir Welding Pin Profile*. In M. Awang (Éd.), *2nd International Conference on Mechanical, Manufacturing and Process Plant Engineering* (p. 1-18). Springer Singapore.
- [17] Guérin, B. (2015). *Soudage d'alliages d'aluminium par la technologie de friction stir welding bobbin tool* [Thèse de doctorat]. École national supérieure des mines. <https://theses.hal.science/tel-01127650/>
- [18] SBB l'innovation en aluminium. (2021, Avril). *Avantages du soudage par friction malaxage/friction stir welding*. Repéré le 10 Mars 2023 à <https://www.sbb.ca/fr/blog/sbb-propose-la-soudure-par-friction-malaxage--friction-stir-welding-fsw>
- [19] American Welding Society. (2016). *Specification for friction stir welding of aluminum alloys for aerospace applications* (AWS D17.3/D 17.3 M: 2016)
- [20] Organisation International de normalisation. (2020). *Soudage par friction malaxage-aluminium* (ISO-25239 : 2020).
- [21] The Aluminum Association (2005). *Aluminum Design Manual: Specifications & guidelines for aluminum structures*.
- [22] Groupe CSA. (2019). *Code canadien sur le calcul des ponts routiers* (CSA-S6 :19)
- [23] A.Hobbacher.(2008). *Recommendations for fatigue design of welded joints and components* (XIII-2151r4-07/XV-1254r4-07)
- [24] European committee for standardization. (2007). *Design of aluminum structures-Part 1-1: general structural rules* (EN 1999-1-1)

- [25] M. A. Wahab, M. W. Dewan, D. J. Huggett, A. M. Okeil, T. W. Liao & A. C. Nunes. (2019). *Challenges in the detection of weld-defects in friction-stir-welding (FSW): Advances in Materials and Processing Technologies*, 5:2, 258-278, DOI: 10.1080/2374068X.2019.1575713.
- [26] Fleury, A. (2020). *Conception en fatigue de joints soudés par friction malaxage dans les tabliers de pont en aluminium*. [Mémoire de maîtrise]. Université du Québec à Chicoutimi, Saguenay. https://constellation.uqac.ca/5538/1/Fleury_uqac_0862N_10652.pdf
- [27] Guo, S H. (2018). *Fatigue behaviour of aluminum friction stir welds under highway bridge loading conditions*. [Mémoire de maîtrise]. University of Waterloo,
- [28] P.M.G.P. Moreira. M.A. V de Figuero. P.M.S.T. de Castro. (2007). *Fatigue behaviour of MIG and FSW weldments for two aluminum alloy: theoretical and applied fracture mechanics*, (48), 169-177.
- [29] Stirweld. (s.d). *Technology FSW stirweld*. Repéré le 15 Mars 2023 à <https://stirweld.com/soudage-par-friction-malaxage/technologie/>
- [30] Zoghalmi, M. (2017). *Influence des paramètres du procédé FSW sur les caractéristiques des bandes alternées (onion ring) dans les alliages d'aluminium*. [Mémoire de maîtrise] École de technologie supérieure. (Université du Québec à Montréal). https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/2003/1/ZOGHLAMI_Mariem.pdf
- [31] Trimech, M., Annan, C-D., Walbridge, S., Amira, S., & Nadeau, F. (2021). *Defects and quality control of friction stir welded joints in aluminum bridge decks*. Proceeding of the Canadian society of civil engineering annual conference 2021. Vol 248, 525-536. https://doi.org/10.1007/978-981-19-1004-3_43
- [32] Outil blog. (2018). *Quelles méthodes d'inspection des soudures existent?* Repéré le 16 Mars 2023 à *Quelles méthodes d'inspection des soudures existent et - Outils Blog* (leagueoftools.com)
- [33] American Society for Testing and Materials. (2019). *Standard practice for contact ultrasonic testing of weldments* (ASTM E164).
- [34] Organisation International de normalisation. (2018). *Non-destructive testing of welds- ultrasonic testing- Techniques, testing levels and assessment*. (ISO 17640: 2018)
- [35] Admin, D. (2014). *Métallographie de soudure-L'examen macroscopique et macrographique d'un joint soudé*. Repéré le 16 Mars 2023 à <https://www.soudeurs.com/site/metallographie-de-soudure-l-examen-macroscopique-et-macrographique-d-un-joint-soude-221/>

- [36] Admin, D. (2012). *Métallographie de soudure-L'examen microscopique et micrographique d'un joint soudé*. Repéré le 16 Mars 2023 à <https://www.soudeurs.com/site/metallographie-de-soudure-l-examen-microscopique-et-micrographique-d-un-joint-soude-407/>
- [37] Lászlo,G., & Ichiro,O. (2013). *Fatigue behaviour of friction Stir welded aluminum bridge segment: Material and design*, (44), 119-127. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.08.007>
- [38] Struers Ensuring Certainty. (s.d). *Essai de dureté de Vickers*. Repéré le 16 Mars 2023 à <https://www.struers.com/fr-FR/Knowledge/Hardness-testing/Vickers>
- [39] Buehler. (s.d). *Essais de dureté de Vickers*. Repéré le 16 Mars 2023 à <https://www.buehler.fr/vickers-hardness-testing.php>
- [40] Farah,A. (2013). *Comportement en fatigue de joints d'aluminium 7075-T6 soudés par friction malaxage et parachevés*. [Thèse de doctorat]. École Polytechnique de Montréal. https://publications.polymtl.ca/1316/1/2013_AssafFarah.pdf
- [41] Texier, D., Atmani, F., Bocher, P., Nadeau, F., Chen, J., Zedan, Y., Demers, V., & Vanderesse,N. (2018). *moreira between microstructural and structural-contact-fretting crack initiation on the fatigue performance of FSW and GMAW aluminum alloys welded joints*, Vol 116, 220-223. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.06.020>
- [42] Amphi. (2008). *Comportement, endommagement et rupture en fatigue*. Repéré le 16 Mars 2023 à http://mms2.ensmp.fr/mat_paris/duree/transparents/Amphi_Fatigue_2008.pdf
- [43] Amira, S., Giguère, N., Toupin, M., & Toupin, J-D. (2018). *The Manufacturing of the New Pedestrian Bridge of the Petite Décharge River (Alma, Quebec, Canada). Implementation, Lessons Learnt and Future Perspectives*. 12th International Symposium on Friction Stir Welding. Chicoutimi, Canada.
- [44] American Welding Society. (2014). *Structural welding code-aluminum (AWS D1.2/D1.2M:2014)*.
- [45] Shusheng,D., Xinqi Y., Guohong L., & Bo, J. (2006). *Comparative study on fatigue properties between AA2024-T4 friction stir welds and materials*, Vol (435-436), 389-395. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.07.009>
- [46] Ericsson, M., et Sandstrom, R., (2003). *Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds and comparison with MIG and TIG: international journal of fatigue* 25(12).1379-1387. DOI:10.1016/S0142-1123(03)00059-8
- [47] Wang, R., & Mi, P. (2020). *Study on fatigue strength of fsw joints of 5083 aluminum alloy with kissing bond defect: Journal of Mechanical Science and Technology*, (34), 2761-2766. <https://doi.org/10.1007/s12206-020-0608-3>

- [48] Moreira, P.M.G.P., De Jesus. A.M.P., A.S. Ribeiro, P.M.S.T. de Castro. (2008). *Fatigue crack growth in friction stir welds of 6082 T6 and 6062-T6 aluminum alloy: a comparison. Theoretical and applied fracture mechanics*, Vol 50, 81-91. <https://doi.org/10.1016/J.TAFMEC.2008.07.007>
- [49] Prime, M.B., Gnaupel-Herold, T., Baumann, J.A., Lederich, R. J., Bowden, D. M., & Sebring, R. J. (2006). *Residual stress measurements in a thick, dissimilar aluminum alloy friction stir weld*. 19(5), 4013-4021. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.04.034>
- [50] Zwick-roell. (s.d). *Courbe de wholer/Ligne wholer*. Repéré le 19 Mars 2023 à Wöhler: Courbe de Whöler, ligne de Whöler et diagramme | ZwickRoell
- [51] Foucheneau, R. (2014). *Modélisation probabiliste des courbes S-N*. [Thèse de doctorat] Université Paris-Sud. <https://theses.hal.science/tel-00990770>
- [52] Groupe CSA. (2016). *Strenght design in aluminum (CSA-S157 :16)*
- [53] stirweld. (s.d). L'importance de l'outillage de bridage. Repéré le 19 Mars 2023 à <https://stirweld.com/importance-outillage-de-bridage/>
- [54] amazon. (s.d). *diagtree pied à coulisse électronique numérique en fibre de carbone avec écran LCD 150 mm*. Repéré le 19 Mars 2023 à Diagtree Pied à coulisse électronique numérique en fibre de carbone avec écran LCD 150 mm : Amazon.ca: Commerce, Industrie et Science
- [55] MTS. (s.d). Enhanced travel axial extensometers. Repéré le 19 Mars 2023 à <https://www.mts.com/en/products/materials/extensometers/enhanced-travel-axial-extensometers>
- [56] American Society for Testing and Materials. (2016). *Standard test methods for tension testing of metallic materials. (ASTM-E8/E8M)*
- [57] Materiel welding. (2023). *Types of ultrasonic testing, Displays: A-scan B-scan and C-scan*. Repéré le 19 Mars 2023 à <https://www.materialwelding.com/types-of-ultrasonic-testing-displays-a-scan-b-scan-and-c-scan/>
- [58] American Society for Testing and Materials. (2011). *Standard guide for metallographic specimens (ASTM E3-11)*.
- [59] Duval, M. (2018). *Soudage par friction malaxage (FSW) [Rapport de recherche]*. <https://aluquebec.com/media/1743/ceial-soudage-de-l-aluminium-par-friction-malaxage-fsw.pdf>
- [60] Struers ensuring certainty. (n.d). *Généralités sur l'attaque*. Saisi le 25 mai 2023 à <https://www.struers.com/fr-FR/Knowledge/Etching#applicationspecialists>

- [61] K. Elangovan; V. Balasubramanian. Influence of post-weld heat treatment on tensile properties of friction stir-welded AA6061 aluminum alloy joints. *Material characterization* (2008) 59.1168-1177
- [62] K. Fuse; V. Badheka. Bobbin tool friction stir welding: A review. *Science and Technologic of welding and Joining* (2019), 24:4, 277–304.
- [63] Zhe Liu; Wei Guan; Huijun Li; Dongpo Wang; Lei Cui. Study on the relationship between welding force and defects in bobbin tool friction stir welding. *Journal of manufacturing process* (2022), 84, 1122-1132.
- [64] Chen S, Li H, Lu S et al. Temperature measurement and control of bobbin tool friction stir welding. *Int J Adv Manuf Technol.* (2016). 86(1-4). 337-346.
- [65] Rouis, M. (2021). *Comportements mécaniques en soudage bout à bout par friction malaxage avec bobbin tool des extrusions en aluminium 6061-T6*. [Essai de maîtrise]. Université du Québec à Chicoutimi.
- [66] Esmaily M, Mortazavi N, Osikowicz W et al. *Bobbin and conventional friction stir welding of the thick extruded AA6005-T6 profiles*. *Mater Des.* (2016). 108.114-125.
- [67] Luis trueba Jr. Monica A Torres Lucie B Johannes Daniel Rybicki. *Process optimization in the self-reacting stir welding of alu-minum 6061-T6*. *Int J Mater form* (2018) 11. 559-570
- [68] Gariépy A, Gambou-Bosca A, Grégoire H, Nadeau F. *Investigation on the fatigue fracture characteristics between friction-stir welded aluminum overlap joints with different alloys and tools*. *Proceedings of the 12th International Symposium on FSW* (2018)
- [69] He C, Liu Y, Dong J, Wang Q et al. *Through thickness property variations in friction stir welded AA6061 joint fatigued in very high cycle fatigue regime*. *International Journal of Fatigue.* (2016). 82. 379-386.
- [70] Jain N, Kumar R. *Fatigue analysis of the friction stir welded AA6061-T6 aluminum alloy*. *Materials Research Express.* (2020). 016501.
- [71] Okura I, Hagisawa N, Naruo M, Toda H. Fatigue behaviour of aluminum deck fabricated by friction stir welding. *JSCE, J Struct Mech Earthquake Eng* 2003; 20 (1): 55-67.
- [72] American Society for Testing and Materials. (2015). *Standard practice for conducting force controlled constant amplitude axial fatigue tests of metallic materials* (ASTM E466).
- [73] AluQuébec Grappe de l'aluminium. (N.d). *Répertoire des passerelles conçues et/ou fabriquées au Québec*. Saisi le 02/09/2023 à <https://aluquebec.com/repertoires/passerelles/>
- [74] Canadian Civil engineer -L'ingénieur civil canadien. (2018). *Aluminium structures - Structures en aluminium*. Saisi le 02/09/2023 à https://csce.ca/wpcontent/uploads/2018/06/CIVIL_SPRING18_LAZ-de.pdf

Annexes

A. Annexe 1- Résultats des tests d'ultrasons à bain d'immersion

Le graphique est celui du test d'ultrason des parties de l'extrusion finale soudée avec les paramètres optimisés servant pour les essais finaux.

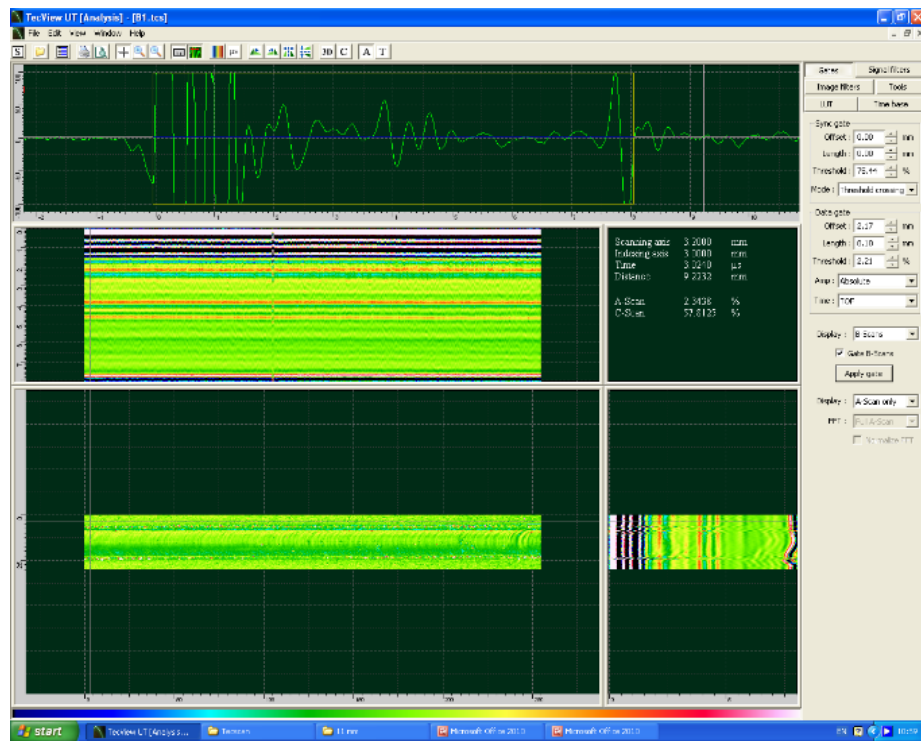


Figure A.1 Test d'ultrason pour échantillons de 500 mm test finaux (centre)

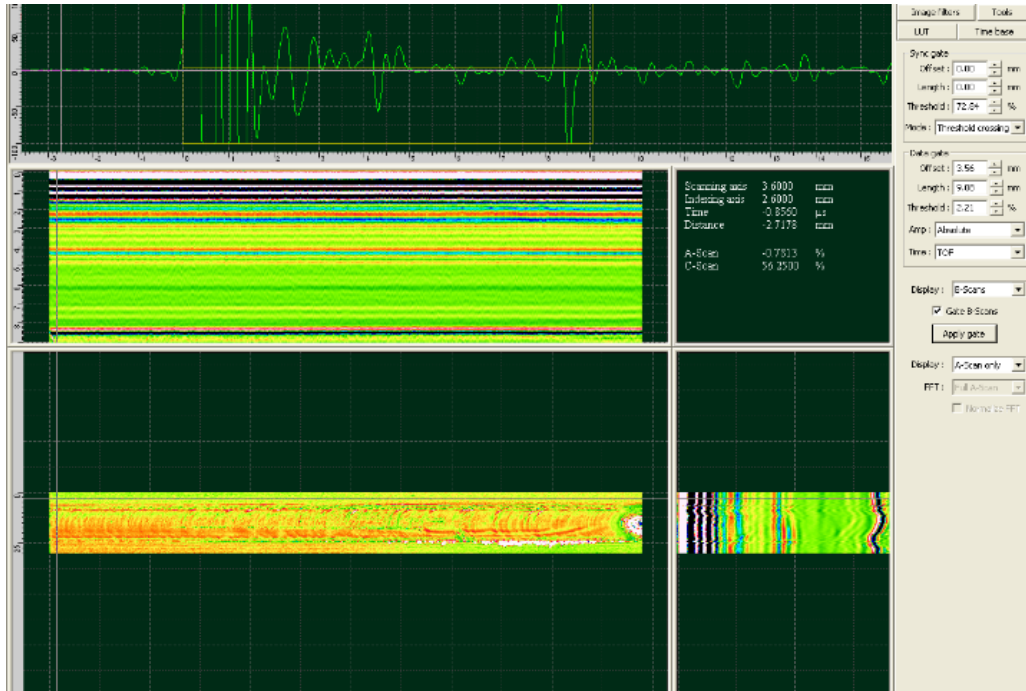


Figure A.2. Test finaux 300 mm d'extrusion soudés (fin de la zone soudée)

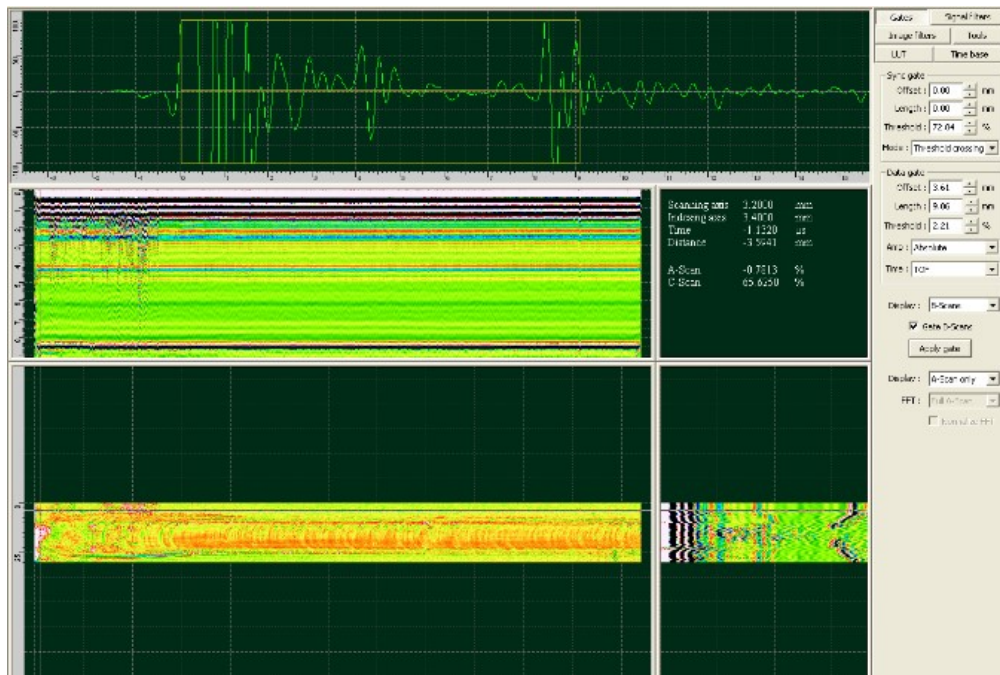


Figure A.3. Test finaux 300 mm d'extrusion soudés (début de la zone soudée)

Les graphiques suivants sont ceux des tests de qualification.

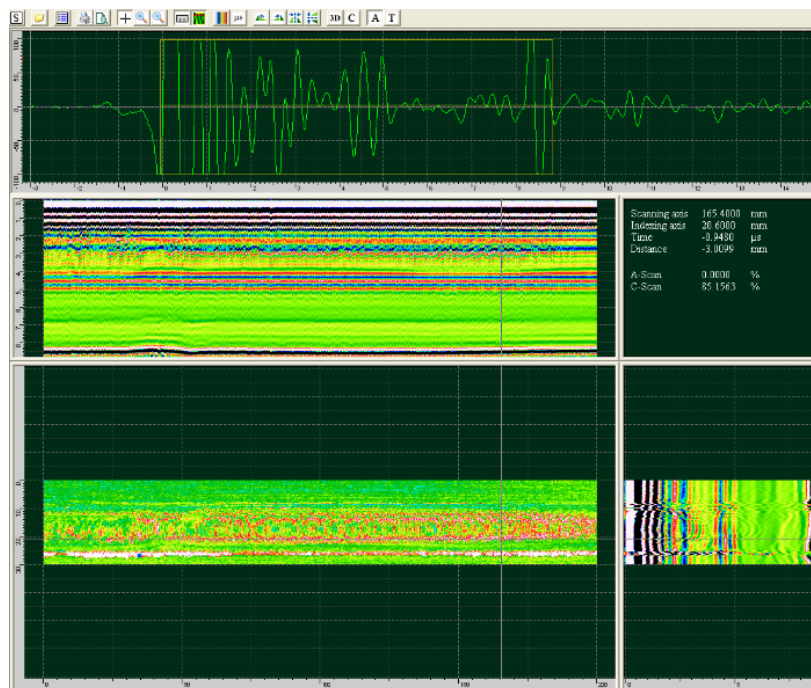


Figure A.44. Test d'ultrason Essai 1 (400 rpm - 400 mm/min)



Figure A.5. Test d'ultrason Essai 2 (500 rpm - 500 mm/min)

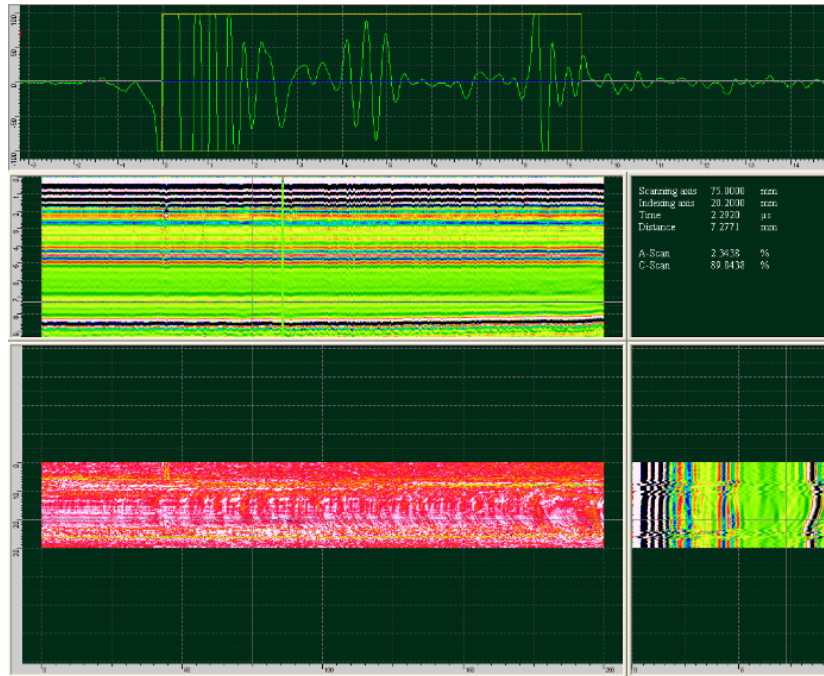


Figure A.5. Test d'ultrason Essai 4 (850 rpm - 650 mm/min)

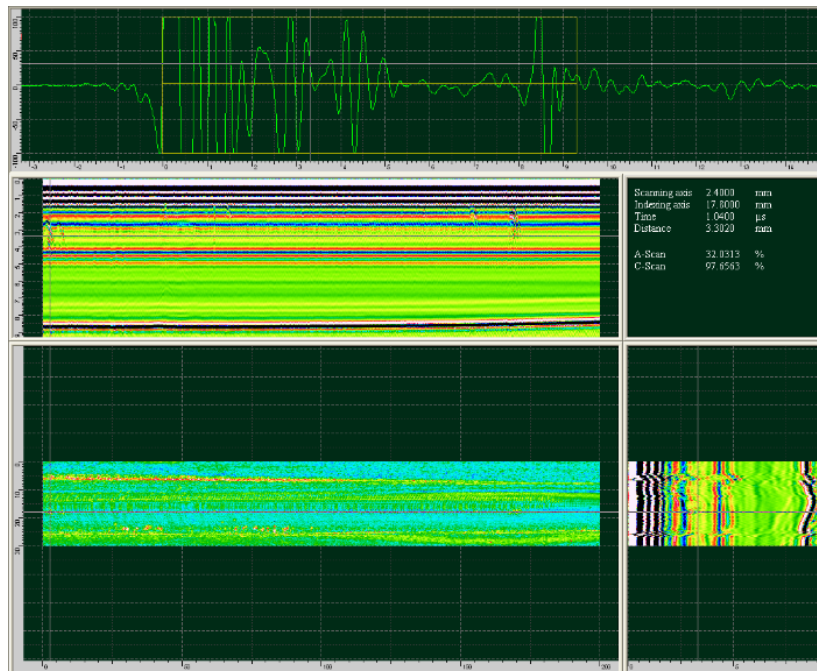


Figure A.6. Test d'ultrason Essai 4-2 (500 rpm - 500 mm/min)

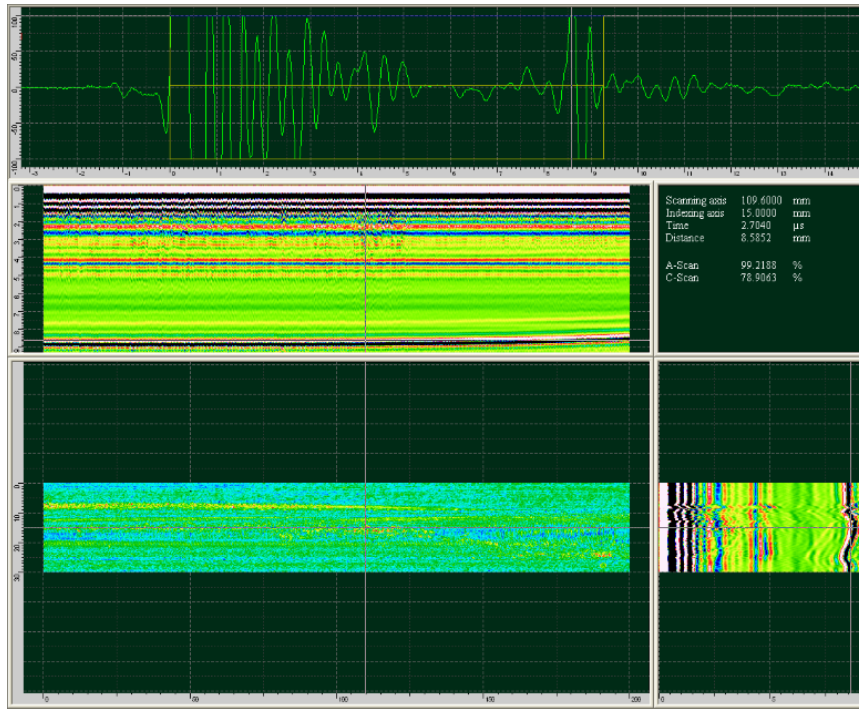


Figure A.7. Test d'ultrason Essai 3 (600 rpm - 600 mm/min)

B. Annexe 2 – Forces et moment de soudage

Les graphiques représentent les forces de soudage dont la force de la traverse (traverse force), la force de forge (forge force), la force de croisée (cross force) et le moment (torque) pour chacun des essais.

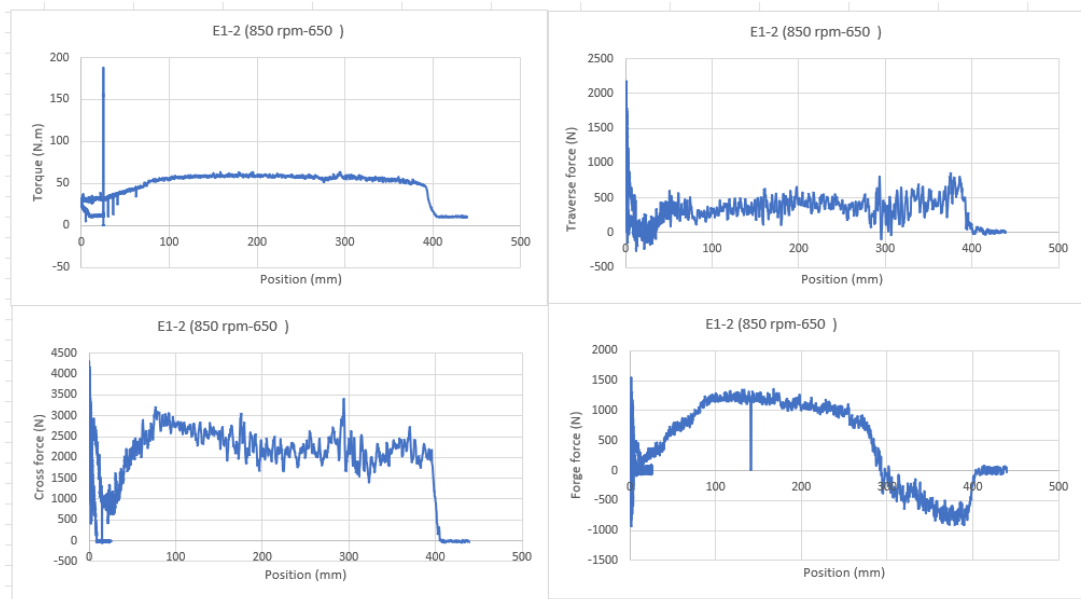


Figure B.1. Essai E1-2 : Moment, force de traverse, force de forge, cross force

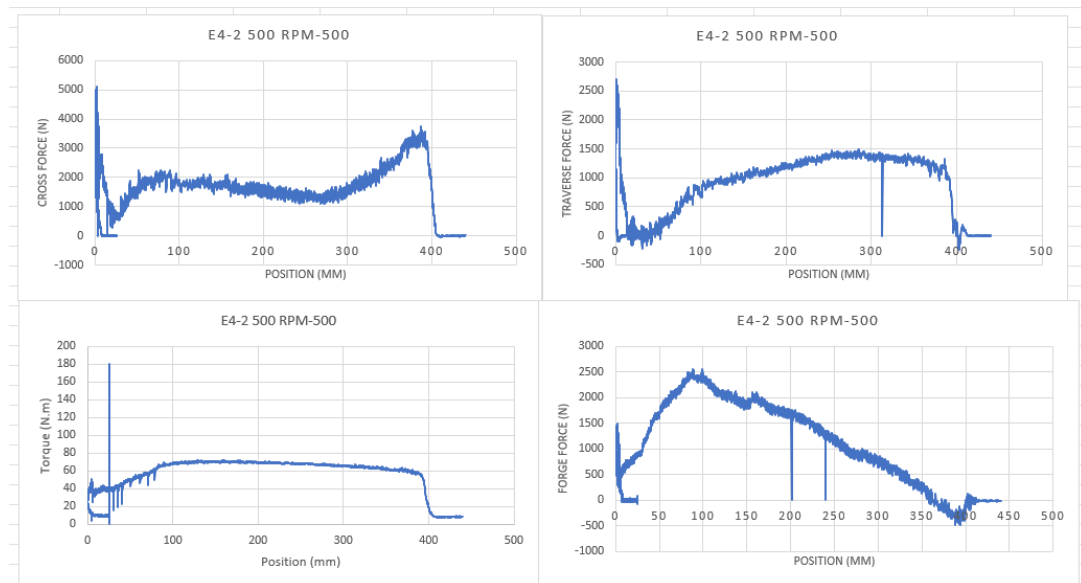


Figure B.2. Essai E4-2 : Moment, force de traverse, force de forge, cross force

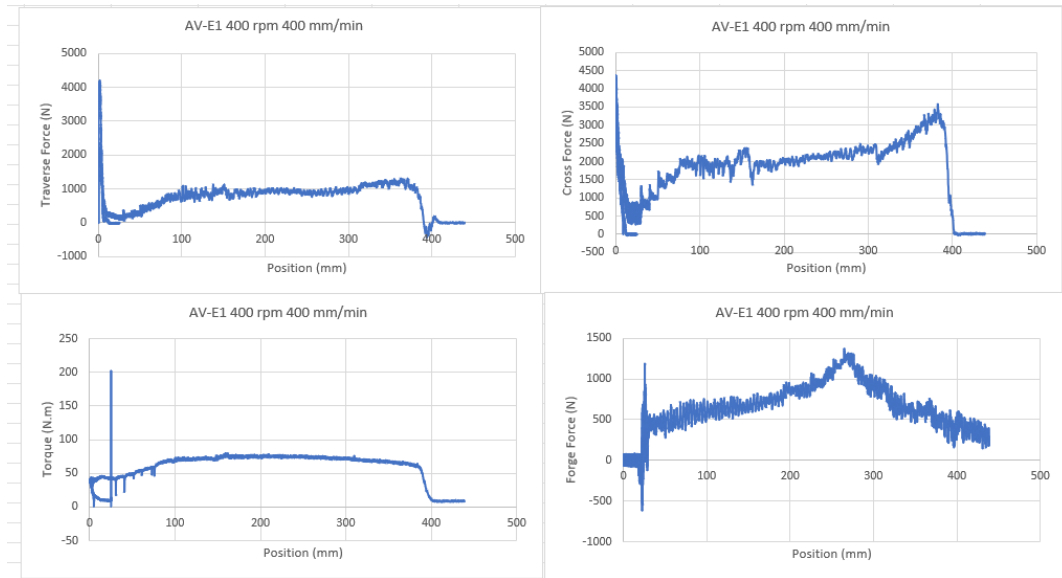


Figure B.3. Essai E1 : Moment, force de traverse, force de forge, cross force

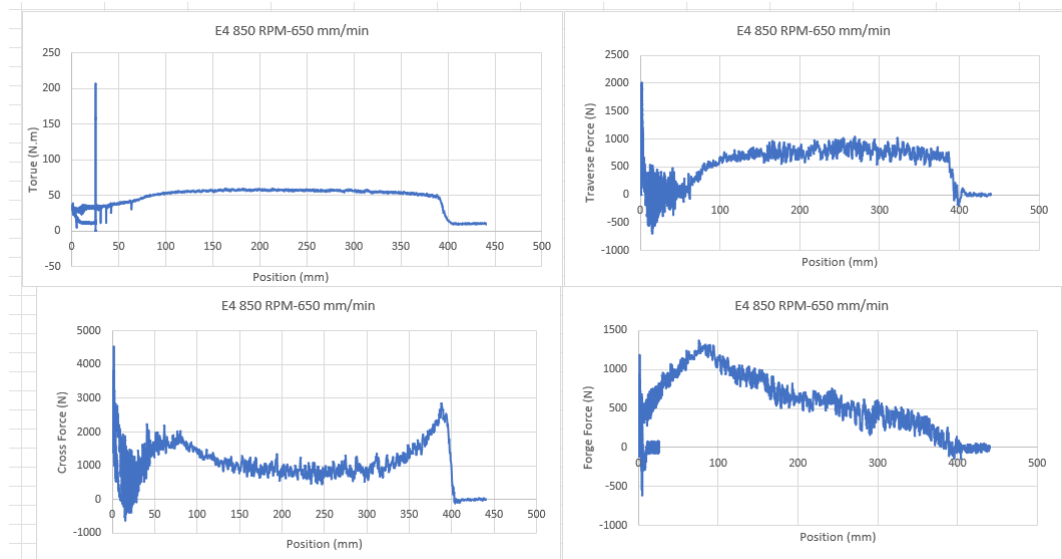


Figure B.4. Essai E4 : Moment, force de traverse, force de forge, cross force

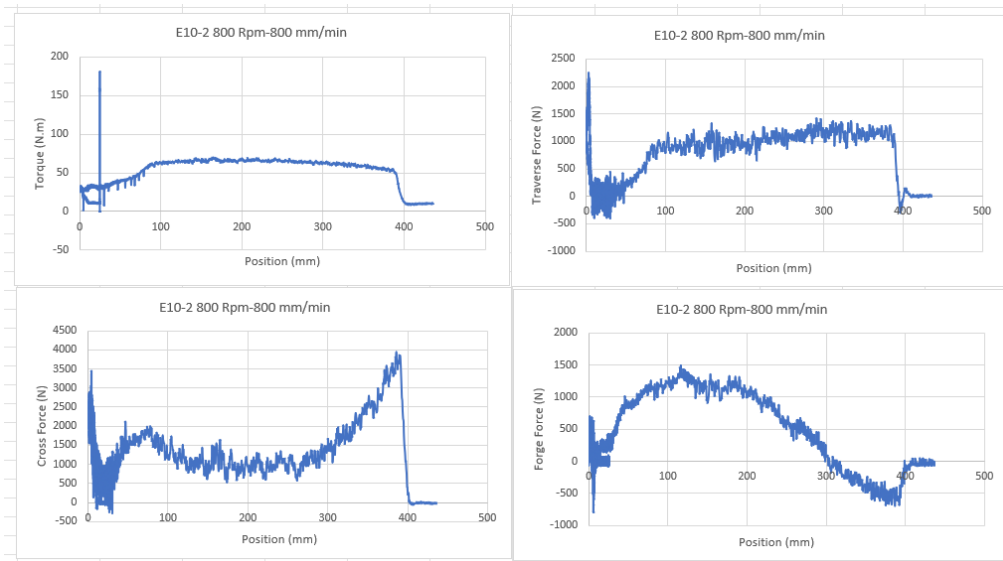


Figure B.5. Essai E10-2 : Moment, force de traverse, force de forge, cross force

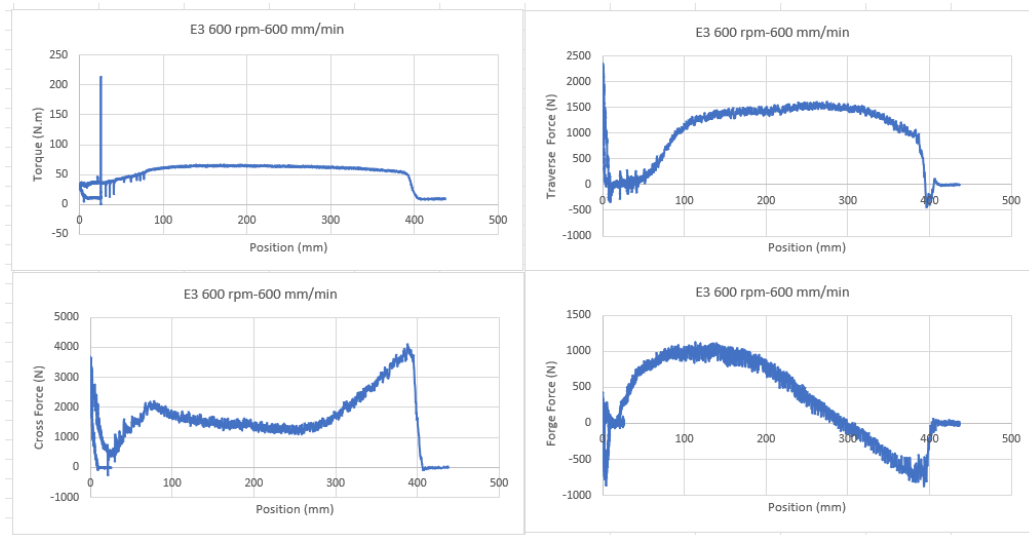


Figure B.6. Essai E3 : Moment, force de traverse, force de forge, cross force

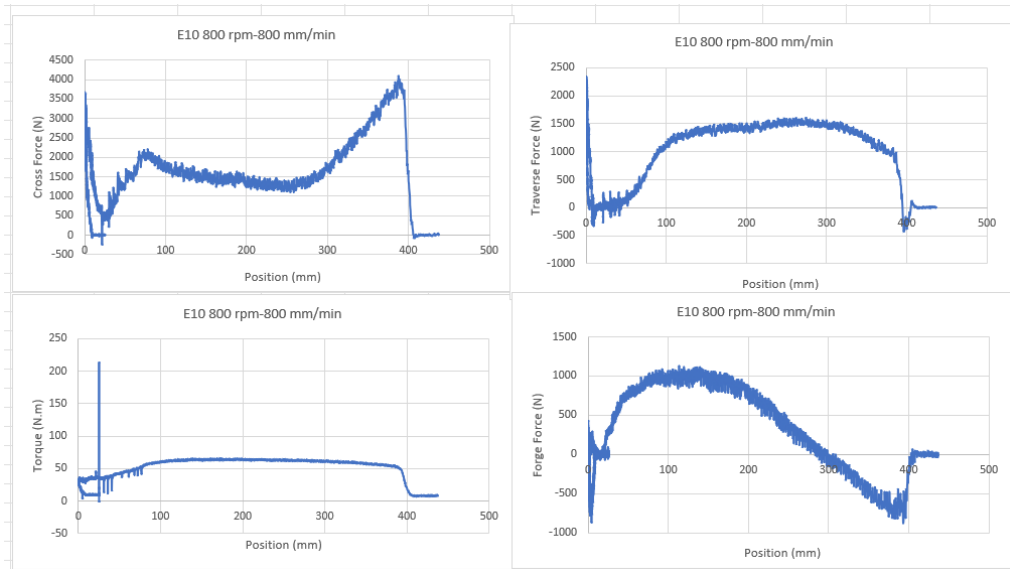


Figure B.7. Essai E10 : Moment, force de traverse, force de forge, cross force

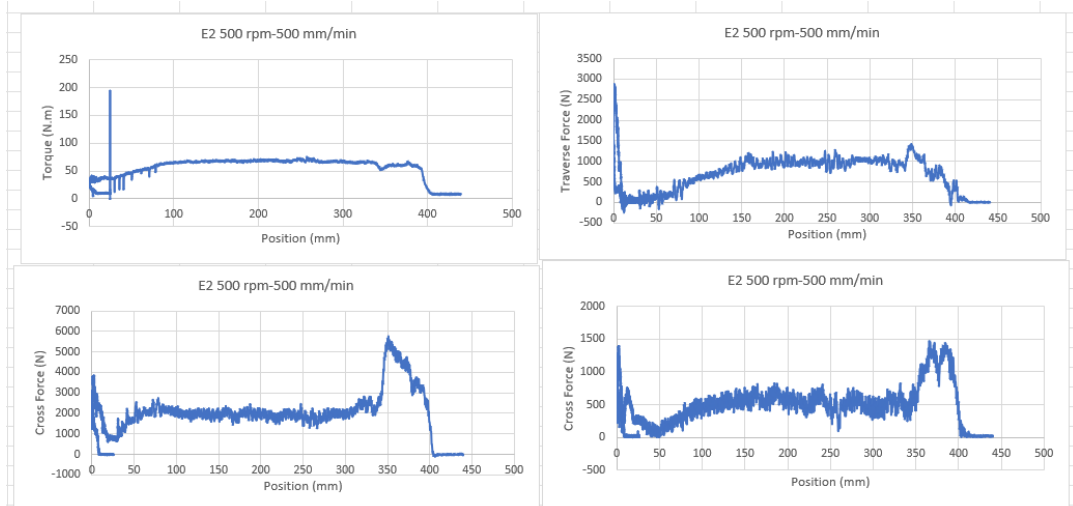
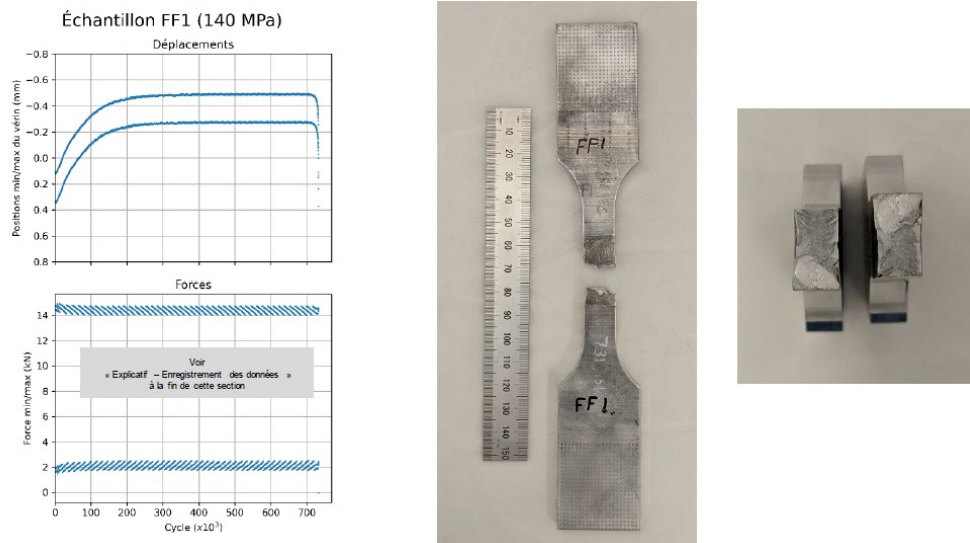
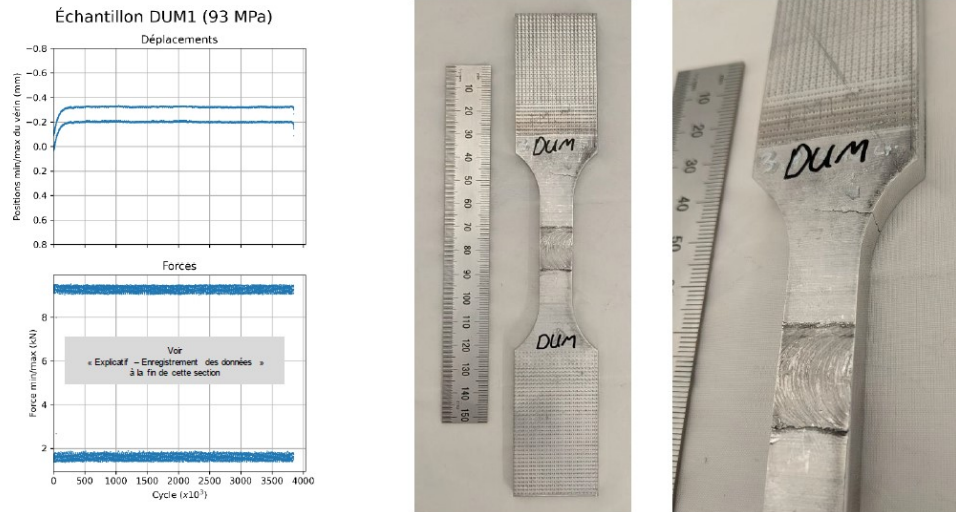


Figure B.8. Essai E2 : Moment, force de traverse, force de forge, cross force

**C. Annexe 3- Forces, déplacements, faciès de
rupture/localisation de zone de rupture**

- **Échantillons de fatigue testés au CNRC.**



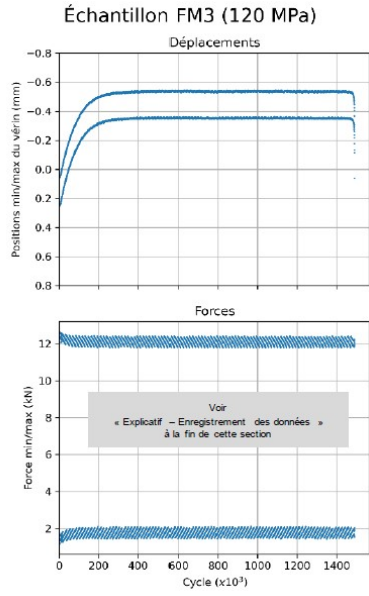


Figure C.3.FM3-Rupture dans la TMZA/ZAT

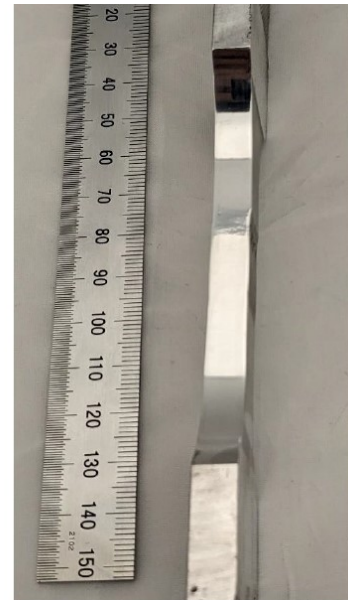
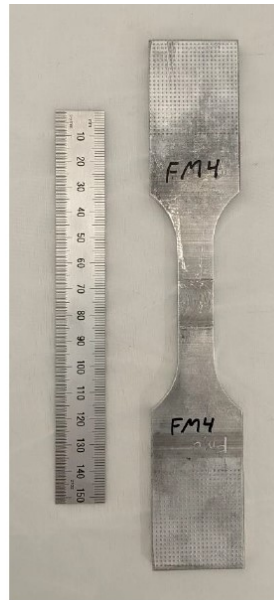
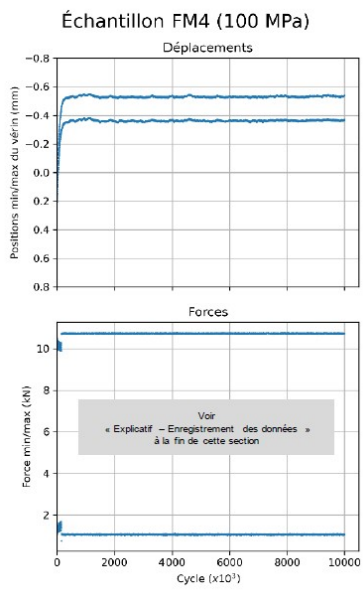


Figure C.4.FM4- Pas de rupture

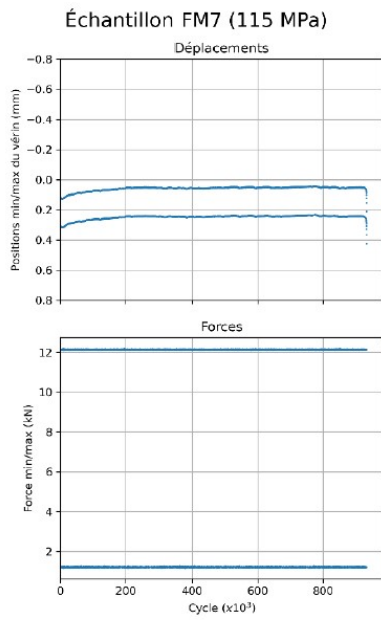


Figure C.5.FM7- Rupture dans la TMZA/ZAT

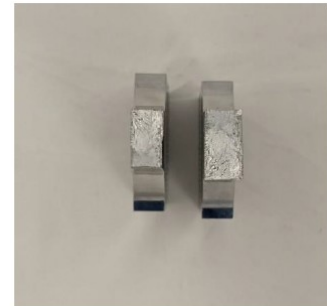
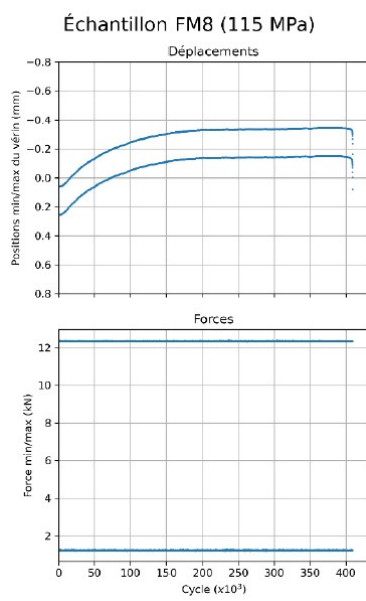


Figure C.6.FM8- Rupture dans la ZATM/ZAT

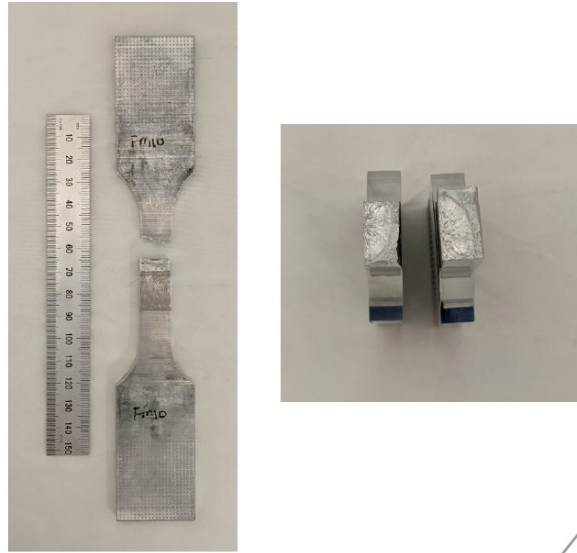
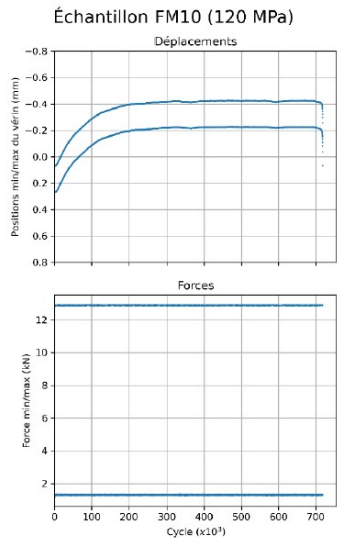


Figure C.7.FM10- Rupture dans la ZATM/ZAT

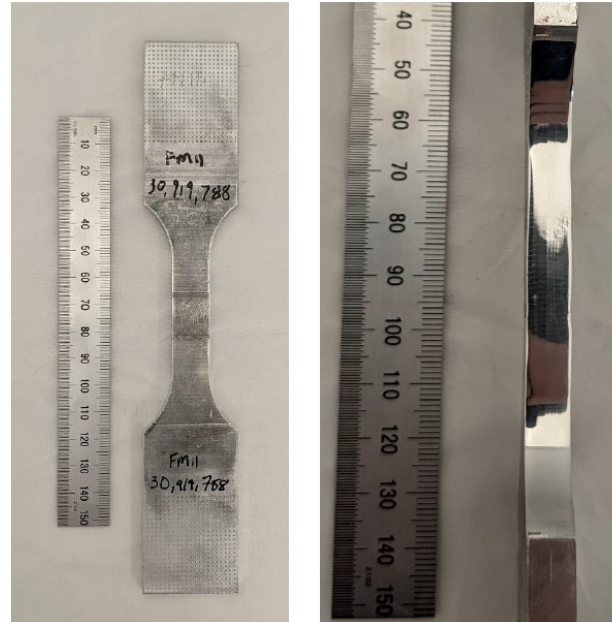
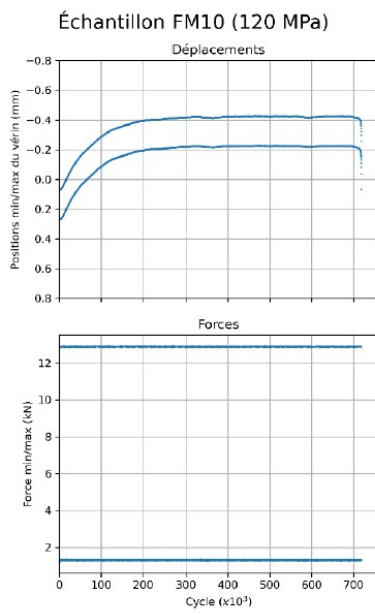


Figure C.8.FM11-Pas de rupture

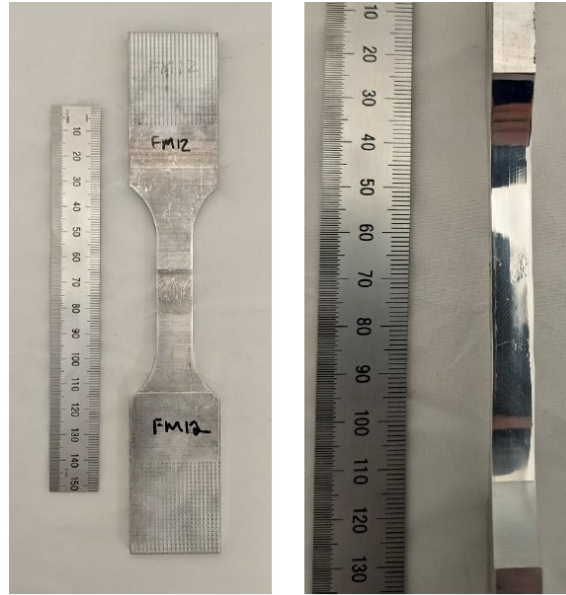
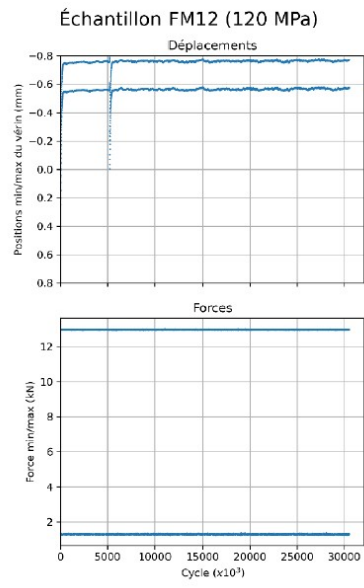


Figure C.9. FM12-Pas de rupture

- Échantillons de fatigue testés à l'Université du Québec à Chicoutimi.

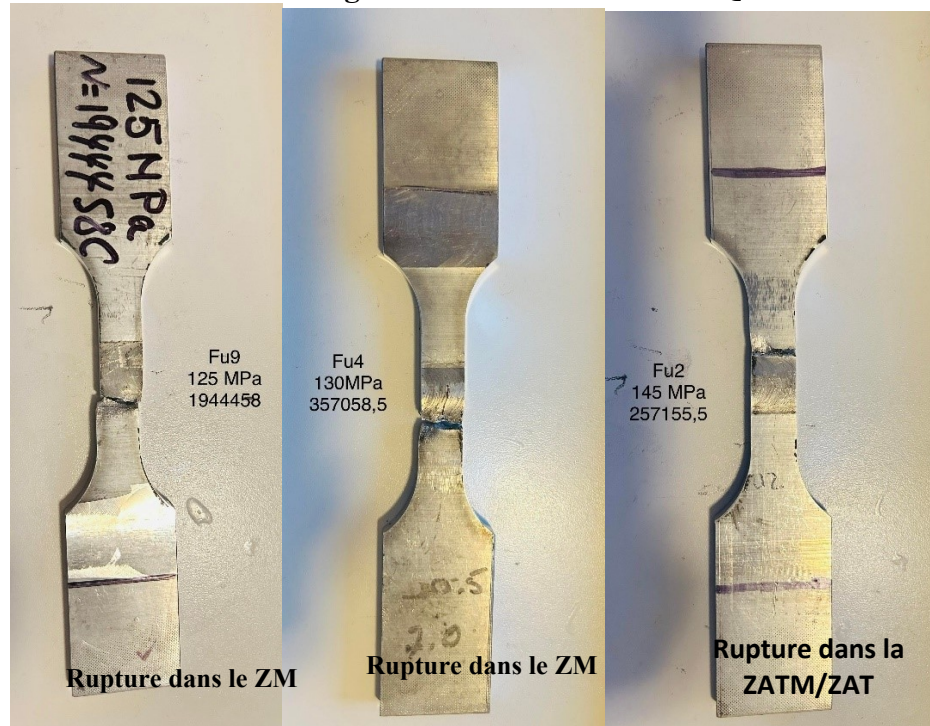


Figure C.10. Échantillon rompus

- **Échantillons testés à l'Université Laval**



Figure C.12. FL1-Rupture dans ZM



Figure C.11. FL2-Rupture dans ZATM/ZAT



Figure C.14. FL3-Rupture dans ZM



Figure C.13. FL4-Rupture dans ZATM/ ZAT



Figure C.16. FL6- Rupture dans ZATM/ZAT



Figure C.15. FL7- Rupture dans ZATM/ZAT



Figure C.17.FL8- Rupture dans ZM



Figure C.18.FL9- Rupture dans ZM

D. Annexe 4-Résultats des tests de tractions détaillés.

Tableau D.1 Résultats des tests de traction sur le métal de base

Échantillons	Limite ultime (MPa)	Limite élastique (MPa)	Limite ultime théorique (MPa)	Limite élastique théorique (MPa)	Gain limite ultime (%)	Gain limite élastique (%)	Module de Young (MPa)	Allongement à la rupture (%)
1	290	276	260	240	12	14	70174	16
2	291	276	260	240	12	14	70573	19
3	293	278	260	240	13	15	70046	19
4	296	283	260	240	14	18	70406	17
5	297	282	260	240	14	18	70825	21
6	295	285	260	240	14	19	70046	18
Moyenne	294	280	260	240	13	16	70345	18
Écart-type	3	4	0	0	1	2	287	2

Tableau D.2 Résultats des tests de traction pour essais finaux

Échantillons	Limites ultimes (MPa)	Limites élastiques (MPa)	Pourcentage d'allongement	% d'efficacité du joint (limite ultime)	% d'efficacité du joint (limite élastique)
TD1	217	121	13	74	44
TD2	212	127	10	73	46
TD3	208	111	10	71	40
TD4	217	137	14	74	49
TD6	210	126	13	72	45
TF2	215	138	11	74	50
TF3	216	138	11	74	50
TF4	217	136	14	74	49
TF6	218	140	13	75	50
TM1	210	129	12	72	46
TM2	207	118	12	71	42
TM3	215	121	12	74	44
TM4	216	139	14	74	50
TM5	221	128	11	76	46
TM6	219	118	13	75	42
T2	214	143	9	74	51
T3	209	142	11	72	51
T4	212	141	10	73	51
T5	210	150	10	72	54
T6	214	141	10	74	51
T7	221	128	14	76	46
T8	224	142	12	77	51
T9	216	145	11	74	52
T10	219	126	12	75	45
T11	221	126	12	76	45
T12	217	155	12	75	56
Moyenne	215	133	12	74	48
Écart-type	4	11	1	2	4

Tableau D.3 Résultats des tests de traction sur métal soudé

Échantillons	Vitesse de rotation(rpm)/avance (mm/min)	Moyenne limite élastique (MPa)	Moyenne limite ultime (MPa)	% d'efficacité du joint (limite ultime)	% d'efficacité du joint (limite élastique)	Allongement à la rupture (%)
E1	400/400	125	205	70	45	14
E1-2	850/650	119	208	71	43	11
E2	500/500	127	206	70	45	11
E3	600/600	141	219	74	50	13
E4	850/650	140	217	74	50	13
E4-2	500/500	128	217	74	46	13
E10	800/800	134	206	70	48	11
E10-2	800/800	132	213	72	47	11

E. Annexe 5- Résultats de métallographie

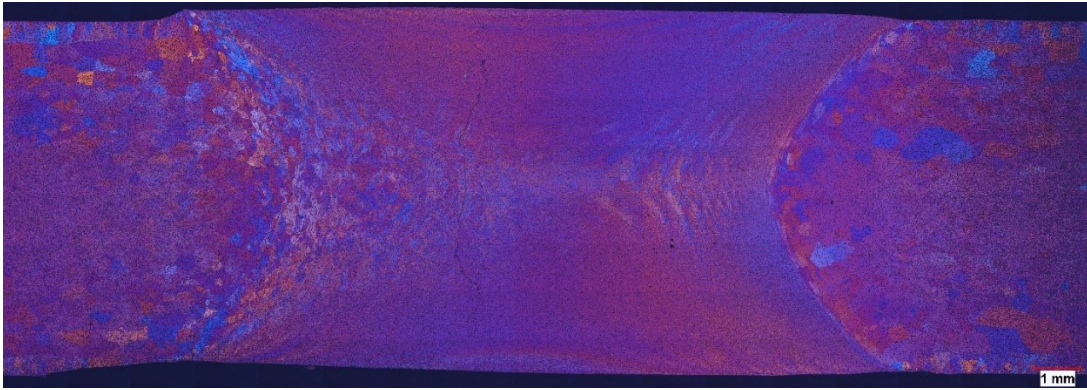


Figure E.1- Métallographie de E1

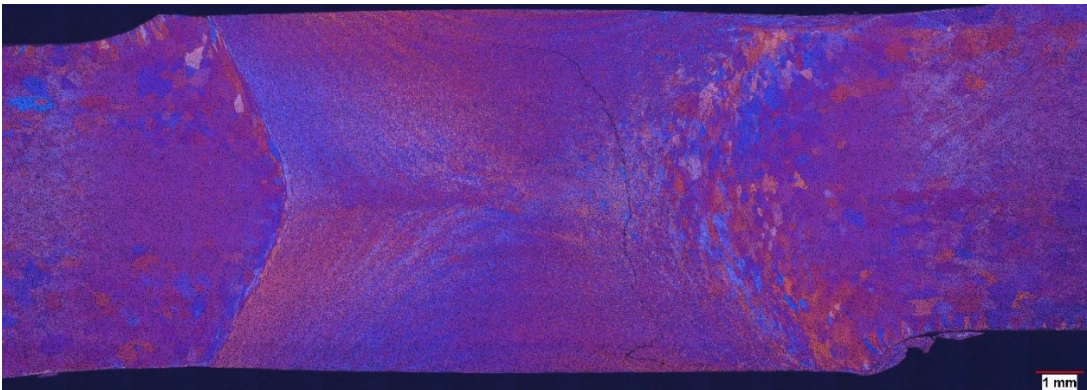


Figure E.2 - Métallographie de E1-2

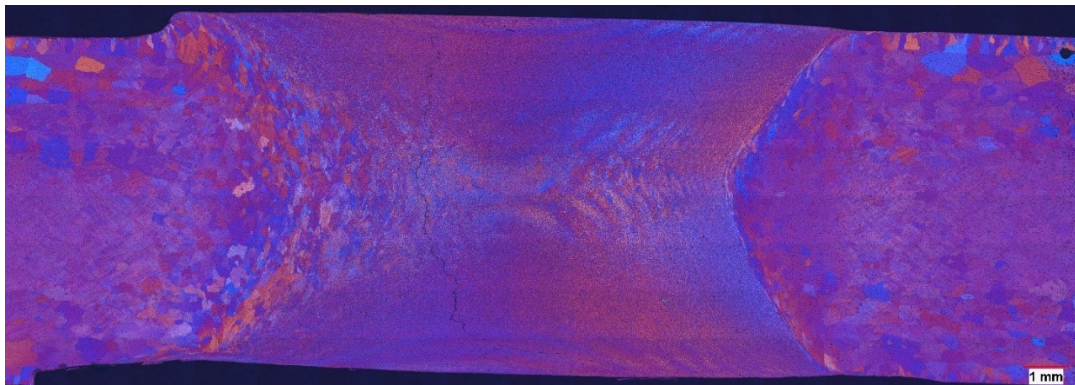


Figure E.3- Métallographie de E2

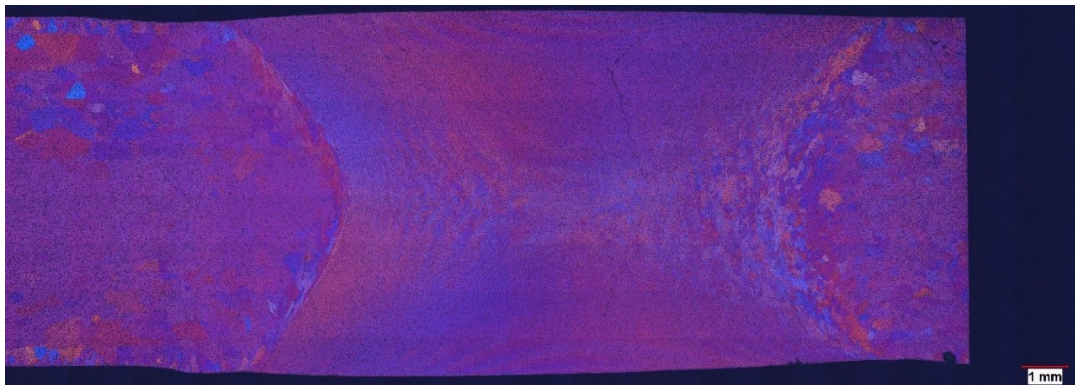


Figure E.4- Métallographie de E3

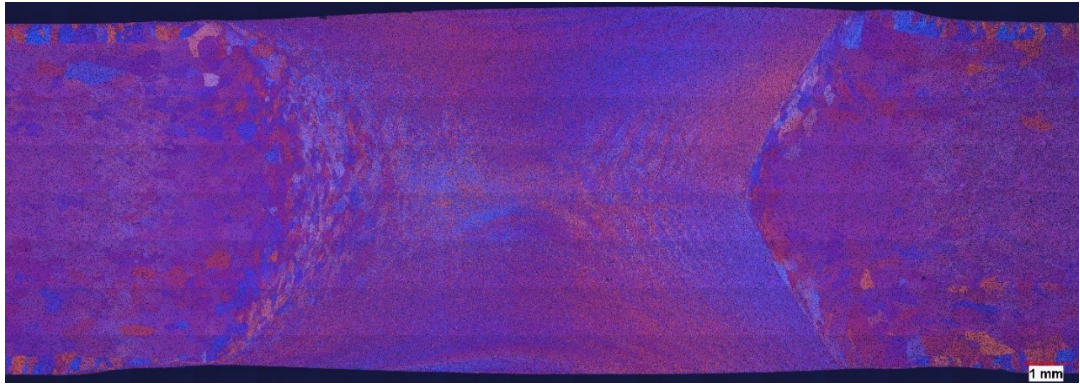


Figure E.5 - Métallographie de E4

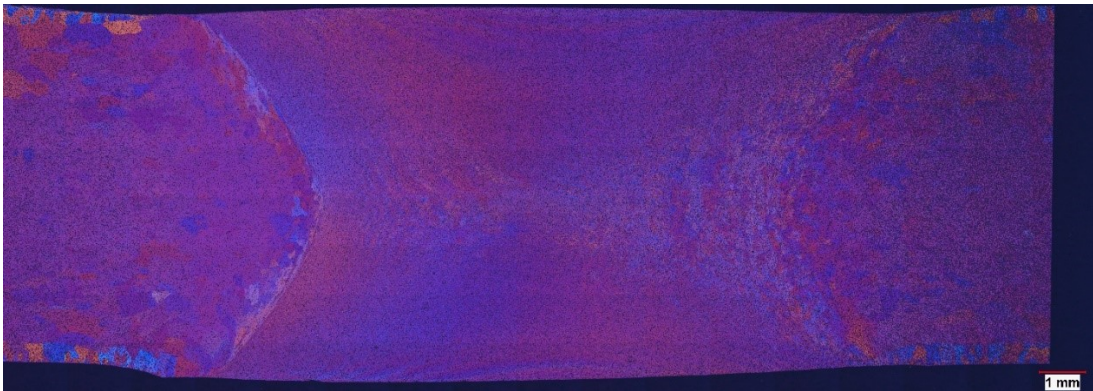


Figure E.6- Métallographie de E4-2

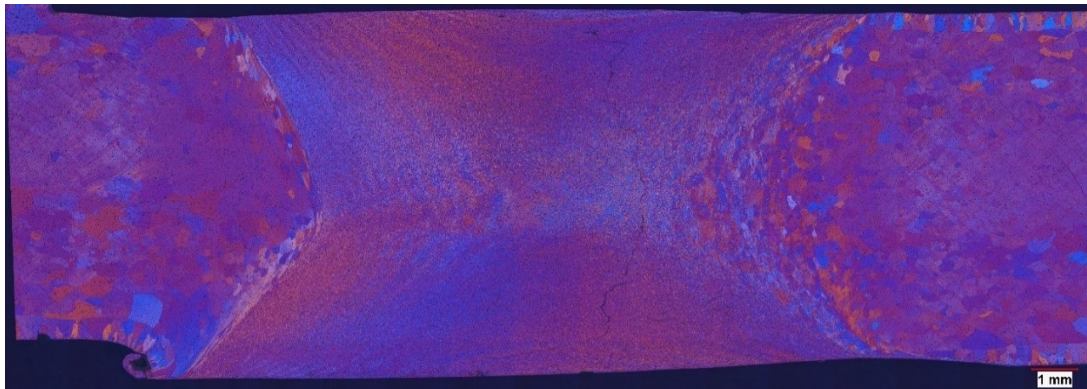


Figure E.7- Métallographie de E10

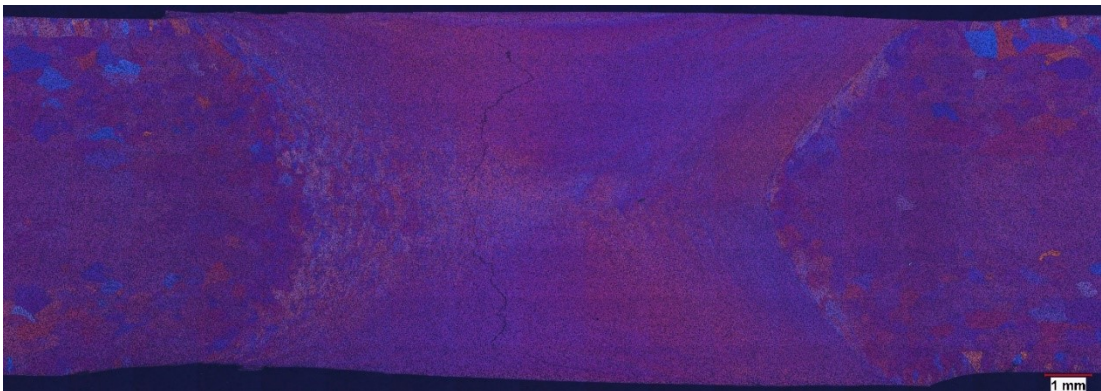


Figure E.8 - Métallographie de E10-2

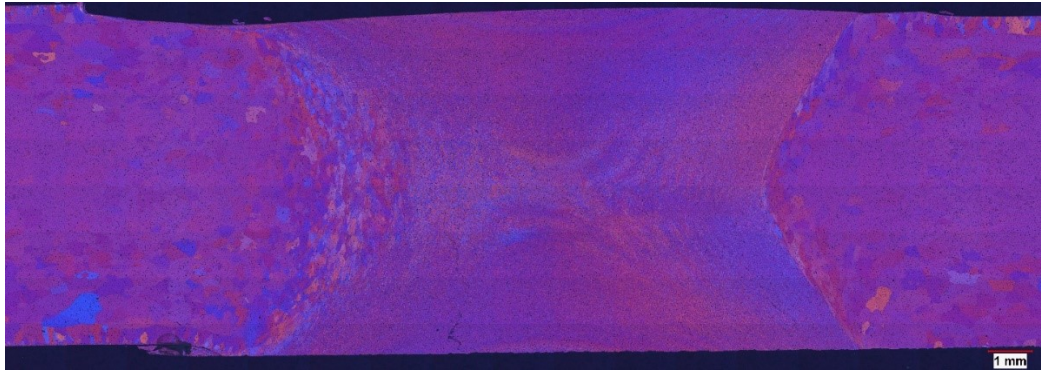


Figure E.9 - Métallographie de M2F

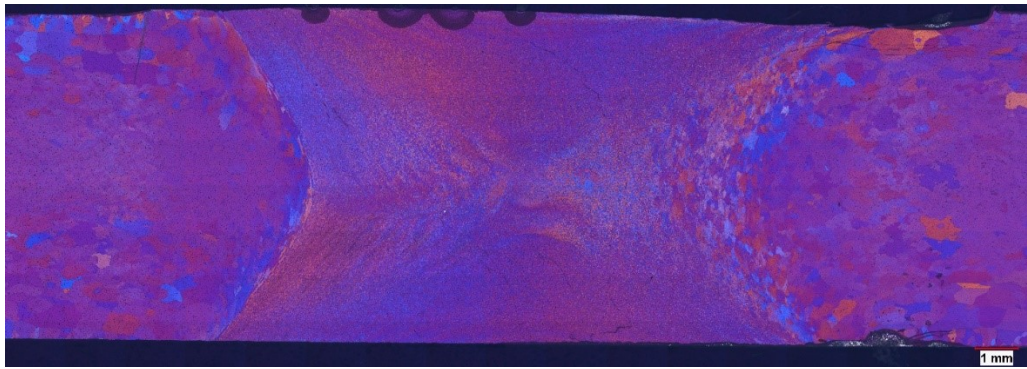


Figure E.10 - Métallographie de MM3