



Développement d'une méthode d'assemblage de profilés à angle droit par soudage par friction
malaxage

Par Jean Marie TOLNO

Sous la direction de Lyne St-Georges (UQAC) et la codirection de Mathieu Fiset (UQAC)

Mémoire présenté à l'Université du Québec à Chicoutimi en vue de l'obtention du grade de Maîtrise
ès sciences appliquées (M. Sc. A.) en ingénierie

Jury :

Dilip Sarkar, UQAC, Président du Jury

Éric-Villeneuve, Jury, Membre externe

Ahmed Rahem, Jury, UQAC, Membre interne

Lyne St-Georges, Direction de recherche, UQAC, Membre interne

Mathieu Fiset, Codirection de recherche, UQAC, Membre interne

Québec, Canada

© Jean Marie TOLNO, 2026

RÉSUMÉ

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre du développement d'une méthode innovante d'assemblage de profilés à angle droit en alliage d'aluminium par soudage par friction malaxage (SFM). Le SFM est un procédé de soudage à l'état solide basé sur l'action combinée de la chaleur générée par friction et du malaxage mécanique induit par un outil rotatif non consommable. Ce procédé présente de nombreux avantages par rapport aux procédés conventionnels de soudage par fusion, notamment une réduction des défauts métallurgiques (porosité, fissuration), une zone affectée thermiquement (ZAT) réduite, ainsi qu'une amélioration des propriétés mécaniques dans la zone soudée.

Cependant, malgré les nombreuses études sur les configurations d'assemblage classiques (bout à bout ou en recouvrement), les données disponibles sur l'application du SFM à des géométries en angle droit restent très limitées. Cette lacune freine le transfert industriel du procédé vers des structures complexes, pourtant fréquentes dans plusieurs secteurs industriels.

L'objectif principal de ce travail est d'adapter au procédé SFM une configuration d'assemblage complexe : le joint à angle droit entre deux profilés extrudés. Cette géométrie introduit plusieurs contraintes spécifiques, notamment la difficulté d'accès pour l'outil de soudage, des problèmes de contrôle du flux de matière dans la zone d'intersection, ainsi que des risques accrus de défauts internes tels que les vides ou les tunnels. Afin de répondre à ces défis, une méthodologie expérimentale rigoureuse a été mise en place, comprenant les étapes suivantes : conception d'un outillage de maintien adapté à l'assemblage en T, développement d'un outil de soudage spécifique (géométrie du pion, forme de l'épaule), et réalisation d'essais de laboratoire sur des profilés en alliage d'aluminium 6061-T6.

La caractérisation des joints soudés a été effectuée par des observations macro- et micrographiques, des essais de dureté Vickers et des essais mécaniques de traction et de flexion. Une attention particulière a été portée à l'analyse de la zone de malaxage (nugget), de la ZAT. Les résultats ont montré qu'il est possible d'obtenir des assemblages mécaniquement performants et exempts de défauts majeurs, sous réserve d'un ajustement précis des paramètres de soudage (vitesse de rotation, vitesse d'avance, angle d'inclinaison de l'outil, profondeur de plongée) et d'une conception adéquate de l'outil et du bridage.

Ce travail contribue à l'élargissement du champ d'application du SFM aux assemblages tridimensionnels complexes et ouvre la voie à des solutions de fabrication avancées pour des structures légères et rigides.

ABSTRACT

This master thesis focuses on the development of new methods for I section aluminum members connection using Friction Stir Welding (FSW). FSW is a solid-state welding process based on the combined effect of frictional heat and mechanical stirring generated by a non-consumable rotating tool. Compared to conventional fusion welding techniques, FSW offers numerous advantages, including a significant reduction in metallurgical defects (such as porosity and cracking), a narrower heat-affected zone (HAZ), and improved mechanical properties within the weld region.

However, despite extensive research on standard assemblies (such as butt or lap joints), the available data on the application of FSW to right-angle assemblies remains very limited. This knowledge gap hinders the industrial deployment of FSW for complex structural geometries, which are common in various engineering sectors.

The main objective of this work is to adapt the FSW process to a complex assembly configuration: the right-angle connection between two extruded aluminum members. This geometry introduces several challenges, including restricted tool access, difficulties in controlling material flow within the intersection area, and an increased risk of internal defects such as voids or tunnel formations. To address these challenges, a rigorous experimental methodology was implemented, consisting of the design of a dedicated clamping system for T-joint assemblies, the development of a specialized welding tool (optimized pin and shoulder geometry), and a series of parametric tests on 6061-T6 aluminum profiles.

The welded joints were characterized through macro- and micrographic observations, Vickers hardness measurements, as well as tensile and bending tests. Special attention was given to the analysis of the stir zone (nugget) and the HAZ. The results demonstrated the possibility of producing mechanically sound and defect-free joints, provided that precise control is maintained over key welding parameters (rotational speed, traverse speed, tool tilt angle, and plunge depth) and that the tool and fixturing system are properly designed.

This work contributes to expanding the applicability of FSW to complex three-dimensional assemblies and paves the way for advanced manufacturing solutions in the design of lightweight and rigid structural components.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	i
ABSTRACT	ii
TABLE DES MATIÈRES	iii
LISTE DES TABLEAUX	vi
LISTE DES FIGURES	vii
DÉDICACE	xi
REMERCIEMENTS	xii
Chapitre 1	1
1 Introduction	1
1.1 Mise en contexte de l'étude	1
1.2 Présentation générale	3
1.3 Problématique	5
1.4 Objectif.....	6
1.5 Organisation du mémoire	6
Chapitre 2	8
2 Revue de littérature	8
2.1 Description et caractéristiques de l'aluminium	8
2.2 Type d'alliages d'aluminium	8
2.3 Méthodes de soudage de l'aluminium	9
2.4 Le processus de soudage par friction malaxage (FSW)	10
2.5 Les paramètres de soudage et leurs effets sur les soudures :	12
2.5.1 Principaux paramètres du procédé	13
2.5.2 Avantages et désavantages du procédé de soudage par friction malaxage	16
2.6 Géométrie de l'outil	17
2.7 Equipements	19
2.8 Conception commune	20
2.9 Méthodes utilisées pour souder des pièces à angle	22
2.10 Microstructure et micro-dureté de soudures FSW	24
2.11 Méthode d'analyse de la microstructure	26
2.12 Propriétés mécaniques des joints FSW	27
2.13 Propriétés et comportements de l'alliage d'aluminium 6005A-T6	28

2.14	Microstructure et propriétés mécaniques locales et globales des soudures par friction-malaxage en alliage d'aluminium 6005A-T6	28
2.14.1	Évolution microstructurale dans les différentes zones	28
2.14.2	Propriétés mécaniques locales	29
2.14.3	Propriétés mécaniques globales de l'assemblage	30
2.15	L'alliage d'aluminium 6061-T6.....	30
2.16	Conclusion	31
Chapitre 3.....		32
3	MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE	32
3.1	Matériaux utilisés	33
3.2	Procédé de soudage	36
3.2.1	Montage utilisé.....	37
3.2.2	Outils de soudage.....	40
3.2.3	Paramètres de soudage utilisés	42
3.3	Essai mécanique	44
3.3.1	Assemblage de poutrelles	44
3.3.2	Détermination des paramètres de soudage pour l'assemblage ailes – âme (soudure en recouvrement)	45
3.3.3	Prélèvement des échantillons	49
3.3.4	Préparation des échantillons.....	50
3.4	Essai de traction	55
3.5	Essais de flexion grande échelle	58
3.6	SIMULATION NUMERIQUE.....	65
3.7	Approches de modélisation du lien entre les poutrelles	67
3.8	Chargements externes	68
3.9	Étude de convergence du maillage	71
Chapitre 4.....		72
4	RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	72
4.1	Essais de soudage	72
4.2	Essais de traction	73
4.3	Observations macrographiques	78
4.4	Test de microdureté Vickers.....	79
4.5	Essai de flexion sur poutrelles assemblées	81
4.5.1	Première configuration d'assemblage	81
4.5.2	Essai de flexion deuxième configuration.....	85

4.5.3	Rigidité élastique de l'assemblage	86
4.6	Étude de convergence du maillage	87
	Résultats de convergence de l'analyse de maillage	91
	Chapitre 5	94
5	Conclusion	94
	Annexe	97
	Référence	104

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 2-1: COMPARAISON DES PRINCIPALES METHODES DE SOUDAGE DE L'ALUMINIUM	10
TABLEAU 3-1: PROPRIÉTÉS DE L'ACIER AISI 4340 À 273 KELVINS	42
TABLEAU 3-2: PARAMETRE DES DIFFERENTS TESTS DE SOUDURE	43
TABLEAU 3-3: PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DE 6061-T6 ET 6005-T6 [47]	45
TABLEAU 3-4: PARAMÈTRES UTILISÉS POUR SOUDER L'ÂME	47
TABLEAU 3-5: RÉSUMÉ PROCÉDURE DE POLISSAGE	52
TABLEAU 3-6: CONVERGENCE DE MAILLE DE MODÈLES	71
TABLEAU 4-1: PARAMÈTRES DE SOUDURE OÙ LES ÉCHANTILLONS DES ESSAIS DE TRACTION ONT ÉTÉ PRÉLEVÉS	75
TABLEAU 4-2: RÉCAPITULATIF DES RÉSULTATS DES ESSAIS DE TRACTION	76
TABLEAU 4-3: RÉSULTAT DE L'ÉTUDE DE COMPARAISON DES CONTRAINTES POUR DIVERS CAS DE CHARGEMENT AVEC ET SANS ÂME SOUDÉE	91

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1-1: DEFINITIONS DES TERMES LORS DU SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE (FSW) [9].	4
FIGURE 1-2: LES ZONES D'ANGLES A SOUDER	5
FIGURE 2-1: PRINCIPALES COMPOSANTES D'UNE CELLULE DE SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE (FSW) [9].	11
FIGURE 2-2: ILLUSTRATION DES PHASES DE SOUDAGE [9].	12
FIGURE 2-3: VARIATION DE LA FORCE NORMALE ET DU COUPLE DURANT LES PHASES DE SOUDAGE [9].	12
FIGURE 2-4 : DESSIN SCHEMATIQUE DE L'OUTIL FSW [9]	17
FIGURE 2-5: OUTILS WORL ET MX TRIFLUTE DEVELOPPES PAR THE WELDING INSTITUTE (TWI) [25]	18
FIGURE 2-6: OUTILS FLARED-TRIFLUTE™ DÉVELOPPÉS PAR THE WELDING INSTITUTE (TWI) [25].	19
FIGURE 2-7: ARCHITECTURE GLOBAL D'UN ÉQUIPEMENT DE FSW [26]	19
FIGURE 2-8: CONFIGURATIONS DE JOINTS POUR LE SOUDAGE PAR FRICTION-MALAXAGE [8].	20
FIGURE 2-9: EXEMPLE DE PASSERELLE FABRIQUEE EN ALUMINIUM [28].	21
FIGURE 2-10: ILLUSTRATION D'UNE JONCTION POSSIBLE ENTRE DES EXTRUSIONS EN « I »	21
FIGURE 2-11: ILLUSTRATION DU TROU PRODUIT LORS DE L'EXTRACTION DE L'OUTIL EN FSW [5].	22
FIGURE 2-12: SCHEMA DE LA TECHNIQUE APPLIQUEE A UNE CONFIGURATION SOUDURE [29].	23
FIGURE 2-13: SCHEMA DU CONGE D'ANGLE SSFSW [29].	24
FIGURE 2-14: SCHEMA DU CORDON DE SOUDURE D'ANGLE ADSTIR SSFSW [29].	24
FIGURE 2-15: SCHEMAS DES ZONES AFFECTEES PAR LE SOUDAGE FSW [34]	25
FIGURE 2-16: MICROSTRUCTURE D'UNE SOUDURE FSW [35]	26
FIGURE 2-17: PROFILS DE MICRO-DURETE VICKERS D'UN ECHANTILLON BRUT DE SOUDAGE [36].	27
FIGURE 3-1: MÉTHODOLOGIE SUIVIE	32
FIGURE 3-2: GEOMETRIE TYPIQUE D'UNE EXTRUSION EN I 6005A-T6	34
FIGURE 3-3: CONFIGURATION DE JOINTS AILE-AILE AVEC ÂME	34

FIGURE 3-4: EXTRUSION I LONGITUDINALE DE 420 MM ET TRANSVERSALE 200 MM USINEE AVEC AME	35
FIGURE 3-5: DIMENSIONS DE L'EXTRUSION TRANSVERSALE USINEE	35
FIGURE 3-6: CONFIGURATION DE JOINT OU L'ÂME N'EST PAS SOUDÉ AVEC AILE	36
FIGURE 3-7: EXTRUSION LONGITUDINALE ET TRANSVERSALE OU L'AME N'EST PAS SOUDE AVEC AILE	36
FIGURE 3-8: MONTAGE 3D DES EXTRUSIONS.....	37
FIGURE 3-9: MACHINE ET OUTILS UTILISÉS POUR EFFECTUER LA SOUDURE.	38
FIGURE 3-10: MONTAGE DES EXTRUSIONS AVANT SOUDAGE	39
FIGURE 3-11: REPRESENTATION DES SUPPORTS UTILISES POUR SOUDER LES EXTRUSIONS	39
FIGURE 3-12: OUTIL À SIMPLE ÉPAULEMENT OÙ CONVENTIONNEL UTILISÉ POUR LE SOUDAGE.....	40
FIGURE 3-13: OUTIL À SIMPLE ÉPAULEMENT CONIQUE UTILISÉ POUR SOUDER À RECOUVREMENT	41
FIGURE 3-14: LES CONDITIONS DE SOUDAGES UTILISÉES AVEC 25 MM DE RAYON À L'ENTRÉE ET À LA SORTIE DE DEUX POUTRELLES	44
FIGURE 3-15: LES CONDITIONS DE SOUDAGE UTILISEES AVEC RAYON DE 6 MM A LA SORTIE DE DEUX POUTRELLES.....	45
FIGURE 3-16: PREPARATION METALLOGRAPHIQUE ET OBSERVATION MACROSCOPIQUE D'UN ECHANTILLON T5.....	46
FIGURE 3-17: ÉCHANTILLON DECOUPE POUR CONTROL VISUEL	46
FIGURE 3-18: SOUDURE FINALE TRANSVERSAL AV 250 MM/MN ET VR 1000 RPM DE DEUX POUTRELLES.....	48
FIGURE 3-19: POUTRELLES DONT AME ET L'AILE NE SONT PAS SOUDES.....	48
FIGURE 3-20: PRELEVEMENT D'ECHANTILLONS APRES SOUDURE	49
FIGURE 3-21: PRÉLÈVEMENT D'ÉCHANTILLONS APRÈS SOUDAGE DE L'ÂME	50
FIGURE 3-22: MACHINE D'ENROBAGE STRUER LABOPRESS-3.....	51
FIGURE 3-23: MACHINE DE POLISSAGE	53
FIGURE 3-24: APPAREIL DE MESURE DE DURETÉ VICKERS	55
FIGURE 3-25: EXEMPLE D'EMPREINTE TYPIQUE LAISSE PAR LE PENETRATEUR DANS UNE PLAQUE D'ALUMINIUM.....	55
FIGURE 3-26: EPROUVETTE DE TRACTION UTILISEE (E8/E8M) [49].	56

FIGURE 3-27: PRESSE MTS 647 HYDRAULIC WEDGE GRIP	57
FIGURE 3-28: EXTENSOMÈTRE MTS MODEL 634.12F-54.....	57
FIGURE 3-29: SCHEMA TYPIQUE ILLUSTRANT LE CHARGEMENT D'UNE POUTRE EN FLEXION 4 POINTS.	59
FIGURE 3-30: POUTRELLE SOUDEE POUR ESSAI DE FLEXION.	59
FIGURE 3-31: APPAREIL POUR ESSAIS DE FLEXION.....	60
FIGURE 3-32: POUTRE ISOSTATIQUE POUR ANALYSE 1 DE STRUCTURE.....	60
FIGURE 3-33: MONTAGE DE LA PREMIÈRE CONFIGURATION POUR ESSAIS DE FLEXION 4 POINTS	61
FIGURE 3-34: MESURE DE LA MASSE À L'AIDE D'UNE BALANCE DE LA CHARGE MORTE 72,6 KG.....	62
FIGURE 3-35: CAPTEUR À CÂBLE PLACÉ À 171,76 MM DE L'ÂME	62
FIGURE 3-36: CAPTEUR DE DÉPLACEMENT LASER PLACER HORIZONTALEMENT SUR L'ÉPROUVETTE À L = 130,83 MM.....	63
FIGURE 3-37: POUTRE ISOSTATIQUE POUR ANALYSE 2 DE STRUCTURE.....	63
FIGURE 3-38: MONTAGE DE LA PREMIÈRE CONFIGURATION POUR ESSAIS DE FLEXION 3 POINTS	64
FIGURE 3-39: EMLACEMENT DE CAPTEUR À CÂBLE ET CAPTEUR DE DÉPLACEMENT LASER.....	65
FIGURE 3-40: GEOMETRIE MODELISEE D'UNE EXTRUSION I 3D 6005A-T6.....	66
FIGURE 3-41: GEOMETRIE MODELISEE D'UNE EXTRUSION USINEE 3D	66
FIGURE 3-42: GEOMETRIE MODELISEE DE LA PIECE FINALE A LIER	66
FIGURE 3-43: MODELISATION DE LA LIAISON DE TYPE SOLIDAIRE DES AILES SEULEMENT	67
FIGURE 3-44: MODELISATION DE LA LIAISON DE TYPE SOLIDAIRE DES AILES ET DE L'ÂME	68
FIGURE 3-45: MODELISATION DE LA LIAISON DES AILES AVEC FORCE VERTICALE DE 4500 N	69
FIGURE 3-46: MODELISATION DE LA LIAISON DES AILES ET AMES AVEC FORCE VERTICALE DE 4500 N	69
FIGURE 3-47: MODELISATION DE LA LIAISON DES AMES AVEC UNE FORCE DE TRACTION 15000 N	69
FIGURE 3-48: MODELISATION DE LA LIAISON DES AILES AVEC UNE FORCE DE TRACTION 4500 N	70

FIGURE 3-49: MODELISATION DE LA LIAISON DES AILES AVEC MOMENT DE TORSION 250 N.M	70
FIGURE 3-50: MODELISATION DE LA LIAISON DES AILES ET AMES AVEC MOMENT DE TORSION 250 N.M.....	70
FIGURE 3-51: MAILLAGE EMPLOYE	71
FIGURE 4-1: ÉCHANTILLONS SOUDÉS.....	73
FIGURE 4-2: ÉPROUVETTE POUR ESSAI DE TRACTION	73
FIGURE 4-3: ÉPROUVETTE APRES RUPTURE	74
FIGURE 4-4: LES COURBES DE CONTRAINTES ET DEFORMATIONS AVEC ET SANS AME ..	74
FIGURE 4-5: COMPARAISON DES PERFORMANCES MÉCANIQUES DES JOINTS SOUDÉS .	78
FIGURE 4-6: ECHANTILLON MACRO EN RECOUVREMENT AU CENTRE ENROBE ET UN VISUEL AGRANDI DE LA ZONE UTILISEE POUR L'ANALYSE MICROSTRUCTURALE. ...	79
FIGURE 4-7: ÉCHANTILLON MACRO DU SOUDAGE BOUT A BOUT ENROBE ET UN VISUEL AGRANDI DE LA ZONE UTILISEE POUR L'ANALYSE MICROSTRUCTURALE.....	79
FIGURE 4-8: MICRODURETE DE VICKERS.....	80
FIGURE 4-9: COURBE DE FORCE DÉPLACEMENT	82
FIGURE 4-10: MOMENT DANS LE SOUDÉ EN FONCTION DE LA ROTATION DU JOINT	83
FIGURE 4-11: LA PIÈCE APRÈS ESSAI DE FLEXION.....	84
FIGURE 4-12: CONTRAINTE AXIALE EN FONCTION DE LA ROTATION DU JOINT	84
FIGURE 4-13: COURBE FORCE-DÉPLACEMENT DU VÉRIN MTS OBTENUE LORS DE L'ESSAI DE FLEXION DE LA CONFIGURATION 2.	86
FIGURE 4-14: RELATION MOMENT ROTATION ET PENTE ELASTIQUE DETERMINEE POUR LA CONFIGURATION DE SOUDURE DU JOINT 1.....	87
FIGURE 4-15: CONTRAINTE DE FLEXION SANS ÂME AVEC UNE FORCE DE 4500N	88
FIGURE 4-16: CONTRAINTE DE FLEXION AVEC ÂME AVEC UNE FORCE DE 4500N	88
FIGURE 4-17: CONTRAINTE DE TRACTION SANS ÂME AVEC UNE FORCE DE 15000 N	89
FIGURE 4-18: CONTRAINTE DE TRACTION AVEC ÂME AVEC UNE FORCE DE 15000N	89
FIGURE 4-19: CONTRAINTE DE TORSION SANS ÂME AVEC UNE FORCE DE TORSION 250N.M	90
FIGURE 4-20: CONTRAINTE DE TORSION DU MODELE AVEC AME SOUDEE AVEC UNE FORCE DE 250N.M	90

DÉDICACE

Je dédie ce mémoire à tous ceux qui ont cru en moi-même dans les moments de doute...

À mes parents, pilier de ma vie...

*À ma famille, en particulier à ma fille, à mes cousines Jeanne Marie TOLNO et Angéline KAMANO
à mes amis, source de force et d'inspiration...*

À mes encadrants, sans vous, rien de tout cela n'aurait été possible...

*À toutes les personnes qui ont semé en moi la persévérance, la curiosité et l'ambition. Ce mémoire
est l'aboutissement d'un chemin façonné par vos conseils, votre amour et votre confiance...*

Merci !

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC) et à Alu-Québec pour m'avoir offert l'opportunité de participer à ce projet, riche en découvertes, en apprentissages et enrichissement personnel.

Je remercie tout particulièrement ma directrice, Lyne St-Georges, Ing., Ph. D., ainsi mon codirecteur Mathieu Fiset, Ing., Ph. D., pour leur supervision, leur précieux conseils, leur encadrement et leur disponibilité tout au long de cette recherche. Merci de m'avoir transmis votre passion et expertise, cela m'a permis d'apprendre énormément. Je tiens également à remercier le technicien du Centre de Soudage par Friction Malaxage de l'UQAC (CSFM-UQAC) Alexandre Maltais pour son implication et sa disposition durant tout le projet.

Je suis très reconnaissant envers MITACS et Alu-Québec pour le financement de ma bourse d'études, qui m'a permis de mener à bien cette recherche.

Un grand merci aux responsables du Centre Universitaire de Recherche sur l'Aluminium (CURAL) et du Parc Technologique de l'UQAC pour la mise à disposition de leurs équipements et pour leur aide dans la réalisation des différents tests de laboratoire.

Je Souhaite également exprimer ma gratitude envers tout le personnel technique de l'UQAC ainsi qu'à tous les étudiants qui m'ont offert leur soutien, leur temps et leur connaissance pour effectuer mes essais.

Enfin, je souhaite adresser toute ma reconnaissance à mon père, ma mère, ma famille et à mes proches pour leur soutien inébranlable tout au long de mon parcours, ainsi que pour leurs encouragements constants, à Dieu tout puissant qui a permis que tout cela se réalise.

Chapitre 1

1 Introduction

1.1 Mise en contexte de l'étude

Au cours des dernières décennies, l'utilisation des alliages d'aluminium s'est considérablement accrue dans de nombreux secteurs industriels, notamment le transport, la construction, l'aéronautique et les structures légères. L'utilisation des alliages d'aluminium s'est fortement développée grâce à leurs nombreux avantages, notamment leur légèreté, leur bonne résistance mécanique malgré leur faible poids, leur résistance à la corrosion ainsi que leur facilité de mise en forme et de fabrication par extrusion [1, 2]. Dans un contexte mondial marqué par la recherche d'efficacité énergétique et de réduction des émissions de gaz à effet de serre, la conception de structures légères et performantes constitue un enjeu majeur d'ingénierie [2].

Parmi les alliages les plus utilisés dans les applications structurales figurent les séries 6xxx, notamment les alliages 6005A-T6 et 6061-T6. Ces alliages présentent un compromis intéressant entre résistance mécanique, ténacité et aptitude au soudage [1]. Toutefois, malgré leurs performances intrinsèques, l'assemblage demeure un défi technique important, particulièrement lorsqu'il s'agit de géométries complexes telles que les assemblages à angle droit entre profilés extrudés.

Les méthodes de soudage conventionnelles par fusion (MIG, TIG, etc.) induisent généralement des gradients thermiques importants, susceptibles de provoquer des déformations, des contraintes résiduelles et une dégradation des propriétés mécaniques dans la zone affectée thermiquement [3]. Ces phénomènes sont particulièrement critiques pour les alliages durcis par précipitation à l'état T6, dont les propriétés mécaniques dépendent fortement de leur état métallurgique. La recherche de procédés d'assemblage alternatifs capables de limiter ces effets thermiques constitue donc un axe stratégique pour l'amélioration des performances structurales [1].

Dans ce contexte, le procédé de soudage par friction malaxage (FSW – *Friction Stir Welding*), développé au début des années 1990 [4], représente une avancée majeure. Contrairement aux procédés par fusion, le FSW est un procédé à l'état solide : la liaison est obtenue par l'action combinée de la rotation et de l'avancement d'un outil non consommable, qui plastifie localement le matériau sans atteindre sa température de fusion [5, 6].

Ce mode d'assemblage permet de réduire significativement les défauts métallurgiques, les déformations et les contraintes résiduelles, tout en offrant une microstructure affinée dans la zone malaxée.

Si le FSW a été largement étudié pour des configurations en bout à bout ou en recouvrement sur des plaques planes, son application à des assemblages tridimensionnels, notamment à angle droit entre profilés extrudés, demeure moins documentée. Or, ce type de configuration est fréquent dans les structures de cadres, de poutres et de modules légers utilisés dans les domaines du transport et du génie civil. L'optimisation d'une méthode d'assemblage adaptée à ces géométries constitue ainsi un enjeu scientifique et technologique important.

Le principal défi réside dans la maîtrise simultanée des paramètres de soudage (vitesse de rotation, vitesse d'avance, géométrie de l'outil, profondeur d'enfoncement), de la qualité métallurgique de la zone soudée et du comportement mécanique global de l'assemblage.

L'interaction entre la microstructure locale issue du procédé FSW et la réponse structurale globale de la pièce assemblée doit être analysée de manière intégrée. Une caractérisation mécanique approfondie, incluant notamment des essais de flexion et l'analyse des courbes moment-rotation ($M-\theta$) ainsi que des contraintes équivalentes en fonction de la rotation ($\sigma_{eq-\theta}$), permet d'évaluer la rigidité, la résistance et les modes d'endommagement des assemblages.

Le présent travail s'inscrit dans cette perspective et vise à développer et à valider une méthode d'assemblage par soudage par friction malaxage pour des profilés en I en alliage d'aluminium assemblés à angle droit. L'étude porte plus particulièrement sur des alliages de la série 6xxx à l'état T6, utilisés dans des applications structurales légères. Elle combine une approche expérimentale d'optimisation des paramètres de soudage, une caractérisation microstructurale des zones affectées et une analyse mécanique globale des assemblages réalisés.

Le principal défi réside dans la maîtrise simultanée des paramètres de soudage (vitesse de rotation, vitesse d'avance, géométrie de l'outil, profondeur d'enfoncement), de la qualité métallurgique de la zone soudée et du comportement mécanique global de l'assemblage.

L'interaction entre la microstructure locale issue du procédé FSW et la réponse structurale globale de la pièce assemblée doit être analysée de manière intégrée. Une caractérisation mécanique approfondie, incluant notamment des essais de flexion et l'analyse des courbes moment-rotation ($M-\theta$) ainsi que des contraintes équivalentes en fonction de la rotation ($\sigma_{eq-\theta}$), permet d'évaluer la rigidité, la résistance et les modes d'endommagement des assemblages.

Le présent travail s'inscrit dans cette perspective et vise à développer et à valider une méthode d'assemblage par soudage par friction malaxage pour des profilés en I en alliage d'aluminium assemblés à angle droit. L'étude porte plus particulièrement sur des alliages de la série 6xxx à l'état T6, utilisés dans des applications structurales légères. Elle combine une approche expérimentale

d'optimisation des paramètres de soudage, une caractérisation microstructurale des zones affectées et une analyse mécanique globale des assemblages réalisés.

1.2 Présentation générale

L'application des alliages d'aluminium comme matériau de structure a augmenté ces dernières années en raison de leurs propriétés favorables : c'est-à-dire un rapport résistance/poids élevé, une facilité de fabrication, un degré élevé d'ouvrabilité, une ductilité considérable, une excellente conductibilité thermique, une résistance élevée à la corrosion et un aspect attrayant. C'est pour ces raisons que 25% de la production mondiale d'aluminium est actuellement utilisée dans le secteur de la construction [4, 7]. Leur facilité d'extrusion fait des alliages d'aluminium des matériaux structurels polyvalents permettant la production de formes transversales complexes, adaptées aux structures qui ne peuvent pas être développées à partir de matériaux structurels plus conventionnels, tels que le béton ou l'acier. Leur grande résistance à la corrosion les rend bien adaptés aux applications dans les environnements salins et marins sans protection de surface et avec un faible coût de maintenance. Leur grande durabilité permet de créer des structures capables de conserver leurs propriétés inhérentes même dans de grandes variations de température [4, 7]. Dans le cadre des engagements en matière de durabilité et d'atténuation des changements climatiques, les récentes avancées technologiques ont conduit à des systèmes structuraux innovants en aluminium, plus efficaces d'un point de vue environnemental et économique que l'acier et le béton. En particulier, les progrès réalisés dans des alliages d'aluminium ont réduit l'énergie requise de plus de 75% depuis 1995, réduisant ainsi l'empreinte carbone de l'industrie de près de 40 % [4, 7].

Le soudage par friction et malaxage (FSW « *Friction stir Welding* ») est un procédé d'assemblage à l'état solide relativement nouveau inventé au Royaume-Uni par l'institut britannique de soudage (*The Welding Institute*) sous l'appellation de *Friction Stir Welding* en 1991 (année de dépôt du premier brevet) [8]. Malgré la ressemblance d'appellation avec le soudage par friction, le soudage par friction malaxage se distingue par l'utilisation d'un outil non consommable, ce qui confère plus de flexibilité au procédé [8]. Le principe de base du soudage par friction malaxage (FSW), illustré à la figure 1-1, est relativement simple. Afin de réaliser une soudure, un outil doté d'un épaulement et d'un pion est mis en rotation avant d'être pressé contre les pièces à souder jusqu'à ce que l'épaulement prenne appui sur la surface des pièces. Lorsque l'épaulement en rotation est bien en contact avec le matériau, le frottement généré produit un échauffement de la matière, ce qui le rend plus facilement déformable. Le pion pressé dans le matériau et l'épaulement en appui sur sa surface peuvent alors le déformer plastiquement. Les températures des pièces assemblées atteignent généralement 0,8 à 0,9 fois la température de fusion du matériau sans toutefois excéder cette valeur. Le matériau demeure ainsi en phase solide. Dans la partie déformée par le pion, l'effet de la déformation et de la température élevée produit une recristallisation dynamique du matériau. Cet effet, combiné à la

rupture des oxydes de surface et au rapprochement des atomes, permet de produire l'assemblage. À la suite du contact entre l'épaulement et le matériau à souder, l'outil est déplacé dans l'axe de la soudure à réaliser avec une vitesse d'avance choisie [9, 10].

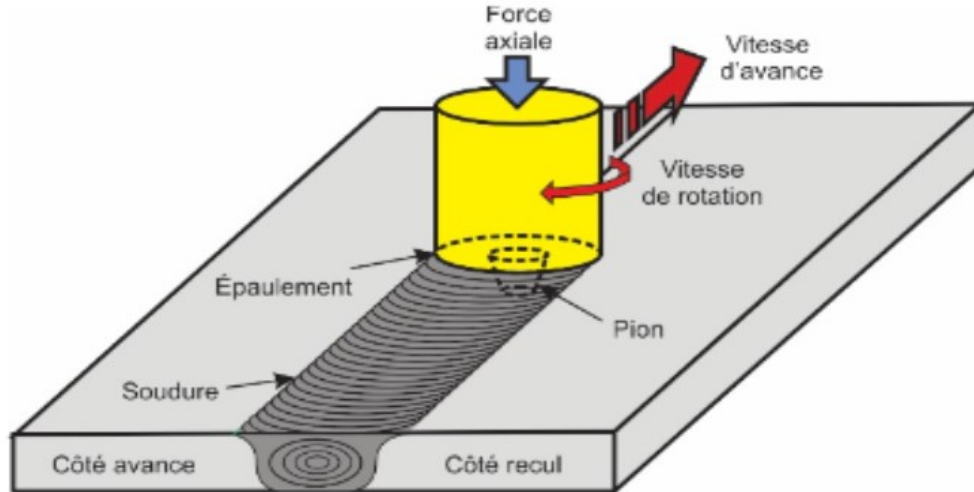


Figure 1-1: Définitions des termes lors du soudage par friction malaxage (FSW) [9].

En raison du sens de rotation de l'outil, la soudure produite contient une certaine asymétrie. Pour différencier les deux côtés de la soudure, la terminologie suivante est utilisée :

- **Côté avance** : c'est le côté de la soudure où la vitesse tangentielle due à la rotation de l'outil et la direction d'avance (le déplacement de l'outil le long du joint de soudure) sont dans le même sens ;
- **Côté recule** : c'est le côté de la soudure où la vitesse tangentielle due à la rotation de l'outil et la direction d'avance sont opposées.

Le soudage par friction malaxage (FSW) est une technique d'assemblage à l'état solide développée pour divers types de matériaux tels que les métaux et les alliages métalliques [4]. Ce procédé a trouvé des applications dans divers secteurs en raison de ses avantages en termes d'efficacité énergétique, de respect de l'environnement, de polyvalence et de préservation des propriétés mécaniques des matériaux. Contrairement aux méthodes de soudage conventionnelles, le FSW se fait à des températures basses. Aucun gaz de couverture ni flux n'est utilisé, ce qui rend le processus respectueux de l'environnement. L'assemblage n'implique aucune utilisation de métal d'apport et donc n'importe quel alliage d'aluminium peut être assemblé sans se soucier de la compatibilité de la composition, ce qui pose des problèmes en soudage par fusion. Lorsque cela est souhaitable, des alliages d'aluminium et des composites différents peuvent être assemblés avec la même facilité. Le soudage par friction malaxage se démarque donc non seulement par son utilisation dans

l'assemblage des métaux et alliages, mais également par son élargissement à l'assemblage de métaux polymère, ce qui dépasse les limites traditionnelles des techniques d'assemblage en offrant une solution à l'état solide.

L'alliage d'aluminium 6005A-T6 est un alliage d'aluminium de résistance moyenne, largement utilisé dans le secteur des transports grâce à son excellente aptitude à l'extrusion, sa bonne résistance à la corrosion et sa soudabilité. Les techniques de soudage des alliages d'aluminium, notamment le soudage par fusion et le soudage par friction-malaxage (FSW), constituent un important axe de recherche en raison des défis liés à l'assemblage de ces matériaux et des nombreuses applications industrielles du procédé FSW dans les secteurs aéronautique, automobile, naval et ferroviaire.

1.3 Problématique

Dans le processus de soudage par friction malaxage, un outil cylindrique est actionné en rotation et pressé contre les pièces à assembler. Cette pression combinée à la rotation crée de la chaleur par friction, permettant le ramollissement des matériaux et leur assemblage, sans fusion de la matière. Cependant, lorsque les pièces à assembler ont des surfaces à angle, assurer un contact optimal entre l'épaulement de l'outil et ces surfaces devient un défi. Ce défi est particulièrement pertinent dans le domaine de la construction d'infrastructures, où les extrusions en aluminium sont souvent utilisées pour créer des structures à angles droits (90 degrés). Dans ces cas, obtenir un assemblage solide et étanche entre les extrusions nécessite des techniques spécifiques pour adapter le processus de FSW à ces configurations. La figure 1-2 montre la difficulté qu'a l'outil à souder les zones d'angles.

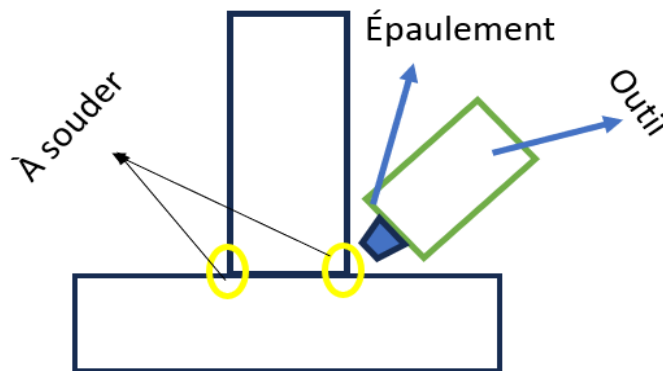


Figure 1-2: les zones d'angles à souder

1.4 Objectif

L'objectif principale de ce projet est de développer des méthodes innovantes afin de réaliser des joints entre des extrusions en I en aluminium à angles de 90 degrés en utilisant le FSW. Pour atteindre cet objectif principal, les objectifs spécifiques sont les suivants :

- Optimiser les paramètres de soudage pour l'alliage 6005A-T6 et l'épaisseur de matériau utilisé ;
- Développer une méthode de bridage adéquate pour un assemblage en « T » entre des poutrelles extrudées ;
- Caractériser les matériaux constituant les assemblages soudés par FSW (propriétés mécaniques et microstructure) ;
- Évaluer numériquement la performance de l'assemblage pour différentes configurations de soudure (âme, ailes) et pour différents types de sollicitation mécanique (traction, flexion et/ou torsion) ;
- Développer un assemblage complet adéquat pour différentes conditions de sollicitation mécaniques.

1.5 Organisation du mémoire

Les travaux présentés dans ce mémoire se divisent en deux grandes parties : une partie expérimentale et une partie numérique (simulation), qui sont exposées simultanément au travers des différents chapitres.

Tout d'abord le chapitre 1 d'introduction, offre une vue d'ensemble du soudage par friction malaxage, présente la problématique du projet et les objectifs fixés.

Le chapitre 2 propose une revue de la littérature, visant à approfondir la compréhension des divers paramètres et mécanismes impliqués dans le soudage par friction malaxage. Les effets de ces paramètres sur les phénomènes thermiques, mécaniques et microstructuraux sont analysés à partir de résumés d'articles et de publications traitant de ce sujet. Ce chapitre permet d'acquérir une meilleure compréhension du sujet abordé, en présentant en détail la méthodologie de travail utilisée ainsi que les résultats obtenus. Il offre une analyse approfondie des différentes étapes de l'étude, permettant ainsi de relier les choix méthodologiques aux conclusions tirées.

Le chapitre 3 expose la méthodologie adoptée pour cette étude. Il décrit en détail les différentes étapes suivies pour atteindre les objectifs de l'étude, incluant le procédé de soudage utilisé, les

techniques d'inspection et de validation des soudures, la simulation numérique, ainsi que le type de machine employée pour réaliser les différents essais.

Le quatrième chapitre présente les principaux résultats obtenus à la suite de la caractérisation des matériaux constituant les assemblages tests, les résultats des essais flexion sur poutrelles assemblées et les résultats de l'étude du maillage du modèle numérique.

Le cinquième et dernier chapitre complète ce mémoire en présentant les principales conclusions et recommandations tirées des résultats obtenus dans les chapitres précédents. Il revient également sur les objectifs de la recherche afin d'évaluer dans quelle mesure ils ont été atteints.

Chapitre 2

2 Revue de littérature

2.1 Description et caractéristiques de l'aluminium

L'aluminium est un métal non ferreux léger, de couleur argentée, dont la densité est d'environ 2,7 g/cm³, soit environ trois fois inférieure à celle de l'acier. Cette caractéristique en fait un matériau de choix pour des applications où la réduction du poids est essentielle, comme dans les secteurs de l'aéronautique, de l'automobile, ou encore du transport ferroviaire [7].

L'aluminium pur, bien que relativement malléable et ductile, présente une résistance mécanique modeste. Pour répondre aux exigences de performance mécanique, il est le plus souvent utilisé sous forme d'alliages, notamment ceux de la série 6xxx (Al-Mg-Si), qui allient bonne aptitude au formage, résistance à la corrosion et aptitude au soudage. Ces alliages, comme le 6005A-T6 peuvent atteindre des résistances à la traction supérieures à 250 MPa grâce à des traitements thermiques de durcissement [1].

Le module d'Young de l'aluminium est d'environ 70 GPa, ce qui traduit une rigidité modérée par rapport aux aciers. Toutefois, cette propriété, combinée à sa faible masse volumique, permet de concevoir des structures offrant un bon compromis entre légèreté et performance mécanique [1, 11].

Sur le plan chimique, l'aluminium possède une excellente résistance à la corrosion atmosphérique, notamment grâce à la formation spontanée d'une couche passive d'oxyde d'aluminium (alumine) à sa surface, qui le protège de l'oxydation. Cette propriété est renforcée dans certains alliages, et peut être améliorée par des traitements de surface comme l'anodisation [1, 11].

Enfin, l'aluminium est un matériau hautement recyclable sans perte significative de ses propriétés initiales, ce qui en fait un matériau stratégique dans un contexte de développement durable et de réduction de l'empreinte écologique des industries manufacturières [11].

2.2 Type d'alliages d'aluminium

Les alliages d'aluminium se divisent en deux grandes catégories : les alliages de corroyage (ou de déformation) et les alliages de fonderie. Chacun se décline en plusieurs séries numérotées selon leur composition chimique dominante [1]

▪ **Alliages de corroyage (séries 1xxx à 7xxx)**

Ces alliages sont conçus pour être mis en forme par laminage, extrusion ou forgeage. Ils présentent de bonnes caractéristiques mécaniques et sont largement utilisés dans les structures.

- **Série 1xxx (Al $\geq$ 99%)** : aluminium presque pur, excellent conducteur électrique, très bonne résistance à la corrosion, faible résistance mécanique;
- **Série 2xxx (Al-Cu)** : haute résistance mécanique, moins bonne résistance à la corrosion, souvent utilisés dans l'aéronautique;
- **Série 3xxx (Al-Mn)** : bonne formabilité et résistance à la corrosion, utilisés en tôlerie (cuisines, toitures);
- **Série 4xxx (Al-Si)** : bonne résistance à l'usure, souvent utilisés pour les pièces automobiles;
- **Série 5xxx (Al-Mg)** : excellente résistance à la corrosion, bonne soudabilité, utilisés dans le secteur maritime et les carrosseries;
- **Série 6xxx (Al-Mg-Si)** : bon compromis entre résistance, soudabilité et formabilité. Idéal pour les structures mécaniques, profilés extrudés et applications architecturales (ex. : 6061, 6005A) [7];
- **Série 7xxx (Al-Zn-Mg-Cu)** : alliages très résistants, utilisés en aéronautique et compétition automobile, mais souvent plus sensibles à la corrosion [11].

▪ **Alliages de fonderie (séries 1xx.x à 7xx.x)**

Utilisés pour produire des pièces moulées. Ils contiennent souvent du silicium et sont classés selon une codification différente [1] :

- **Séries 3xx.x (Al-Si-Cu / Al-Si-Mg)** : très répandus en fonderie, bon compromis entre coulabilité, résistance et coût;
- **Série 2xx.x (Al-Cu)** : haute résistance mécanique, mais moins bonne corrosion;
- **Série 7xx.x (Al-Zn)** : bonne résistance, mais plus rares.

2.3 Méthodes de soudage de l'aluminium

Les propriétés physiques et métallurgiques de l'aluminium, telles que sa conductivité thermique élevée, la formation naturelle d'une couche d'oxyde en surface et son important coefficient de dilatation thermique, rendent son assemblage par soudage plus complexe que celui de nombreux autres matériaux métalliques. Ces particularités imposent le recours à des procédés de soudage spécifiquement adaptés afin de garantir la qualité métallurgique et les performances mécaniques des

assemblages. À cet effet, le tableau suivant présente les principales méthodes de soudage de l'aluminium, ainsi que leurs avantages, leurs inconvénients et leurs domaines d'application.

Tableau 2-1: Comparaison des principales méthodes de soudage de l'aluminium

Procédé	Avantages	Inconvénients	Applications typiques
TIG (GTAW)	- Très bonne qualité de soudure - Contrôle précis du bain de fusion	- Faible vitesse - Peu adapté aux fortes épaisseurs	Aéronautique, tubes fins, structures complexes
MIG (GMAW)	- Productivité élevée- Automatisable - Bon pour épaisseurs moyennes	- Porosité possible - Sensibilité aux paramètres de soudage	Automobile, chaudronnerie, charpentes légères
Soudage par résistance	- Très rapide - Idéal pour la production en série	- Limité aux tôles minces - Mauvaise accessibilité	Assemblage automobile, appareils électroménagers
Laser	- Très grande précision - Faible déformation - Très rapide	- Coût élevé - Préparation stricte des bords	Aérospatial, électronique, microcomposants
Friction-Malaxage (FSW)	- Pas de fusion (état solide) - Excellente qualité mécanique - Écologique	- Machines spécifiques - Nécessite un bridage rigide	Aéronautique, ferroviaire, profilés aluminium

2.4 Le processus de soudage par friction malaxage (FSW)

Le procédé de soudage par friction malaxage FSW, est une technique d'assemblage à l'état solide qui offre de nombreux avantages par rapport aux méthodes traditionnelles de soudage par fusion. Le processus implique l'utilisation d'un outil rotatif, généralement constitué de certains matériaux durs tels que le carbure de tungstène ou les aciers à outils pour travail à chaud, avec un épaulement spécialement conçu et un pion de différentes formes [12, 13]. L'outil crée de la chaleur de friction grâce à son mouvement de rotation et à la force axiale appliquée aux matériaux. Par conséquent, l'outil utilisé doit répondre à certaines qualifications pour le processus de soudage. Il doit être durable

et conserver sa ténacité face à des températures élevées dans la zone de soudage. L'outil doit présenter une résistance aux charges axiales et latérales subies pendant les phases de plongée et d'avancement. Il ne doit pas subir de déformation plastique due à la température, préservant ainsi ses propriétés mécaniques face aux contraintes qu'il subira. De plus, il devrait dissiper efficacement la chaleur générée par la friction pendant le processus [4]. Le processus FSW comprend plusieurs étapes de base. Tout d'abord, l'outil est mis en contact avec la surface de la pièce et exerce une force vers le bas pour générer suffisamment de chaleur de friction. Dans ce processus, il faut attendre un certain temps pour que la température atteigne un niveau suffisant. L'outil se déplace ensuite le long de la ligne de joint pour mélanger les matériaux [14]. La figure 2-1 présente le procédé de soudage par friction malaxage (FSW) ainsi que ses principales composantes.

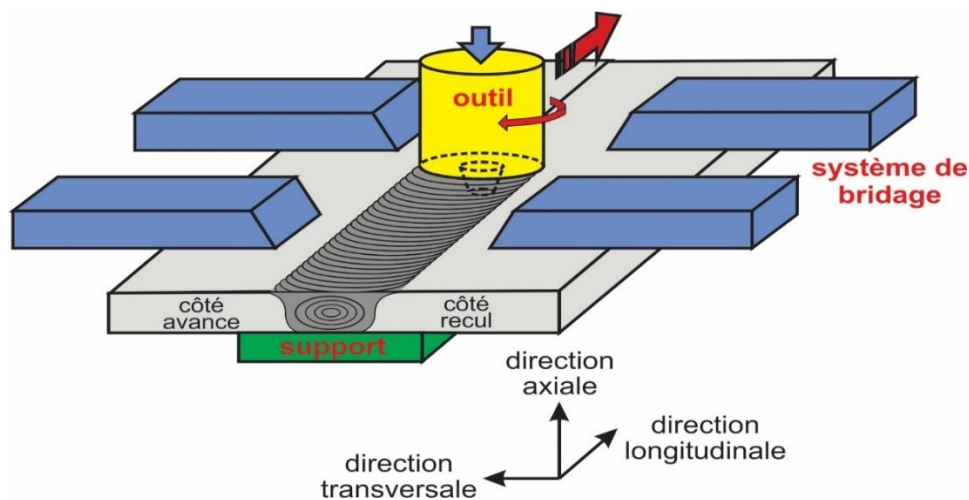


Figure 2-1: Principales composantes d'une cellule de soudage par friction malaxage (FSW) [9].

Pour réaliser une soudure par friction malaxage, il y a principalement de quatre (4) phases différentes : la phases de plongée ; la phase de stabilisation ; la phase de soudage et la phase de retrait de l'outil. La figure 2-2 illustre ces quatre phases. La figure 2-3 montre les variations de la force axiale et du couple appliqué lors de ces phases en fonction du temps.

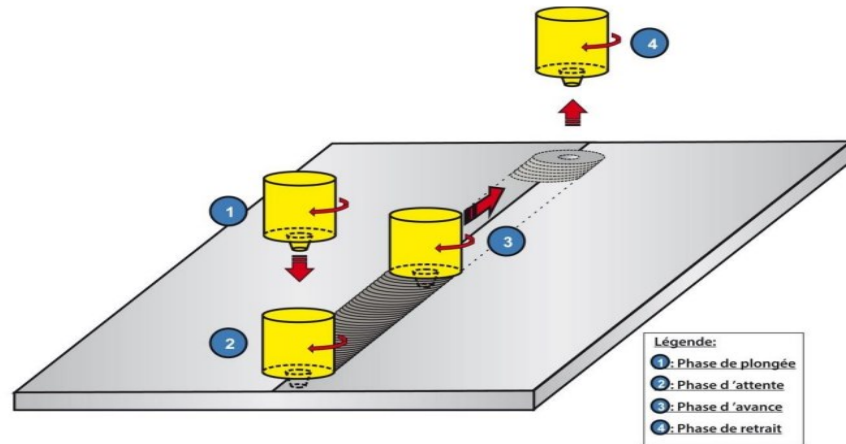


Figure 2-2: Illustration des phases de soudage [9].

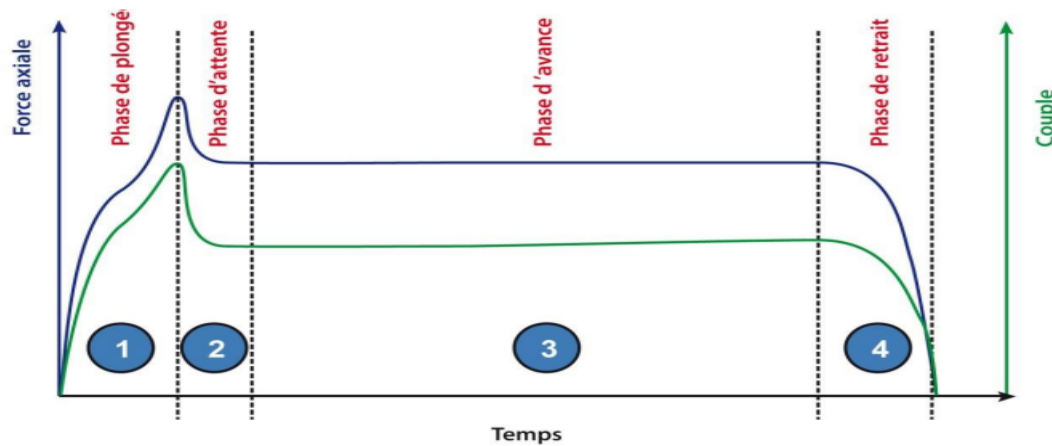


Figure 2-3: Variation de la force normale et du couple durant les phases de soudage [9].

La sélection de matériaux appropriés pour garantir une formation réussie des joints et les propriétés mécaniques souhaitées est un aspect important et étudié du FSW. Des facteurs tels que la compatibilité des matériaux, la conductivité thermique, le comportement d'écoulement et la compatibilité métallurgique doivent être pris en compte. La compatibilité métallurgique entre les matériaux à assembler est essentielle pour obtenir des soudures solides et fiables. La compatibilité peut être affectée par des facteurs tels que la composition chimique, les transformations de phase et la formation de composés intermétalliques [15, 16].

2.5 Les paramètres de soudage et leurs effets sur les soudures :

Le choix des paramètres de soudage (FSW) est crucial pour garantir des soudures de qualité et limiter la dégradation du matériau de base. Cependant, cette tâche peut être complexe en raison du grand nombre de paramètres impliqués, de leurs interactions mutuelles et des phénomènes thermomécaniques complexes qui se produisent pendant le processus de soudage. Par conséquent,

la sélection des paramètres est souvent basée sur les essais et des erreurs, et ces résultats sont rarement directement transférables d'une application à une autre.

Cette section 2.5 vise à identifier les paramètres critiques et à comprendre comment leur variation influence les propriétés mécaniques globales et locales des soudures effectuées par FSW en se basant sur les connaissances disponibles dans la littérature.

2.5.1 Principaux paramètres du procédé

Le soudage FSW compte plusieurs paramètres s'affectant les uns les autres de façon complexe, les paramètres de processus sont très importants pour déterminer la qualité de la soudure. Il est souvent admis que l'ordre d'importance des paramètres est la suivante [17] :

1. La vitesse de rotation (RPM);
2. La vitesse d'avance (mm/min);
3. La force axiale appliquée vers le bas (kN);
4. Le diamètre de l'épaulement (mm);
5. Le diamètre (mm) et la géométrie du pion;
6. La dureté du matériau de l'outil (HRC).

Chacun de ces paramètres joue un rôle crucial dans l'impact final sur deux aspects fondamentaux des soudures FSW : la génération de chaleur et les déformations induites par l'outil dans le cœur de la soudure. D'autres paramètres, notamment le matériau de l'outil et celui de l'enclume utilisée comme gabarit de soudage, jouent également un rôle important dans la qualité des soudures obtenues. Toutefois, ces paramètres sont souvent déterminés par les exigences spécifiques de l'application et du montage utilisé.

La vitesse de rotation et la vitesse d'avance de l'outil constituent deux paramètres clés dans le procédé de soudage par friction malaxage. Elles influencent directement le niveau de malaxage et les déformations plastiques induites autour du pion. En général, une vitesse de rotation plus élevée engendre une augmentation de la température, en raison de l'intensification du frottement entre l'outil et les matériaux à assembler. De même, une réduction de la vitesse d'avance provoque une élévation thermique, du fait d'un temps de contact prolongé entre l'outil en rotation et les pièces. Il est donc essentiel d'ajuster ces deux paramètres de manière optimale avant d'entamer le soudage. L'étude paramétrique de Gharaibeh et al. [18], menée sur l'alliage 6061-T6, a permis d'identifier les effets de la vitesse de rotation, de la vitesse d'avance et de la charge axial sur la qualité des joints obtenus par soudage par friction malaxage en recouvrement. Les résultats ont montré qu'une combinaison de 1200 tr/min pour la vitesse de rotation, 45 mm/min pour la vitesse d'avance et 11,5 kN de charge axiale permettait d'obtenir une résistance au cisaillement de 63,08 MPa. Ces paramètres peuvent

constituer une base de départ pour l'optimisation du soudage de l'alliage 6005A-T6, compte tenu de la similitude de leurs comportements mécaniques.

Dans le cadre de ce projet, une série d'essais de traction a été réalisée sur des échantillons rectangulaires en alliage d'aluminium 6061-T6, de dimensions 12,7 mm d'épaisseur, 50,7 mm de largeur et 165 mm de longueur. Les outils utilisés pour le soudage ont été développés et commercialisés par le fabricant *Friction Stir Link*. Cinq outils ont ainsi été achetés pour réaliser les soudures expérimentales. Trois d'entre eux, conçus pour le soudage de plaques bout à bout, possèdent la même géométrie d'épaule et de tige. Les longueurs de tige sont respectivement de 6,35 mm, 12,7 mm et 19,05 mm afin de souder des plaques de différentes épaisseurs. Deux autres outils sont conçus pour le soudage en recouvrement pour des plaques d'épaisseurs minimales de 9,5 mm et de 16 mm. Frédéric Thibeault [19] a pu tirer des conclusions pertinentes sur l'efficacité des joints soudés. Ces essais ont permis de caractériser les performances des soudures et d'identifier l'impact des paramètres de soudage sur la qualité des assemblages. La soudure ayant présenté la meilleure résistance à la traction, soit 220 MPa (équivalent à environ 71% de la résistance du matériau de base fixée à 310 MPa), a été réalisée à une vitesse de rotation de 1000 tr/mm (ω) et une vitesse d'avance de 6,35 mm/s (v), correspondant à un rapport de vitesse $k = \omega / v$ de 2,6 tr/mm.

Lorsque cette configuration optimale est comparée à d'autres soudures exécutées avec un rapport similaire mais à des vitesses moindres, une nette diminution de la performance mécanique est constatée (exemple : 172 à 196 MPa). Cette observation suggère que, pour un rapport k donné, une vitesse de rotation élevée contribue à une meilleure efficacité du joint, probablement en favorisant une répartition plus localisée de la chaleur dans la zone de soudage.

Cependant, l'analyse de soudures réalisées avec un rapport $k = 3,93$ tr/mm révèle que la vitesse de soudage, bien qu'importante, ne constitue pas le seul facteur déterminant.

Une étude expérimentale approfondie menée par Balasubramanian (2008) [20] a permis de mieux comprendre l'impact de la vitesse de rotation de l'outil sur la qualité des joints obtenus par soudage par friction-malaxage (FSW) pour divers alliages d'aluminium. Vingt-cinq joints ont été fabriqués en combinant cinq métaux de base (AA1050, AA6061, AA2024, AA7039 et AA7075) avec cinq vitesses de rotation différentes, tandis que la vitesse d'avance (75 mm/min) et la force axiale (8 kN) ont été maintenues constantes.

L'analyse macroscopique des joints a montré que chaque alliage possède une vitesse de rotation optimale permettant d'obtenir une soudure sans défauts. Plus précisément :

- L'alliage AA1050 a donné de bons résultats à 900 tr/min;
- L'AA6061 à 1100 tr/min;

- L'AA2024 à 1200 tr/min;
- L'AA7039 à 1300 tr/min;
- Et l'AA7075 à 1500 tr/min.

Ces vitesses optimales traduisent l'importance d'un apport thermique suffisant, mais maîtrisé, pour garantir un bon malaxage sans introduire de défauts dans la zone de soudure. En effet, une vitesse trop faible ne génère pas assez de chaleur pour assurer la plastification de la matière, tandis qu'une vitesse excessive peut provoquer une surchauffe, une turbulence excessive ou une détérioration microstructurale.

Cette étude met en évidence la nécessité d'adapter les paramètres de soudage, en particulier la vitesse de rotation de l'outil, aux propriétés spécifiques du matériau de base. Elle fournit ainsi une base de référence utile pour le choix des paramètres expérimentaux dans le cas d'alliages d'aluminium similaires, tels que l'alliage 6005A-T6 étudié dans le présent mémoire. Toutefois, les autres paramètres du procédé FSW jouent également un rôle essentiel dans la qualité des joints soudés, même s'ils ont été maintenus constants dans cette étude afin d'isoler l'effet de la vitesse de rotation.

La vitesse d'avance influence directement l'apport thermique par unité de longueur de soudure. Une vitesse d'avance élevée réduit le temps de chauffage et peut entraîner un manque de malaxage ou des défauts internes, tandis qu'une vitesse trop faible augmente excessivement l'apport thermique et peut provoquer un grossissement des grains ou une dégradation des propriétés mécaniques.

La force axiale permet d'assurer un contact adéquat entre l'outil et les pièces à souder. Une force insuffisante peut favoriser la formation de vides ou de défauts de consolidation, alors qu'une force trop importante peut provoquer un excès de bavures ou une déformation excessive du matériau.

Le diamètre de l'épaule agit sur la quantité de chaleur générée par frottement et sur le confinement du matériau plastifié. Un épaulement plus large augmente généralement la chaleur produite et améliore le brassage du matériau.

Le diamètre et la géométrie du pion influencent fortement l'écoulement de la matière dans la zone soudée. Certaines géométries favorisent un meilleur mélange du matériau et réduisent les risques de défauts internes.

Enfin, la dureté du matériau de l'outil détermine principalement sa résistance à l'usure et sa capacité à supporter les fortes sollicitations thermomécaniques du procédé. Une dureté insuffisante peut entraîner une dégradation rapide de l'outil et affecter la stabilité du soudage.

2.5.2 Avantages et désavantages du procédé de soudage par friction malaxage

L'un des principaux avantages du FSW est sa capacité à produire des soudures de haute qualité avec d'excellentes propriétés mécaniques. Cela peut être facilement réalisé sur des fraiseuses conventionnelles et des machines à commande numérique par ordinateur (CNC) à l'aide d'un outil approprié, en déterminant les paramètres de processus appropriés. La nature solide du processus élimine les problèmes associés au soudage par fusion tels que la porosité, les fissures de solidification et la dégradation [12, 21]. Les joints FSW présentent une résistance élevée, une résistance à la fatigue et une ténacité, ce qui les rend adaptés aux applications critiques [22]. Le FSW offre également des avantages en termes d'efficacité des processus et de productivité. Il s'agit d'une méthode de soudage relativement rapide qui permet une production efficace [23, 24]. L'absence de matériau de remplissage contribue à réduire l'apport de chaleur, à minimiser les pertes de matériaux, à réduire les coûts et à améliorer la précision dimensionnelle [23].

En plus de ne nécessiter aucun métal d'apport et de ne pas chauffer le matériau à une température supérieure au point de fusion, le soudage par friction malaxage comporte beaucoup d'avantages. Selon *The Welding Institute* [19], ce procédé :

- Permet d'éviter les problèmes d'ordre métallurgique encourus avec le soudage traditionnel (porosités, fissurations, surfusion, coalescence des grains, etc.) ;
- Permet de réaliser des soudures dans diverses positions (horizontale, verticale, etc.) ;
- Diminue la zone affectée thermiquement ;
- Élimine la production de fumée toxique ;
- Élimine les risques de « flash » (arc brillant produit lors du soudage à l'arc) ce qui facilite le travail des utilisateurs ;
- Permet de réaliser plusieurs soudures avec les mêmes outils car les outils ont une durée de vie supérieure à ceux utilisés avec des méthodes dites traditionnelles ;
- Est facilement opéré sur une machine à commande numérique, nécessite moins de personnel technique que les procédés fortement automatisés ;
- Permet d'obtenir une soudure de belle apparence comparativement aux autres techniques de soudage ;
- Réduit fortement l'impact sur l'environnement étant donné qu'aucun métal d'apport n'est utilisé et qu'aucune fumée toxique n'est dégagée. Il s'agit aussi d'un procédé moins énergivore ;
- Génère peu de distorsion pour des pièces longues et de faibles épaisseurs.

Toutefois, il existe aussi des désavantages [19] :

- La fin de la soudure est marquée par la présence d'un trou ;

- Une force axiale très élevée doit être appliquée sur l'outil (peut atteindre plusieurs dizaines de kN, selon le matériau et l'épaisseur du matériau soudée) ;
- La pièce doit être retenue solidement lors du soudage ;
- Le procédé est moins flexible que le soudage à l'arc (difficulté avec les trajectoires complexes non-linéaires) ;
- Le procédé peut être moins rapide que les soudages par fusion pour les installations industrielles quoiqu'il ne nécessite qu'une seule passe même pour les fortes épaisseurs de matériau à souder.

2.6 Géométrie de l'outil

La géométrie de l'outil constitue l'un des facteurs les plus déterminants dans le développement et l'efficacité du procédé. La géométrie de l'outil joue un rôle essentiel dans le flux de matériaux et a un impact sur la vitesse de déplacement optimale à utiliser. Un outil FSW se compose d'un épaulement et d'un pion, comme illustré schématiquement sur la figure 2-4. L'outil a deux fonctions principales : produire un chauffage localisé et assurer un flux de matière. Lors de la phase initiale de plongée de l'outil, l'échauffement résulte principalement du frottement entre l'outil et la pièce. Un échauffement supplémentaire résulte de la déformation du matériau. L'outil est plongé jusqu'à ce que l'épaulement touche la pièce. La friction entre l'épaulement et la pièce à souder est la principale composante de l'échauffement. Du point de vue du chauffage, la taille relative du pion et de l'épaulement est importante, et les autres caractéristiques de conception sont moins critiques. L'épaulement assure également le confinement du volume de matière chauffée. La deuxième fonction de l'outil est de « remuer » et de « déplacer » le matériau. L'uniformité de la microstructure et des propriétés ainsi que les charges du processus sont régies par la conception de l'outil. Généralement, un épaulement concave et des pions cylindriques filetés sont utilisés [5].

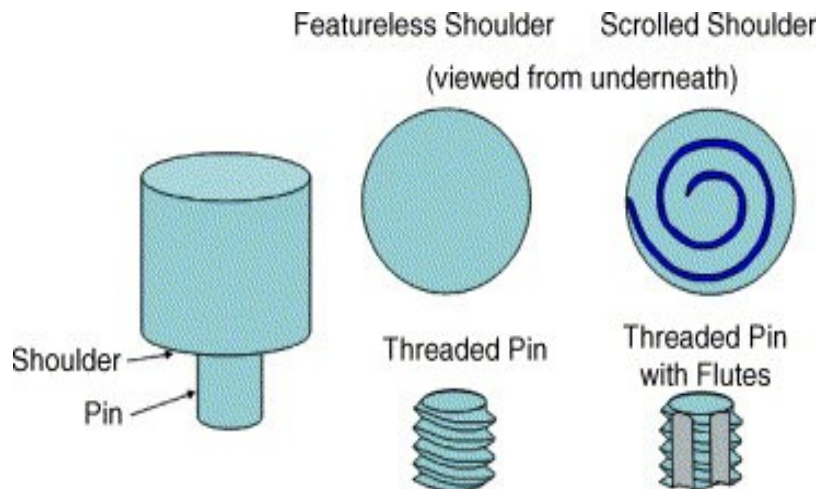


Figure 2-4 : Dessin schématique de l'outil FSW [9]

Avec une expérience croissante et une certaine amélioration de la compréhension du flux de matériaux, la géométrie des outils a considérablement évolué. Des fonctionnalités complexes ont été ajoutées pour modifier le flux des matériaux, le mélange et réduire les charges de processus. Par exemple, les outils Whorl et MX Triflute développés par TWI sont présentés sur la figure 2-5. Thomas et coll. [25] ont souligné que les pions des deux outils ont une forme tronconique (plus large en haut et plus étroit en bas) qui déplace moins de matière qu'un outil cylindrique de même diamètre de racine. Généralement, le Whorl réduit le volume déplacé d'environ 60%, tandis que le MX Triflute réduit le volume déplacé d'environ 70%. Certains pensent que les caractéristiques de conception du Whorl et du MX Triflute™ réduisent la force de soudage, permettent un écoulement plus facile du matériau plastifié, facilitent l'effet de vis vers le bas et augmentent l'interface entre le pion et le matériau plastifié, augmentant ainsi la génération de chaleur. Il a été démontré que des plaques d'aluminium d'une épaisseur allant jusqu'à 50 mm peuvent être soudées avec succès par friction malaxage en une seule passe à l'aide de ces deux outils. Une soudure 6082Al-T6 FSW de 75 mm d'épaisseur a été réalisée à l'aide de l'outil Whorl™ en deux passes, chacune donnant une pénétration d'environ 38 mm. Thomas et coll. [25] ont suggéré que le principal facteur déterminant la supériorité des pions à rainures circulaires sur les pions cylindriques conventionnelles est le rapport entre le volume balayé pendant la rotation et le volume du pion même ; c'est-à-dire un rapport entre le volume dynamique et le volume statique. Ce rapport est important pour fournir un chemin d'écoulement adéquat, pour les pions ayant des diamètres de racine et une longueur de pions similaires il est de 1,1 : 1 pour un pion cylindrique conventionnelle, de 1,8 : 1 pour le pion Whorl et de 2,6 : 1 pour le pion MX Triflute (valeur obtenue le soudage d'une plaque de 25 mm d'épaisseur).

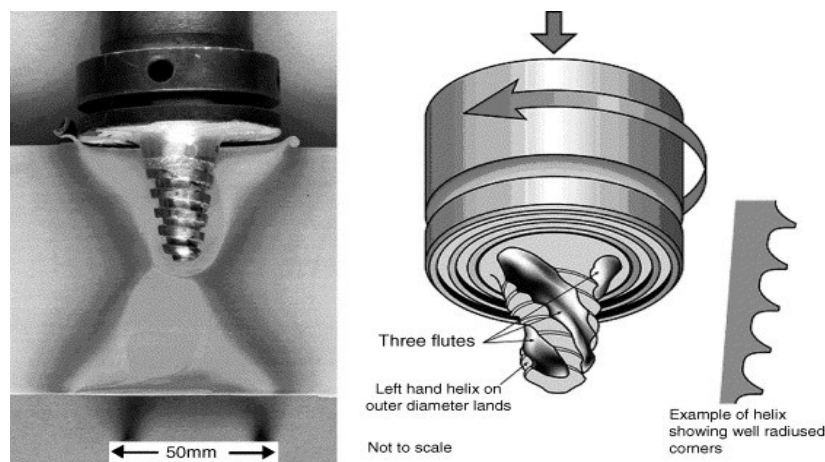


Figure 2-5: Outils whorl et MX triflute développés par the welding institute (TWI) [25]

Au fil des ans, des outils mieux adaptés pour le soudage en recouvrement ont été développés afin de briser complètement les couches d'oxyde présentes à la surface des pièces à souder. Ces outils permettent de réaliser un malaxage accru et d'augmenter le volume déplacé par la rotation de l'outil.

Plusieurs d'entre eux sont dotés de larges gorges longitudinales, soit droites ou à angle d'hélice (filet droit ou gauche). La figure 2-6 en offre une représentation.

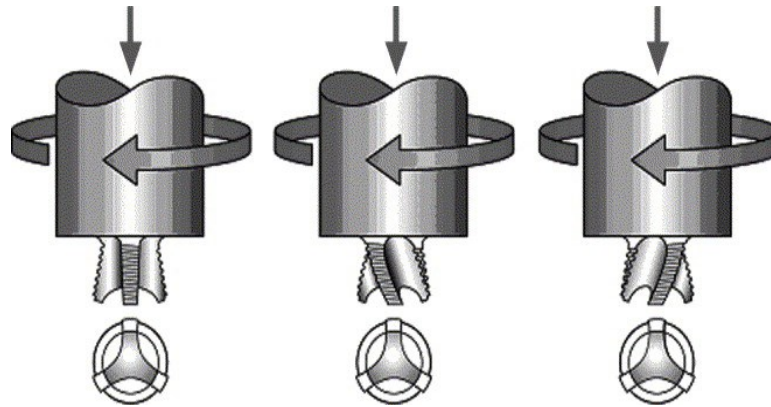


Figure 2-6: Outils Flared-Triflute™ développés par The Welding Institute (TWI) [25]

2.7 Equipements

Tous les appareils dotés d'un mandrin rotatif pourraient servir à faire du soudage par friction malaxage. Il requiert toutefois que celui-ci puisse fournir une force axiale assez importante pour réussir les soudures. Même si ce paramètre est rarement contrôlé, l'appareil doit être en mesure d'insérer l'outil dans le métal et de maintenir sa position. Ainsi, les machines d'usinage à commande numérique et les robots industriels sont aussi efficaces que les véritables machines conçues strictement pour ce procédé tel que le *ESAB Super Stir machine* utilisé par *The Welding Institute* (TWI) (une représentation de la géométrie d'un tel équipement est illustrée à la figure 2-7).

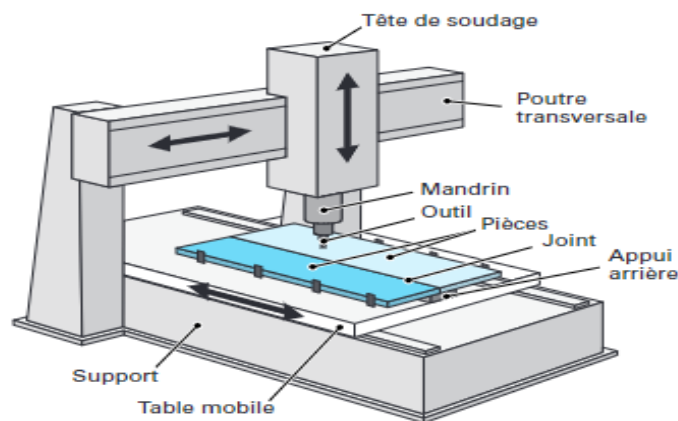
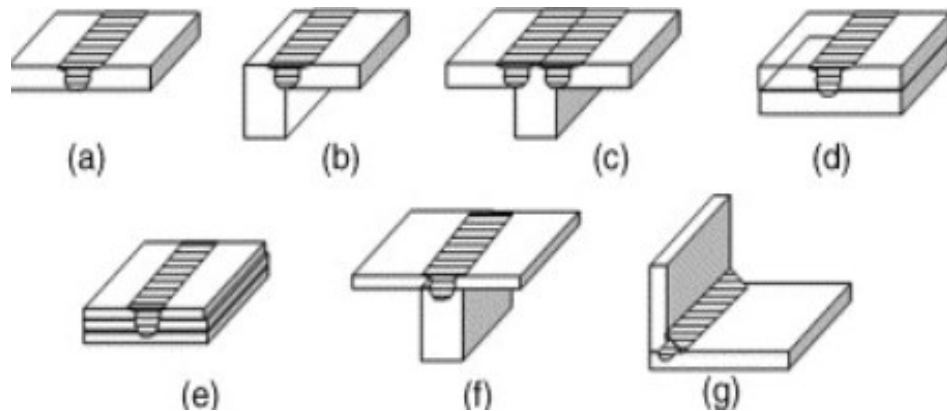


Figure 2-7: Architecture global d'un équipement de FSW [26]

Cependant, peu importe le type d'appareil utilisé, il est primordial que les pièces à souder soient fixées solidement afin d'éviter les déplacements et de minimiser les déformations de celles-ci causés par les forces importantes du mandrin et des réactions aux appuis. Certaines machines utilisent un système de maintien par vacuum alors que la plupart des autres utilisent un système mécanique ou hydraulique [27].

2.8 Conception commune

Il y'a différents type de conception de joints avec le FSW, mais les plus utilisés sont les joints bout à bout et en recouvrement. Pour le joint bout à bout, la soudure s'effectue de la manière suivante : deux plaques de même épaisseur sont placées sur support et sont serrées pour éviter leurs mouvement ou décalage pendant les étapes ou phases de soudage. Un outil rotatif est d'abord plongé dans la ligne de joint et maintenu en position pendant quelques secondes afin de chauffer les deux plaques. Il est ensuite déplacé le long de cette ligne à une vitesse d'avance et un angle d'inclinaison constants, réalisant ainsi la soudure. D'autre part, pour un simple joint à recouvrement, deux plaques sont superposées et serrées sur un support. Un outil rotatif descend à travers la plaque supérieure et s'insère partiellement dans la plaque inférieure. L'outil parcourt ensuite la jonction dans la direction souhaitée, soudant les deux plaques. D'autres types de conceptions de joints sont aussi possibles, tels que les joints d'angle. La figure 2-8 illustre les configurations de joint les plus courantes.



(a) bout carré, (b) bout à bord, (c) joint bout à bout en T, (d) joint à recouvrement, (e) joint à recouvrement multiple, (f) joint à recouvrement en T et (g) joint de filet

Figure 2-8: Configurations de joints pour le soudage par friction-malaxage [8]

Dans les ponts et passerelles, des pièces de géométries distinctes sont fréquemment assemblées entre elles à angle pour soutenir diverses charges, comme l'illustre la figure 2-9.



Figure 2-9: Exemple de passerelle fabriquée en aluminium [28]

L'utilisation du FSW pour de tels assemblages, notamment entre des extrusions courantes en « I » ou « C » orientées à 90 degrés, en raison de leur géométrie, n'est pas facilement réalisable puisque que l'on y retrouve un coin à souder pour lequel l'épaulement ne peut prendre appui sur toute sa surface. Uniquement les surfaces planes d'un tel assemblage peuvent être aisément soudées par FSW.

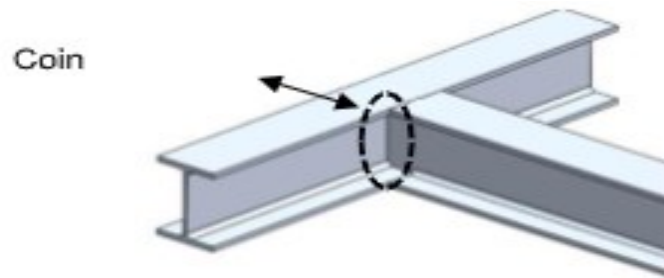


Figure 2-10: Illustration d'une jonction possible entre des extrusions en « I »

Il existe certaines variantes du soudage par friction malaxage permettant la réalisation de soudures à angle, notamment le procédé à épaulement fixe [29], qui offre un meilleur contrôle thermique et une adaptation accrue aux géométries complexes. Toutefois, la réalisation de tels assemblages nécessite une adaptation spécifique de la géométrie de l'outil, en particulier de l'épaulement, afin d'assurer un confinement adéquat du matériau et de suivre précisément la géométrie du joint. Cette contrainte limite la flexibilité du procédé pour des applications impliquant une grande diversité de configurations.

Par ailleurs, une approche alternative consiste à concevoir des profilés extrudés spécifiquement adaptés au FSW, permettant de simplifier la géométrie des assemblages. Néanmoins, le développement de telles extrusions nécessite la conception de filières dédiées ainsi que des phases d'essais et de validation, ce qui peut engendrer des coûts élevés et des délais de mise en œuvre importants.

Par ailleurs, lors de l'insertion du pion dans le matériau en début de soudage, un trou est produit. Sans apport de matière ou métal d'apport, ce trou est laissé dans les pièces lors du retrait du pion en fin de soudage (voir figure 2-11). Ce défaut affaiblit les assemblages en produisant une concentration de contrainte. Sur de courtes soudures, un tel défaut peut avoir un effet déterminant sur la qualité et la résistance des assemblages [30]. De plus, en début et fin de soudage, une section de l'assemblage reste souvent non soudée puisque l'épaule doit être entièrement appuyé sur la surface pour produire une soudure adéquate. Cette partie peut aussi constituer une zone de concentration de contrainte ou une amorce de fissure.

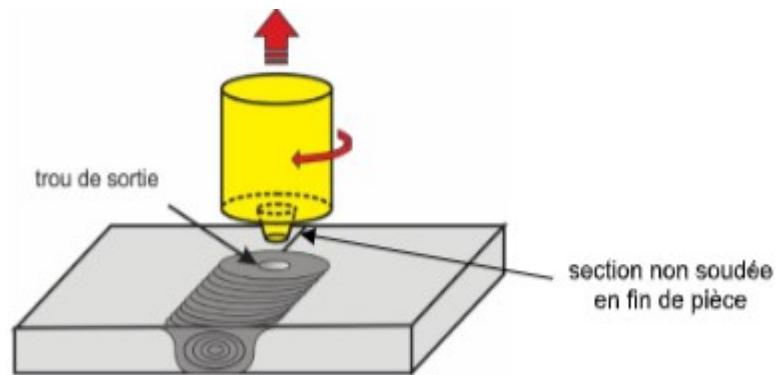


Figure 2-11: Illustration du trou produit lors de l'extraction de l'outil en FSW [5]

Afin d'éliminer le trou d'extraction de l'outil, différentes approches peuvent être utilisées :

- Terminer la soudure dans une pièce excédentaire ou rapportée qui sera coupée suite au soudage, afin d'éliminer le trou de sortie [31]. Cette approche peut également être utilisée pour souder les pièces entre elles sur toute la longueur du joint si l'on ajoute une pièce rapportée au début et à la fin de la soudure.
- Utiliser un outil à pion rétractable avec lequel le pion peut être retiré graduellement du matériau en maintenant l'épaule en contact sur la surface des pièces lors du soudage. Lorsqu'un tel retrait est réalisé, la perte de matière encourue en début de soudage est répartie sur une plus grande surface et permet d'éliminer le trou en fin de soudage en produisant une légère dépression [32].

2.9 Méthodes utilisées pour souder des pièces à angle

Vers la fin de 2004 et le début de 2005, TWI a développé une technique innovante appelée soudage par friction-malaxage à épaulement stationnaire (SSFSW), principalement destinée au soudage de matériaux à faible conductivité thermique tels que les alliages de titane, où un apport de chaleur plus uniforme dans la soudure est bénéfique.

Le mécanisme clé du SSFSW consiste en un pion rotatif placé dans l'épaulement non rotatif, qui glisse sur la surface du matériau pendant le soudage. L'épaulement non rotatif est façonné pour glisser sur le coin interne des plaques à souder et contient le matériau agité pendant le soudage. La figure 2-12 montre un schéma illustrant la technique appliquée à une configuration de soudage en T [29].

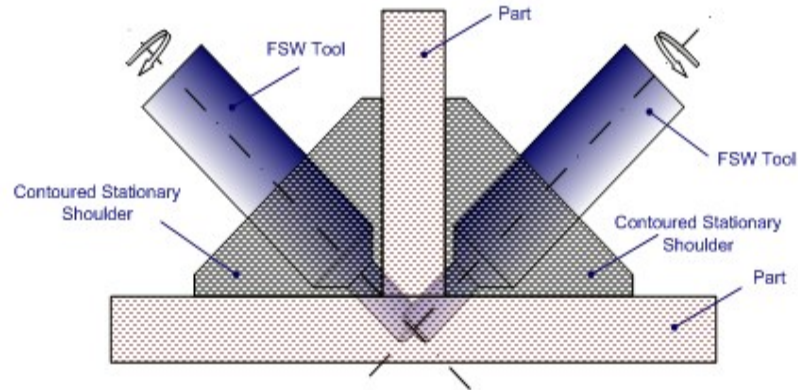


Figure 2-12: Schéma de la technique appliquée à une configuration soudure [29]

Des essais de soudage SSFSW réalisés sur des plaques en Ti-6Al-4V de 6 mm d'épaisseur ont produit des surfaces de soudure très lisses, presque polies, sans réduction de section transversale et un apport de chaleur constant et presque linéaire sur toute la section de soudure [33].

La méthode SSFSW permet d'assembler des plaques disposées dans des plans angulaires variés, comme les joints en T, en utilisant un épaulement fixe profilé. Cette approche offre une alternative intéressante aux techniques traditionnelles de FSW, permettant de surmonter certains défis spécifiques liés à la fabrication des joints à angle avec des outils FSW classiques. Grâce à son épaulement fixe, la technique SSFSW améliore la stabilité du processus et réduit les contraintes qui peuvent survivre lors du soudage de ces types de joints [33].

Afin d'ajouter un arrondi dans les coins à angle droit soudés par SSFSW, et ainsi réduire les concentrations de contrainte à cet endroit, le procédé a par la suite été modifié. La première technique développée pour obtenir un congé consiste à utiliser un bord de fuite à l'épaulement fixe pour façonner le matériau de soudure sortant. Une branche surdimensionnée (pièce volontairement plus grosse que la forme finale du joint, afin de fournir du métal supplémentaire qui sera malaxé et formé pendant le soudage pour créer un bel angle renforcé - congé) a été usinée pour incorporer deux chanfreins à 45°. Ce matériau supplémentaire est mélangé au cours du procédé de soudage puis extrudé et forgé sous l'action de l'outil afin de former le congé d'angle à la sortie de l'épaulement.

Cette approche de soudage par friction malaxage à simple épaulement avec formation d'un congé d'angle (SSFSW) [33] est illustrée à la figure 2-13 pour une configuration de soudure d'angle interne.

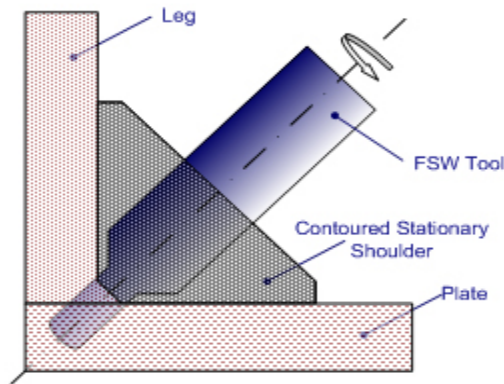


Figure 2-13: Schéma du congé d'angle SSFSW [29]

Une deuxième technique a également été développée pour façonner le coin des pièces soudées. Dans cette technique un fil d'apport est ajouté dans la soudure d'angle pendant le processus de soudage. Cette technique, baptisée *Corner AdStir Fillet SSFSW*, offre la possibilité de produire des joints d'angle avec un congés à partir de plaques plates, le matériau du congé étant fourni par le fil d'apport de manière similaire aux procédés de soudage par fusion, mais aucune préparation de la soudure n'est requise. La figure 2-14 montre un schéma de cette technique [33].

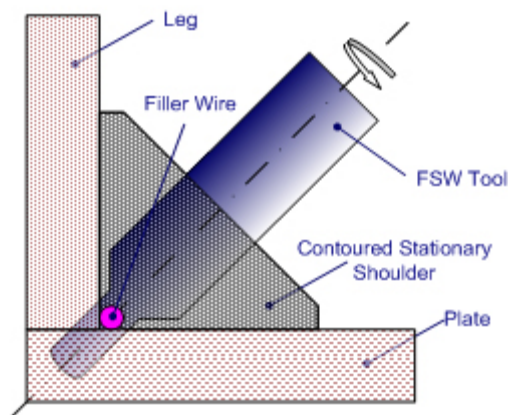


Figure 2-14: Schéma du cordon de soudure d'angle AdStir SSFSW [29]

2.10 Microstructure et micro-dureté de soudures FSW

La soudure par friction malaxage est composée de quatre (4) zones principales présentant des microstructures et des propriétés différentes, il y'a donc :

- ✓ La zone affectée thermiquement (ZAT ou HAZ) subit un échauffement compris entre 150°C et 350°C sans déformation notable [34].
- ✓ La zone affectée thermo-mécaniquement (ZATM ou TMAZ) se trouve autour du noyau soudé. Elle subit un traitement thermique et plastique complexe, ce qui peut induire un début de recristallisation et des phénomènes de précipitation et/ou de réversion des précipités (les petites particules durcissantes déjà formées dans le métal disparaissent ou se dissolvent sous l'effet de la chaleur du soudage) en place dans le métal de base. Les grains initiaux subissent une rotation pouvant atteindre 90°. Les pics de températures dans cette zone sont compris entre 350°C et 450°C [34].
- ✓ Le noyau soudé ou "nugget" subit la plus grande déformation plastique et la température peut atteindre les 500°C. A cette température les précipités présents peuvent se dissoudre et les intermétalliques sont broyés et redistribués par la grande déformation plastique. La taille du noyau est un peu plus grande que la taille du pion. Il est entièrement recristallisé de façon dynamique [34].
- ✓ Le métal de base non affecté, qui ne se trouve assez loin de la zone soudée, ne subit ni déformation ni échauffement important. Par conséquent il conserve ses propriétés et microstructures d'origine. Les figures 2-15, 2-16 illustrent ces différentes zones.

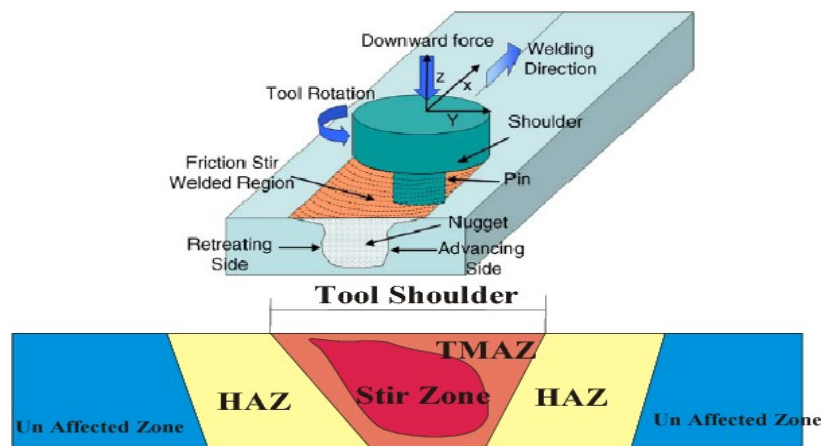


Figure 2-15: Schémas des zones affectées par le soudage FSW [34]

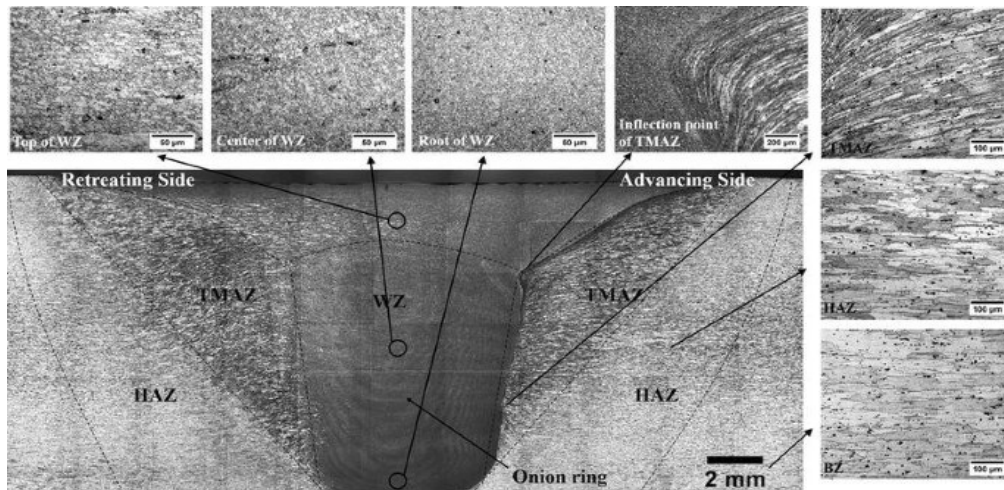


Figure 2-16: Microstructure d'une soudure FSW [35]

2.11 Méthode d'analyse de la microstructure

La dureté des matériaux est déterminée à l'aide de plusieurs méthodes, telles que les essais Rockwell, Vickers, Knoop et Brinell. Un essai de dureté consiste à mesurer la résistance d'un matériau à une déformation plastique permanente provoquée par la pénétration d'un matériau plus dur. Les valeurs de dureté obtenues permettent ensuite d'estimer indirectement certaines propriétés mécaniques du matériau, notamment sa résistance à la déformation et, dans certains cas, sa résistance à l'usure. De plus, ces essais permettent de choisir le matériau le mieux adapté à une application spécifique en fonction de ses caractéristiques mécaniques et de son comportement.

L'essai Vickers est la méthode standard utilisée pour caractériser la microstructure des joints des soudure. Il permet d'évaluer les résistances de la soudure, en particulier autour de la zone affectée thermiquement (ZAT). L'analyse des matériaux dans cette zone est essentielle pour évaluer la fragilité de la soudure et mesurer l'entendue de la ZAT. Cet essai est souvent privilégié en raison de sa facilité d'exécution et de sa précision. Il peut être réalisé sur un appareil d'essai universel de micro-dureté. De plus, l'avantage de l'essai Vickers réside dans l'utilisation d'un même pénétrateur, un diamant pyramidal, pour tous les matériaux, quel que soit leur niveau de dureté. Cette flexibilité permet d'effectuer des mesures sur une grande variété de matériaux avec une grande fiabilité. La figure 2-17 présente le profil de micro-dureté mesuré à travers la section transversale d'un joint soudé par friction-malaxage. Les mesures ont été effectuées selon plusieurs lignes de balayage afin d'évaluer l'évolution de la dureté depuis le métal de base (MB), en passant par la zone affectée thermomécaniquement (ZATM/ZAT), jusqu'à la zone malaxée (ZM).

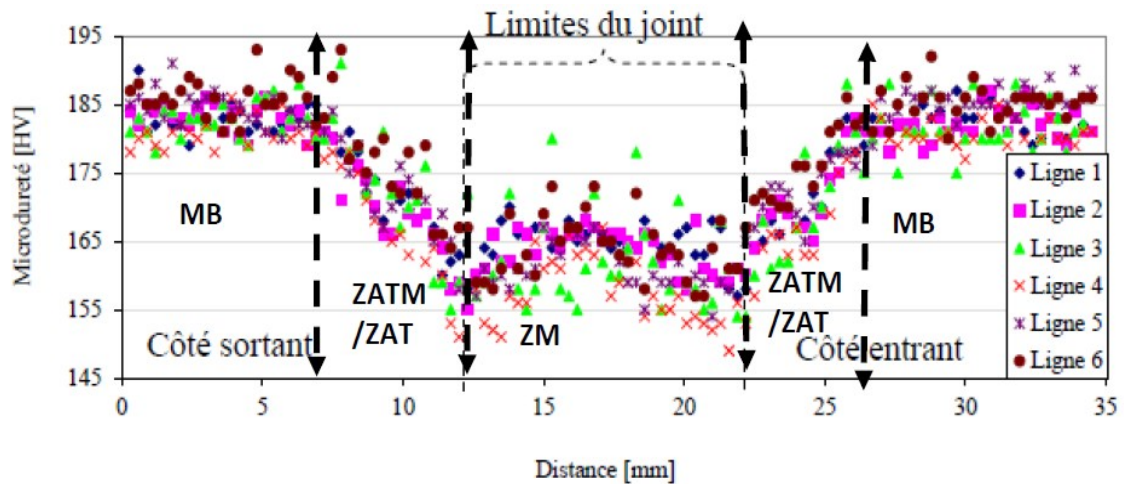


Figure 2-17: Profils de micro-dureté Vickers d'un échantillon brut de soudage [36]

Le profil observé met en évidence une diminution significative de la micro-dureté au niveau de la zone soudée par rapport au métal de base. Les valeurs de dureté les plus élevées sont observées dans le métal de base, où la microstructure initiale de l'alliage est préservée.

La dureté minimale est observée dans la zone malaxée (ZM), où le matériau a subi une importante déformation plastique. Ce phénomène entraîne une dissolution partielle ou une redistribution des précipités responsables du durcissement de l'alliage, provoquant ainsi un adoucissement local du matériau.

Le profil présente également une distribution relativement symétrique entre le côté entrant et le côté sortant de l'outil, bien que de légères variations puissent être observées en raison des différences d'écoulement du matériau et des gradients thermiques générés durant le soudage.

2.12 Propriétés mécaniques des joints FSW

Le FSW est connu pour produire des joints soudés présentant d'excellentes propriétés mécaniques. Souvent, les joints FSW présentent une résistance élevée, proche de la résistance des matériaux de base. Combiné à la microstructure amincie dans la zone de soudure, il contribue à l'augmentation de la résistance des joints grâce à la nature solide du processus. L'absence de défauts liés à la fusion tels que la porosité et les fissures de solidification améliore encore l'intégrité des joints [37]. Les propriétés de résistance des joints FSW peuvent être affectées par divers facteurs, notamment les paramètres du processus, la conception des outils et les propriétés des matériaux. La vitesse de soudage, la vitesse de rotation, la force axiale, la profondeur de plongée et l'angle d'inclinaison de l'outil jouent un rôle important dans la résistance mécanique du joint [12].

2.13 Propriétés et comportements de l'alliage d'aluminium 6005A-T6

L'alliage d'aluminium 6005A-T6 appartient à la série des alliages Al-Mg-Si, largement utilisés dans les structures légères sollicitées en flexion, traction ou compression. Grace à sa composition chimique équilibrée (typiquement 0,6-0,9 % Mg et 0,5-0,7 % Si) cet alliage développe, après traitement thermique T6, une microstructure caractérisée par la précipitation β'' (Mg_2Si), responsable de son durcissement structural [38].

Sur le plan mécanique, l'alliage 6005A-T6 présente généralement une limite d'élasticité comprise entre 230 et 260 MPa, une résistance à la traction autour de 260-300 MPa, et un module d'élasticité d'environ 69-70 GPa. Ces propriétés le situent entre les alliages 6060-T6 et 6061-T6, avec une meilleure résistance mécanique que les alliages 6060 tout en conservant une excellente aptitude à l'extrusion [39]. Cette combinaison de rigidité, résistance et formabilité en fait un matériau privilégié pour les structures extrudées en ingénierie, notamment dans les applications structurales, le transport et les assemblages soudés.

Concernant son comportement en soudage par friction malaxage (FSW), l'alliage 6005A-T6 est considéré comme hautement soudable, bien que la zone affectée thermiquement (ZAT) subisse un adoucissement typique des alliages durcis par précipitation. Le FSW crée une zone malaxée (ZM) où les précipités β'' sont fragmentés ou dissous, produisant une microstructure recristallisée à grains fins favorisant une bonne ductilité locale. Cependant, la ZAT reste généralement la zone mécaniquement la plus faible, ce qui influence directement les mécanismes de rupture observés lors des essais de flexion [10].

2.14 Microstructure et propriétés mécaniques locales et globales des soudures par friction-malaxage en alliage d'aluminium 6005A-T6

La soudure par friction-malaxage (FSW) modifie fortement la microstructure de l'alliage 6005A-T6, qui est initialement durci par précipitation (Mg_2Si). Comme pour les autres alliages de la série 6xxx, la combinaison de la déformation plastique sévère et du chauffage à l'état sous-solide provoque une redistribution des phases durcissantes accompagnée d'un affinement des grains au sein de la zone malaxée.

2.14.1 Évolution microstructurale dans les différentes zones

La zone malaxée (ZM) présente une microstructure recristallisée, constituée de grains fins équiaxes formés sous l'effet du cisaillement intense imposé par le pion. Avec le 6005A-T6, plusieurs études ont montré que la dissolution partielle des précipités Mg_2Si contribue à une réduction locale de la dureté, malgré l'affinement granulométrique [40].

De plus, l'alliage 6005A-T6, légèrement plus riche en Mg que le 6061-T6, présente une sensibilité plus élevée à la sur-dissolution thermique en FSW, ce qui accentue la chute locale de dureté dans la ZM [41].

Dans la zone affectée thermo mécaniquement subit une déformation plastique moins sévère, conduisant à un allongement et une rotation des grains sans recristallisation complète. Les précipités sont partiellement dissous et redistribués, induisant une chute de la résistance mécanique intermédiaire entre la ZM et la ZAT [10].

Dans la zone affectée thermiquement ZAT, l'effet dominant est la sur-dissolution ou la fusion des précipités Mg_2Si , ce qui entraîne la plus grande perte de dureté dans l'alliage 6005A-T6 soudé FSW. Plusieurs travaux montrent que la ZAT constitue la zone fragile la plus fréquente dans les soudures FSW des 6xxx, en raison de la perte du durcissement T6 initial [42].

2.14.2 Propriétés mécaniques locales

La dureté du 6005A-T6 chute typiquement de 90–100 HV dans le matériau de base à environ 60–70 HV dans la ZAT, avec une remontée légère dans la ZM (70–80 HV). Cette évolution reflète :

- La dissolution des précipités durcissant dans la zone malaxée,
- Le sur-vieillissement thermique dans la zone affectée thermiquement,
- L'absence de post-traitement thermique.

Les valeurs observées dans la littérature correspondent à celles généralement enregistrées dans les soudures FSW de la série 6xxx [42].

Pour ce qui est du cisaillement et de la résistance à la traction locale, les essais mécaniques locaux montrent que l'alliage 6005A-T6 soudé présente :

- Une résistance maximale dans la zone malaxée attribuée à l'affinement des grains,
- Une résistance minimale dans la zone affectée thermiquement, zone contrôlant l'initiation de rupture dans la majorité des configurations.

Les propriétés mesurées suivent également la distribution de dureté, ce qui confirme la sensibilité du 6005A au vieillissement thermique [42].

2.14.3 Propriétés mécaniques globales de l'assemblage

Les assemblages FSW en 6005A-T6 montrent une bonne rigidité globale en flexion, mais la charge ultime reste contrôlée par la résistance réduite dans la ZAT. Des essais de flexion de plusieurs configurations montrent :

- Des réponses initialement linéaires, indiquant une bonne cohésion soudure-matériau,
- Des zones plastiques principalement associées au comportement de la zone affectée thermiquement,
- Une rupture se produisant principalement à la frontière entre la zone affectée thermiquement et la zone affectée thermo mécaniquement (selon les observations de rupture et les profils de dureté).

Ces observations sont conformes aux résultats de travaux réalisés sur les soudures FSW d'alliages 6xxx [43].

Lorsque la géométrie de la soudure et les paramètres FSW favorisent une recristallisation homogène et une réduction modérée de la dureté locale, il est possible d'obtenir des soudures qui ne rompent pas sous flexion. Ce comportement est cohérent avec l'optimisation du profil d'outil et des paramètres processus [44].

Alors, l'évolution microstructurale spécifique du 6005A-T6 en FSW caractérisée par la dissolution des précipités, la recristallisation dynamique et le sur-vieillissement thermique gouverne directement les propriétés mécaniques locales et globales de la soudure. La zone affectée thermiquement demeure la zone critique, déterminant, la dureté minimale, la localisation des déformations plastiques et la zone d'amorçage de rupture.

La bonne tenue globale en flexion et la possibilité d'obtenir une configuration sans rupture démontrent néanmoins la capacité de l'alliage 6005A-T6 à être utilisé efficacement dans des assemblages FSW à angle droit, sous réserve d'une optimisation adéquate des paramètres et de la géométrie d'outil.

2.15 L'alliage d'aluminium 6061-T6

L'alliage 6061-T6 est l'un des alliages les plus utilisés de la série 6xxx grâce à son bon équilibre entre résistance mécanique, soudabilité et résistance à la corrosion [11]. Sa composition est similaire à celle du 6005A, mais se distingue par une teneur généralement plus élevée en magnésium et l'ajout significatif de cuivre (Cu), élément qui augmente la résistance mécanique mais peut réduire la résistance à la corrosion [45].

En condition T6, le 6061 développe une microstructure dominée par des précipités Mg_2Si mûris (β'), ainsi que des particules Cu-Mg-Si qui contribuent au durcissement secondaire [46]. Cette précipitation plus complexe donne à l'alliage une résistance mécanique légèrement supérieure à celle du 6005A-T6, avec des limites d'élasticité autour de 270–310 MPa.

Le 6061-T6 est largement utilisé dans les structures mécaniques, l'aéronautique légère, les cadres de véhicules et les applications nécessitant une bonne résistance aux contraintes combinées [11]. Toutefois, sa teneur en cuivre tend à réduire légèrement sa performance lors de procédés thermomécaniques intensifs comme le FSW, notamment en diminuant sa ductilité locale dans la zone thermiquement affectée [10]. Cela peut conduire à un comportement mécanique post-soudage légèrement moins favorable que celui observé pour le 6005A-T6 dans certaines configurations.

2.16 Conclusion

Cette revue de la littérature a permis d'avoir une idée générale du procédé de soudage par friction malaxage en particulier pour les alliages d'aluminium et comprendre quelques informations sur les paramètres du processus, l'intégrité des joints et les propriétés mécaniques des joints soudés FSW, et les différentes configurations possibles de FSW développés pour les soudures à angles. Les paramètres du processus ont une grande influence sur la qualité des joints soudés.

Depuis son apparition, le procédé de soudage par friction-malaxage (FSW) a fait l'objet de nombreuses recherches, ce qui a favorisé son développement et son intégration progressive dans le domaine du soudage. Aujourd'hui, ce procédé est utilisé dans plusieurs secteurs industriels, notamment pour le soudage des alliages d'aluminium, puisque ces matériaux sont souvent difficiles à assembler avec les techniques de soudage conventionnelles en raison de leurs caractéristiques métallurgiques.

Chapitre 3

3 MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE

Afin d'atteindre l'objectif du projet présenté au chapitre 1, la méthodologie suivante et illustrée à la figure 3-1 est suivie :

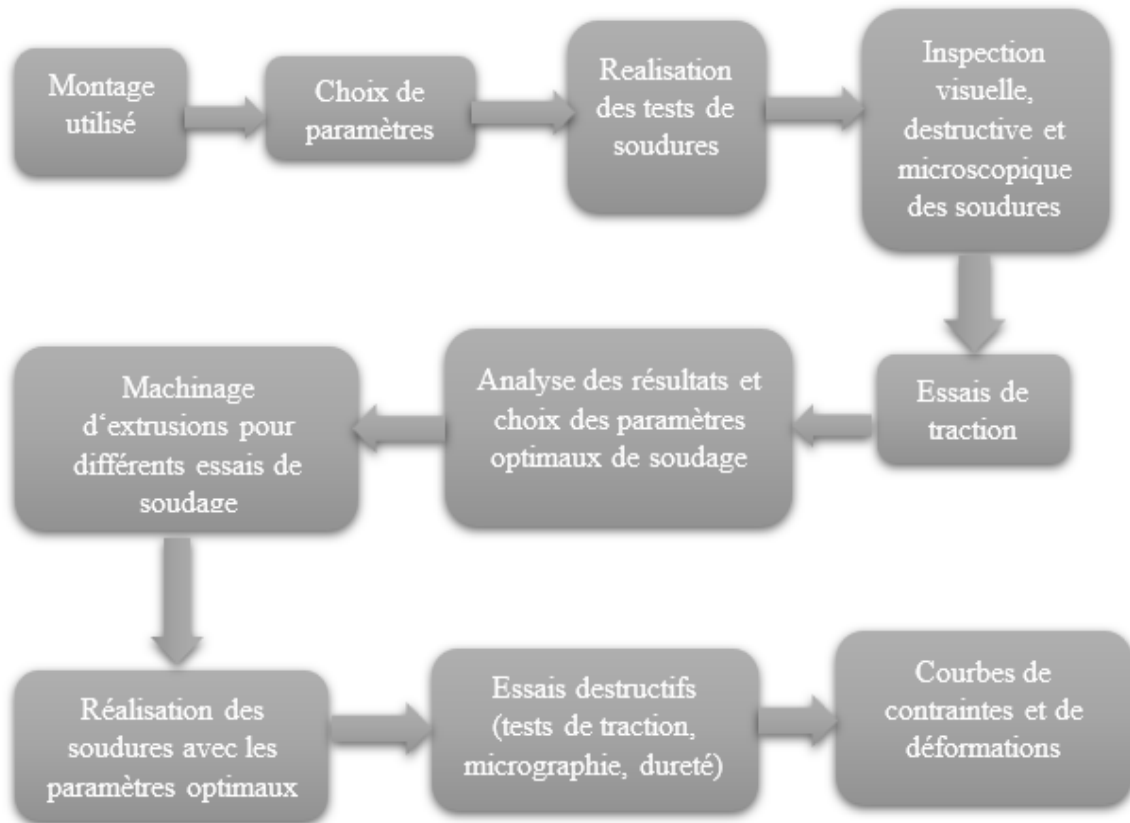


Figure 3-1: Méthodologie suivie

La méthodologie suivie dans cette étude vise à déterminer les paramètres optimaux du procédé de soudage par friction malaxage (FSW) pour l'assemblage de profilés en aluminium à angle droit. Le schéma ci-dessus illustre les différentes étapes principales de cette démarche expérimentale.

Dans un premier temps, le montage expérimental est défini et les paramètres de soudage (vitesse de rotation, vitesse d'avance, angle d'inclinaison, etc.) sont choisis. Des essais préliminaires de soudage sont alors réalisés afin d'évaluer le comportement du matériau et la qualité des soudures obtenues.

Les soudures sont ensuite soumises à une inspection visuelle, destructive et microscopique, complétée par des essais de traction permettant de mesurer la résistance mécanique des joints. Les résultats obtenus sont analysés afin de sélectionner les paramètres optimaux de soudage.

Une fois ces paramètres définis, de nouvelles soudures sont réalisées sur des éprouvettes issues du machinage d'extrusions. Ces soudures sont soumises à une série d'essais destructifs (tests de traction, micrographie et dureté) pour valider les performances du joint et la stabilité du procédé. Enfin, une configuration d'assemblage travaillant en flexion cisaillement a été fabriquée puis testée sous cette combinaison d'effort afin d'examiner le comportement global de l'assemblage.

Cette démarche progressive permet d'assurer une évaluation complète du procédé, depuis la sélection des paramètres jusqu'à la validation mécanique et microstructurale des soudures optimales.

3.1 Matériaux utilisés

Ce projet porte sur l'alliage d'aluminium 6005A-T6, appartenant à la série 6xxx, reconnue pour sa polyvalence, sa capacité de durcissement thermique, sa bonne malléabilité, sa soudabilité, ses propriétés mécaniques intéressantes ainsi que sa bonne résistance à la corrosion. Ces alliages sont composés de silicium et du magnésium, qui se combinent pour former du siliciure de magnésium dans sa composition. Les produits d'extrusion de la série 6000 sont largement préférés pour des applications architecturales et structurelles en raison de leurs propriétés exceptionnelles. Ils peuvent également être soumis à des procédés d'anodisation. L'alliage 6005A en particulier, est très utilisé dans cette série et trouve des applications diverses telles que dans la fabrication de caravanes, de caisses de camions, de lampadaires et dans des environnements maritimes.

Pour ce projet, des extrusions d'aluminium 6005A-T6 de forme en "I", ayant des ailes d'une épaisseur de 9,5 mm soit 3/8 de pousces avec une tolérance de $\pm 0,5$ mm sont utilisées. Les autres dimensions de l'extrusion sont ici illustrées sur la figure 3-2.

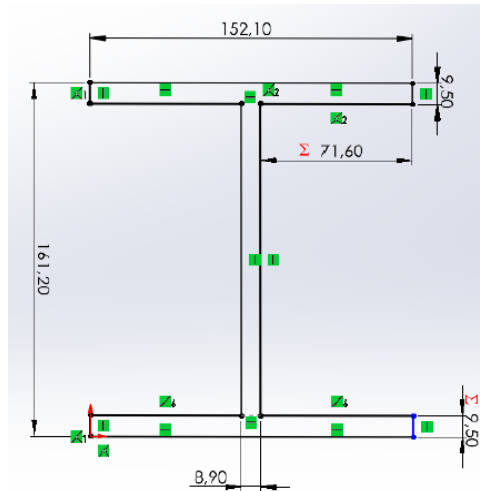


Figure 3-2: Géométrie typique d'une extrusion en I 6005A-T6

Ces extrusions ont été découpées selon différentes dimensions, dans le but de les assembler à angle de 90 degrés et de produire un assemblage avec une extrusion longitudinales de 420 mm et une extrusion transversale de 200 mm. Ces dimensions ont été choisies en fonction des contraintes physiques du poste de soudage et de la configuration de dispositifs de fixation d'équerres de serrage.

Dans une première configuration d'assemblage, la pièce transversale est usinée afin que son âme puisse s'insérer entre les ailes de la pièce longitudinale (ses ailes sont ainsi retirées sur une longueur de 71,63 mm). Les figures 3-3 à 3-5 illustrent la géométrie des pièces coupées et usinées. Dans cette configuration, l'âme de la pièce transversale pourra être soudée avec les ailes de la pièce longitudinale. Un tel assemblage requiert cependant un usinage assez complexe de l'une des deux extrusions.

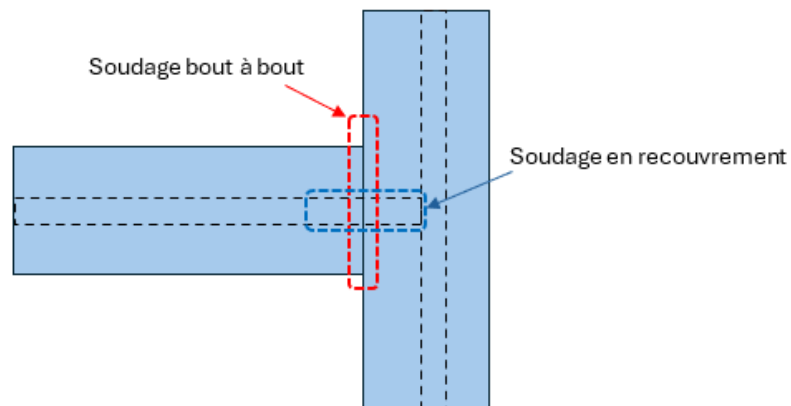


Figure 3-3: Configuration de joints aile-aile avec âme



Figure 3-4: Extrusion I longitudinale de 420 mm et transversale 200 mm usinée avec âme

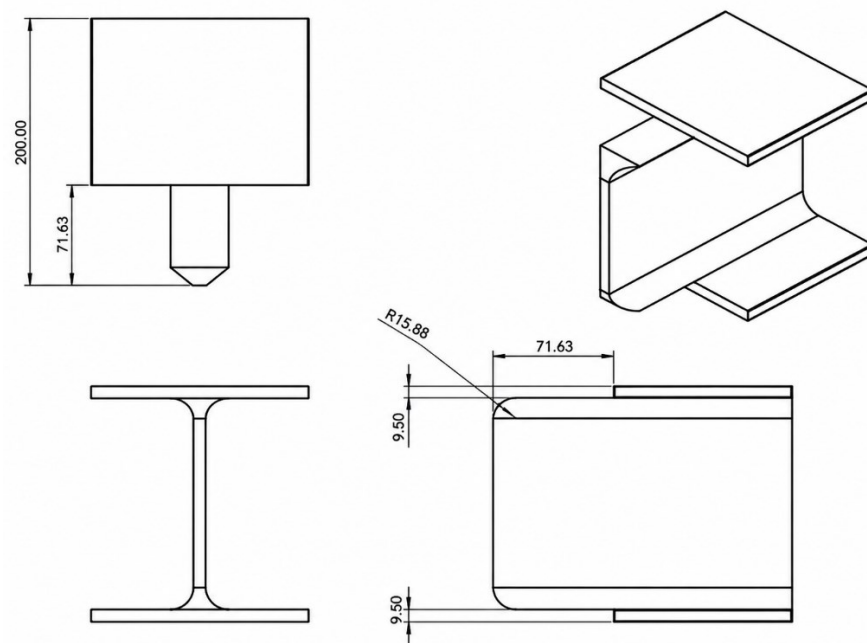


Figure 3-5: Dimensions de l'extrusion transversale usinée

Dans une seconde configuration d'assemblage, les deux extrusions sont simplement coupées, puis seules les ailes sont assemblées. Cette configuration ne nécessite aucun usinage supplémentaire,

ce qui simplifie considérablement la préparation des pièces avant le soudage. Les figures 3-6 et 3-7 présentent cette seconde configuration d'assemblage.

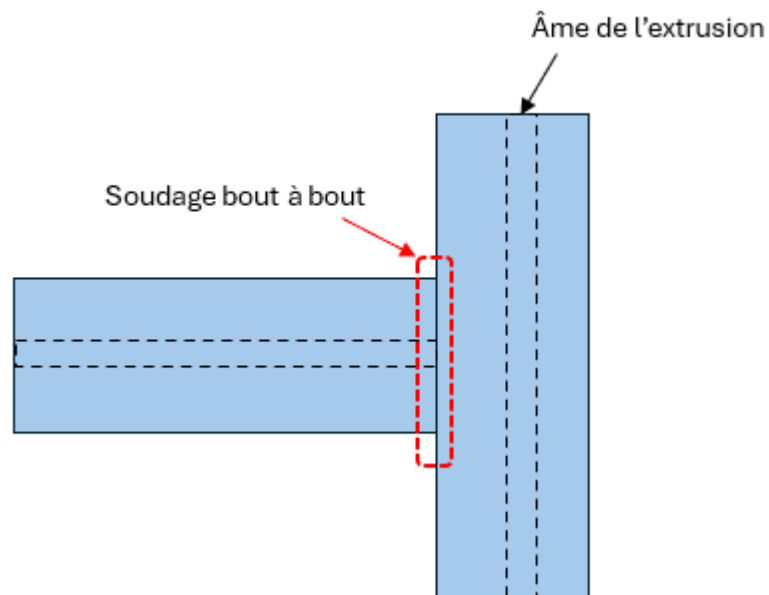


Figure 3-6: Configuration de joint ou l'âme n'est pas soudé avec aile

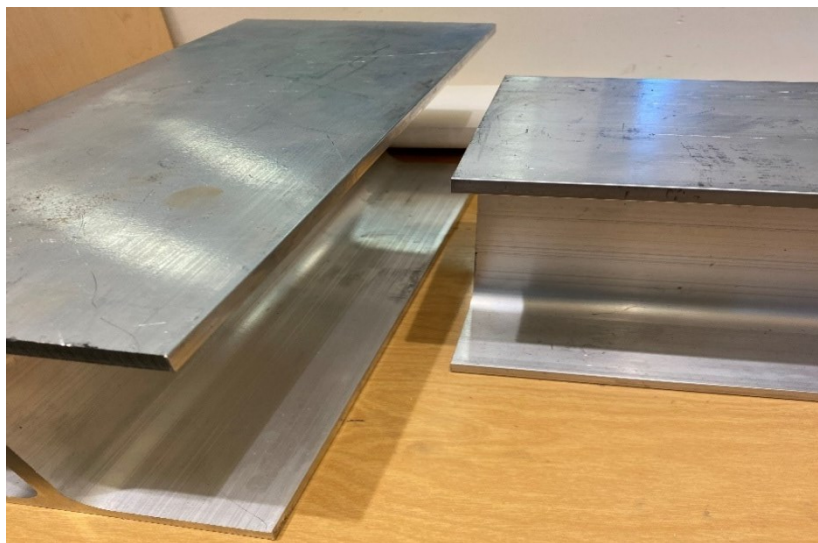


Figure 3-7: Extrusion longitudinale et transversale ou l'âme n'est pas soudé avec aile

3.2 Procédé de soudage

Avant le soudage, les surfaces des extrusions sont nettoyées à l'acétone afin d'éliminer les contaminants et les impuretés présents en surface, réduisant ainsi le risque de leur incorporation dans le joint soudé.

3.2.1 Montage utilisé

Les essais de soudage ont été conduits au moyen d'une machine de soudage par friction malaxage de modèle GG7, fabriquée par Bond Technologies, localisée au sein du Centre de Soudage par Friction-malaxage de l'Université du Québec à Chicoutimi (CSFM-UQAC). Pour maintenir les extrusions de manière stable et rigide pendant le processus de soudage, des gabarits sous forme d'équerres ont été employés. La figure 3-8 illustre la configuration du montage des extrusions ainsi que les éléments cruciaux en 3D.

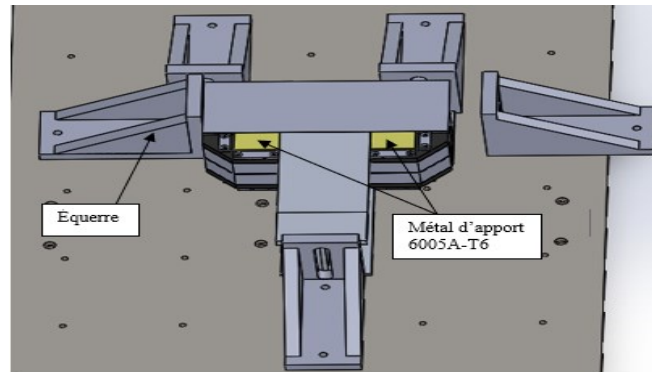


Figure 3-8: Montage 3D des extrusions.

La machine dispose d'une surface de travail généreuse, mesurant 19 mètres de long sur 3 mètres de large, avec une hauteur de 1 mètre. Sa précision en position est de l'ordre de 0,16 mm, ce qui garantit un alignement précis de l'outil de soudage pendant le processus de soudage. Les axes de rotation Y et Z offrent des amplitudes de 100 degrés et 360 degrés respectivement, permettant une grande flexibilité de positionnement de la tête de soudage. La machine est également capable d'atteindre des vitesses allant jusqu'à 6 mètres par minute et 3 000 tours par minute (3 000 RPM).

Une force maximale de 65 000 Newtons peut être appliquée, ce qui permet le soudage de pièces d'une épaisseur allant jusqu'à 25 mm. Le contrôle de la machine s'effectue à l'aide d'une interface à commande numérique, à travers laquelle les paramètres de soudage, tels que les vitesses de rotation et d'avance, sont introduits comme il est observé sur la figure 3-9.

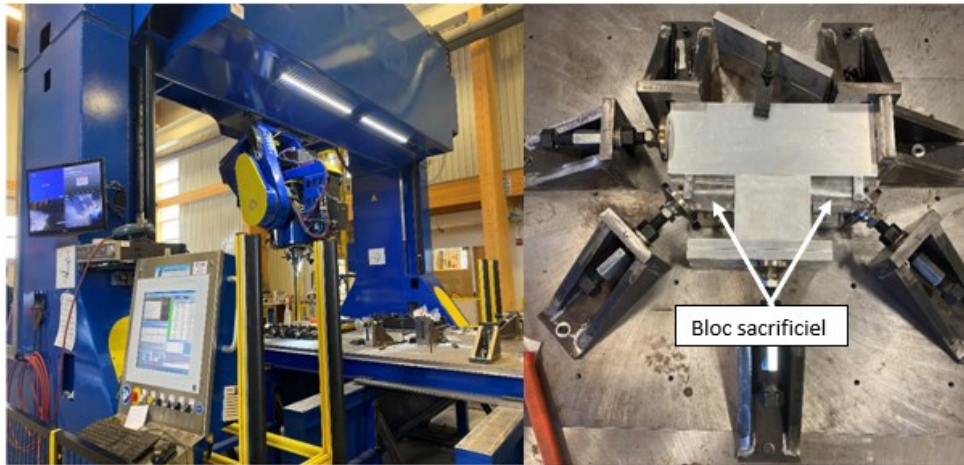


Figure 3-9: Machine et outils utilisés pour effectuer la soudure.

Après l'usinage des extrusions conformément aux géométries présentées aux figures 3-3 et 3-6, une méthode de montage a été développée afin d'optimiser le procédé de soudage. Cette méthode repose sur l'utilisation de supports de fixation placés sous les ailes des deux pièces à assembler. Ces supports permettent d'assurer la stabilité des pièces durant le soudage et de limiter l'enfoncement excessif du pion dans le matériau, phénomène susceptible d'entraîner l'apparition de fissures ou de cavités dans la zone de jointure. Les supports de fixation utilisés sont présentés aux figures 3-10 et 3-11.



Figure 3-10: Montage des extrusions avant soudage

No. ARTICLE	NUMERO DE PIECE	DESCRIPTION	QTE
1	acier_gauche	Acier 44W	1
2	Aluminium	Aluminium 6061-T6	2
3	acier_droit	Acier 44W	1
4	shim	Aluminium 6061-T6	1
5	serrage_1vis	Acier 44W	2
6	serrage_2vis	Acier 44W	2

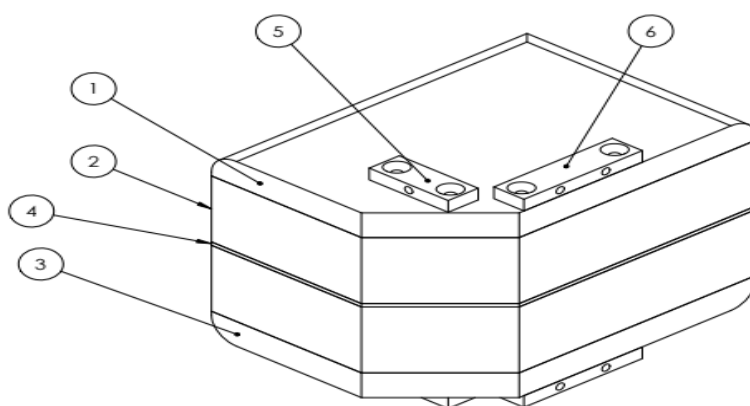


Figure 3-11: Représentation des supports utilisés pour souder les extrusions

Les supports de fixation ont été fabriqués en acier 440W et en aluminium 6061-T6. Les surfaces en contact direct avec les ailes des extrusions ont été réalisées en acier afin de supporter les faces inférieures des pièces durant le soudage. L'utilisation de l'acier permet d'obtenir des surfaces suffisamment rigides et résistantes pour assurer un support adéquat pendant le procédé. De plus, l'aluminium présentant une faible affinité de soudage avec l'acier, les pièces en acier peuvent être séparées plus facilement des extrusions en aluminium après le soudage.

Les surfaces en acier ont également été percées et filetées afin de permettre la fixation de blocs de serrage destinés au maintien des plaques sacrificielles en aluminium utilisées au début et à la fin des soudures. Ces blocs de serrage ont été installés sur les faces supérieures des supports de fixation afin de permettre le soudage des ailes supérieures et inférieures des extrusions.

Le cœur des supports est fabriqué à partir de deux pièces en aluminium afin d'alléger la structure et de réduire les coûts. Une cale mince en acier est insérée au centre des supports afin de combler les jeux pouvant être présents entre les supports et les extrusions en raison des tolérances sur la distance entre les ailes des extrusions.

3.2.2 Outils de soudage

Les essais de soudage ont été réalisés à l'aide de la machine du Centre de Soudage par Friction et Malaxage de l'Université du Québec à Chicoutimi (CSFM-UQAC). Pour l'exécution des soudures, un outil MTI 0157721 à simple épaulement a été utilisé. Cet outil est composé d'un épaulement de diamètre uniforme de 20 mm et d'un pion fileté présentant un diamètre de 9,5 mm à la base, de 5,5 mm à son extrémité ainsi qu'une hauteur de 8,9 mm. Il a servi au soudage des ailes des extrusions dans une configuration de joint bout à bout, telle qu'illustrée à la figure 3-12.

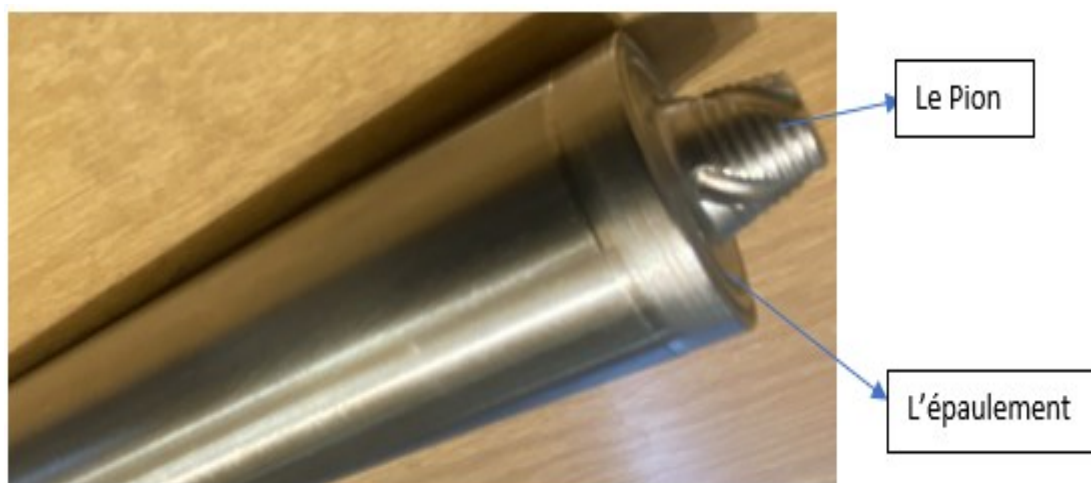


Figure 3-12: Outil à simple épaulement ou conventionnel utilisé pour le soudage

Un second outil a été utilisé pour réaliser le soudage en recouvrement entre l'âme de la poutrelle transversale et les ailes de la poutrelle longitudinale. Ce choix s'explique par la longueur de son pion fileté, de 12,7 mm, mieux adaptée à l'épaisseur de l'assemblage à souder que celle du premier outil présenté à la figure 3-15, dont le pion mesure 9,5 mm. La longueur plus importante du pion permet ainsi d'assurer une pénétration adéquate et un malaxage efficace du matériau au niveau de la zone de recouvrement. Cet outil est fabriqué en acier AISI 4340, un outil choisi pour sa disponibilité, sa capacité à résister aux hautes températures générées lors du soudage, réduisant ainsi les risques d'usure ou de déformation prématurée. Il s'agit d'un acier trempé, ce qui améliore sa dureté et prolonge sa durée de vie. Il a une tige de forme conique taraudée à trois gorges, avec un diamètre de base de 8,2 mm, un diamètre au bout de 4,5 mm une longueur de 12,7 mm et un épaulement concave avec un diamètre extérieur de 21 mm comme il est sur la figure 3-13.

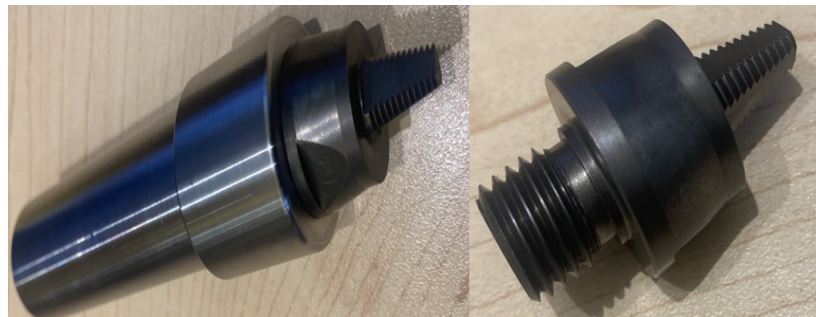


Figure 3-13: Outil à simple épaulement conique utilisé pour souder à recouvrement

Le matériau utilisé pour la fabrication de l'outil de soudage doit posséder une résistance mécanique élevée ainsi qu'une bonne stabilité thermique afin de supporter les sollicitations importantes générées durant le procédé de soudage par friction malaxage. Le Tableau 3-1 présente les principales propriétés mécaniques, thermiques et physiques de ce matériau.

Tableau 3-1: Propriétés de l'acier AISI 4340 à 273 kelvins

Propriété	Valeurs	Unité (S.I)
Densité	7800	kg/m ³
Limite d'élasticité	1650	MPa
Résistance à la traction	1990	MPa
Module d'élasticité (E)	210	GPa
Module d'élasticité isostatique (K)	140	GPa
Module de cisaillement (G)	81	GPa
Coefficient de Poisson	0,3	-
Conductivité thermique	24,3	W/m·K
Chaleur spécifique	460	J/kg·K
Chaleur latente	740 000	J/kg
Température de fusion	1427	°C
Coefficient d'expansion thermique	33-39 x 10 ⁻⁶	/°C

Ces propriétés confèrent au matériau une excellente résistance mécanique et une bonne stabilité thermique, le rendant particulièrement adapté aux conditions sévères rencontrées lors du procédé FSW.

3.2.3 Paramètres de soudage utilisés

3.2.3.1 Détermination des paramètres de soudage pour l'assemblage des ailes (soudure bout à bout)

Les échantillons ont d'abord été découpés et usinés selon les géométries requises, puis nettoyés à l'acétone afin d'éliminer toute impureté ou contamination présente à leur surface. Ils ont ensuite été assemblés par soudage selon les différentes configurations étudiées.

Toutes les soudures ont été amorcées et terminées dans des blocs sacrificiels afin d'éviter la présence de défauts dans les pièces principales. L'un des défauts les plus courants en soudage par friction malaxage est le trou de sortie laissé par le retrait de l'outil à la fin du procédé. Afin d'empêcher que ce défaut ne soit localisé dans les extrusions principales, une trajectoire de sortie courbe a été adoptée. Ainsi, au lieu de suivre un parcours rectiligne jusqu'à son extraction, l'outil est dévié selon un arc de cercle qui se prolonge dans le bloc sacrificiel.

Cette trajectoire est caractérisée par le rayon de l'arc de cercle utilisé. Toutes les soudures réalisées avec cette approche comportent un rayon de sortie correspondant à un quart de cercle, soit un angle de 90°.

Les trajectoires de soudage évaluées afin d'éviter que le trou de sortie de l'outil ne soit localisé sur les extrusions principales sont les suivantes :

- Une trajectoire avec un rayon d'entrée et de sortie de 25 mm, illustrée à la figure 3-14 ;
- Une trajectoire sans rayon d'entrée et avec un rayon de sortie de 25 mm ;
- Une trajectoire sans rayon d'entrée et avec un rayon de sortie de 12,5 mm ;
- Une trajectoire sans rayon d'entrée et avec un rayon de sortie de 6 mm, présentée à la figure 3-15.

Les premiers essais (1 et 2) ont été réalisés en contrôle de position afin de déterminer la force de soudage nécessaire au procédé. Les paramètres utilisés, soit une vitesse de rotation de 900 tr/min, une vitesse d'avance de 600 mm/min ainsi qu'un angle d'inclinaison de l'outil de 0° par rapport à l'axe vertical, ont été sélectionnés à partir de travaux de soudage antérieurs réalisés sur le même matériau et pour une épaisseur similaire. La principale différence avec les études précédentes résidait dans la géométrie des pièces à assembler. La force déterminée lors de cet essai a ensuite été utilisée pour réaliser les autres tests en contrôle de force, avec les mêmes vitesses de rotation et d'avance. Ces essais ont permis d'observer et d'analyser la qualité des soudures obtenues.

Les principaux paramètres de soudage par friction malaxage sont la géométrie de l'outil, la vitesse d'avance et la vitesse de rotation de l'outil. Ces paramètres présentés au Tableau 3-2 pour la condition d'essai 7, ont été appliqués pour le soudage des extrusions en I de l'alliage d'aluminium 6005A-T6.

Tableau 3-2: Paramètre des différents tests de soudure

Nbre de Test	Vitesse Avance mm/mn	Vitesse Rotation RPM	Contrôle	Force N	Rayon entrée (mm)	Rayon sortie(mm)	Défauts
Test 1, 2	600	900	Position	-	25	25	Cavité de surface
Test 3,4	600	900	Force	14500	0	25	Cavité de surface
Test 5,6	600	900	Force	14500	0	12	Cavité de surface
Test 7, 7-1-2	600	900	Force	14500	0	6	Pas de Cavité de surface

3.3 Essai mécanique

3.3.1 Assemblage de poutrelles

Après les essais de soudage, il a été observé que tous les essais réalisés en contrôle de position ainsi qu'en contrôle de force avec un rayon d'entrée et de sortie supérieur à 6 mm présentaient des cavités superficielles. La figure 3-14 illustre les défauts observés au niveau des zones d'entrée et de sortie de l'outil.

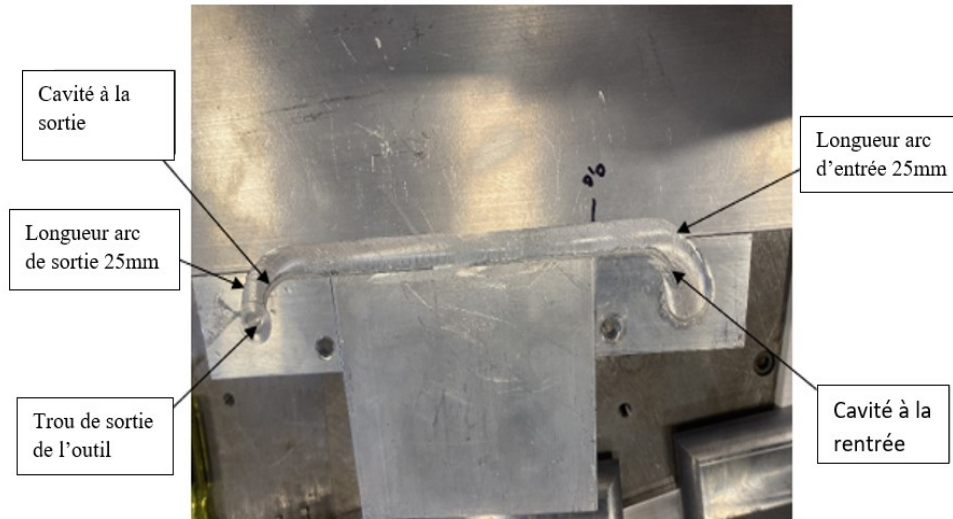


Figure 3-14: Les conditions de soudages utilisées avec 25 mm de rayon à l'entrée et à la sortie de deux poutrelles

Tous les essais réalisés en contrôle de force avec une entrée rectiligne et un arc de sortie de 6 mm ont produit une surface de soudure exempte de cavités et présentant peu de bavures. La figure 3-15 présente l'état de surface obtenu pour cette configuration de trajectoire de soudage.

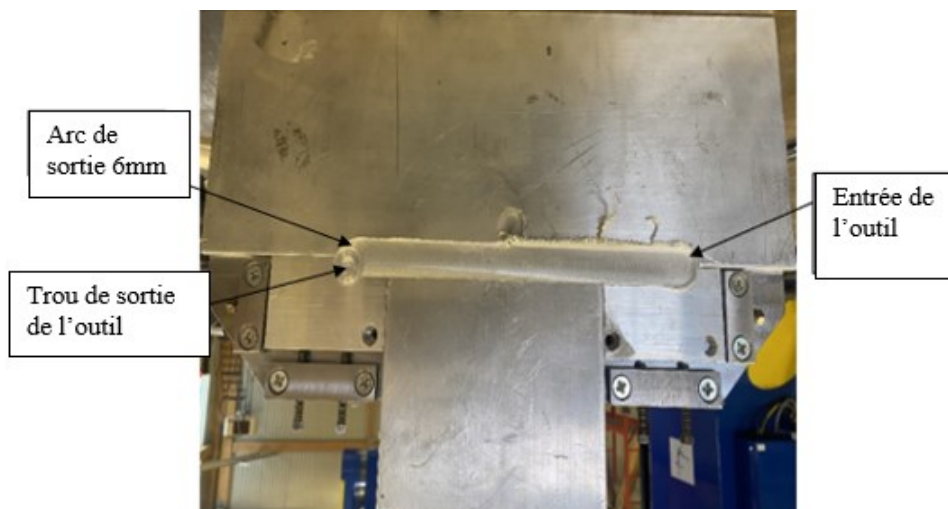


Figure 3-15: Les conditions de soudage utilisées avec rayon de 6 mm à la sortie de deux poutrelles

3.3.2 Détermination des paramètres de soudage pour l'assemblage ailes – âme (soudure en recouvrement)

Pour identifier les paramètres de soudage permettant de réaliser des soudures en recouvrement entre l'aile d'une poutrelle longitudinale et l'âme d'une poutrelle transversale, des premiers essais de soudage ont été effectués sur des plaques planes de 9,5 mm d'épaisseur en alliage d'aluminium 6061-T6. Cette configuration a été choisie afin de faciliter la mise en place du montage requis pour faciliter les essais. Des plaques en 6061-T6 ont été utilisées malgré une composition différente de celles des poutrelles en « I » en raison de leur disponibilité. Les propriétés mécaniques du 6061-T6 sont relativement similaires à celles du 6005A-T6, comme elles sont présentées au Tableau 3-3. Toutefois, ces deux alliages se distinguent par leur composition chimique. L'alliage 6061-T6 contient notamment davantage de magnésium et de silicium, ainsi que de faibles quantités de cuivre et de chrome, ce qui lui confère une bonne combinaison de résistance mécanique, de soudabilité et de résistance à la corrosion. L'alliage 6005A-T6, quant à lui, présente généralement une teneur plus élevée en silicium et une teneur plus faible en cuivre, ce qui le rend particulièrement adapté à la fabrication de profilés extrudés de structure tout en conservant de bonnes propriétés mécaniques et une excellente aptitude à l'extrusion.

Tableau 3-3: Propriétés mécaniques de 6061-T6 et 6005-T6 [47]

Alliage	Résistance ultime à la traction (MPa)	Limite d'élasticité (MPa)	Module d'élasticité (GPa)
6061-T6	310	275	69
6005-T6	320	292	69

Les essais de soudage ont été effectués sur les plaques plane 9,5 mm d'épaisseur en utilisant les paramètres décrits dans le tableau 3-4 qui suit.

Les essais 1 et 2, réalisés en contrôle de position, ont permis d'estimer la force de forgeage à appliquer sur l'outil (environ 7 100N) pour le soudage en contrôle de force. Les essais suivants ont été réalisés en contrôle de force avec une légère modulation de la force appliquée afin de réduire l'enfoncement de l'outil et de limiter la formation de bourrelets.

Afin d'évaluer la qualité des soudures réalisées, des échantillons T5 issus des assemblages en recouvrement ont été prélevés pour analyse. Ces soudures ont été réalisées avec une vitesse de rotation de 100 tr/min, une vitesse d'avance de 250 mm/min et une force 8500 N.

La figure 3-16 montre un échantillon après enrobage, polissage et attaque chimique pour le contrôle visuel des défauts de soudage. L'image de gauche présente l'échantillon après découpe et enrobage, tandis que l'image de droite correspond à l'observation de la section polie puis attaquée chimiquement à l'acide fluorhydrique (HF). Cette préparation métallographique a permis de révéler les différentes zones du soudage ainsi que certaines imperfections présentes dans l'assemblage. L'observation a été réalisée à l'aide d'un appareil macroscopique avec une échelle de 500 μm , comme indiqué sur l'image de droite.

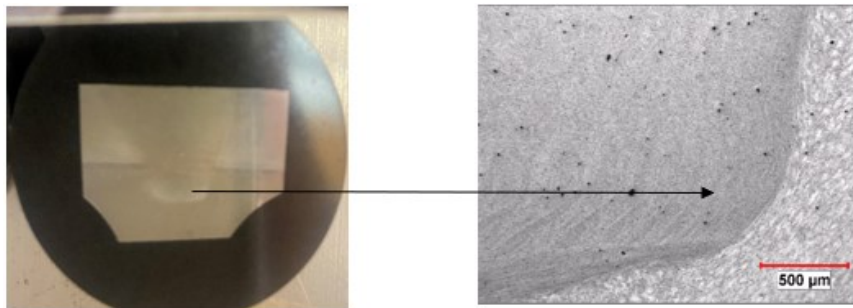


Figure 3-16: Préparation métallographique et observation macroscopique d'un échantillon T5

La figure 3-17 présente l'inspection visuelle de l'échantillon T5 soudé en recouvrement pour l'assemblage de l'âme et de l'aile des extrusions.



Figure 3-17: Échantillon découpé pour control visuel

Le tableau 3-4 suivant résume les paramètres de soudage utilisés pour les essais de soudage en recouvrement et présente une image des soudures obtenues. À la suite de l'analyse visuelle des soudures obtenues, les conditions de soudage utilisées lors de l'essai 5 ont été retenues pour la réalisation des essais suivants sur les poutrelles en alliage 6005A-T6.

Tableau 3-4: Paramètres utilisés pour souder l'âme

Essais	Vitesse de rotation (tr/mn)	Vitesse d'avance (mm/mn)	Contrôle	Images
1	1000	100	Position	T1 RPM:1000 Av: 100 mm/mn L: 0° Ret: Anti Vitesse G A R
2		200		T2 RPM:1000 Av: 200 mm/mn L: 0° Ret: Anti Vitesse Contrôle Position G A R 3/3 2/2 1/1
3		100	Force 7100 à 7500 N	T3 RPM:1000 Av: 100 mm/mn L: 0° Force 7100 N / 7300 N / 7500 N G A R
4		200	Force 8100 à 8500 N	T4 RPM:1000 Av: 200 mm/mn L: 0° Force 8100 N / 8300 N / 8500 N G A R
5		250	Force 8500 N	T5 RPM:1000 Av: 250 mm/mn L: 0° Force 8500 N G A R

À la suite d'une analyse visuelle (Tableau 3-4), les conditions utilisées pour l'essai 5 ont été conservés pour les essais sur poutrelles en alliage 6005A-T6. À l'aide de ces paramètres de soudage retenus, l'aile d'une poutrelle longitudinale a été soudée en recouvrement sur l'âme d'une poutrelle transversale, comme l'illustre la figure 3.18. La longueur totale de la soudure réalisée est de 126 mm. Étant donné que l'aile de la poutrelle longitudinale mesure 75 mm jusqu'au milieu l'âme, la

soudure est initiée à 51 mm du bout de la poutrelle transversale (vis-à-vis de l'âme) et s'arrête vis-à-vis l'âme de la poutrelle longitudinale afin de localiser le trou de sortie à un endroit ayant le plus de matière. L'inspection visuelle réalisée après soudage a révélé que les paramètres développés sur plaques planes en 6061-T6 semble adéquats pour les extrusions de même épaisseur en 6005A-T6. Des analyses microscopiques présentées plus loin dans ce document permettront de confirmer le tout.

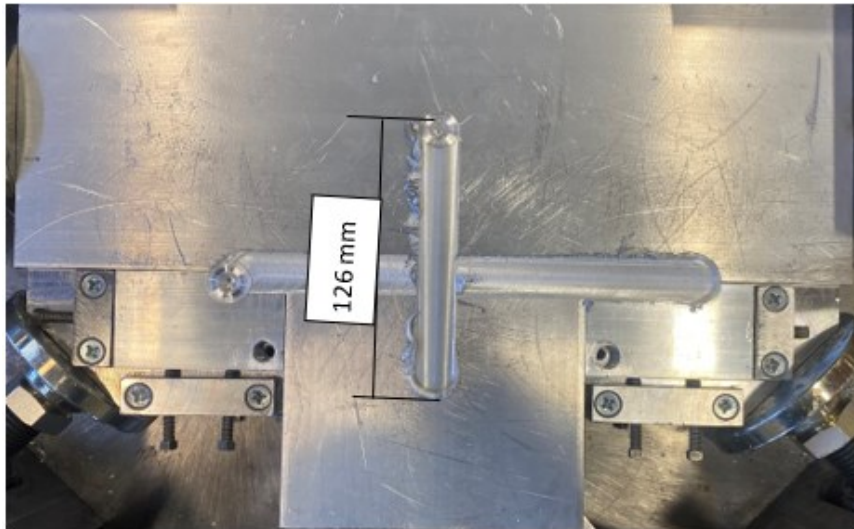


Figure 3-18: Soudure finale transversal Av 250 mm/mn et VR 1000 RPM de deux poutrelles

Pour la configuration d'assemblage où seules les ailes sont assemblées, les mêmes paramètres que ceux du test 7 ont été conservés (vitesse d'avance de 600 mm/min, vitesse de rotation de 900 RPM, force axiale de 14500 N).

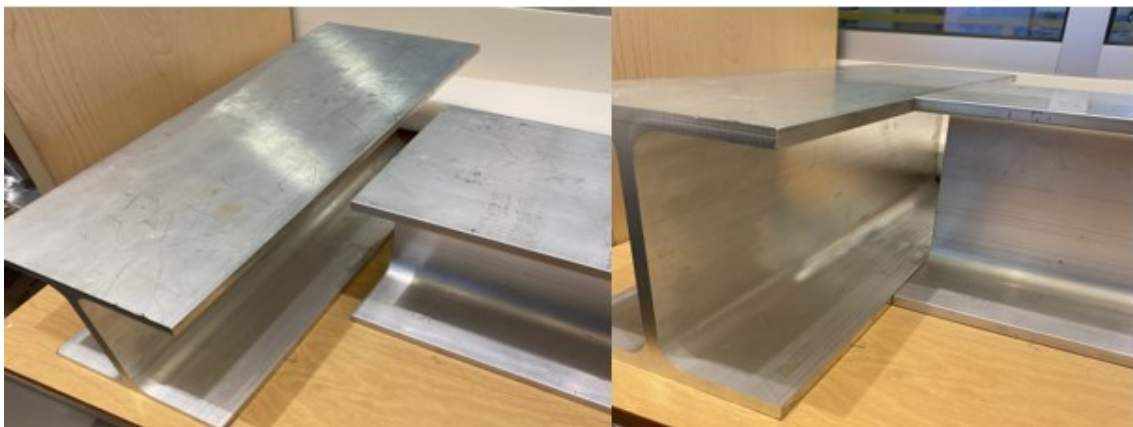


Figure 3-19: Poutrelles dont âme et l'aile ne sont pas soudés

La figure 3-19 présente la configuration des deux poutrelles en aluminium avant l'opération de soudage, mettant en évidence leur positionnement relatif dans l'assemblage.

3.3.3 Prélèvement des échantillons

Après le soudage bout à bout des ailes des extrusions, des échantillons ont été prélevés sur les deux ailes soudées afin de réaliser des analyses en microscopie optique ainsi que des essais de micro-dureté et de traction. Les prélèvements ont été effectués transversalement par rapport à la soudure. Au total, quatre échantillons ont été prélevés pour les analyses en microscopie optique et six échantillons pour les essais de traction. La figure 3-20 illustre les zones de prélèvement des échantillons sur un côté de l'assemblage, sachant que l'assemblage complet comporte deux ailes soudées.

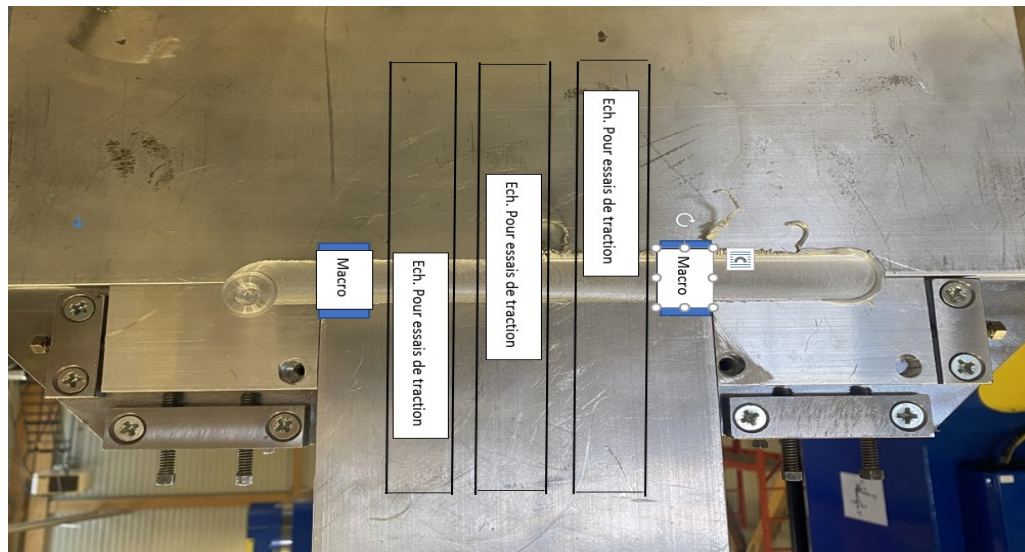


Figure 3-20: Prélèvement d'échantillons après soudure

Pour les échantillons dont l'âme est soudée, à chaque surface deux prélèvements sont fait pour les essais de traction soit quatre (4) par échantillon et trois (3) pour macrographie (deux aux extrémités et un au centre, figure 3-24).

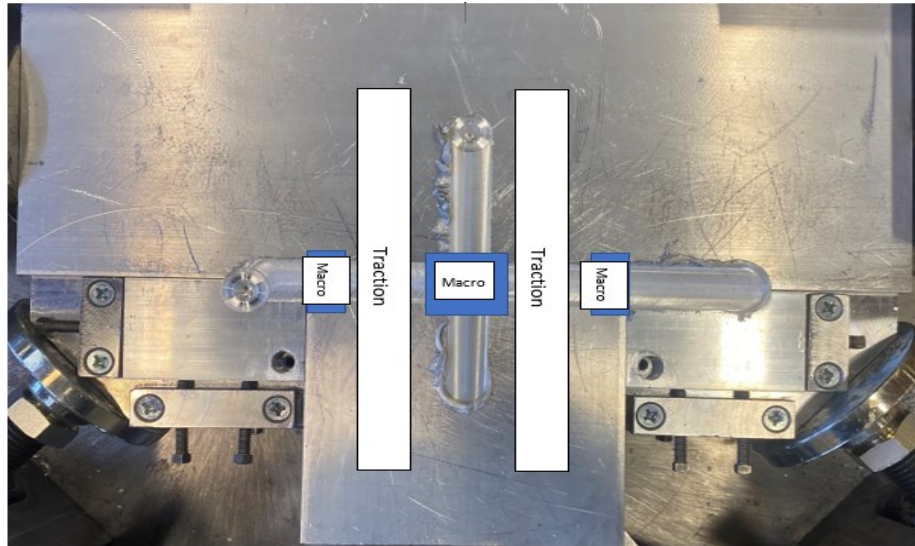


Figure 3-21: Prélèvement d'échantillons après soudage de l'âme

3.3.4 Préparation des échantillons

Les échantillons pour la microscopie optique ont été prélevés aux extrémités de la soudure, précisément du côté de l'entrée et de sortie de l'outil.

Les échantillons ont une dimension de 20 mm de long, 1,5 mm de large et 9,5 mm d'épaisseur qui correspond à l'épaisseur des extrusions. Ces échantillons sont enrobés avec de la résine noire à l'aide d'une machine "*Struers*" au Parc Technologique de l'UQAC. Pour ce faire, les échantillons sont placés sur une surface plane et poussés dans un creuset, dans lequel une quantité de 10 g de poudre de résine est versée, compactée avant d'être hermétiquement fermée à l'aide du bouchon de protection. Enfin, la machine est mise en action avec une force de compression de 30 N, une température de chauffage de 180°C, un temps de préchauffage et de mise en marche de 5 minutes, un temps de chauffage de 7 minutes et un temps de refroidissement de 7 minutes pour une durée totale d'environ 20 minutes pour chaque échantillon (figure 3-24).

Les échantillons sont enrobés tout en gardant apparente la surface où se trouvent la soudure (20mm x 9,5mm). Cette surface apparente est par la suite polie avant d'être observée au microscope optique. L'observation au microscope optique permet de voir s'il y a, présence de porosités, fissures, etc.



Figure 3-22: Machine d'enrobage Struer LaboPress-3

Après l'enrobage, les échantillons ont été polis à l'aide d'une polisseuse automatique en suivant le protocole présenté au tableau 3-5. Les principaux paramètres considérés lors du polissage étaient la force appliquée par la polisseuse, la vitesse de rotation, le temps de polissage, le type de papier abrasif, le type de tapis de polissage, le sens de rotation, ainsi que l'utilisation d'eau, de solutions DIAMAT polycristallines, d'un lubrifiant vert et d'une solution SIAMAT de silice colloïdale.

Les échantillons ont d'abord été fixés sur un support afin d'assurer une répartition uniforme des forces appliquées durant le polissage. La polisseuse a ensuite été mise en marche de manière à faire tourner les échantillons dans le sens opposé à celui de la plaque porte-abrasif. Une série de papiers abrasifs en carbure de silicium a été utilisée progressivement, en passant des grains les plus grossiers aux plus fins (120, 240/280, 320/400 et 600), avec des temps de polissage respectifs de 30 s, 1 min 30 s, 1 min 30 s et 2 min. De l'eau a été utilisée en continu afin de limiter l'échauffement et d'évacuer les résidus générés durant le polissage.

Afin d'obtenir un meilleur état de surface, les échantillons ont ensuite été polis à l'aide d'une polisseuse vibratoire fonctionnant à une vitesse de rotation de 150 tr/min. Le premier polissage de finition a été effectué avec un tapis de polissage de 6 μm , préalablement humidifié avec une solution DIAMAT polycristalline (6 μm) et un lubrifiant vert. Le polissage a été réalisé pendant 5 minutes, en ajoutant du lubrifiant toutes les 30 secondes afin de maintenir une lubrification adéquate de la surface.

Après cette étape, les échantillons ont été nettoyés à l'eau et à l'alcool avant d'être polis à nouveau avec un tapis de 1 μm en utilisant le même procédé, mais avec une solution DIAMAT polycristalline Diamond de 1 μm .

Enfin, un dernier polissage de finition a été réalisé à l'aide d'un tapis de polissage de 0,5 μm et d'une solution SIAMAT de silice colloïdale (0,5 μm). Cette solution a été appliquée sur le tapis pendant une durée de 10 minutes. Lorsque le tapis commençait à sécher, celui-ci était rincé à l'eau pendant environ 20 secondes avant l'ajout d'une nouvelle quantité de solution SIAMAT accompagnée d'eau afin de maintenir les conditions de polissage.

Une fois le polissage terminé, les échantillons ont été observés au microscope. Le tableau 3-5 résume les différentes étapes du procédé de polissage, tandis que la figure 3-23 présente la machine de polissage utilisée.

Tableau 3-5: Résumé procédure de polissage

					Tapis de Polissage		
Papiers Abrasif	120	280/240	320/400	600	6 µm	1 µm	0.5 µm
Temps(min)	0:30	1:30	1:30	2:00	5 :00	5 :00	10:00
Vitesse de rotation (rpm)	120				150		120
Force (N)	10			15	10		15
Sens de la rotation	Contraire de la machine						Même
Produits Utilisés	Eau				DIAMAT Polycristalline Diamond (6µm) + Lubrifiant vert	DIAMAT polycristalline Diamond (1µm) + Lubrifiant vert	SIAMAT de Silice Colloidal (0.5 µm) + Eau



Figure 3-23: Machine de polissage

Après avoir polis les échantillons à l'état miroir, afin d'observer la taille et forme des grains, d'identifier la microstructure des échantillons dans les soudures, des attaques chimiques ont été effectuées par immersion dans une solution 0.5% le fluorure d'hydrogène HF (c'est-à-dire pour 100 mL de solution à 0,5%, 1 mL de HF est ajouté à 99 mL d'eau distillée), pendant 60 secondes, après ils sont observés au microscope optique.

3.3.4.1 Test de dureté Vickers

Des essais de dureté Vickers ont été réalisés afin de caractériser la résistance mécanique locale des assemblages soudés, notamment dans les cordons de soudure et les zones affectées thermiquement (ZAT). Ce procédé permet d'obtenir des mesures fiables de dureté même sur des zones de quelques dizaines de microns.

Les essais ont été conduits conformément à la norme ASTM E92-17 [48], qui encadre les procédures d'essais de micro dureté pour les matériaux métalliques à l'aide d'un pénétrateur en diamant. Pour cette étude, certains échantillons initialement préparés pour les observations macrographiques ont été sélectionnés afin d'évaluer la dureté dans des zones critiques du joint.

Les essais de micro-dureté ont été réalisés au Centre Universitaire de Recherche sur l'Aluminium (CURAL) de l'UQAC à l'aide d'un duromètre Vickers semi-automatique, assurant une excellente répétabilité des mesures ainsi qu'un positionnement précis des empreintes. La procédure de mesure de la dureté Vickers a été réalisée selon les étapes suivantes :

- **Préparation de l'échantillon :**

Les échantillons, déjà enrobés dans une résine thermodurcissable et soigneusement polis selon une procédure métallographique standard (comme indiqué sur la figure 3-25), ont été utilisés sans traitement supplémentaire. Une attention particulière a été apportée à la qualité du polissage afin d'éviter les déformations ou micro-rayures qui pourraient fausser les lectures.

- **Paramétrage de la machine :**

Une force d'essai de 0,025kgf (25 gf) a été sélectionnée, adaptée à l'échelle microstructurale des zones sondées (soudure, ZAT, métal de base).

Le pénétrateur, en diamant de forme pyramidale à base carrée (angle de 136° entre les faces opposées), est enfoncé perpendiculairement à la surface du matériau.

Le temps de maintien de la charge a été fixé à 20 secondes, conformément aux prescriptions normatives.

- **Alignement et mesure :**

Chaque échantillon a été positionné avec soin sur la platine de la machine, de façon à assurer une parfaite stabilité et un alignement précis de la zone ciblée sous le pénétrateur.

L'empreinte laissée par le pénétrateur a ensuite été mesurée optiquement, et la valeur de dureté HV calculée selon l'équation (1) suivante :

$$HV = \frac{1854 * F}{d^2} \quad (1)$$

Où F représente la charge appliquée (kgf) et d correspond à la moyenne des diagonales de l'empreinte mesurée en millimètres (mm).

Les profils de dureté obtenus permettent de suivre l'évolution de la dureté à travers le joint soudé, depuis le métal de base jusqu'au centre de la soudure. Ils permettent également d'évaluer la qualité métallurgique de la soudure en identifiant les zones présentant un adoucissement ou un

durcissement localisé, ainsi que de détecter d'éventuelles zones critiques susceptibles de constituer des points de fragilité mécanique, notamment dans la zone affectée thermiquement (ZAT).

La figure 3-26 présente l'appareil utilisé pour les essais de dureté Vickers, tandis que la figure 3-27 illustre l'empreinte laissée par le pénétrateur sur la surface de l'échantillon.

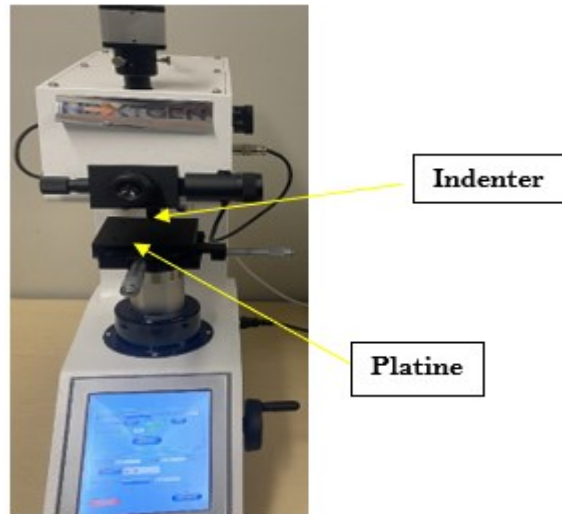


Figure 3-24: Appareil de mesure de dureté Vickers

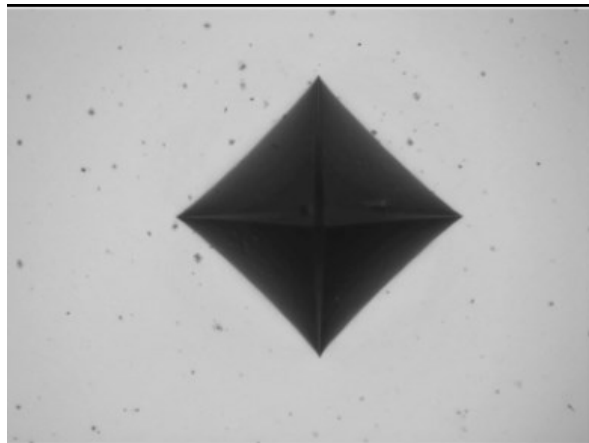


Figure 3-25: Exemple d'empreinte typique laissée par le pénétrateur dans une plaque d'aluminium

3.4 Essai de traction

Les essais de traction consistent à soumettre une éprouvette à une charge croissante jusqu'à sa rupture afin de déterminer ses propriétés mécaniques en traction, notamment sa résistance et son comportement en déformation. Dans le cadre de cette étude, les essais ont été réalisés sous contrôle de déplacement à une vitesse d'allongement de 1,5 mm/min, permettant de mesurer avec précision les déformations de l'ordre de 10^{-3} .

Afin de caractériser les propriétés mécaniques des assemblages soudés, les éprouvettes de traction ont été prélevées dans les extrusions soudées puis usinées conformément aux exigences de la norme ASTM E8/E8M-22 [49]. Les dimensions des éprouvettes utilisées sont les suivantes :

$L = 200 \text{ mm}$	$G = 50 \text{ mm}$	$C = 20 \text{ mm}$	$R = 12.5 \text{ mm}$
$A = 57 \text{ mm}$	$B = 50 \text{ mm}$	$W = 12.5 \text{ mm}$	$T = 9 \text{ mm}$

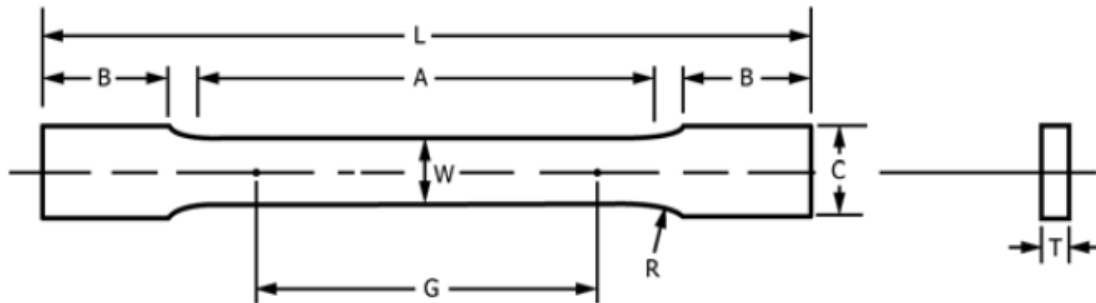


Figure 3-26: éprouvette de traction utilisée (E8/E8M) [49].

Dans le cadre de cette étude, les essais de traction ont été réalisés à l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC), au sein d'un environnement de recherche équipé de technologies de pointe. Ces essais ont été effectués à l'aide d'une presse hydraulique MTS 647 Hydraulique Wedge Grip, conçue pour les tests mécaniques sur matériaux métalliques.

La presse MTS 647 est un système de traction hydraulique haute performance, doté de mors auto-serrant permettant de maintenir fermement les éprouvettes pendant l'essai, sans glissement ni déformation parasite. Elle permet un contrôle précis de la vitesse de déplacement, de la charge appliquée et de l'enregistrement en temps réel des paramètres d'essai (force, allongement, contrainte, déformation).

Chaque essai a été mené conformément à la norme ASTM E8/E8M [49], sur des éprouvettes préparées selon les dimensions standards. Les courbes contrainte-déformation générées ont permis de déterminer les principales caractéristiques des matériaux étudiés, notamment : la limite d'élasticité, la résistance à la traction ultime, l'allongement à la rupture. La figure 3-29 présente la presse MTS 647 Hydraulique Wedge Grip.

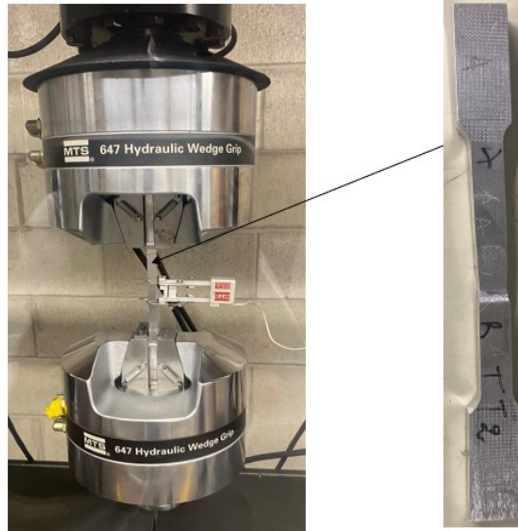


Figure 3-27: Presse MTS 647 Hydraulic Wedge Grip.

Afin de mesurer avec précision la déformation longitudinale des éprouvettes pendant les essais de traction, un extensomètre de marque MTS, modèle 634.12F-54, portant le numéro de série 102000658, a été utilisé. Cet appareil a été monté directement sur chaque éprouvette au niveau de la zone de mesure active, selon les recommandations du fabricant et les normes d'essai en vigueur ASTM E8/E8M [49] (figure 3-28).



Figure 3-28: Extensomètre MTS Model 634.12F-54

Ce modèle d'extensomètre est un instrument de haute précision conçu pour des essais sur des matériaux métalliques et composites. Il permet une mesure directe et en temps réel de l'allongement de l'éprouvette.

L'appareil offre une excellente résolution de mesure et une répétabilité élevée, ce qui le rend parfaitement adapté à des essais nécessitant un suivi précis du comportement mécanique jusqu'à la rupture.

L'extensomètre a été installé manuellement sur chaque éprouvette avant le début de l'essai, avec une longueur de 25 mm. Une fois en place, il est calibré pour garantir une mesure précise, puis connecté au système de collecte de données de la machine d'essai.

Pendant l'essai, la variation de la longueur est mesurée en continu, permettant une détection fine de la déformation élastique initiale, puis de la déformation plastique. Grâce à cette mesure directe, il est possible de déterminer avec précision le point de transition entre le comportement élastique et plastique, ce qui est souvent difficile à identifier uniquement à partir du déplacement global de la traverse. Pour les essais réalisés, la limite élastique des échantillons d'aluminium testés a été déterminée par la méthode du décalage à 0.2 % définie par ASTM E8/E8M [49].

L'essai de traction mené sur des éprouvettes soudées a aussi été utilisé pour l'efficacité de la soudure. L'efficacité de la soudure, aussi appelé pourcentage d'efficacité du joint est un indicateur de la performance mécanique d'un joint soudé par rapport au matériau de base non soudé. Il permet d'évaluer dans quelle mesure le procédé d'assemblage (comme le FSW) conserve les propriétés mécaniques du matériau. Il se calcule selon l'équation (2) suivante :

$$\text{Efficacité du joint}\% = \left(\frac{\sigma_{\text{ult.s}}}{\sigma_{\text{ult.mb}}} \right) * 100 \quad (2)$$

Dans cette équation, $\sigma_{\text{ult.s}}$ est la résistance à la traction ultime de la soudure et $\sigma_{\text{ult.mb}}$ est la résistance à la traction ultime du matériau de base.

3.5 Essais de flexion grande échelle

Les valeurs caractéristiques de l'essai de flexion sont en principe obtenues avec l'essai de flexion 2 points, l'essai de flexion 3 points ou l'essai de flexion 4 points. Avec ce type d'essai de flexion, un moment fléchissant constant entre les rouleaux d'application de la charge est obtenu. La figure 3-33 illustre le principe d'un essai de flexion 4 points.

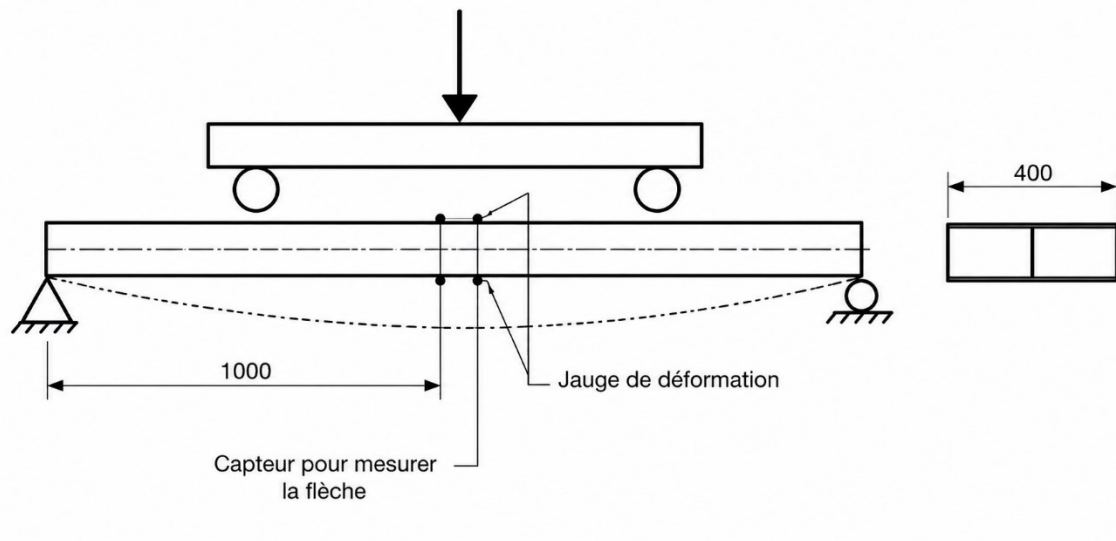


Figure 3-29: Schema typique illustrant le chargement d'une poutre en flexion 4 points.

Les poutrelles requises pour effectuer les essais de flexion ont été découpées selon les dimensions suivantes 1000 mm et 400 et soudées avec les paramètres retenus de T7 (600 mm/mn vitesse d'avance, 900 RPM vitesse de rotation, 14500 N force), comme présenté à la figure 3-30.

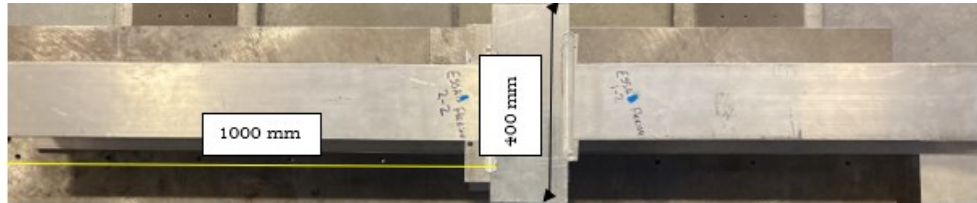


Figure 3-30: Poutrelle soudée pour essai de flexion.

Les essais de flexion sont effectués à l'UQAC avec une presse de modèle 661 23F-01 de numéro de série SN 10364650A avec une capacité de 500 kN, qui a une table de travail avec les dimensions suivantes : largeur de 711,2 mm et une longueur de 2108,2 mm. Cette presse a une charge d'appuis (charge morte) de 711,96 N. la figure 3-31 illustre l'appareil qui a été utilisé pour effectuer les essais de flexion.



Figure 3-31: Appareil pour essais de flexion.

Pour effectuer ces essais de flexion, deux configurations ont été utilisées et sont réalisées de la manière suivante :

Dans une première configuration, une poutre isostatique comportant un appui simple et un appui mobile a été utilisée, comme illustré à la figure 3-32.

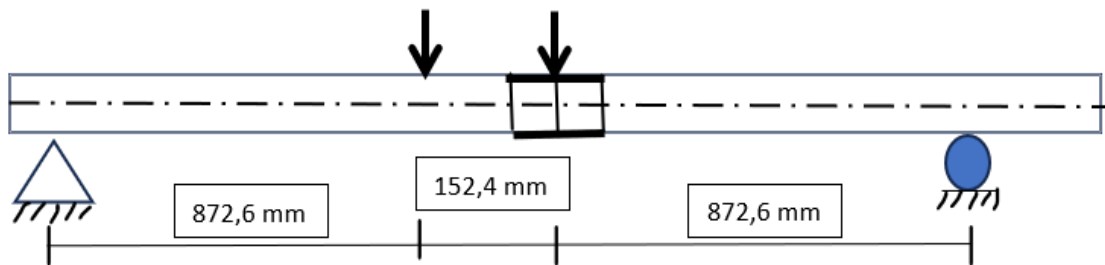


Figure 3-32: Poutre isostatique pour analyse 1 de structure.



Figure 3-33: Montage de la première configuration pour essais de flexion 4 points

Avant d'effectuer les essais de flexion sur ce montage avec une vitesse de déplacement de 5 mm/min, différentes manipulations ont été réalisées :

- Le poids de la charge morte a été pesé à l'aide d'une balance à 72,6 kg soit un poids de 0,71196 kN ;
- Le capteur à câble aussi appelé capteur à fil tendu ou encore transducteur de déplacement à câble est placé à $L = 171,76$ mm par rapport à l'âme de l'extrusion transversale afin de mesurer la flèche de l'éprouvette, fournir des données pour le calcul des contraintes/déformations qui a permis de déterminer la courbure ou la déformation locale de poutre ;
- Un capteur de déplacement laser est posé en bas de la poutre afin de trouver la valeur du déplacement vertical pour ensuite la comparer au déplacement trouvé dans la presse, puis le capteur de déplacement laser est ensuite placé horizontalement sur la poutre à $L = 130,83$ mm pour maintenant trouver le déplacement horizontal des fibres de surface de l'éprouvette.

Afin de mieux comprendre les explications précédentes, les figures 3-34, 3-35 3-36 en donnent une représentation visuelle.



Figure 3-34: Mesure de la masse à l'aide d'une balance de la charge morte 72,6 kg



Figure 3-35: Capteur à câble placé à 171,76 mm de l'âme

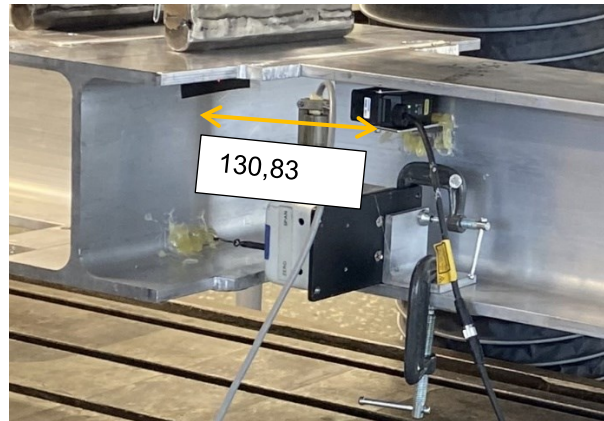


Figure 3-36: Capteur de déplacement laser placé horizontalement sur l'éprouvette à $L = 130,83$ mm

Un essai de flexion 3 points a été effectué. La poutre a été simplement appuyée sur une longueur totale entre appuis de 872 mm et une charge ponctuelle P a été appliquée vers le bas au centre de la poutre soit à 436 mm, comme illustre les figures 3-37, 3-38. Dans cette configuration, la zone soudée se retrouve directement à proximité de l'un des appuis, ce qui permet de maximiser l'effort tranchant repris par la soudure.

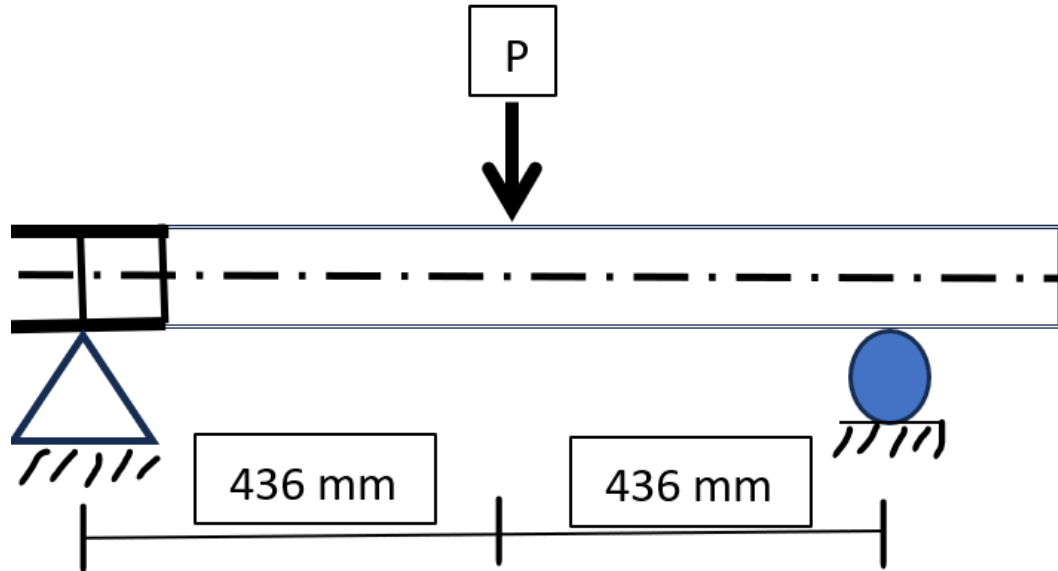


Figure 3-37: Poutre isostatique pour analyse 2 de structure



Figure 3-38: Montage de la première configuration pour essais de flexion 3 points

Avant d'effectuer les essais de flexion sur ce montage avec une vitesse de déplacement de 5 mm/min, différentes manipulations ont encore été réalisées :

- Le capteur à câble est placé à $L = 167,52$ mm afin de mesurer la flèche de l'éprouvette, fournir des données pour le calcul des contraintes/déformations qui a permis de déterminer la courbure ou la déformation locale de l'éprouvette ;
- Un capteur de déplacement laser est placé horizontalement sur l'éprouvette à $L = 181,24$ mm pour mesurer le déplacement horizontal.

Afin de mieux comprendre les explications précédentes, la figure 3-39, en donne une représentation visuelle.

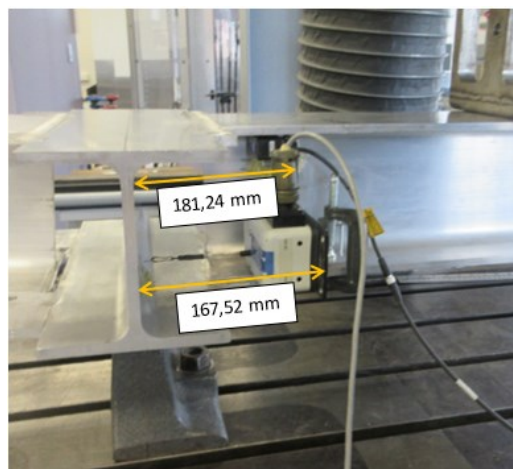


Figure 3-39: Emplacement de capteur à câble et capteur de déplacement laser

3.6 SIMULATION NUMERIQUE

Dans le cadre de cette étude, une représentation de la réalité numérique de l'assemblage a été développée afin de représenter sa géométrie tridimensionnelle et son comportement mécanique. Cette représentation de la réalité a ensuite servi de base à la réalisation d'études et de prédictions de comportements par éléments finis à l'aide du logiciel SolidWorks Simulation, dans le but de prédire la réponse de l'assemblage sous différentes conditions de chargement. Les résultats obtenus ont été interprétés afin d'évaluer la répartition des contraintes, d'identifier les zones critiques susceptibles de présenter des concentrations de contraintes et d'estimer le comportement mécanique global de l'assemblage.

L'objectif principal de cette approche numérique est de fournir une première estimation des performances mécaniques de la structure et de vérifier si la conception répond aux exigences du projet avant la réalisation des essais expérimentaux. Il convient toutefois de souligner que la représentation repose sur plusieurs hypothèses simplificatrices et ne prend pas en compte l'ensemble des phénomènes physiques liés au procédé de soudage par friction malaxage, notamment les effets thermiques, les contraintes résiduelles, les déformations induites par le soudage ainsi que les modifications microstructurales. Les résultats d'études et prédictions de comportements doivent donc être interprétés comme des estimations permettant d'orienter la conception et l'interprétation, plutôt que comme une représentation exacte du comportement réel de l'assemblage.

La représentation géométrique a été élaborée à partir des dimensions réelles des extrusions en utilisant des esquisses bidimensionnelles, ensuite transformées en volumes tridimensionnels au moyen d'opérations d'extrusion. Les différentes pièces de l'assemblage ont ensuite été reliées par

des contacts de type *Solidaire (Bonded)*, afin de représenter les zones soudées et de reproduire, dans la mesure des hypothèses retenues, le comportement attendu de l'assemblage réel. Les modèles numériques développés sont présentés aux figures 3-40 à 3-42.

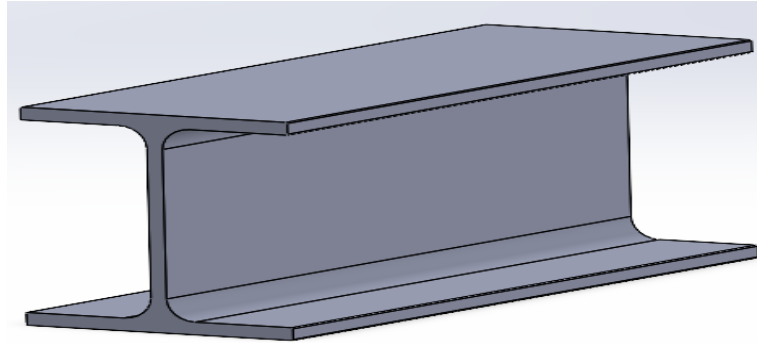


Figure 3-40: Géométrie modélisée d'une extrusion I 3D 6005A-T6

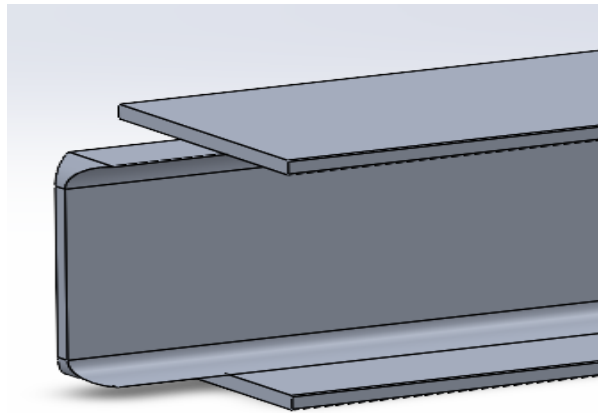


Figure 3-41: Géométrie modélisée d'une extrusion usinée 3D

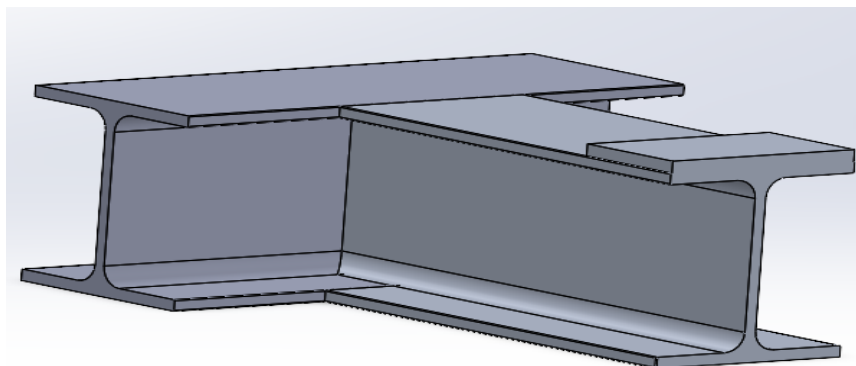


Figure 3-42: Géométrie modélisée de la pièce finale à lier

Pour l'interprétation mécanique, des charges ont été appliquées sur la surface du modèle selon différents types de sollicitations, notamment en flexion, en traction et en torsion, afin d'identifier les zones critiques de la structure. Les conditions aux limites ont été définies de manière à bloquer tout déplacement aux points d'appui. Un maillage adaptatif a été utilisé pour raffiner les zones à forte concentration de contraintes, améliorant la précision des résultats. Les simulations ont été menées jusqu'à convergence avec un critère de tolérance de 1 % sur les déformations.

3.7 Approches de modélisation du lien entre les poutrelles

Dans le cadre de cette modélisation numérique, deux approches distinctes ont été utilisées pour assembler les pièces à l'aide de contraintes de type solidaire.

Avec la première approche, seules les ailes ont été liées entre-elles. Quant-à-elle, l'âme des poutrelles n'était pas considérée dans l'assemblage. Cette configuration permet de simuler un scénario où seules les ailes sont solidarisées, sans aucun lien structurel avec l'âme.

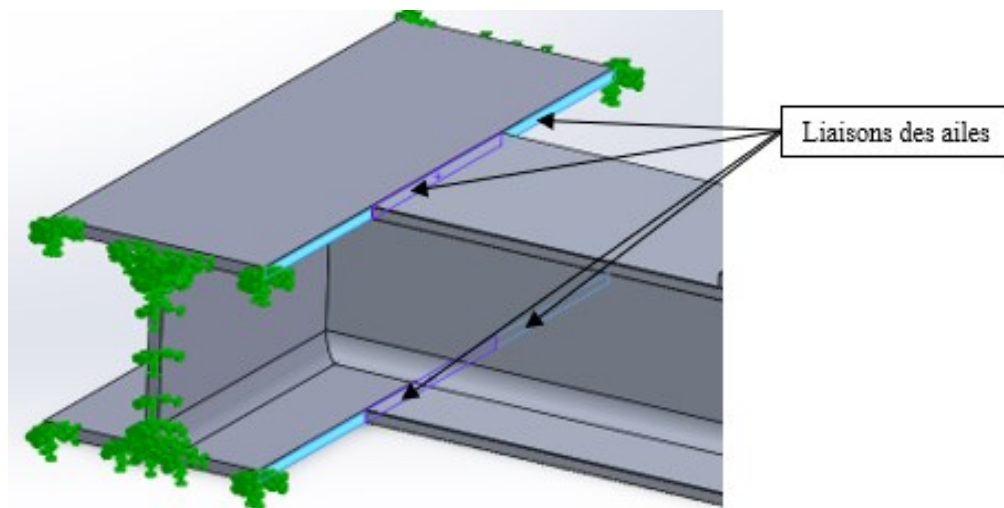


Figure 3-43: Modélisation de la liaison de type solidaire des ailes seulement

La deuxième approche de modélisation du lien entre les poutrelles consiste à lier les ailes et l'âme des poutrelles de façon solidarisée, simulant ainsi un assemblage complet où les deux parties principales du modèle (ailes et âme) sont liées entre elles.

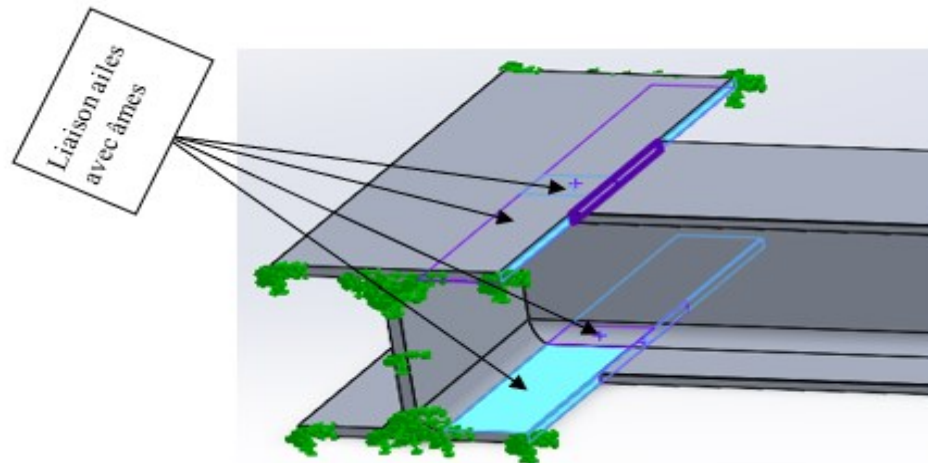


Figure 3-44: Modélisation de la liaison de type solidaire des ailes et de l'âme

Ces deux approches ont été mises en place afin d'évaluer l'importance de la soudure de l'âme et vérifier si celle-ci est réellement indispensable pour garantir la résistance de l'ensemble. Cela permet d'optimiser le processus de fabrication en évaluant si l'absence de soudure sur l'âme affecte significativement la performance globale de la structure. Pour cette étude, les chargements externes en flexion, traction et torsion ont été appliquées pour les deux approches décrites précédemment.

3.8 Chargements externes

Les charges externes ont été appliquées sur le modèle pour différentes sollicitations (flexion, traction et torsion) afin de trouver les contraintes pour chaque approche.

Les figures de 3-45 à 3-50 montrent où les charges externes ont été appliqués. Les forces appliquées pour chaque cas de chargement ont été ajustées afin de produire un niveau de contrainte maximal, sous la limite d'élasticité du matériau. Cela permet d'obtenir un niveau de contrainte facilement observable et de réaliser une analyse de contrainte élastique linéaire.

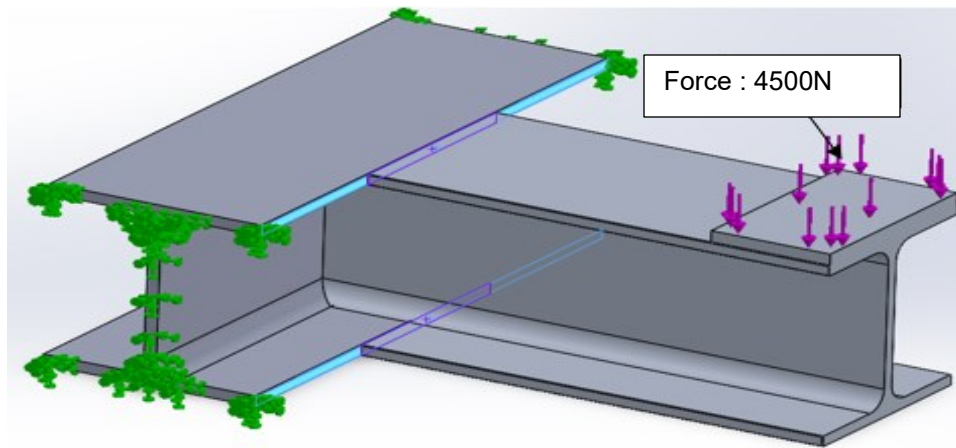


Figure 3-45: Modélisation de la liaison des ailes avec force verticale de 4500 N

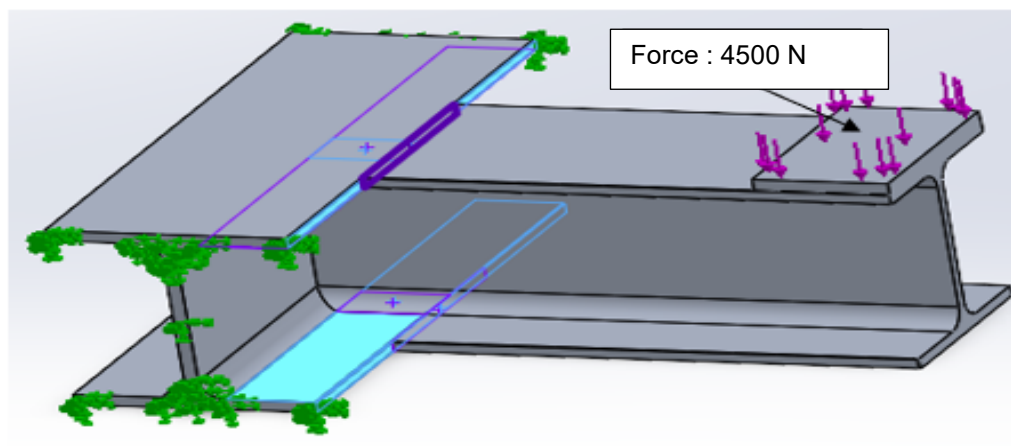


Figure 3-46: Modélisation de la liaison des ailes et âmes avec force verticale de 4500 N

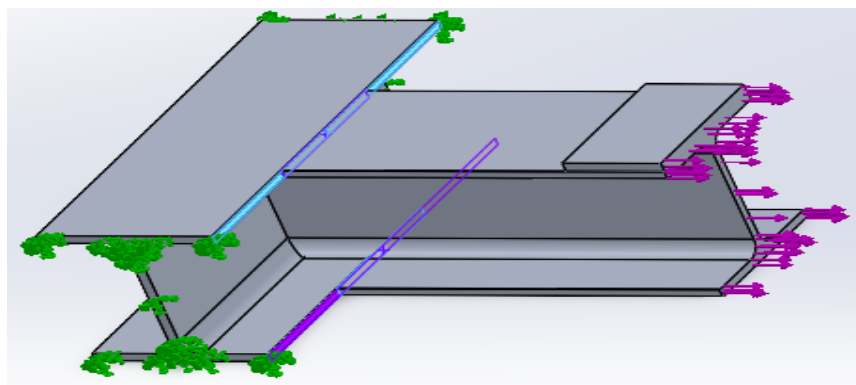


Figure 3-47: Modélisation de la liaison des âmes avec une force de traction 15000 N

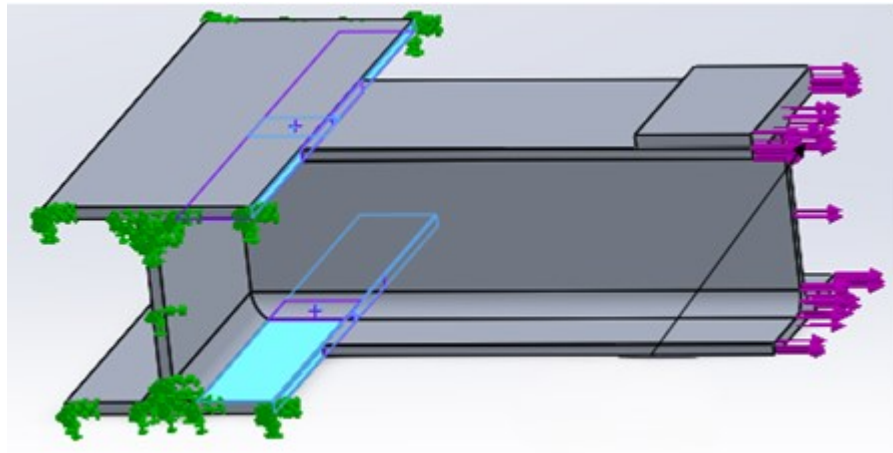


Figure 3-48: Modélisation de la liaison des ailes avec une force de traction 4500 N

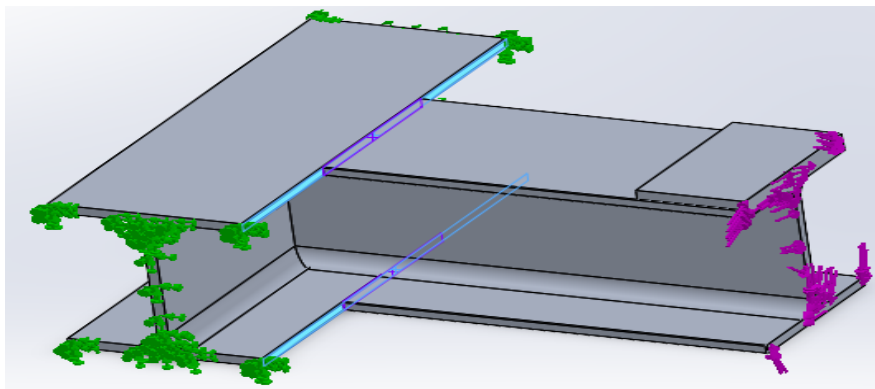


Figure 3-49: Modélisation de la liaison des ailes avec moment de torsion 250 N.m

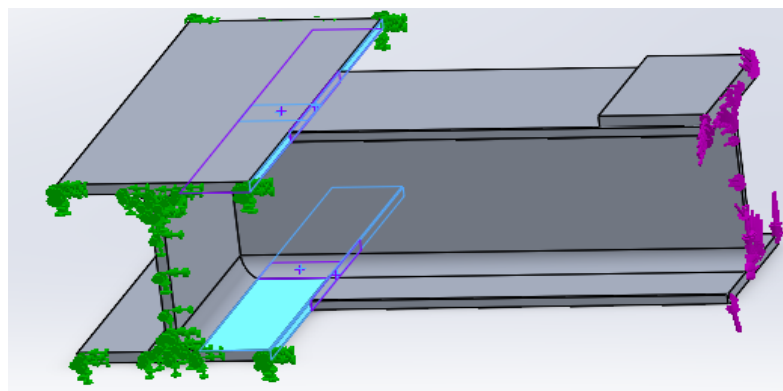


Figure 3-50: Modélisation de la liaison des ailes et âmes avec moment de torsion 250 N.m

3.9 Étude de convergence du maillage

Une étude de convergence du maillage a été menée afin de vérifier l'indépendance des résultats numériques face au maillage utilisé. Cette étude consiste à s'assurer que le maillage est suffisamment fin pour fournir des résultats fiables, sans pour autant augmenter inutilement le temps de calcul.

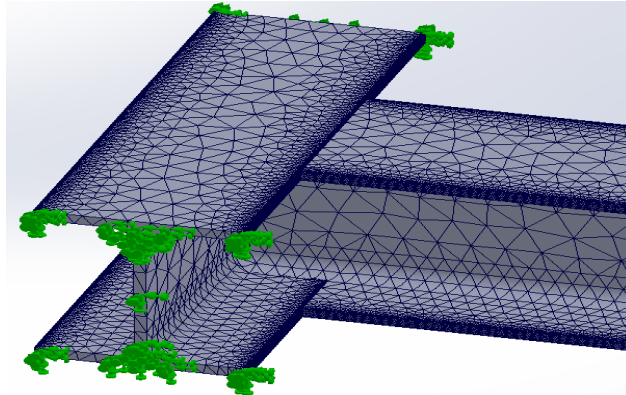


Figure 3-51: Maillage employé

Différentes tailles de maillage ont été utilisées et les valeurs de contraintes maximales ont été comparées pour évaluer la sensibilité des simulations au maillage. Le tableau 3-6 présente la convergence de maille de modèles. Dans ce tableau, TEmax est la taille d'éléments maximum, TEmin correspond à la taille d'éléments minimum et NE correspond au nombre d'éléments présents dans les différents modèles.

Tableau 3-6: Convergence de maille de modèles

	CONVERGENCE DE MAILLE		
	TEmax(mm)	TEmin(mm)	NE
Eléments Grossiers	33,5154	1,67577	137600
Eléments Moyens	23,4608	1,17304	217906
Eléments Fins	4,69216	0,234608	586541

Chapitre 4

4 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

4.1 Essais de soudage

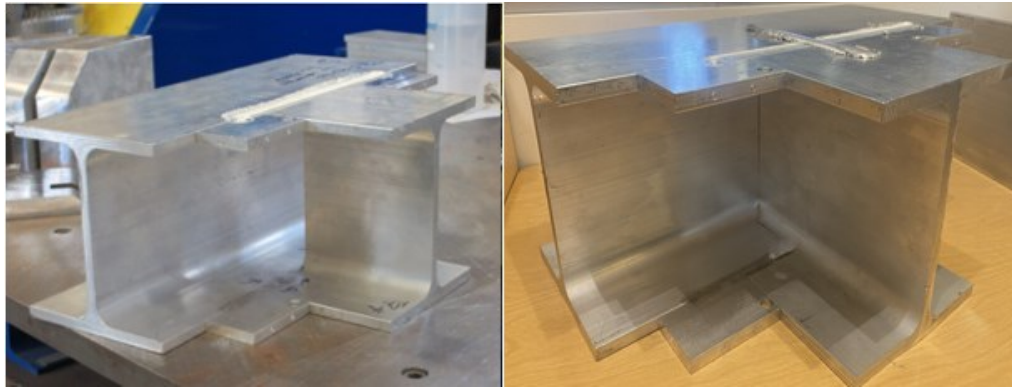
À l'issue de chaque opération de soudage réalisée avec les paramètres validés, une inspection visuelle minutieuse a été menée sur les deux faces des assemblages, à savoir les surfaces supérieure et inférieure. L'objectif était de vérifier la qualité du cordon obtenu, en observant des critères tels que la régularité des stries, la présence de défauts de surfaces (trou), etc.

Bien que les réglages aient été initialement définis à partir d'une série d'essais effectués sur de plaques plates, des différences de comportement ont été constatées avec les essais. Ces variations sont principalement liées à une diffusion de chaleur différente dans les poutrelles que dans les plaques, ce qui peut influencer localement la plasticité du matériau et par conséquent, l'aspect de la soudure. Pour pallier ces écarts potentiels, un ajustement spécifique a été apporté comme la hauteur d'enfoncement de l'outil (ou profondeur de pénétration).

Les paramètres retenus, soit une vitesse d'avance de 600 mm/min et une vitesse de rotation de 900 tr/min pour les assemblages bout à bout, ainsi qu'une vitesse d'avance de 250 mm/min et une vitesse de rotation de 1000 tr/min pour les assemblages en recouvrement, ont permis d'obtenir des soudures présentant une bonne qualité visuelle et conformes aux critères de validation établis pour la poursuite de l'étude, notamment les analyses métallographiques et les essais mécaniques.

Ces soudures se sont révélées exemptes de défauts visuels critiques. Aucun phénomène d'éjection latérale de matière, ni d'affaissement, ni de formation de bourrelets excessifs n'a été observé. Le profil de la soudure est resté pratiquement lisse et homogène.

Pour les soudures réalisées dans les ailes, il est recommandé de ne pas utiliser d'arc d'entrée et de limiter l'arc de sortie à un maximum de 6 mm afin d'éliminer les cavités externes générées par l'entrée et la sortie de l'outil dans les blocs sacrificiels. Cette configuration permet de localiser le trou d'extraction de l'outil à l'intérieur d'une des pièces sacrificielles. La figure 4-1 présente une photographie des assemblages soudés complets.



a) assemblage sans âme soudée

b) assemblage avec âme soudée

Figure 4-1: Échantillons soudés

4.2 Essais de traction

Des essais de traction ont été réalisés sur des éprouvettes extraites au centre et aux deux extrémités de chaque extrusion, perpendiculairement aux cordons de soudure, dans le but de caractériser les propriétés mécaniques des assemblages obtenus par soudage par FSW. Les éprouvettes ont été découpées conformément aux normes ASTM E8/E8M-22 en vigueur, puis testées jusqu'à rupture.

L'observation visuelle de l'éprouvette après essai de traction montre que la rupture s'est produite à proximité de la soudure, mais légèrement en dehors de la zone malaxée. Cette position indique que la rupture s'est initiée dans la zone affectée thermiquement (ZAT) et plus précisément du côté recul. En effet, cette zone correspond à la partie du matériau qui a été exposée à une élévation de température importante pendant le soudage, sans toutefois subir de déformation plastique due à l'action de l'outil. Cette exposition entraîne une modification microstructurale du métal, notamment une croissance des grains et une dissolution partielle des précipités durcissant, ce qui réduit la résistance mécanique locale. Par conséquent, lors de l'essai de traction, la rupture se produit préférentiellement dans cette région affaiblie plutôt que dans la zone soudée ou dans le métal de base.



Figure 4-2: Éprouvette pour essai de traction



Figure 4-3: Éprouvette après rupture

Les courbes de contrainte en fonction de la déformation obtenues sont présentées à la figure 4-4.

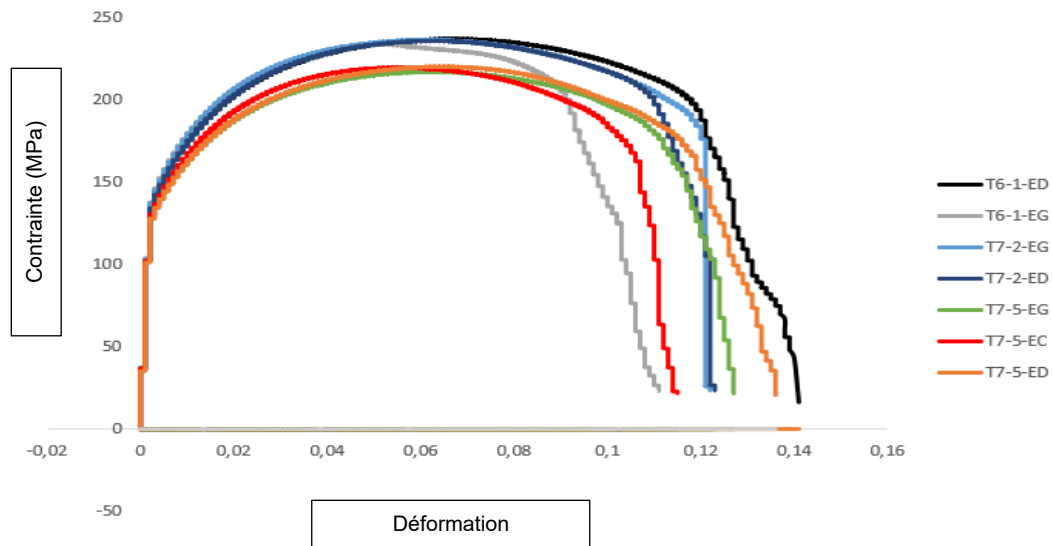


Figure 4-4: Les courbes de contraintes et déformations avec et sans âme

La figure 4-4 présente les courbes contrainte-déformation obtenues à partir des essais mécaniques réalisés sur des profils extrudés en I en alliage d'aluminium assemblés par soudage par friction malaxage (FSW). Ces essais ont été effectués afin d'évaluer l'influence de la configuration de soudage sur le comportement mécanique des assemblages. Les éprouvettes analysées se divisent en deux catégories : les assemblages comportant un soudage simultané des ailes et de l'âme du profilé, identifiés notamment par les séries T6-1-ED, T6-1-EG, T7-2-ED et T7-2-EG, et les assemblages pour lesquels seules les ailes ont été soudées, représentés par les éprouvettes T7-5-EG, T7-5-EC et T7-5-ED. La comparaison des courbes permet ainsi d'analyser l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation, ainsi que d'évaluer l'effet de la géométrie du joint soudé sur la rigidité, la résistance mécanique et le comportement à la rupture des différentes configurations étudiées.

Les éprouvettes T6-1-ED, T7-2-EG et T7-2-ED présentent les niveaux de contraintes maximales les plus élevés, atteignant approximativement des valeurs comprises entre 230 et 240 MPa. Ces éprouvettes montrent également une meilleure capacité de déformation avant rupture, indiquant un comportement plus ductile et une meilleure capacité d'absorption de l'énergie mécanique. La diminution de la contrainte après le pic maximal y demeure progressive, traduisant une rupture moins brutale.

À l'inverse, les éprouvettes T7-5-EC et T6-1-EG présentent une rupture plus précoce, avec une chute rapide de la contrainte après l'atteinte de la contrainte maximale. Ce comportement suggère une ductilité plus faible ainsi qu'une sensibilité accrue à l'amorçage de fissures ou à la concentration des contraintes dans les zones soudées.

Les éprouvettes de la série T7-5, correspondant aux assemblages comportant uniquement des soudures au niveau des ailes, affichent globalement des contraintes maximales légèrement inférieures à celles des assemblages soudés au niveau des ailes et de l'âme. Cette tendance indique que la participation de l'âme soudée contribue à une meilleure répartition des efforts dans le profilé, améliorant ainsi la résistance globale et la stabilité mécanique de l'assemblage.

Dans l'ensemble, les résultats montrent que la configuration de soudage influence significativement le comportement mécanique des profilés extrudés en I assemblés par FSW, notamment en termes de résistance maximale, de ductilité et de mode de rupture.

Le tableau 4-1 met en évidence les types de soudure et les dimensions des arcs d'entrée et de sortie correspondant aux différentes éprouvettes:

Tableau 4-1: Paramètres de soudure où les échantillons des essais de traction ont été prélevés

Test	Soudure	Vitesse Avance (mm/min)	Vitesse Rotation (RPM)	Arc d'entrée (mm)	Arc de sortie (mm)
TT3, TT4	Sans âmes soudé	600	900	25	25
T6-1-ED T6-1-EG	Avec âmes soudé	600	900	0	12
T7-5-EG T7-5-EC T7-5-EG	Sans âmes	600	900	0	6
T7-2-ED T7-2-EG	Avec âmes soudé	600	900	0	6

Le tableau 4-2 présente les propriétés déterminées à partir des essais de traction des échantillons des extrusions soudées avec et sans âmes.

Tableau 4-2: Récapitulatif des résultats des essais de traction

Tests	Resistance à la traction ultime (MPa)	Moyenne résistance à la traction ultime (MPa)	Contrainte Ultime Matériel de Base (MPa)	Coef de soudure Ks	Vitesse de déformation (mm/min)	Côté de rupture	Limite d'élasticité (MPa)	Moyenne limite d'élasticité (MPa)
TT3	233,84	233,05	319,4	0,73	1,5	Avance	120	124,86
TT4	232,27			Recul		129,72		
T6-1-EG	233,61	235,34		0,74		Recul	147,24	145,49
T6-1-ED	237,07					Recul	143,74	
T7-2-EG	236,49	236,24		0,74		Recul	148,68	147,25
T7-2-ED	235,99					Recul	145,83	
T7-5-EG	217,17	219,06		0,68		Recul	133	134,33
T7-5-EC	219,69						133	
T7-5-ED	220,32						137	

La valeur de la contrainte ultime du matériel de base, a été tirée des essais traction effectués à l'Université Laval par Pablo Rico Gomez [47]. En fonction de cette contrainte ultime, le coefficient de soudure K_s a été déterminé selon la formule de l'équation (3) suivante :

$$K_s = \frac{\sigma_{ult.s}}{\sigma_{ult.mb}} \quad (3)$$

Dans cette équation, k_s est le coefficient de soudure, $\sigma_{ult.s}$ est la résistance à la traction ultime de la soudure et $\sigma_{ult.mb}$ est la résistance à la traction ultime du matériau de base.

L'analyse des résultats expérimentaux révèle que les valeurs de la résistance à la traction ultime des échantillons soudés restent globalement proches de celles du matériau de base, bien qu'inférieure. Les moyennes obtenues varient entre 219 MPa et 236MPa, alors que la contrainte ultime du matériau de base est de 319,4 MPa. Cette diminution est attendue, car le procédé de soudage par friction malaxage (FSW) modifie localement la microstructure, en particulier à l'intérieur de la zone affectée thermiquement et la zone soudée. Toutefois, certains assemblages présentent des coefficients de soudure (k_s) supérieurs à 0,7, traduisant une efficacité mécanique satisfaisante du procédé.

En ce qui concerne la limite élastique, les valeurs observées sont comprises entre 120 MPa et 148 MPa, avec des variations notables d'un essai à l'autre. Cette dispersion s'explique notamment par les différences de configuration (coté avance ou recul), ainsi que par les paramètres de soudage employés, tels que la vitesse de déformation. Il est noté que les éprouvettes associées à un meilleur coefficient de soudure présentent également les limites élastiques les plus élevées, ce qui indique une bonne préservation du comportement élastique du matériau dans la zone soudée.

Ainsi cela met en évidence l'importance du choix des paramètres de soudage sur les propriétés mécaniques finales de l'assemblage. Un bon compromis entre résistance ultime et rigidité initiale peut être atteint en optimisant les conditions de soudage, en particulier la vitesse de rotation et d'avance de l'outil.

La figure 4-5 présente un comparatif des performances mécaniques des joints. Il peut être constaté la forte corrélation entre la qualité du joint (k_s) et les performances mécaniques mesurées.

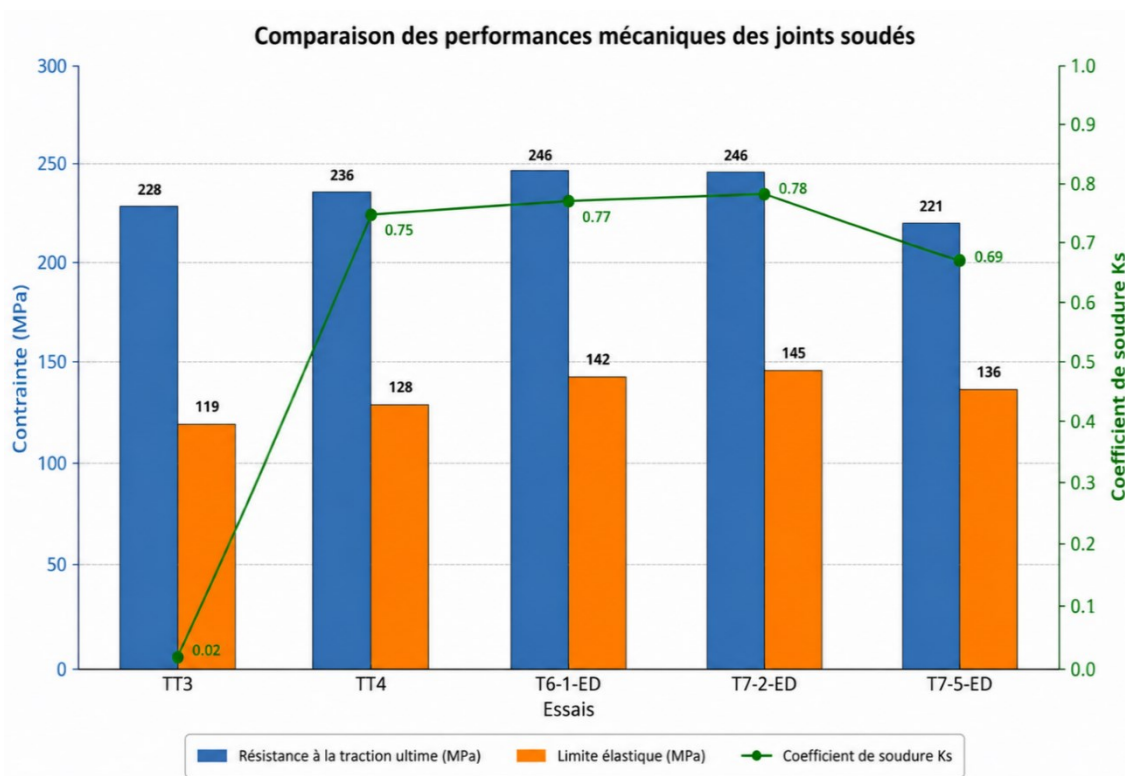


Figure 4-5: Comparaison des performances mécaniques des joints soudés

4.3 Observations macrographiques

Des coupes transversales ont été réalisées au niveau des cordons de soudure afin d'en observer la structure macroscopique. Ces macrographies ont permis d'évaluer :

- La qualité de la liaison entre les matériaux ;
- La forme de la zone malaxée ;
- L'étendue de la zone affectée thermiquement ;
- La présence éventuelle de défauts internes (tunnel, porosité, inclusion...).

Les observations présentées aux figures 4-6, 4-7 montrent une zone malaxée bien centrée et symétrique, avec une transition progressive vers le métal de base. En effet, aucune discontinuité interne ni aucun défaut majeur n'ont été observés dans les coupes analysées. La liaison entre les pièces apparaît continue et homogène, sans présence visible de porosité ni de vide interne, ce qui témoigne d'une bonne consolidation et d'une compacité satisfaisante du joint soudé.

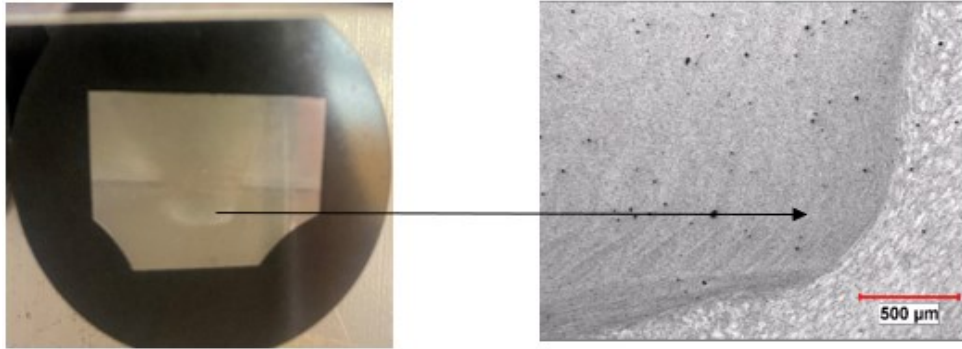


Figure 4-6: Échantillon macro en recouvrement au centre enrobé et un visuel agrandi de la zone utilisée pour l'analyse microstructurale.

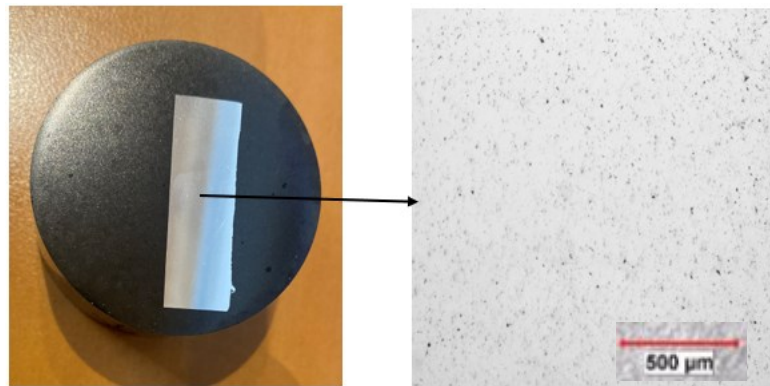


Figure 4-7: Échantillon macro du soudage bout à bout enrobé et un visuel agrandi de la zone utilisée pour l'analyse microstructurale.

4.4 Test de microdureté Vickers

Pour ce projet, trois tests de microdureté Vickers ont été réalisés sur des échantillons prélevés au centre de l'assemblage de poutrelles soudée avec âme, du côté avance de la soudure de l'âme et du côté recule de la soudure de l'âme. Sur ces échantillons, 23 points ont été testés à 1 mm de distance. Les valeurs de dureté obtenues sont présentées à la figure 4-8 pour les échantillons HV1, HV2 et HV3 prélevés respectivement au centre, du côté avance et du côté recule du joint soudé des poutrelles avec âme soudée. Il peut être constaté que les duretés mesurées varient entre 48,3HV et 80HV. Les valeurs les plus basses sont généralement mesurées pour l'échantillon HV1 prélevé au centre de la poutrelle avec âme soudée. Cette plus basse dureté s'explique par la présence des deux soudures réalisées dans cette zone (les soudures d'ailes et d'âme).

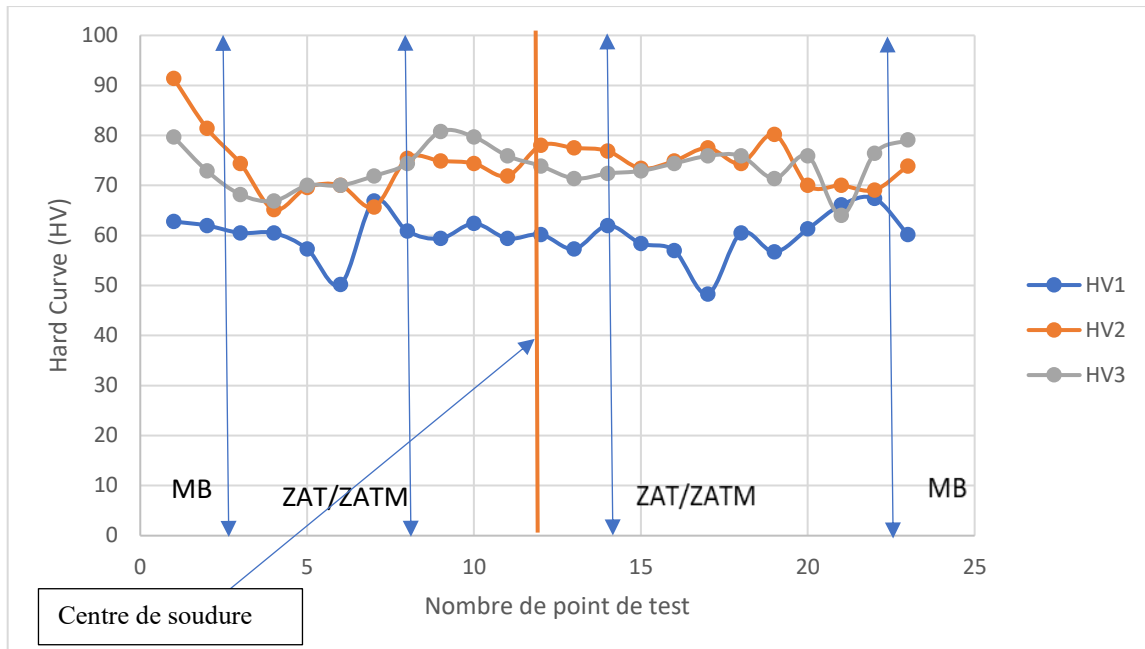


Figure 4-8: Microdureté de Vickers

Le profil de microdureté montre des variations significatives entre les différentes zones métallurgiques : Le matériau de base (MB), la zone affectée thermiquement/thermo mécaniquement (ZAT/ZATM) et la zone malaxée. Ces variations reflètent les modifications microstructurales induites par le procédé FSW.

Dans la zone malaxée (points de test 1 à 4 et 22 à 24), la dureté est relativement stable et élevée, notamment pour HV2 et HV3 (≈ 80 HV). Cela indique que cette région n'a pas été altérée de façon significative par le procédé de soudage.

Dans la zone affectée thermiquement (ZAT) points de test 4 à 9 et 14 à 22, une diminution de la dureté est observée, particulièrement sur les courbes HV2 et HV3. Cette baisse s'explique par l'effet thermique du procédé, qui peut provoquer une recristallisation statique ou dynamique et un grossissement local des grains, selon la zone considérée.

Les valeurs de dureté les plus faibles sont enregistrées dans la zone affectée thermiquement (ZAT). Cette zone, modifiée par des températures élevées lors de traitements thermiques ou de soudage, est plus susceptible de subir des ruptures. En effet, la ZAT présente une microstructure altérée, impliquant la résistance du matériau. Si aucun défaut interne n'est détecté, cette région devient particulièrement vulnérable.

4.5 Essai de flexion sur poutrelles assemblées

Afin d'évaluer le comportement mécanique des assemblage réalisés, des essais de flexion ont été effectués sur des pièces à grande échelle. Ce type d'essai permet d'analyser la rigidité et la capacité de déformation des échantillons sollicités, ainsi que de mettre en évidence d'éventuelles zones de faiblesse liées au procédé de soudage. Ils constituent ainsi une référence pour l'interprétation et la discussion des performances globales de l'assemblage.

4.5.1 Première configuration d'assemblage

La courbe force-déplacement de la figure 4-14 obtenue lors de l'essai de flexion réalisé sur l'assemblage FSW à angle droit en alliage 6005A-T6 et présenté à la figure 4-9 met en évidence un comportement mécanique typique d'une structure soudée soumise à une sollicitation croissante. La première portion de la courbe, linéaire jusqu'à environ 10 mm de déplacement, traduit un comportement élastique et confirme une bonne rigidité initiale de l'assemblage, malgré la présence du joint FSW. La perte progressive de linéarité observée au-delà de cette valeur correspond à l'initiation de la plastification, probablement localisée au sein de la zone affectée thermiquement (ZAT), région connue pour présenter un adoucissement microstructural dans les alliages de la série 6000. Entre 18 et 26 mm de déplacement, la charge se stabilise autour d'un maximum d'environ 110 kN, ce qui montre que l'assemblage est capable d'absorber une quantité significative d'énergie avant la défaillance finale. Cette zone de plateau témoigne d'une certaine ductilité, malgré la configuration géométrique en angle droit qui concentre les contraintes en bordure du cordon. Enfin, la chute brutale de la force à un déplacement de près de 29 mm indique une rupture franche, vraisemblablement initiée dans la zone la plus sollicitée en traction, pouvant correspondre soit à la ZAT, soit à l'interface de malaxage. Ce comportement global démontre que, bien que la soudure par friction malaxage réduise localement la résistance mécanique par rapport au matériau de base, l'assemblage conserve une bonne capacité portante et une absorption d'énergie notable avant rupture.

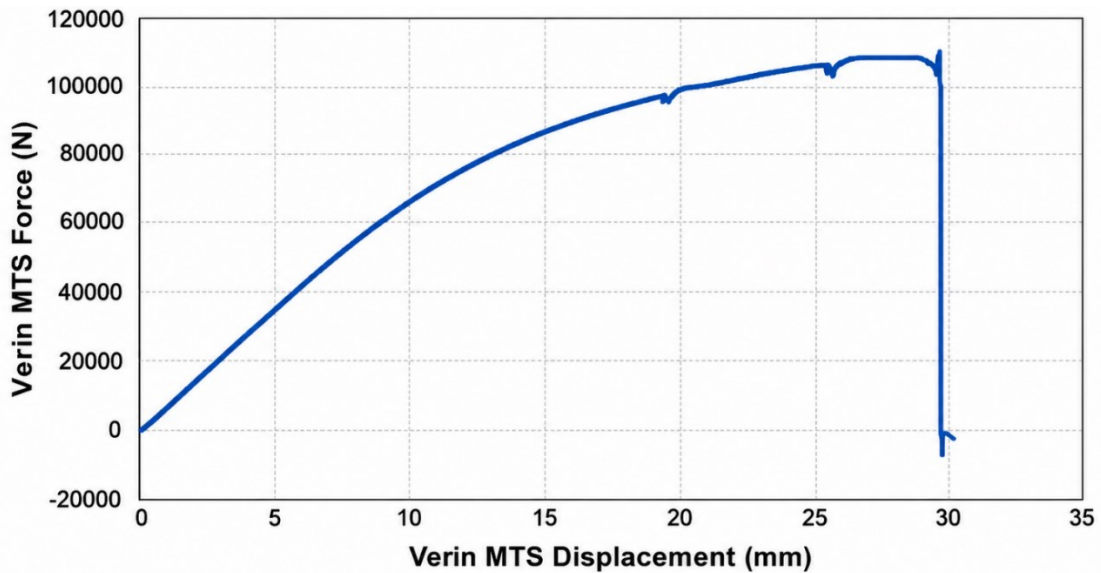


Figure 4-9: Courbe de force déplacement

La figure 4-10 présente le moment (M) repris par le joint soudé en fonction de la rotation spécifique du joint. Cette rotation a été déterminée en prenant le ratio entre la différence de déplacement longitudinal des ailes mesurée par le système présenté en figure 3-36 et la distance verticale entre les deux points de mesure. Le détail de calcul pour déterminer le moment et la rotation est donné en annexe. À la figure 4-10 la pente initiale plutôt linéaire traduit une grande raideur en rotation du joint, ce qui indique que la soudure assure une continuité mécanique et s'oppose efficacement à la rotation relative des profilés. L'écartement progressif par rapport à la linéarité signale l'apparition d'un mécanisme plastique local (formation d'une charnière plastique partielle) dans la zone affectée thermiquement (ZAT), où l'adoucissement microstructural réduit la résistance locale. Les légères baisses ponctuelles dans ce plateau correspondent à des micro-endommagements ou à l'amorçage de fissures le long de la transition nugget/ZAT. La décroissance finale et la perte rapide de moment confirment l'effondrement progressif puis la rupture franche du joint, en accord avec l'observation macroscopique de la fissure suivant le bord du cordon.

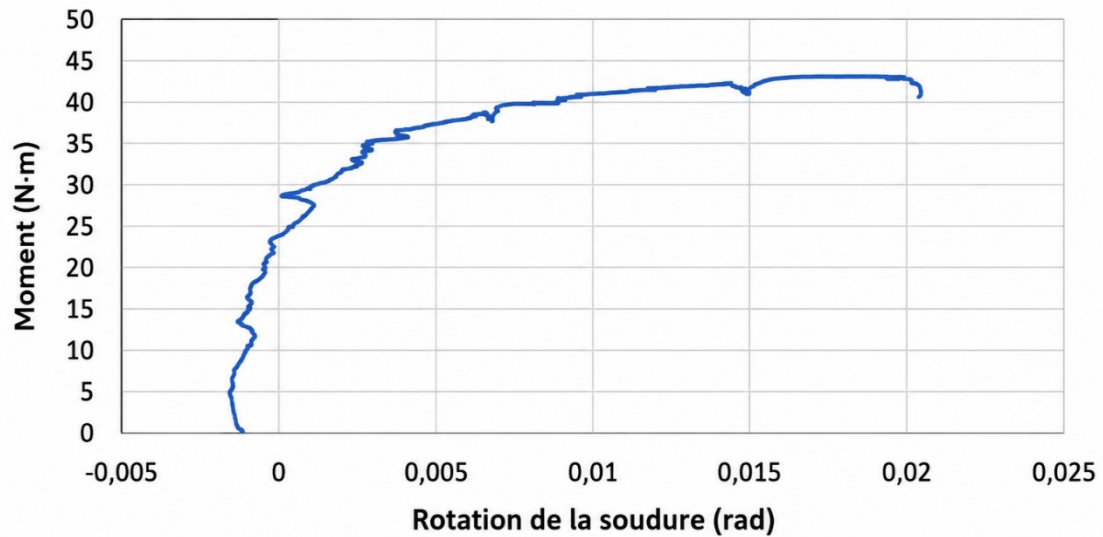


Figure 4-10: Moment dans le soudé en fonction de la rotation du joint

La figure 4-11 présente la fissuration de la pièce après la rupture du joint dans la soudure tendue. Comme il peut être observé, la pièce après essai de flexion montre que la rupture s'est produite de manière préférentielle au niveau de la zone adjacente à la soudure, suivant une propagation quasi linéaire le long du bord du joint. La fissure s'est développée à l'interface entre la zone malaxée (ZM) et la zone affectée thermiquement (ZAT), confirmant que cette région constitue la zone la plus vulnérable de l'assemblage. Ce mode de défaillance est typique des alliages de la série 6000 soudés par friction malaxage, où l'adoucissement thermique de la ZAT entraîne une diminution significative de la résistance en tension. La morphologie de la rupture indique une phase initiale de glissement en cisaillement, cohérente avec le niveau observé sur la courbe "effort tranchant vs déplacement", suivie d'une rupture finale brutale provoquant une perte instantanée de la capacité portante du joint. L'absence de fissuration dans le métal de base confirme que la défaillance est bien localisée dans la zone affectée thermiquement.



Figure 4-11: La pièce après essai de flexion

La courbe contrainte–rotation en découlant et présentée à la 4-12 permet de mieux comprendre les contraintes subies par le joint soudé jusqu’à la rupture, et de comparer avec les propriétés mesurées sur les éprouvettes testées en traction. Le détail du calcul des contraintes dans les pièces testées est donné en annexe.

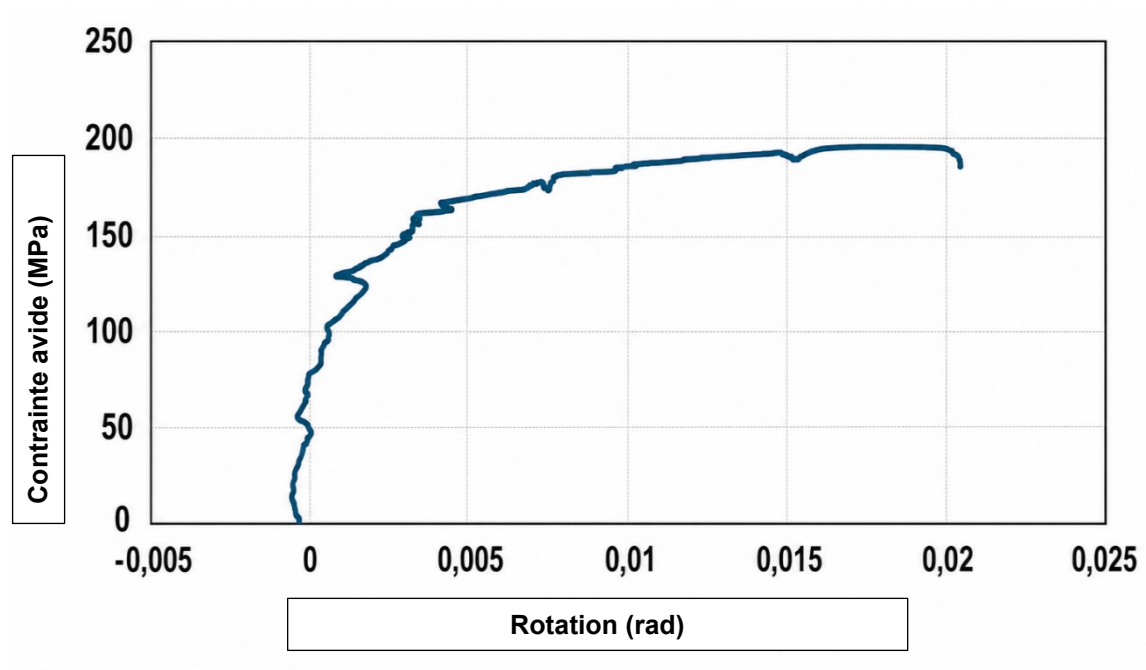


Figure 4-12: Contrainte axiale en fonction de la rotation du joint

L'évolution de la contrainte dans la soudure en fonction de la rotation du joint présentée à la figure 4-12 met en évidence la réponse mécanique progressive de l'assemblage FSW sous flexion. La courbe obtenue d'abord une zone initiale linéaire, correspondant à la prise de charge progressive de la

liaison et à la mobilisation des microdéformations dans la soudure et la zone affectée thermiquement (ZAT).

Au-delà de cette phase, la contrainte augmente de manière quasi linéaire avec la rotation, sans diminution de pente ni chute brutale de la contrainte, ce qui indique que la soudure ne présente pas de perte de rigidité ni d'amorce de défaillance dans ce domaine de chargement. La contrainte atteint ensuite un plateau d'environ 190 MPa, traduisant l'approche de la limite mécanique de la zone soudée.

Cette stabilisation, observée avant la rupture réelle, suggère que la soudure entre dans une zone de plasticité localisée, où les déformations augmentent sans accroissement significatif de la contrainte. Ce comportement est cohérent avec la morphologie de la rupture observée sur l'éprouvette (figure 4-11), révélant une concentration des contraintes dans la région d'interface entre poutrelle et bloc sacrificiel, zone généralement plus sensible du fait du gradient thermique et microstructural.

Ainsi, la relation contrainte axiale–rotation confirme le rôle déterminant de la rigidité locale de la soudure et permet de caractériser finement son seuil de performance sous flexion.

4.5.2 Essai de flexion deuxième configuration

La Figure 4-14 présente l'évolution de la force appliquée en fonction de son déplacement pour l'essai de flexion réalisé sur la deuxième configuration d'assemblage. Cette configuration se distingue par un comportement mécanique nettement stable et une capacité de charge élevée.

La courbe montre d'abord une phase initiale quasi linéaire (0 à 5 mm), correspondant à la mise en charge progressive de la poutre et à l'alignement complet du montage. Il peut ensuite être constaté une augmentation régulière de la force jusqu'à atteindre une valeur maximale d'environ 215 kN autour de 20 mm de déplacement.

À partir de 20–21 mm, la force appliquée commence à se stabiliser, suggérant l'entrée dans un régime pseudo-plastique, où l'assemblage continue de se déformer tout en maintenant une capacité portante élevée. Aucun effondrement brutal de la charge n'est noté ici, ce qui indique une meilleure redistribution des contraintes et une résilience accrue de la soudure FSW dans cette configuration.

Lorsque le déplacement dépasse 25 mm, une diminution progressive de la force apparaît. Cette baisse ne correspond pas à une rupture franche : il s'agit plutôt d'un relâchement mécanique dû à la déformation globale de la poutre et à l'écrasement progressif de la zone sollicitée. Il n'y a eu aucune rupture ni fissuration visible dans le joint soudé ou ailleurs le long de la poutre au cours de l'essai. Cela confirme que la deuxième configuration possède une capacité de flexion supérieure et présente un comportement stable jusqu'à la fin de l'essai, sans défaillance de la soudure.

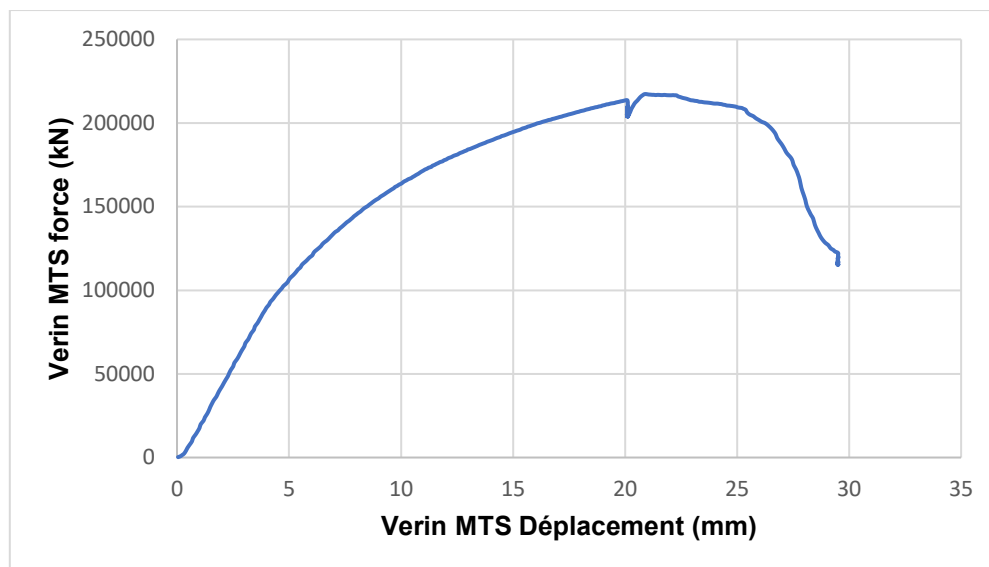


Figure 4-13: Courbe Force–Déplacement du vérin MTS obtenue lors de l’essai de flexion de la configuration 2.

En résumé, les résultats des essais indiquent que la configuration 2 (Figure 3-40) présente une intégrité structurale remarquable, capable de supporter jusqu’à 215 kN sans rupture, ce que reflète directement la forme continue et stable de la courbe force-déplacement.

Néanmoins, cet essai de flexion ne permet pas une évaluation directe de la performance mécanique de la soudure par friction malaxage, dans la mesure où la zone soudée n’était pas située dans la région de sollicitation maximale. La déformation et les contraintes les plus importantes se concentraient principalement au milieu de la poutre, au niveau de l’application de la charge. Par conséquent, les résultats obtenus reflètent davantage le comportement mécanique global de la structure que la résistance ou la qualité intrinsèque de l’assemblage FSW, ce qui constitue une limite majeure de cet essai pour la caractérisation spécifique de la soudure.

4.5.3 Rigidité élastique de l’assemblage

À partir des mesures prises en laboratoire, la rigidité élastique en rotation de l’assemblage soudé par friction malaxage a été déterminée. Cette rigidité est obtenue à partir de la pente de la courbe moment–rotation ($M-\theta$) dans le domaine élastique, présente à la figure 4-14. Le détail du calcul de cette pente est donné en annexe.

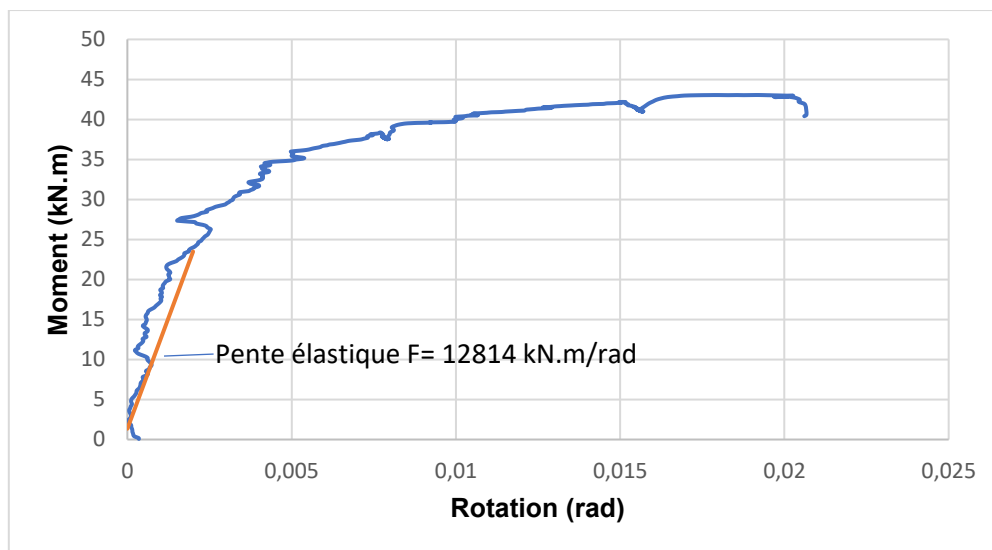


Figure 4-14: Relation moment rotation et pente élastique déterminée pour la configuration de soudure du joint 1

Comme présenté, la pente obtenue est de 12 814 kN/rad. Cette valeur caractérise la rigidité de l'assemblage à s'opposer à la rotation dans le domaine élastique et constitue un paramètre fondamental pour la classification et la modélisation de l'assemblé dans les analyses structurales.

4.6 Étude de convergence du maillage

L'étude de convergence vise à vérifier la précision des résultats obtenus lors des simulations numériques en fonction du raffinement du maillage. Plus précisément, cette analyse permet de déterminer si les résultats convergent vers une solution stable à mesure que la taille des éléments de maillage diminue. Dans cette étude, plusieurs simulations ont été réalisées en affinant progressivement le maillage pour observer l'évolution des variables clés telles que les contraintes de Von Mises, les déformations et les déplacements.

Les critères de convergence adoptés consistent à observer la variation des résultats d'une itération à l'autre, et une tolérance de convergence de 1 % a été retenue pour juger de la stabilité des résultats. Une convergence satisfaisante est atteinte lorsque les variations des résultats deviennent négligeables malgré un raffinement supplémentaire du maillage. Les figures ci-dessous illustrent les zones de contraintes dans chaque cas de modèle.

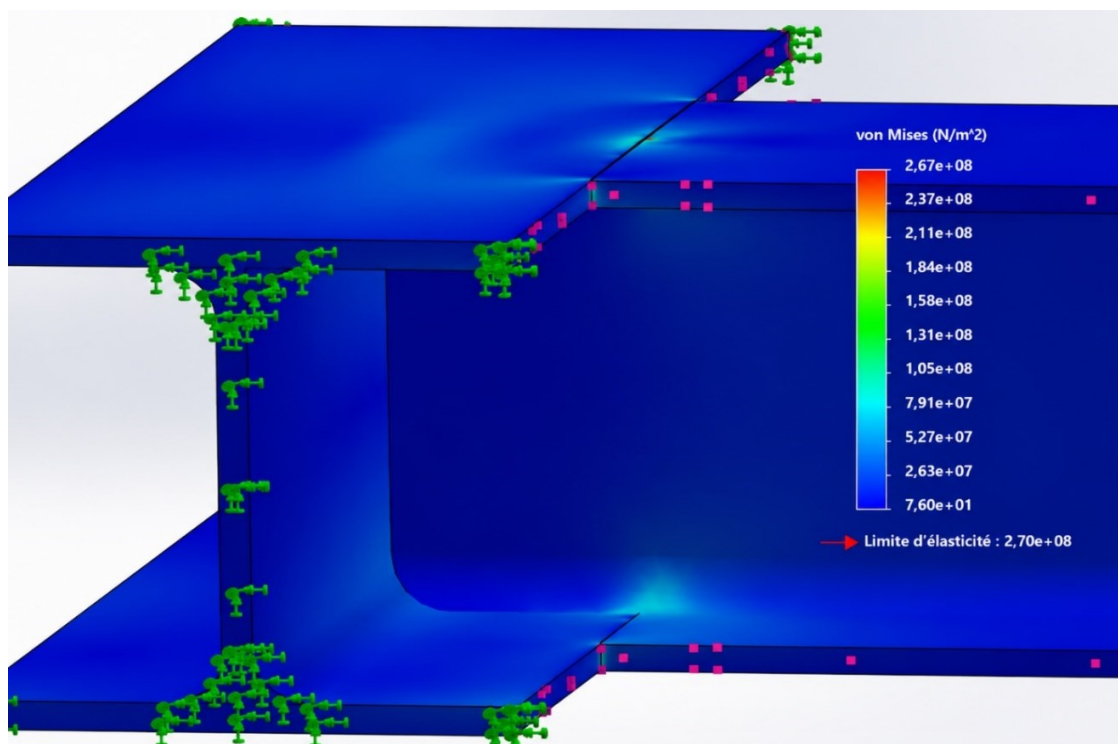


Figure 4-15: Contrainte de flexion sans âme avec une force de 4500N

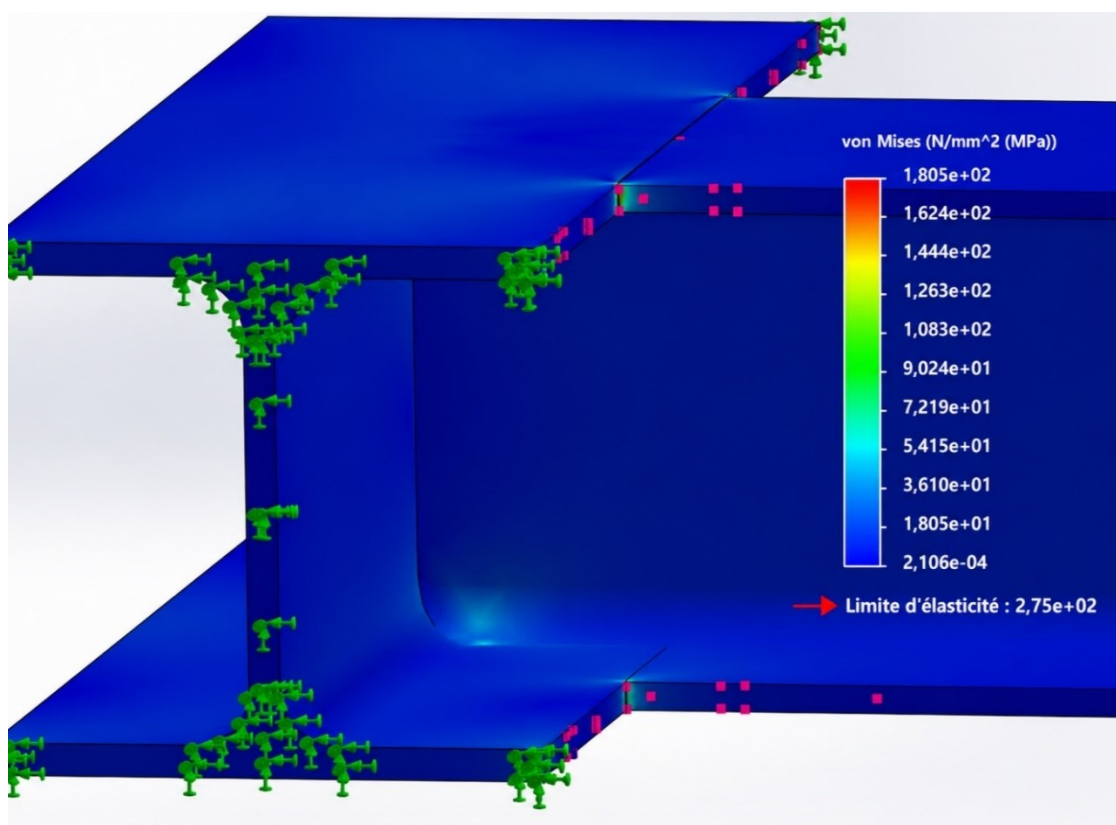


Figure 4-16: Contrainte de flexion avec âme avec une force de 4500N

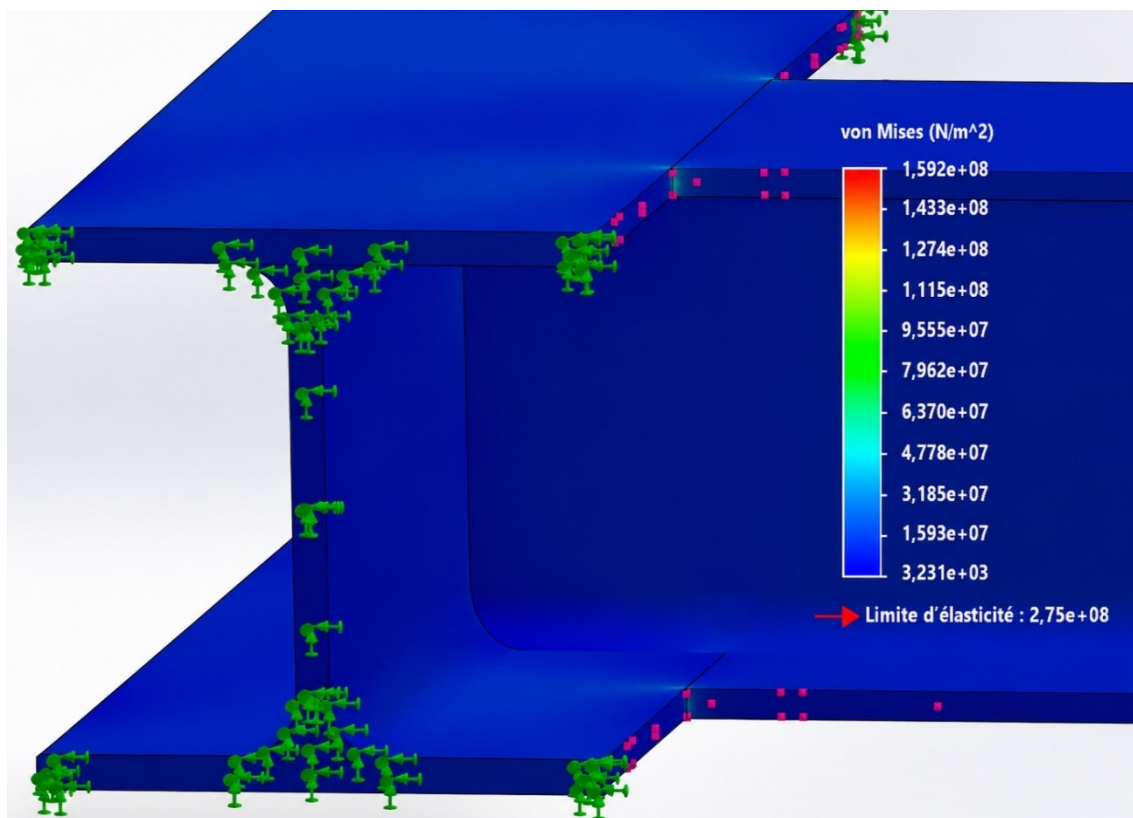


Figure 4-17: Contrainte de traction sans âme avec une force de 15000 N

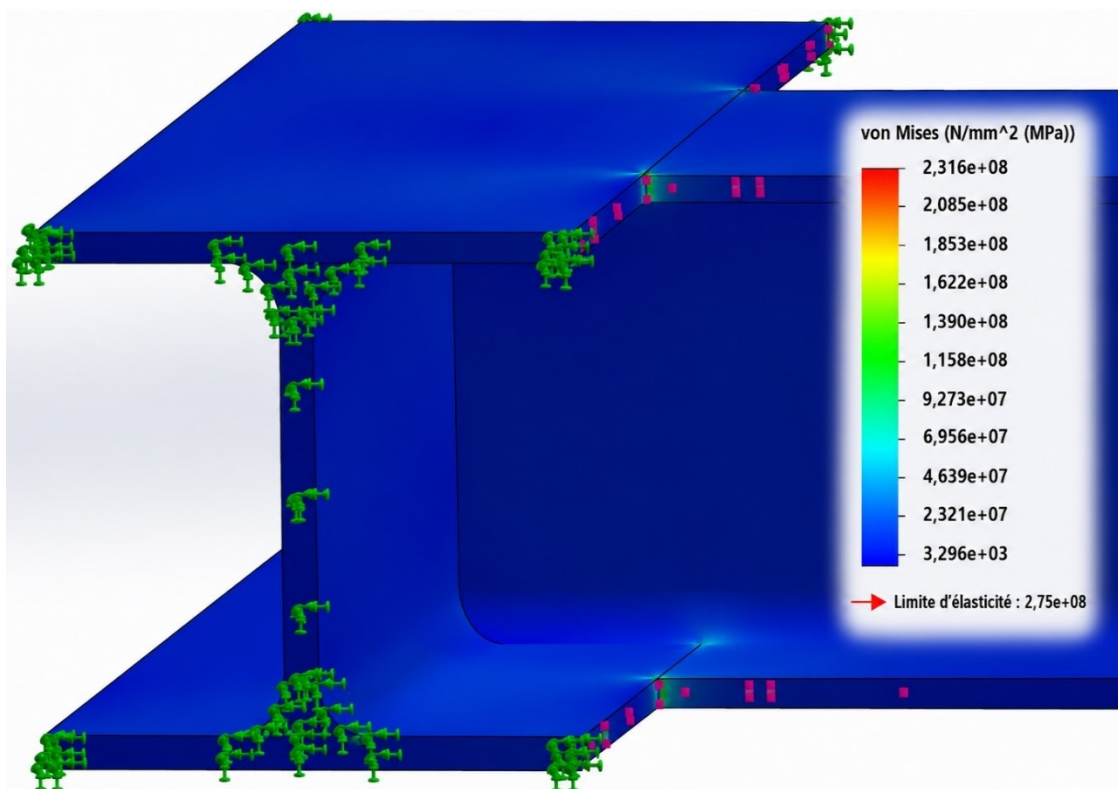


Figure 4-18: Contrainte de traction avec âme avec une force de 15000N

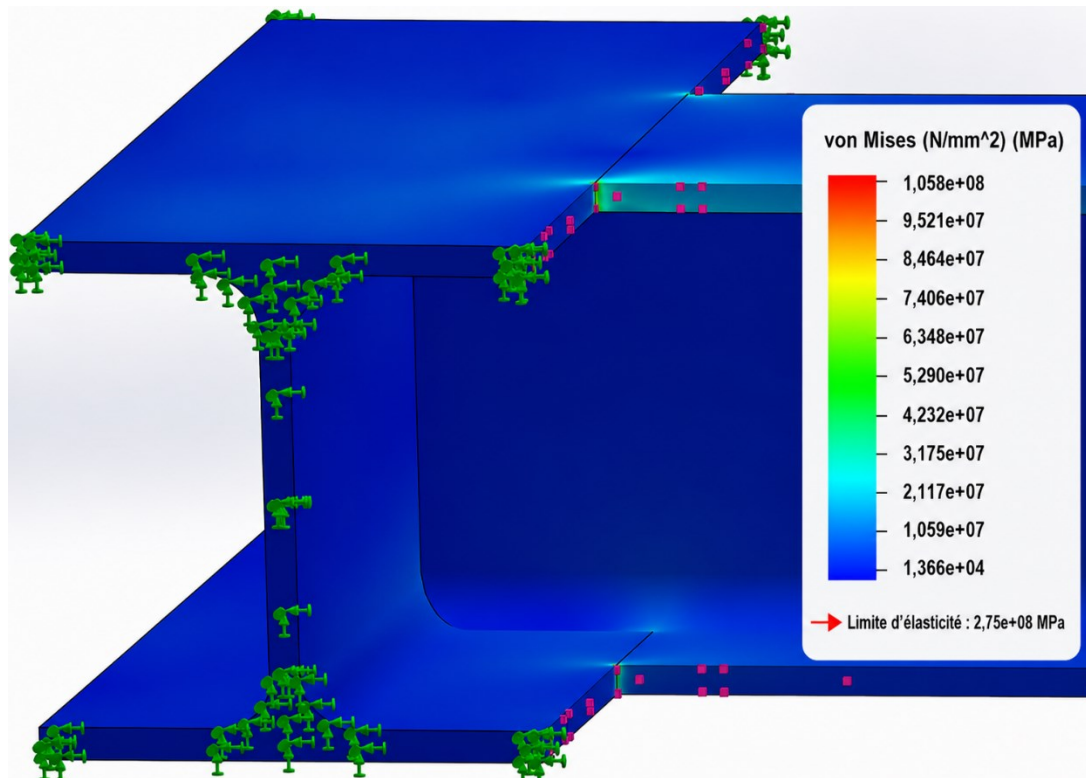


Figure 4-19: Contrainte de torsion sans âme avec une force de torsion 250N.m

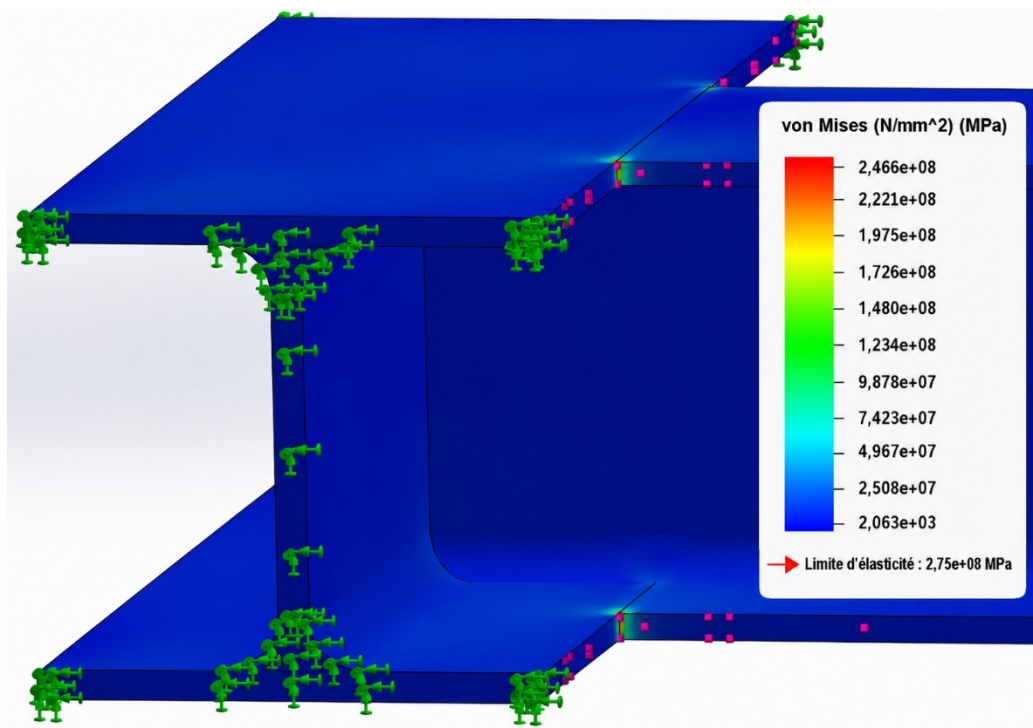


Figure 4-20: Contrainte de torsion du modèle avec âme soudée avec une force de 250N.m

Résultats de convergence de l'analyse de maillage

L'étude de convergence du maillage réalisée sur les assemblages soudés par friction malaxage (FSW) en aluminium 6005A-T6 a permis d'évaluer simultanément l'influence du raffinement du maillage ainsi que l'effet de la configuration de soudage de l'âme sur le comportement mécanique des profilés extrudés soumis à différentes sollicitations mécaniques, notamment en flexion, en traction et en torsion.

Les simulations numériques effectuées sous SolidWorks Simulation ont été réalisées en conservant les mêmes propriétés matériaux, les mêmes conditions aux limites, tandis que le raffinement du maillage a été progressivement augmenté dans les régions critiques de l'assemblage. Une attention particulière a été portée aux zones des extrémités des cordons de soudure, des raccords entre l'âme et les ailes, des discontinuités géométriques présentant de forts gradients de contraintes.

Le raffinement progressif du maillage a permis d'améliorer significativement la représentation des concentrations locales de contraintes ainsi que la précision des résultats numériques. Les différents niveaux de maillage utilisés dans l'étude sont présentés au chapitre précédent dans le tableau 3-6.

Le raffinement progressif du maillage améliore la représentation des gradients de contraintes au voisinage des soudures. Les maillages grossiers sous-estiment les concentrations locales de contraintes, tandis que les maillages fins permettent une localisation plus précise des zones critiques. La stabilisation des contraintes maximales de von Mises observée pour les derniers raffinements confirme la convergence satisfaisante du modèle numérique. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 4-3.

Tableau 4-3: Résultat de l'étude de comparaison des contraintes pour divers cas de chargement avec et sans âme soudée

Type de sollicitation	Configuration	Chargement appliqué	Contrainte maximale de von Mises (MPa)
Flexion	Sans âme soudée	4500 N	267
Flexion	Avec âme soudée		180,5
Traction	Sans âme soudée	15000 N	159,2
Traction	Avec âme soudée		231,6
Torsion	Sans âme soudée	250 N.m	105,8
Torsion	Avec âme soudée		246,6

Les résultats obtenus mettent en évidence des comportements mécaniques différents selon le type de sollicitation appliquée.

Dans le cas de la flexion, l'ajout de l'âme soudée entraîne une réduction importante des contraintes maximales de von Mises, celles-ci passant de $2.67 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ à $1.81 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ ce qui correspond à une diminution approximative de 32%. Cette diminution indique que la présence de l'âme soudée améliore significativement la rigidité en flexion de l'assemblage et favorise une redistribution plus uniforme des efforts dans la structure.

À l'inverse, dans les cas de traction et de torsion, les configurations avec âme soudée présentent des contraintes maximales plus élevées que les configurations sans âme soudée. En traction, les contraintes augmentent de $1.59 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ à $2.32 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$, soit une augmentation d'environ 46%

De même, sous chargement en torsion, les contraintes maximales évoluent de $1.06 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ à $2.47 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$, correspondant à une augmentation importante de 133%.

Cette augmentation des contraintes dans les configurations avec âme soudée peut être attribuée à une rigidification locale de la structure, entraînant une concentration plus importante des contraintes au voisinage des soudures et des raccords géométriques.

Les distributions de contraintes de von Mises montrent que les concentrations maximales apparaissent principalement aux extrémités des zones de soudure, dans les zones de transition entre l'âme et les ailes, dans les régions soumises à des changements brusques de rigidité.

Le raffinement progressif du maillage a permis de mieux localiser ces concentrations de contraintes et d'améliorer la précision des résultats numériques dans les zones critiques. Les derniers niveaux de raffinement montrent une stabilisation progressive des contraintes maximales, confirmant ainsi la convergence satisfaisante du modèle numérique.

La contrainte maximale obtenue dans l'ensemble des simulations correspond au cas de flexion sans âme soudée : $2.67 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$, cette valeur représente environ 97% de la limite d'élasticité de l'alliage d'aluminium 6005A-T6, estimée à $2.75 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$.

Ces résultats démontrent que certaines configurations de soudage peuvent conduire à des niveaux de sollicitation très proches du domaine plastique du matériau, particulièrement sous chargement en flexion. Toutefois, l'ensemble des simulations montre que les contraintes maximales demeurent globalement inférieures à la limite d'élasticité, ce qui confirme que les assemblages conservent un comportement majoritairement élastique dans les conditions de chargement étudiées.

L'étude de convergence du maillage a finalement permis de démontrer qu'un raffinement local du maillage est indispensable pour représenter correctement les concentrations locales de contraintes dans les assemblages soudés par FSW, que les zones critiques se situent principalement au voisinage des soudures et des raccords géométriques, que la présence de l'âme soudée

influence fortement la répartition des contraintes selon le type de sollicitation appliquée et que le modèle numérique développé présente une convergence satisfaisante ainsi qu'une bonne robustesse numérique pour l'analyse mécanique des assemblages en aluminium 6005A-T6.

Chapitre 5

5 Conclusion

Le présent projet de recherche avait pour objectif principal de développer et de valider des méthodes innovantes de réalisation d'assemblages à angle droit entre des profilés extrudés en aluminium de type « I » par le procédé de soudage par friction malaxage (FSW – *Friction Stir Welding*). L'étude a été menée sur l'alliage d'aluminium 6005A-T6, un alliage de la série Al-Mg-Si largement utilisé dans les structures légères nécessitant un bon compromis entre résistance mécanique, rigidité structurale, aptitude à l'extrusion et résistance à la corrosion. Ce matériau est particulièrement employé dans les domaines du transport, de la construction et des structures mécaniques soumises à des sollicitations importantes.

L'ensemble des travaux réalisés dans le cadre de cette recherche a permis de démontrer la faisabilité technique de la réalisation d'assemblages complexes en « T » entre profilés extrudés par le procédé FSW, tout en mettant en évidence les principaux paramètres influençant la qualité métallurgique et mécanique des joints obtenus.

Dans un premier temps, une étude approfondie des paramètres de soudage a été effectuée afin d'optimiser les conditions opératoires adaptées à l'alliage 6005A-T6 et à la géométrie particulière des profilés étudiés. Les essais réalisés ont permis d'identifier des combinaisons adéquates de vitesse de rotation, vitesse d'avance et profondeur de pénétration de l'outil favorisant la stabilité du procédé ainsi qu'un écoulement satisfaisant de la matière dans la zone soudée. Les résultats obtenus ont montré que l'optimisation de ces paramètres joue un rôle déterminant sur la qualité des soudures, notamment sur la réduction des défauts internes, l'homogénéité du malaxage et la continuité métallurgique des joints.

Parallèlement, une méthode de bridage spécifique a été développée afin de répondre aux contraintes géométriques liées aux assemblages en « T » des poutrelles extrudées. Le dispositif conçu a permis d'assurer un maintien rigide et stable des pièces durant le soudage, limitant ainsi les déplacements, les vibrations et les déformations induites par les efforts thermomécaniques du procédé. Cette étape s'est révélée essentielle pour garantir la reproductibilité des soudures et la qualité globale des assemblages réalisés.

Les différentes campagnes de caractérisation expérimentale ont ensuite permis d'évaluer le comportement métallurgique et mécanique des assemblages soudés. Les observations macroscopiques ont mis en évidence la bonne continuité des joints ainsi qu'une pénétration adéquate du soudage dans les différentes configurations étudiées. Les analyses microstructurales réalisées après attaque chimique ont permis d'identifier clairement les différentes zones caractéristiques du procédé FSW, notamment le noyau soudé, la zone affectée thermo-mécaniquement (ZATM) et la zone affectée thermiquement (ZAT). Une modification significative de la microstructure a été observée dans la zone malaxée, caractérisée par un affinement des grains dû à la recristallisation dynamique induite par le procédé.

Les essais mécaniques effectués ont permis d'évaluer les performances structurales des assemblages sous différents types de sollicitations mécaniques, notamment en traction, en flexion et en torsion. Les résultats ont montré que les joints soudés présentent une bonne capacité de résistance mécanique malgré l'adoucissement local généralement observé dans les alliages d'aluminium de type 6005A-T6 après soudage. Les courbes expérimentales obtenues ont permis d'analyser le comportement global des assemblages ainsi que leur capacité de reprise des efforts appliqués.

L'étude comparative des différentes configurations de soudage, notamment au niveau de l'âme et des ailes des profilés, a permis d'identifier les configurations offrant les meilleures performances mécaniques et la meilleure répartition des contraintes. Les résultats expérimentaux ont été complétés par des analyses numériques réalisées par la méthode des éléments finis sous SolidWorks Simulation. Ces simulations ont permis d'évaluer la distribution des contraintes de von Mises dans les zones critiques des assemblages et d'identifier les concentrations locales de contraintes au voisinage des raccords géométriques et des extrémités de soudure.

Une étude de convergence du maillage a également été menée afin de garantir la fiabilité des résultats numériques obtenus. Le raffinement progressif du maillage dans les régions fortement sollicitées a montré une stabilisation des contraintes maximales calculées, confirmant ainsi la convergence de la solution numérique. Les résultats obtenus ont démontré que les contraintes maximales demeurent inférieures à la limite d'élasticité de l'alliage 6005A-T6 dans les conditions de chargement étudiées, indiquant un comportement majoritairement élastique des assemblages.

Globalement, les travaux réalisés ont permis de développer une méthodologie complète pour la conception, la fabrication et l'évaluation d'assemblages soudés par friction malaxage entre profilés extrudés en aluminium 6005A-T6. Les résultats obtenus démontrent le potentiel du procédé FSW pour la réalisation de structures soudées complexes présentant de bonnes performances mécaniques et une qualité métallurgique satisfaisante.

Enfin, cette recherche ouvre la voie à plusieurs perspectives d'amélioration et d'approfondissement. Des travaux futurs pourraient notamment porter sur l'étude du comportement en fatigue des assemblages, l'analyse de la tenue en service sous chargements cycliques, l'optimisation géométrique des outils de soudage, ainsi que l'évaluation des performances des assemblages dans des conditions industrielles réelles. L'intégration de simulations thermomécaniques plus avancées pourrait également permettre d'améliorer davantage la compréhension des phénomènes intervenant durant le procédé FSW appliqué aux structures extrudées en aluminium.

Annexe

- **Méthode de détermination de l'effort tranchant (V) et du moment fléchissant**
 - **Première configuration**

Afin de déterminer l'effort tranchant et le moment fléchissant dans cette première configuration, on a les données suivantes :

Force appliquée $F = 109 \text{ kN}$

Distance entre les deux charges $152,4 \text{ mm} = 0,1524 \text{ m}$

Distance entre les appuis

$$L = 872,6 \text{ mm} + 152,4 \text{ mm} + 872,6 = 1897,6 \text{ mm} = 1,8976 \text{ m}$$

Position de la première charge depuis l'appui de gauche : $x_1 = 872,6 \text{ mm} = 0,8726 \text{ m}$

Position de la deuxième charge depuis l'appui de gauche :

$$x_2 = 872,6 \text{ mm} + 152,4 \text{ mm} = 1025 \text{ mm} = 1,025 \text{ m}$$

- **Calcul des réactions aux appuis**

R_A Réaction verticale à gauche

R_B Réaction verticale à droite

Équilibre des moments au point A :

$$\sum M_A = 0 \Rightarrow R_B L - F x_1 - F x_2 = 0$$

$$R_B * 1,8976 - 109 * 0,8726 - 109 * 1,025 = 0$$

$$R_B = 109 \text{ kN}$$

$$\sum F_{ext} = 0 \Rightarrow R_A - F - F + R_B = 0$$

$$R_A = 2 * 109 - 109 = 109 \text{ kN}$$

$$R_A = 109 \text{ kN}$$

- **Calcul des efforts tranchants**

Tableau A 1: Résultats de calcul des efforts tranchants

N°	Zones	Efforts tranchant
1	$0 < x < 0,8726 \text{ m}$	$V = R_A = 109 \text{ kN}$
2	$0,8726 \text{ m} < x < 1,025 \text{ m}$	$V = R_A - F = 0$
3	$1,025 \text{ m} < x < 1,8976 \text{ m}$	$V = -R_B = -109 \text{ kN}$
4	$x > 1,8976 \text{ m}$	$V = 0$

- **Calcul du moment fléchissant**

Tableau A 2: Résultats de calcul des moments fléchissant

N°	Zones	Moment fléchissant
1	$0 < x < 0,8726 \text{ m}$	$M(x) = R_A x$; pour $x = 0$ $M = 0$; $x = 0,8726$ $M = 95,11 \text{ kN.m}$
2	$0,8726 \text{ m} < x < 1,025 \text{ m}$	$M(x) = R_A x - F(x - 0,8726)$; pour $x = 0,8726$ $M = 95,11 \text{ kN.m}$; $x = 1,025$ $M = 95,38 \text{ kN.m}$
3	$1,025 \text{ m} < x < 1,8976 \text{ m}$	$M(x) = R_B x$; pour $x = 0$ $M = 0$; $x = 0,8726$ $M = 95,11 \text{ kN.m}$
4	$x > 1,8976 \text{ m}$	$M = 0$



Figure A 1: Diagramme correspondant à la première configuration

○ **Deuxième configuration**

Force appliquée $F = 211 \text{ kN}$

Distance entre les appuis

$$L = 872 \text{ mm} = 0,872 \text{ m}$$

Position de la charge depuis l'appui de gauche : $x = 436 \text{ mm} = 0,436 \text{ m}$

Position de la charge depuis l'appui de gauche : $x = 436 \text{ mm} = 0,436 \text{ m}$

- **Calcul des réactions aux appuis**

R_A Réaction verticale à gauche

R_B Réaction verticale à droite

Équilibre des moments au point A :

$$\sum M_A = 0 \Rightarrow R_B L - Fx = 0$$

$$R_B * 0,872 - 211 * 0,436 = 0$$

$$R_B = 105,5 \text{ kN}$$

$$\sum F_{ext} = 0 \Rightarrow R_A - F + R_B = 0$$

$$R_A = 211 - 105,5 = 105,5 \text{ kN}$$

$$R_A = 105,5 \text{ kN}$$

- **Calcul des efforts tranchants**

Tableau A 3: Résultats de calcul des efforts tranchants

N°	Zones	Efforts tranchant
1	$0 < x < 0,436 \text{ m}$	$V = R_A = 105,5 \text{ kN}$
2	$0,436 \text{ m} < x < 0,872 \text{ m}$	$V = -R_B = -105,5 \text{ kN}$
3	$x > 0,872 \text{ m}$	$V = 0$

- **Calcul du moment fléchissant**

Tableau A 4: Résultats de calcul des moments fléchissant

N°	Zones	Moment fléchissant
1	$0 < x < 0,436 \text{ m}$	$M(x) = R_A x$; <i>pour</i> $x = 0$ $M = 0$; $x = 0,436$ $M = 46 \text{ kN}$
2	$0,436 \text{ m} < x < 0,872 \text{ m}$	$M(x) = R_B x$; <i>pour</i> $x = 0$, $M = 0 \text{ kN}$; $x = 0,436$ $M = 46 \text{ kN}$
3	$x > 0,872 \text{ m}$	$M = 0$

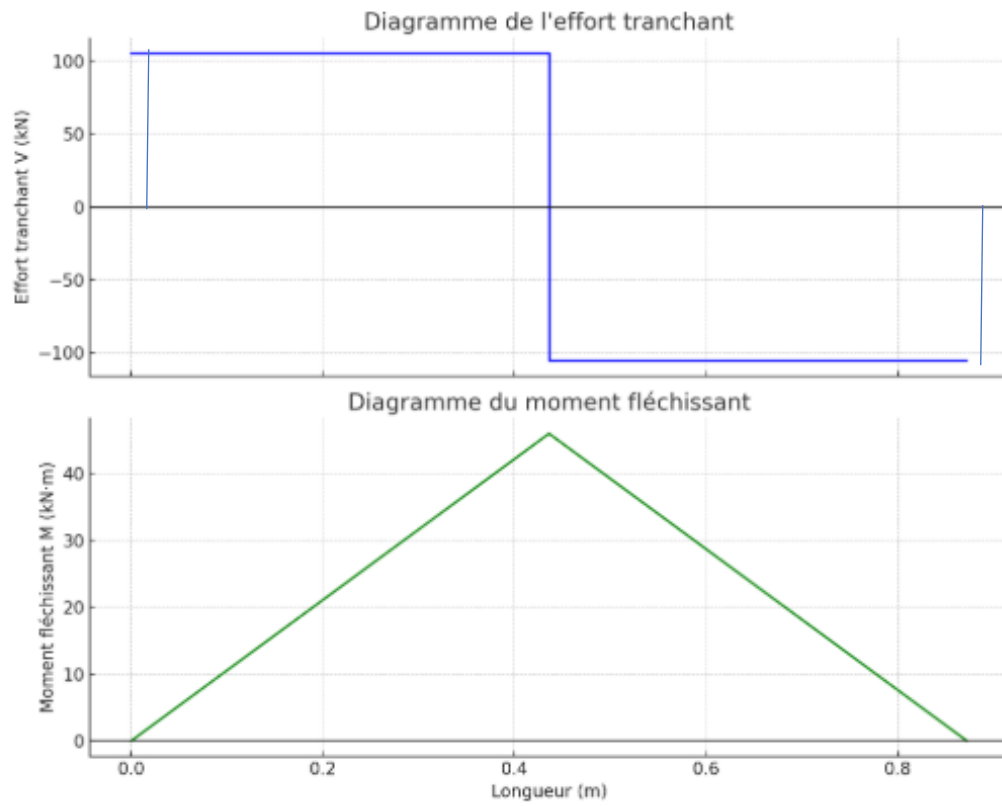


Figure A 2: diagrammes correspondant à la deuxième configuration

❖ Détermination du moment fléchissant à la soudure

Lors de l'essai de flexion, la charge P appliquée génère au niveau de la soudure un moment fléchissant M et un effort tranchant V . En fonction de la configuration statique de l'essai. Ces efforts peuvent s'exprimer sous la forme :

$$M = k_1 P \quad \text{et} \quad M = k_2 P$$

Où k_1 et k_2 sont des coefficients dépendant de la géométrie de la structure et de la position de la charge.

❖ Estimation de la rotation de l'assemblage

La rotation relative de l'assemblage est estimée à partir des déplacements horizontaux mesurés par les capteurs de déplacement linéaire LVDT placés lors de l'essai de flexion. La rotation θ est calculée selon :

$$\theta = \frac{U_{top} - U_{inf}}{h_{eff}} \quad (4)$$

Où U_{top} et U_{inf} sont respectivement les déplacements mesurés en partie supérieure et inférieure de l'assemblage, et h_{eff} la distance effective entre les deux points de mesure.

❖ Evaluation des contraintes dans la zone affectée thermiquement

Lorsque seules les ailes du profilé sont soudées, le moment fléchissant est principalement repris par un couple de forces de traction-compression dans les ailes. L'effort axial de traction T dans une aile est alors estimé par :

$$T = \frac{M}{d} \quad (5)$$

Avec $d = h - t_f = 161,2 - 9,5 = 151,7 \text{ mm}$, représentant la distance centre-à-centre entre les ailes.

La contrainte normale ou axiale dans la zone affectée thermiquement est ensuite calculée par :

$$\sigma_x = \frac{T}{b_f t_f} \quad (6)$$

$$b_f = 152,1 \text{ mm} \quad \text{et} \quad t_f = 9,5 \text{ mm}$$

L'effort tranchant génère une contrainte de cisaillement estimée par :

$$v_{xy} = \frac{V}{2b_f t_f} \quad (7)$$

La contrainte équivalente de von Mises est alors définie par :

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3v_{xy}^2} \quad (8)$$

Dans le cas étudié, la contribution du cisaillement étant faible, la contrainte équivalente peut être raisonnablement assimilée à la contrainte normale, soit :

$$\sigma_{eq} \approx \sigma_x$$

La plastification de l'assemblage est considérée atteinte lorsque la contrainte équivalente dans la zone affectée thermiquement atteint la limite élastique du matériau. Cette limite, notée $f_{y,ZAT}$, est déterminée indépendamment à partir des essais de traction réalisés sur des éprouvettes prélevées dans la ZAT, selon la méthode conventionnelle à 0,2 % :

$$f_{y,ZAT} = R_{p0,2}$$

Pour l'alliage 6005A-T6 soudé par friction malaxage étudié, la valeur mesurée est

$$f_{y,ZAT} = 119 \text{ MPa.}$$

❖ Identification du domaine élastique sur les courbes expérimentales

Afin de déterminer la rigidité élastique de l'assemblage, deux niveaux de contrainte situés dans le domaine élastique sont définis :

$$\sigma_{eq} = 0,05f_{y,ZAT} \quad \text{et} \quad \sigma_{eq} = 0,90f_{y,ZAT}$$

$$\sigma_{eq} = 0,05 * 119 \text{ MPa} = 5,95 \text{ MPa} \quad \text{et} \quad \sigma_{eq} = 0,90 * 119 \text{ MPa} = 107,1 \text{ MPa}$$

À partir de la courbe expérimentale $\sigma_{eq}-\theta$, les rotations correspondantes $\theta_{0.05fy}$ et $\theta_{0.90fy}$ sont identifiées. Les moments fléchissants associés $M_{0.05fy}$ et $M_{0.90fy}$ sont ensuite extraits du tableau expérimental et reportés sur la courbe $M-\theta$.

Selon le tableau expérimental de l'essai de flexion jusqu'à la rupture :

$$\theta_{0.05fy} = -0,0002098 \text{ rad} \quad \text{et} \quad \theta_{0.90fy} = 0,001518345 \text{ rad}$$

$$M_{0.05fy} = 1,352354139 \text{ KN.m} \quad \text{et} \quad M_{0.90fy} = 23,49675947 \text{ KN.m}$$

❖ Calcul de la rigidité élastique en rotation

La rigidité élastique de l'assemblage, notée F , est définie comme la pente de la courbe moment-rotation entre les deux points précédemment identifiés :

$$F = \frac{M_{0.90fy} - M_{0.05fy}}{\theta_{0.90fy} - \theta_{0.05fy}} \quad (9)$$

$$F = \frac{23,49675947 - 1,352354139}{0,001518345 - (-0,0002098)}$$

$F = 12814 \text{ KN.m/rad}$
--

Référence

- [1] J. R. Davis, *Aluminum and Aluminum Alloys*: ASM International, 1993.
- [2] F. M. Mazzolani, *Aluminium Alloy Structures*, 2: E & FN Spon, 1995.
- [3] S. Kou, *Welding Metallurgy*, 2: John Wiley & Sons, 2003.
- [4] W. M. N. Thomas, E. D.; Needham, J. C.; Murch, M. G.; Temple-Smith, P.; Dawes, C. J., "Friction Stir Butt Welding," GB9125978.8, 1991.
- [5] R. S. Mishra, & Mahoney, M. W., *Friction Stir Welding and Processing*: ASM International, 2007.
- [6] R. Nandan, DebRoy, T., & Bhadeshia, H. K. D. H., "Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties," *Progress in Materials Science*, vol. 53, no. 6, pp. 980-1023, 2008. doi: 10.1016/j.pmatsci.2008.05.001.
- [7] J. E. Hatch, "Aluminum: Properties and Physical Metallurgy," *ASM International*, 1984.
- [8] E. Georgantzia, M. Gkantou, et G. S. Kamaris, "Aluminium alloys as structural material: A review of research," *Engineering Structures*, vol. 227, p. 111372, 2021/01/15/ 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111372>.
- [9] L. St-George et L. Kiss, *Le soudage par friction malaxage: principes et applications*, 2015.
- [10] R. S. Mishra et Z. Ma, "Friction stir welding and processing," *Materials science and engineering: R: reports*, vol. 50, no. 1-2, pp. 1-78, 2005.
- [11] I. J. Polmear, "Light Alloys: From Traditional Alloys to Nanocrystals," *Elsevier*, 2006.
- [12] S. Kilic, F. Ozturk, et M. F. Demirdogen, "A comprehensive literature review on friction stir welding: process parameters, joint integrity, and mechanical properties," *Journal of Engineering Research*, 2023. doi: 10.1016/j.jer.2023.09.005.
- [13] S. Hassanifard, A. Ghiasvand, S. Hashemi, et A. Varvani-Farahani, "The effect of the friction stir welding tool shape on tensile properties of welded Al 6061-T6 joints," *Materials Today Communications*, vol. 31, p. 103457, 2022.
- [14] D. Tian, H.-g. Yan, J.-h. Chen, W.-j. Xia, et S. Bin, "Effect of welding speed on microstructure and mechanical properties of Al– Mg– Mn– Zr– Tialloy sheet during friction stir welding," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 31, no. 12, pp. 3626-3642, 2021.
- [15] B. Kumar, A. N. Sinha, et P. Chandra, "MICROSTRUCTURAL AND MECHANICAL ASSESSMENT OF FRICTION STIR WELDING OF DISSIMILAR THERMOPLASTICS: A REVIEW,"
- [16] V. P. Singh, S. K. Patel, A. Ranjan, et B. Kuriachen, "Recent research progress in solid state friction-stir welding of aluminium–magnesium alloys: a critical review," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 3, pp. 6217-6256, 2020.

- [17] S. Rajakumar, C. Muralidharan, et V. Balasubramanian, "Establishing empirical relationships to predict grain size and tensile strength of friction stir welded AA 6061-T6 aluminium alloy joints," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 20, no. 10, pp. 1863-1872, 2010/10/01/ 2010. doi: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(09\)60387-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(09)60387-3).
- [18] M. N. M. Gharaibeh, F. Alzubi, and M. Refaei, "A study of friction stir lap welding of aluminum 6061-T6 alloy," *Materials Sciences and Applications*, vol. 7, pp. 551–564, 2016. doi: 10.4236/msa.2016.77044.
- [19] F. Thibeault, "Étude numérique et expérimentale du soudage par friction malaxage," Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, 2012. [En ligne]. Disponible: <https://constellation.uqac.ca/id/eprint/2541/>
- [20] V. Balasubramanian, "Relationship between base metal properties and friction stir welding process parameters," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 480, no. 1-2, pp. 397-403, 2008. doi: 10.1016/j.msea.2007.07.048.
- [21] J. Hunt, B. Larsen, et Y. Hovanski, "In Line Nondestructive Testing for Sheet Metal Friction Stir Welding," SAE Technical Paper0148-7191, 2023.
- [22] Y. Chung, H. Fujii, R. Ueji, et N. Tsuji, "Friction stir welding of high carbon steel with excellent toughness and ductility," *Scripta Materialia*, vol. 63, no. 2, pp. 223-226, 2010.
- [23] F. B. Ferreira, I. Felice, I. Brito, J. P. Oliveira, et T. Santos, "A Review of Orbital Friction Stir Welding," *Metals*, vol. 13, no. 6, p. 1055, 2023.
- [24] M. M. Ahmed, M. M. El-Sayed Seleman, D. Fydrych, et G. Çam, "Friction Stir Welding of Aluminum in the Aerospace Industry: The Current Progress and State-of-the-Art Review," *Materials*, vol. 16, no. 8, p. 2971, 2023.
- [25] W. Thomas, E. Nicholas, S. Smith, S. Das, J. Kaufman, et T. Lienert, "Aluminum 2001- Proceedings of the TMS 2001 Aluminum Automotive and Joining Sessions," *TMS*, vol. 213, 2001.
- [26] TWI. [En ligne]. Disponible: http://www.twi.co.uk/content/main_home_index.html.
- [27] F. Thibeault, "Étude numérique et expérimentale du soudage par friction malaxage," 2012.
- [28] M. GROUP, "passerelle fabriquée en aluminium ",
- [29] J. Martin, C. Stanhope, et S. Gascoyne, "Novel techniques for corner joints using friction stir welding," *Friction stir welding and processing VI*, pp. 177-186, 2011.
- [30] A. Albannai, "Review The Common Defects In Friction Stir Welding," *International Journal of Scientific & Technology Research*, vol. 9, pp. 318-329, 11/19 2020.
- [31] W. T. Zhili Feng, Jian Chen, Xunxiang Hu, Roger Miller, Brian Gibson, "Report Detailing Friction Stir Welding Process Development for the Hot Cell Welding System," 2016.
- [32] Z. Z. L. Jianqi, F. Kang-Hsien, H. Ziling, W. Jia, L., "Microstructure Evolution and Mechanical Property of the Retractable Pin Tool Friction Stir Welding (RPT-FSW) Joints of A356 Aluminum Alloy Wheels," *Materials Engineering eJournal , Elsevier.*, 2021.

- [33] M. R. e. C. Blignault, "Développements récents dans le soudage par friction-malaxage des alliages de titane ", 2006. [En ligne]. Disponible: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/novel-techniques-for-corner-joints-using-friction-stir-welding>
- [34] Ø. Frigaard, Ø. Grong, et O. T. Midling, "A process model for friction stir welding of age hardening aluminum alloys," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 32, no. 5, pp. 1189-1200, 2001/05/01 2001. doi: 10.1007/s11661-001-0128-4.
- [35] L. Murr, G. Liu, et J. McClure, "Dynamic recrystallization in friction-stir welding of aluminium alloy 1100," *Journal of materials science letters*, vol. 16, no. 22, pp. 1801-1803, 1997.
- [36] P. Kah, R. Rajan, J. Martikainen, et R. Suoranta, "Investigation of weld defects in friction-stir welding and fusion welding of aluminium alloys," *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, vol. 10, no. 1, pp. 1-10, 2015.
- [37] Y. S. Sato et H. Kokawa, "Distribution of tensile property and microstructure in friction stir weld of 6063 aluminum," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 32, pp. 3023-3031, 2001.
- [38] Polmear, "Propriétés et comportements de l'alliage d'aluminium 6005A-T6," 2005.
- [39] M. Ebert, "Magnésium : Propriétés — applications — potentiel," 2001. [En ligne]. Disponible: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01351-4](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01351-4)
- [40] T. e. al., "Soudage par friction-malaxage des alliages d'aluminium," vol. 54, 2009. [En ligne]. Disponible: <https://doi.org/10.1179/174328009X411136>
- [41] L. Ceschini, Boromei, I., Minak, G., Morri, A., & Tonelli, L, "Effect of FSW parameters on the mechanical and microstructural properties of AA6005A-T6 butt joints.," 2014.
- [42] R. Palanivel, Laubscher, R., & Thompson, P., "Microstructure and mechanical properties of friction stir welded 6xxx aluminum alloys.," 2015.
- [43] P. Cavaliere, Campanile, G., De Santis, A., & Panella, F, "Effect of welding parameters on mechanical and microstructural properties of AA6056 joints produced by friction stir welding.," 2009.
- [44] Y. S. Sato, Urata, M., & Kokawa, H., "Parameters controlling microstructure and hardness during FSW of precipitation-hardenable aluminum alloys.," 1999.
- [45] J. R. Davis, "Aluminum and Aluminum Alloys.," 1999.
- [46] M. Mayo, & Sanders, R, "Age Hardening of Wrought Al-Mg-Si Alloys," 1994.
- [47] P. R. Gomez, "La contrainte ultime du matériel de base," 2025.
- [48] A. International, "Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials." [En ligne]. Disponible: <https://www.astm.org/>
- [49] A. International, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials." [En ligne]. Disponible: https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CE0008_E0008M-24%7Cen-US&proxycl=https%3A%2F%2Fsecure.astm.org&fromLogin=true