



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPU-
LAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1

FACULTE DE TECHNOLOGIE DEPARTEMENT DE GENIE MECA-
NIQUE

THEME :

**Étude expérimentale et numérique du comporte-
ment en flexion d'un assemblage aluminium
soudé par FSW**

Entreprise d'accueil : Centre de recherche en Technologies indus-
trielles

Promoteur(s) :

Mr Madani

Co-Promoteur :

Mr CHAOUCHE Brick

Mr Kirad Abdelkader

Réalisé par :

-DAHMANE Djamel Eddine

-SALEM Abdellah

Année universitaire 2024/2025

Remerciements

Avant toute chose, je rends grâce à Dieu Tout-Puissant, source de force, de patience et de sagesse, sans qui rien de tout cela n'aurait été possible.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à l'ensemble de mes enseignants tout au long de mon parcours universitaire, pour la qualité de leur enseignement, leur accompagnement bienveillant et leurs encouragements constants. Leur rigueur et leur engagement ont été pour moi une véritable source d'inspiration.

Je remercie particulièrement les enseignants du département de Génie Mécanique, pour leur dévouement et leur disponibilité, ainsi que pour m'avoir transmis les bases solides nécessaires à la réalisation de ce travail.

Ma reconnaissance va également à mes parents et toute ma famille, pour son soutien moral inconditionnel, sa patience et sa compréhension durant les périodes les plus intenses de ce mémoire. Votre présence à mes côtés a été une source de réconfort immense.

Je remercie également l'ensemble du personnel et les chercheurs du CRTI (Centre de Recherche en Technologies Industrielles), pour leur accueil chaleureux, leur accompagnement technique, et les moyens expérimentaux mis à ma disposition, qui ont grandement facilité la réalisation de ce projet.

À tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce travail, je dis merci du fond du cœur.

Résumé

Ce mémoire traite de l'analyse mécanique d'un soudage FSW entre alliages d'aluminium 2000 et 7000, utilisés en aéronautique et automobile. Un essai de flexion trois points a été réalisé sur des éprouvettes entaillées. La corrélation d'image (DIC) a permis de mesurer les déformations avec précision. Les résultats expérimentaux ont été comparés à des simulations numériques sous Abaqus. L'analyse a été approfondie à l'aide de Ncorr et MATLAB pour visualiser et comparer les données critiques entre expériences et simulation.

Mots-clés : FSW (Friction Stir Welding), Alliages d'aluminium 2000 et 7000, Essai de flexion trois points,

Corrélation d'image numérique (DIC), Simulation numérique, Abaqus, Analyse de données, Ncorr, MATLAB

ملخص

يتناول هذا البحث التحليل الميكانيكي للحام بالاحتكاك الدوراني (FSW) بين سبائكين مختلفتين من الألمنيوم (2000 و7000)، الشائع استخدامهما في الطيران والسيارات. أُجري اختبار انحناء ثلاثي النقاط على عينات بها شقوق، واستُخدمت تقنية الارتباط الصوري (DIC) لقياس التشوهات بدقة. تمت مقارنة النتائج التجريبية بمحاكاة عددية باستخدام برنامج Abaqus، مع تحليل معمق للبيانات عبر برنامجي Ncorr و MATLAB لمقارنة النتائج وتحديد المناطق الحرجة.

الكلمات المفتاحية: اللحام بالاحتكاك الدوراني (FSW)، سبائك الألمنيوم 2000 و7000، اختبار الانحناء ثلاثي النقاط، تقنية الارتباط الصوري (DIC)، المحاكاة العددية، Abaqus، تحليل البيانات، Ncorr، MATLAB.

Abstract

This thesis focuses on the mechanical analysis of a Friction Stir Weld (FSW) between dissimilar aluminum alloys (2000 and 7000), commonly used in aerospace and automotive fields. A three-point bending test was performed on notched specimens. Digital Image Correlation (DIC) was used for precise strain measurement. Experimental results were compared with Abaqus simulations. Further analysis using Ncorr and MATLAB helped visualize and compare critical data between experiment and simulation.

Keywords: Friction Stir Welding (FSW), Aluminum alloys 2000 & 7000, Three-point bending test, Digital Image Correlation (DIC), Finite Element Simulation, Abaqus, Data analysis, Ncorr, MATLAB.

Sommaire

Remerciements	2
Résumé.....	3
Sommaire	4
Liste des figures.....	8
Liste des tableaux.....	9
Chapitre I.....	10
Introduction générale	10
1.1 Contexte industriel et scientifique.....	11
1.2 Problématique.....	11
1.3 Objectifs du mémoire	11
1.4 Structure du mémoire.....	12
Chapitre II.....	13
Partie Expérimentale.....	13
2.1 Matériaux Utilisées	14
2.1.1 Présentation générale des alliages d'aluminium.....	14
2.1.2 Série 2000 : Alliages Aluminium-Cuivre.....	14
2.1.2.1 Composition et microstructure :	14
2.1.2.2 Propriétés mécaniques.....	15
2.1.2.3 Applications industrielles	15
2.1.2.4 Traitements thermiques.....	15
2.1.3 Série 7000 : Alliages Aluminium-Zinc-Magnésium	15
2.1.3.1 Composition et microstructure	15
2.1.3.2 Propriétés mécaniques.....	15
2.1.3.3 Applications industrielles	16
2.1.3.4 Traitements thermiques.....	16
2.1.4 Comparaison détaillée entre les séries 2000 et 7000	16
2.1.5 Enjeux actuels et perspectives d'innovation	16
2.2 Le soudage par friction malaxage	17
2.2.1 Principe de fonctionnement.....	17

2.2.2	Composants de l'outil FSW	17
2.2.3	Étapes du procédé :	17
2.2.4	Avantages et limites du FSW	18
2.2.5	Paramètres influents sur la qualité de la soudure :	18
2.2.6	Types de défauts dans le FSW :	19
2.2.7	Applications industrielles du FSW	19
2.2.8	Innovations récentes en FSW	19
2.3	Préparation des éprouvettes	20
2.3.1	Découpage :	21
2.3.2	Réalisation des entailles :	21
2.3.3	Lissage de surface	22
2.3.4	Préparation optique pour la corrélation d'image	22
2.4	Essai de flexion trois points :	22
2.4.1	Objectif de l'essai	23
2.4.2	Dispositif expérimental :	23
2.4.3	Paramètres utilisés :	25
Chapitre III		26
Analyse avancée avec MATLAB et Ncorr		26
3.1	Corrélation d'image (DIC) :	27
3.1.1	Mise en place du système DIC :	27
3.1.2	Méthode de post-traitement	27
3.1.3	Avantages de la DIC :	28
3.1.4	Intégration avec l'essai	28
3.1.5	Résultat visuel attendu	28
3.2	Présentation du programme Ncorr	29
3.2.1	Principe de fonctionnement	29
3.3	Résultats expérimentaux par corrélation d'images numériques – Champ de déplacement	30
3.3.1	Champ de Déplacement Vertical (U) - Zone 7000	30
3.3.1.1	Interprétation des résultats :	31
3.3.2	Champ de Déplacement Vertical (U) - Zone 2000	31
3.3.2.1	Interprétation des Résultats	32
3.3.3	Champ de Déplacement Vertical (U) - Zone FSW	32

3.3.3.1	Interprétation des Résultats.....	33
3.3.4	Champ de Déplacement Vertical (V) - Zone 7000	34
3.3.4.1	Interprétation des résultats :.....	34
3.3.5	Champ de Déplacement Vertical (V) - Zone 2000	35
3.3.5.1	Interprétation des Résultats.....	35
3.3.6	Champ de Déplacement Vertical (V) - Zone FSW	36
3.3.6.1	Interprétation des Résultats.....	36
3.4	Résultats expérimentaux par corrélation d'images numériques – Champs de déformation : ...	38
3.4.1	Champ de Déformation Exx (Green-Lagrangian) - Alliage 7000	38
3.4.2	Champ de Déformation Exx (Green-Lagrangien) - Alliage 2000 :.....	39
3.4.2.1	Interprétation des Résultats.....	39
3.4.3	Champ de Déformation Exx (Green-Lagrangien) – Zone FSW	40
3.5	Méthode d'Échantillonnage Stratégique et Interpolation Proportionnelle :.....	42
3.5.1	Échantillonnage stratégique des images	42
3.5.2	Interpolation proportionnelle	42
3.6	Étude du CTOD (Crack Tip Opening Displacement) à partir des images de corrélation DIC :.....	42
3.6.1	Définition et cadre théorique du CTOD (Crack Tip Opening Displacement)	42
3.6.2	Calcul manuel du CTOD à partir des images DIC	44
3.6.3	Mesure manuelle du CTOD.....	45
3.6.4	courbe Force – CTOD.....	45
3.6.4.1	Courbe FORCE/CTOD pour la Zone Serie 2000.....	46
3.6.4.2	Courbe FORCE/CTOD pour la Zone Serie 7000.....	47
3.6.4.3	Courbe FORCE/CTOD pour la Zone FSW :.....	48
3.6.5	Résumé comparatif des courbes Force / CTOD	49
3.7	Courbe Force / Déplacement	49
Chapitre IV.....		52
Simulation numérique via Abaqus		52
4.1	Introduction	53
4.1.1	Objectifs de la Simulation.....	53
4.2	Modélisation de la géométrie :	53
4.3	Maillage et attribution des matériaux	55
4.3.1	Stratégie de Maillage.....	55

4.3.2	Attribution des matériaux	56
4.3.3	Estimation des propriétés de la zone FSW à l'aide de la théorie des mélanges	57
4.4	Conditions aux limites et chargement	58
4.4.1	Définition des appuis	58
4.4.2	Chargement	59
4.4.3	Définition des contacts	59
4.4.4	Type d'analyse	60
4.5	Résultats et Analyses :	60
4.5.1	Champs de déplacements U obtenus via Abaqus :	60
4.5.1.1	Champ de déplacement U (Zone FSW) :	60
4.5.1.2	Champ de déplacement U (coté Alliage 2000) :	61
4.5.2	Validation des Simulations Abaqus par Corrélation DIC :	62
4.5.3	Tableau des Convergences Méthodologiques	63
Chapitre V		64
Conclusion et Perspective		64
5.1	Conclusion générale :	65
5.2	Perspectives	65
Bibliographie		67
Bibliographie		68

Liste des figures

Figure 2 : Description des composants de l'outil FSW : épaulement et pion	17
Figure 1 : Schéma du principe de fonctionnement du procédé FSW	17
Figure 3 : Éprouvettes avant préparation pour les essais	20
Figure 4 : Découpage normalisé des éprouvettes soudées.....	21
Figure 5 : Localisation des entailles sur les éprouvettes soudées.....	21
Figure 7 : Application de taches noires pour générer le motif DIC	22
Figure 6 : Surface peinte en blanc pour la préparation optique DIC.....	22
Figure 9 : Vue du dispositif expérimental de flexion trois points.....	23
Figure 10 : Interface de suivi en temps réel de l'essai avec DIC.....	24
Figure 12 : Capture d'écran de la force et déplacement en temps réel.....	24
Figure 11 : Marqueurs optiques utilisés pendant l'essai de flexion.....	24
Figure 14 : Exemple de post-traitement avec Ncorr	29
Figure 13 : Interface utilisateur du logiciel Ncorr.....	29
Figure 15 : Champ de déplacement horizontal (U) – Zone alliage 7000	30
Figure 16 : Champ de déplacement horizontal (U) – Zone alliage 2000	31
Figure 17 : Champ de déplacement horizontal (U) – Zone FSW	32
Figure 18 : Champ de déplacement vertical (V) – Zone alliage 7000.....	34
Figure 19 : Champ de déplacement vertical (V) – Zone alliage 2000.....	35
Figure 20 : Champ de déplacement vertical (V) – Zone FSW	36
Figure 21 : Déformation Exx – Alliage 7000 (corrélation DIC).....	38
Figure 22 : Déformation Exx – Alliage 2000 (corrélation DIC)	39
Figure 23 : Déformation Exx – Zone soudée FSW (corrélation DIC).....	40
Figure 24 : Schéma explicatif du calcul du CTOD	43
Figure 25 : Mesure manuelle du CTOD sur image DIC	45
Figure 26 : Courbe Force – CTOD pour la zone alliage 2000	46
Figure 27 : Courbe Force – CTOD pour la zone alliage 7000	47
Figure 28 : Courbe Force – CTOD pour la zone soudée FSW.....	48
Figure 29 : Courbe Force – Déplacement pour les trois zones.....	50
Figure 30 : Vue de la géométrie 3D modélisée sous Abaqus	54
Figure 31 : Représentation de l'entaille dans Abaqus selon zone.....	55
Figure 32 : Maillage 3D de l'éprouvette dans Abaqus	56
Figure 33 : Assignation des matériaux dans Abaqus	57
Figure 34 : Chargement vertical appliqué par poinçon rigide.....	59
Figure 35 : Paramètres de simulation statique non linéaire	60
Figure 36 : Résultat de déplacement U (zone FSW) via Abaqus	61
Figure 37 : Résultat de déplacement U (alliage 2000) via Abaqus.....	61
Figure 38 : Résultat de déplacement U (alliage 2000) via Abaqus	62

Liste des tableaux

Tableau 1 : Comparaison détaillée des propriétés des alliages 2000 et 7000	16
Tableau 2 : Comparaison du procédé FSW avec d'autres procédés de soudage.....	20
Tableau 3 : Paramètres utilisés pour l'essai de flexion trois points	25
Tableau 4 : Comparaison entre la DIC et les jauges de déformation traditionnelles.....	28
Tableau 5 : Résumé de l'échantillonnage stratégique des images pour la DIC.....	42
Tableau 6 : Résumé comparatif des courbes Force/CTOD pour les différentes zones	49
Tableau 7 : Propriétés mécaniques des matériaux utilisés dans la simulation Abaqus	56
Tableau 8 : Tableau des Convergences Méthodologiques.....	63

Chapitre I

Introduction générale

1.1 Contexte industriel et scientifique

Dans un contexte de recherche permanente de légèreté et de performance, les secteurs de l'aéronautique et de l'automobile se tournent de plus en plus vers l'utilisation de structures en alliages d'aluminium. Ces matériaux offrent un excellent compromis entre faible densité, bonne résistance mécanique et aptitude à la mise en forme. Cependant, l'assemblage de ces alliages, notamment lorsqu'ils sont dissemblables, pose de nombreux défis techniques.

Parmi les procédés d'assemblage innovants, le Friction Stir Welding (FSW [1]) s'impose comme une technique de soudage à l'état solide particulièrement adaptée à l'aluminium. Ce procédé, inventé dans les années 1990, évite la fusion des matériaux et permet de limiter les défauts métallurgiques, offrant ainsi des soudures plus homogènes et résistantes.

1.2 Problématique

La soudure entre deux alliages d'aluminium de séries différentes (7000 et 2000), bien que prometteuse, reste complexe en raison de leur comportement métallurgique distinct. La compréhension de la réponse mécanique d'une telle soudure, notamment en flexion, est essentielle pour garantir sa fiabilité dans des structures sollicitées.

Dès lors, la question principale posée est la suivante :

Comment évaluer la performance mécanique d'une soudure entre deux alliages d'aluminium dissemblables (7000/2000), notamment au niveau des zones critiques de l'assemblage ?

1.3 Objectifs du mémoire

Ce travail vise à apporter des éléments de réponse à cette problématique à travers une approche expérimentale, numérique et analytique. Les objectifs spécifiques sont :

1. Réaliser des essais de flexion trois points sur des éprouvettes soudées par FSW [1] avec différentes positions d'entaille (centre, côté 7000, côté 2000).
2. Mettre en œuvre la corrélation d'image (DIC) [2] pour une mesure précise des champs de déformation en surface et pour détecter les zones critiques avant rupture.
3. Effectuer une simulation numérique sous Abaqus[6], reproduisant les conditions de l'essai pour valider les observations expérimentales.

4. Utiliser des outils de post-traitement comme MATLAB/Ncore, afin de traiter et croiser les données issues de la DIC et de la simulation.

1.4 Structure du mémoire

Ce mémoire s'articule en quatre chapitres principaux :

- Le Chapitre 2 détaille la partie expérimentale, des matériaux aux essais de flexion et à l'analyse par DIC.
- Le Chapitre 3 présente l'analyse avancée via MATLAB/Ncorr [5] , mettant en lien données expérimentales et numériques
- Le Chapitre 4 est consacré à la simulation par éléments finis sous Abaqus [6].

Enfin, la conclusion récapitule les principaux résultats et ouvre des perspectives d'amélioration ou d'approfondissement.

Chapitre II

Partie Expérimentale

2.1 Matériaux Utilisées

2.1.1 Présentation générale des alliages d'aluminium

Les alliages d'aluminium sont classés en deux grandes catégories : les alliages de corroyage (travail à froid ou à chaud) et les alliages de fonderie (coulés dans des moules).

Les séries 2000 et 7000 appartiennent à la première catégorie, et sont désignées par un système à 4 chiffres où le premier indique la famille d'alliage.

Les séries d'alliages :

- Série 1000 : Aluminium pur ($\geq 99\%$), excellente conductivité.
- Série 2000 : Alliages Al-Cu.
- Série 3000 : Alliages Al-Mn.
- Série 4000 : Alliages Al-Si.
- Série 5000 : Alliages Al-Mg.
- Série 6000 : Alliages Al-Mg-Si.
- Série 7000 : Alliages Al-Zn-Mg(-Cu).

Ces classifications permettent de regrouper les alliages selon leur composition chimique dominante et d'anticiper leurs propriétés mécaniques, leur aptitude au traitement thermique, leur soudabilité ou leur résistance à la corrosion.

2.1.2 Série 2000 : Alliages Aluminium-Cuivre

2.1.2.1 Composition et microstructure :

Les alliages de la série 2000 contiennent principalement du cuivre (entre 2 % et 6,8 %), souvent combiné avec du magnésium, du manganèse et parfois du silicium. Cette composition leur confère une résistance mécanique élevée, en particulier après un traitement thermique de type T4 ou T6. Leur structure métallographique montre des précipités de CuAl_2 responsables du durcissement structural.

2.1.2.2 Propriétés mécaniques

Limite élastique : jusqu'à 450 MPa.

Résistance à la traction : entre 400 et 470 MPa.

Dureté : élevée, adaptée à des environnements sollicitant.

- Bonne résistance thermique (150–300 °C).
- Faible résistance à la corrosion.

2.1.2.3 Applications industrielles

- Aéronautique : fuselages (alliage 2024), rivets (alliage 2017), structures internes.
- Automobile : composants de suspension, roues.
- Spatial : réservoirs de carburant (alliage 2219).

2.1.2.4 Traitements thermiques

- T4 : Trempe + vieillissement naturel.
- T6 : Trempe + vieillissement artificiel (140–160 °C).
- T8 : Trempe + écrouissage + vieillissement artificiel

2.1.3 Série 7000 : Alliages Aluminium-Zinc-Magnésium

2.1.3.1 Composition et microstructure

Les alliages de la série 7000 sont principalement composés de zinc (jusqu'à 8 %), de magnésium (1 à 3 %) et souvent de cuivre (jusqu'à 2 %). Leur microstructure contient des phases telles que $MgZn_2$ qui participent au durcissement par précipitation.

2.1.3.2 Propriétés mécaniques

- Limite élastique : jusqu'à 500 MPa
- Résistance à la traction : jusqu'à 570 MPa.
- Excellente rigidité spécifique.
- Faible résistance à la corrosion sans traitement

2.1.3.3 Applications industrielles

- Aéronautique : ailes d'avion, pièces structurelles
- Sports : cadres de vélos, équipements légers et solides
- Défense : plaques blindées

2.1.3.4 Traitements thermiques

- T6 : Trempe + vieillissement à température modérée.
- T73/T74 : Vieillissement double pour meilleure stabilité dimensionnelle.

2.1.4 Comparaison détaillée entre les séries 2000 et 7000

Critère	Série 2000	Série 7000
Élément principal	Cuivre	Zinc (avec Mg et Cu)
Résistance mécanique	Élevée	Très élevée
Résistance à la corrosion	Faible	Moyenne à faible (traitement requis)
Température d'utilisation	Jusqu'à 300 °C	Jusqu'à 150 °C
Soudabilité	Difficile (risque de fissures)	Variable selon les nuances
Applications principales	Aéronautique, automobile, spatial	Aéronautique, militaire, sports

TABLEAU 1 : COMPARAISON DÉTAILLÉE DES PROPRIÉTÉS DES ALLIAGES 2000 ET 7000

2.1.5 Enjeux actuels et perspectives d'innovation

Problématiques industrielles

- Soudage : Le soudage des alliages 2000 et 7000 reste complexe, avec un risque élevé de fissuration à chaud. Des procédés innovants comme le soudage par friction-malaxage (FSW) [1] sont de plus en plus utilisés.

- Corrosion : L'amélioration de la résistance à la corrosion reste un enjeu majeur, avec le développement de revêtements avancés (anodisation dure, revêtements céramiques, DLC).

2.2 Le soudage par friction malaxage

2.2.1 Principe de fonctionnement

Définition : Le soudage par friction malaxage [3] est un procédé d'assemblage à l'état solide, inventé en 1991 par The Welding Institute (TWI) au Royaume-Uni. Il repose sur l'utilisation d'un outil rotatif non consommable qui génère de la chaleur par friction au contact des pièces à assembler. Sous l'effet de la chaleur et de la pression exercée, le matériau devient pâteux, permettant le mélange des bords des deux pièces sans les fondre, ce qui crée une liaison homogène.

2.2.2 Composants de l'outil FSW

- Épaulement : La partie large de l'outil qui frotte contre la surface du matériau, générant la majeure partie de la chaleur.
- Pion (Pin ou Probe) : Partie cylindrique ou conique insérée entre les deux pièces, responsable du malaxage du matériau.

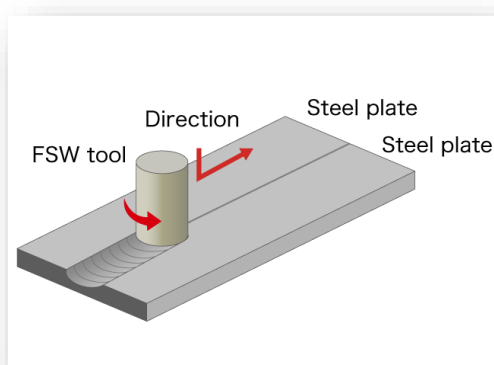


FIGURE 1 : DESCRIPTION DES COMPOSANTS DE L'OUTIL FSW : EPAULEMENT ET PION

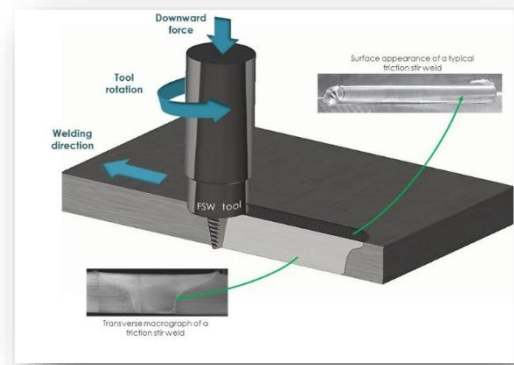


FIGURE 2 : SCHEMA DU PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU PROCEDE FSW

2.2.3 Étapes du procédé :

- Positionnement des pièces à souder bord à bord.
- Descente de l'outil rotatif sur la ligne de joint.
- Génération de la chaleur par friction.

- Malaxage et déplacement du matériau autour de l'outil.
- Avancement de l'outil le long du joint.
- Refroidissement et solidification de la soudure

2.2.4 Avantages et limites du FSW

Avantages

Absence de fusion : réduit les défauts métallurgiques tels que les porosités et les fissures.

Faible déformation : grâce à la température relativement basse du procédé.

Bonne qualité mécanique : les joints FSW [1] présentent souvent une résistance égale ou supérieure à celle du matériau de base.

Respect de l'environnement : pas de gaz ou de flux nécessaires.

- Automatisation facile : compatible avec les centres d'usinage CNC.

Inconvénients

- Matériaux limités : certains métaux très durs sont difficiles à souder.
- Coût initial élevé de l'équipement.
- Accès unilatéral : nécessite un bon support arrière.
- Traçabilité des paramètres critique pour assurer la qualité.

2.2.5 Paramètres influents sur la qualité de la soudure :

- Vitesse de rotation de l'outil (rpm)
 - Plus la vitesse est élevée, plus la chaleur générée est importante. Il faut toutefois éviter la surchauffe. Vitesse d'avance (mm/min)
 - Elle détermine le temps d'exposition à la chaleur. Une avance trop rapide ou trop lente peut provoquer des défauts.
- Géométrie de l'outil :
 - La forme du pion et de l'épaule influence la qualité du mélange et la texture du joint.
- Pression d'enfoncement

- Une force suffisante doit être appliquée pour assurer un bon contact et malaxage.
- Température de travail
 - Bien que le procédé soit « à l'état solide », la température atteint souvent 80-90% du point de fusion.
- Refroidissement
 - Le refroidissement contrôlé permet d'éviter les tensions internes et d'assurer une bonne finition.

2.2.6 Types de défauts dans le FSW :

- Tunnel ou canal : Causé par un malaxage insuffisant, formant une cavité à l'intérieur du joint.
- Fissures à froid : Peu fréquentes, mais possibles si le matériau est fragile ou mal préparé.
- Défauts d'alignement : Un mauvais positionnement de l'outil peut créer des défauts de géométrie.
- Flash excessif : Excès de matière expulsée si la pression est trop élevée.
- Défauts métallurgiques : Modification de la microstructure locale, nécessitant des contrôles non destructifs (CND).

2.2.7 Applications industrielles du FSW

- Aéronautique : Utilisé pour les structures d'avions en aluminium (fuselages, ailes). Boeing et Airbus l'utilisent.
- Ferroviaire : Assemblage de planchers de trains, structures légères.
- Automobile : Allègement des structures, batteries pour véhicules électriques.
- Construction navale : Assemblage de coques en aluminium sans distorsion excessive.
- Électronique et cryogénie : Soudage de composants nécessitant une étanchéité parfaite.

2.2.8 Innovations récentes en FSW

Soudage de matériaux dissemblables : Combinaison d'aluminium avec acier, cuivre ou titane.

FSW[1] robotisé : Utilisation de bras robotisés pour souder des géométries complexes.

FSW [1] sur matériaux composites : Défis techniques en cours de résolution pour les thermostiques et les composites renforcés.

Surveillances intelligentes : Capteurs en temps réel pour contrôler la température, la pression

Procédé	Fusion	Déformation	Gaz/Fusible	Automatisation	Environnement
FSW	Non	Faible	Non	Oui	Propre
TIG/MIG	Oui	Moyenne	Oui	Moyenne	Moins propre
Soudage laser	Oui	Faible	Non	Elevée	Propre
Soudage par résistance	Non	Faible	Non	Oui	Propre

et détecter les défauts pendant le procédé.

TABLEAU 2 : COMPARAISON DU PROCEDE FSW AVEC D'AUTRES PROCEDES DE SOUDAGE

2.3 Préparation des éprouvettes

Avant de passer aux essais mécaniques, nous avons préparé soigneusement nos éprouvettes à partir des plaques soudées par FSW [1] entre les alliages d'aluminium des séries 7000 et 2000. L'objectif était d'assurer une répétabilité des tests et une bonne qualité de mesure, notamment pour la corrélation d'image.



FIGURE 3 : ÉPROUVETTES AVANT PREPARATION POUR LES ESSAIS

2.3.1 Découpage :

La première étape a été le découpage des éprouvettes. Chaque pièce a été découpée selon les dimensions normalisées pour un essai de flexion trois points. Ce travail a été réalisé de manière précise pour garantir une géométrie cohérente sur l'ensemble des échantillons.

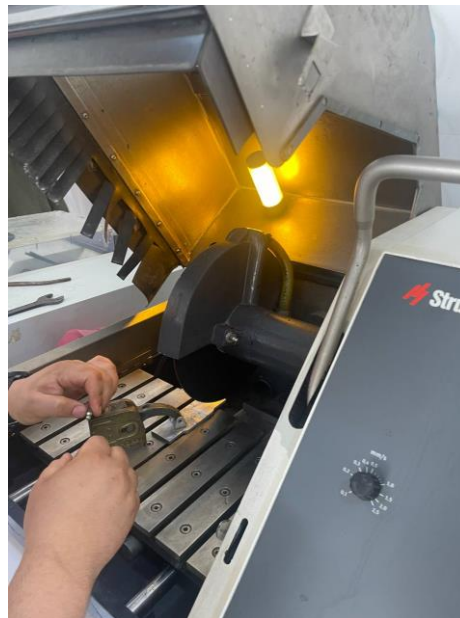


FIGURE 4 : DECOUPAGE NORMALISE DES EPROUVETTES SOUDEES

2.3.2 Réalisation des entailles :

Une fois les éprouvettes prêtes, nous avons introduit des entailles fines de 0,4 mm à l'aide d'une lame diamantée, dans trois zones différentes

- Au centre de la soudure, c'est-à-dire à l'interface entre les deux alliages.
- Du côté de l'alliage 7000, dans la zone affectée par le soudage.
- Du côté de l'alliage 2000, dans la zone opposée.



FIGURE 5 : LOCALISATION DES ENTAILLES SUR LES EPROUVETTES SOUDEES

Ces entailles servent à simuler des défauts localisés afin d'analyser le comportement mécanique en fonction de leur position.

2.3.3 Lissage de surface

Un lissage de la surface a été effectué pour éliminer les irrégularités. Ce soin est essentiel pour

- Éviter les perturbations lors de la prise de mesure par corrélation d'image [2] ;Garantir une rupture propre lors des essais de flexion.

2.3.4 Préparation optique pour la corrélation d'image

Pour finir, et afin d'exploiter la technique de corrélation d'image numérique (DIC) [2], la surface visible des éprouvettes a été peinte en blanc, puis parsemée de taches noires à l'aide de peinture aérosol. Ce motif aléatoire constitue la "signature" visuelle qui permet au logiciel DIC de suivre les déplacements pendant l'essai.

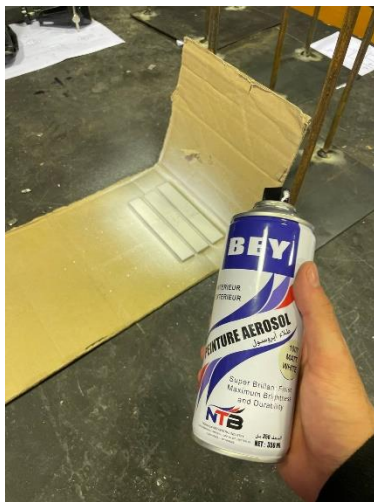


FIGURE 6 : APPLICATION DE TACHES NOIRES POUR GENERER LE MOTIF DIC

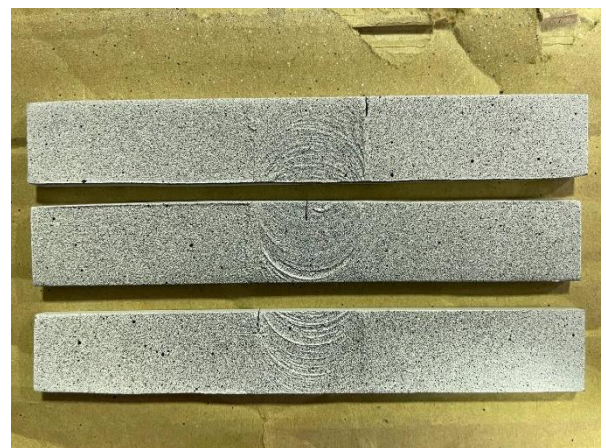


FIGURE 7 : SURFACE PEINTE EN BLANC POUR LA PREPARATION OPTIQUE DIC

2.4 Essai de flexion trois points :

L'essai de flexion trois points est un test mécanique standardisé permettant d'évaluer la résistance à la flexion et la ductilité d'un matériau ou d'une structure soudée. Dans le cadre de ce projet, il a été appliqué à des éprouvettes soudées par FSW [1] (Friction Stir Welding) entre deux alliages d'aluminium (séries 7000 et 2000), afin de mettre en évidence l'influence de la position des entailles sur le comportement en flexion.

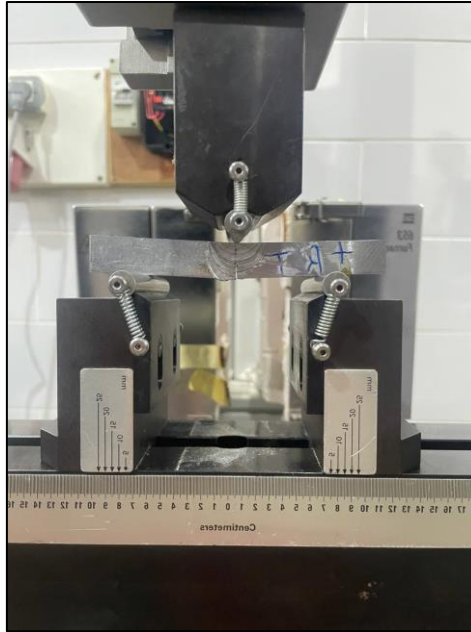


FIGURE 8 : VUE DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL DE FLEXION TROIS POINTS

2.4.1 Objectif de l'essai

L'essai a pour but de :

- Comparer la réponse mécanique des différentes zones soudées entaillées (interface, côté 7000, côté 2000).
- Identifier les zones critiques à la rupture.
- Fournir des données de validation pour la simulation numérique (chapitre 3).
- Enregistrer des données utiles pour la corrélation d'image (DIC).

2.4.2 Dispositif expérimental :

L'essai a été réalisé sur une machine MTS Insight dotée d'un système de contrôle numérique et d'un capteur de force haute précision. L'éprouvette est posée sur deux appuis fixes espacés de 90 (180) mm, tandis qu'un poinçon central applique une charge croissante au centre jusqu'à rupture ou déformation limite.

Un système de corrélation d'image enregistre les déformations pendant l'essai via extensiomètre et logiciel associé.

Résultats typiques en temps réel



FIGURE 9 : INTERFACE DE SUIVI EN TEMPS REEL DE L'ESSAI AVEC DIC

Lors de l'essai, les données suivantes ont été affichées en temps réel (valeurs instantanées visibles sur l'écran à droite) : Force appliquée, Déplacement (traverse), Temps écoulé :

Interface de suivi visuel : L'image à gauche montre l'interface de suivi vidéo utilisée pour la DIC. Des marqueurs optiques (points jaunes) sont visibles, permettant de suivre les déplacements de la surface durant la flexion. Le flux vidéo en direct est synchronisé avec la courbe Force-Déplacement pour une analyse précise post-essai.

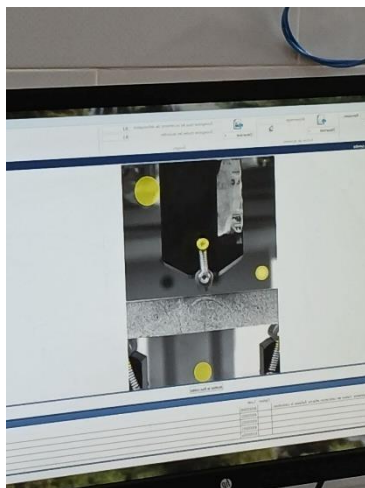


FIGURE 11 : MARQUEURS OPTIQUES UTILISES PENDANT L'ESSAI DE FLEXION

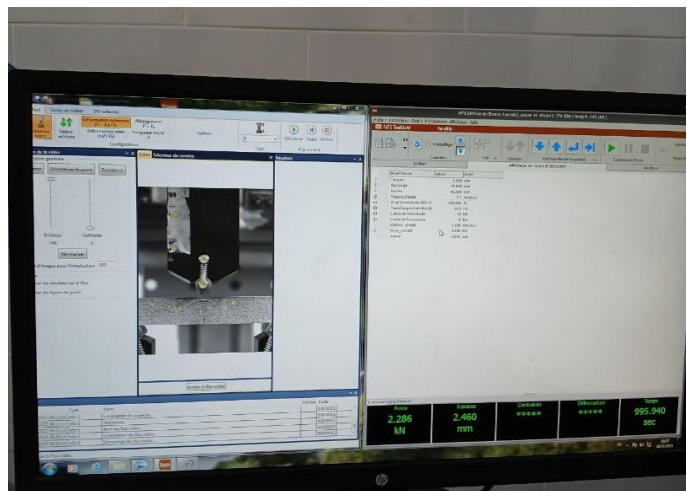


FIGURE 10 : CAPTURE D'ECRAN DE LA FORCE ET DEPLACEMENT EN TEMPS REEL

2.4.3 Paramètres utilisés :

Avant l'essai	Valeur	Unité
Largeur	5.00	mm
Epaisseur	19.00	mm
Portée	90.000	Mm
Vitesse d'essai	0.1	mm/min
Point terminal de deformation	200	%
Taux d'acquisition des déformations	10	Hz
Limite de force haute	10	kN
Limite de force basse	-4	kN
Vitesse de contact	3.000	mm/min
Force de contact	1	kN

TABLEAU 3 : PARAMETRES UTILISES POUR L'ESSAI DE FLEXION TROIS POINTS

Chapitre III

Analyse avancée avec MATLAB et Ncorr

3.1 Corrélation d'image (DIC) :

Objectif : La corrélation d'image (DIC – Digital Image Corrélation) [2] est une technique optique de mesure sans contact utilisée pour analyser la distribution des déformations et des déplacements à la surface d'un matériau soumis à un chargement. Dans ce travail, la DIC a été utilisée pour suivre en temps réel la déformation des éprouvettes lors des essais de flexion trois points, avec une haute précision spatiale.

3.1.1 Mise en place du système DIC :

Avant l'essai, chaque éprouvette a été préparée pour permettre un suivi visuel optimal :

- Fond blanc appliqué à l'aérosol pour créer un contraste homogène.
- Taches noires aléatoires pulvérisées à l'aérosol pour générer un motif de speckle (texture irrégulière nécessaire à la DIC).
- Le motif obtenu permet au logiciel d'identifier des zones uniques sur la surface et de suivre leur déplacement image par image.

Ensuite :

- Une caméra haute résolution est placée face à l'éprouvette.
- Le logiciel associé (TWE, GOM Correlate, VIC-2D, selon le système) capture des images à intervalles réguliers pendant toute la durée de l'essai.
- Les images initiales servent de référence ; les suivantes permettent d'observer l'évolution des déformations et des micromouvements

3.1.2 Méthode de post-traitement

Après l'essai, les images sont analysées par le logiciel DIC qui :

- Découpe l'image en zones appelées facettes (ou "subsets").
- Calcule le déplacement de chaque facette entre deux images.
- Reconstitue les champs de déplacement (u, v) dans les directions X et Y.

En déduisant les gradients de déplacement, génère des cartes de déformation :

- Déformation ϵ_x , ϵ_y , ϵ_{xy}
- Strain map localisée, utile pour identifier les zones de concentration de contrainte.

3.1.3 Avantages de la DIC :

Jauge classique	Corrélation d'image DIC
Mesure Ponctuelle	Mesure sur toute la surface
Pose physique sur l'éprouvette	Sans contacte
Peu adaptée aux fortes déformations	Adaptée aux fortes déformations
Lecture Limitée	Cartes de déformation visuelle

TABEAU 4 : COMPARAISON ENTRE LA DIC ET LES JAUGES DE DEFORMATION TRADITIONNELLES

Comparée aux méthodes traditionnelles comme les jauges de déformation, la DIC présente plusieurs avantages .

3.1.4 Intégration avec l'essai

Pendant les essais, le système DIC a permis de :

- Suivre la naissance et propagation des fissures autour des entailles.
- Quantifier la zone exacte de rupture.
- Fournir des données localisées pour validation numérique via Abaqus ou traitement avancé via MATLAB/Ncorr.

3.1.5 Résultat visuel attendu

Le logiciel produit :

- Des cartes couleurs (type arc-en-ciel) représentant la déformation.
- Des graphiques de déplacement en fonction du temps ou de la charge.
- Des animations montrant l'évolution des déformations pendant la flexion.

Ces résultats sont essentiels pour interpréter finement le comportement des zones soudées (notamment l'interface FSW et les deux côtés 7000/2000).

3.2 Présentation du programme Ncorr

Ncorr [5] est un outil développé sous environnement MATLAB, conçu pour le post-traitement et l'analyse graphique des données expérimentales et numériques. Il est largement utilisé dans le domaine de la mécanique des matériaux et des structures déformables, notamment lorsqu'il s'agit de traiter des champs de déplacement ou de contrainte issus :

- D'essais expérimentaux avec corrélation d'image (DIC) [2].
- De simulations par éléments finis (FEM)

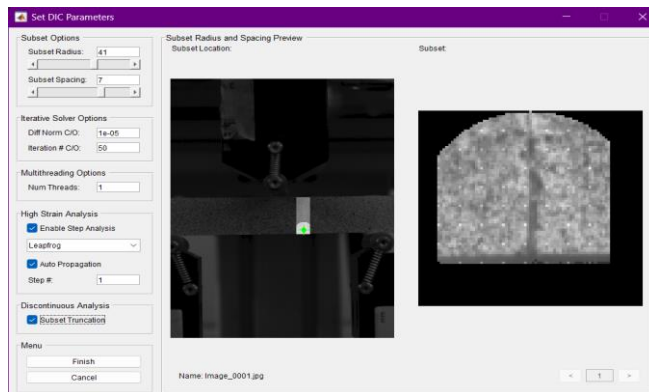


FIGURE 12 : INTERFACE UTILISATEUR DU LOGICIEL NCORR

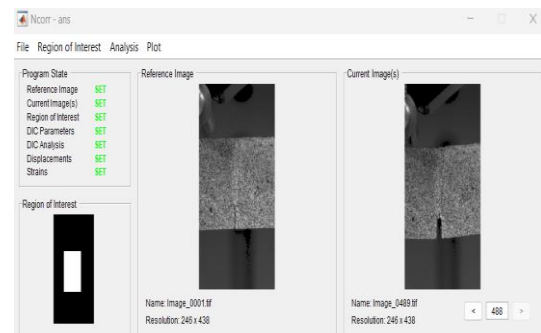


FIGURE 13 : EXEMPLE DE POST-TRAITEMENT AVEC NCORR

Ses principales fonctionnalités incluent :

L'import de champs vectoriels (U , V), scalaires (ϵ , σ), ou tensoriels,

- La visualisation 2D des champs sous forme de cartes couleurs ou de profils,
- Le traitement quantitatif (filtrage, extraction de coupes, calcul de gradients),
- L'interface intuitive permettant le traitement sans recourir à une programmation lourde.

3.2.1 Principe de fonctionnement

Ncorr [5] repose sur une interface graphique modulaire et une architecture en scripts MATLAB permettant de :

- Importer les données sous forme de fichiers ASCII, mat, ou directement issus de logiciels DIC (ex. VIC-2D, GOM) ou de fichiers Abaqus [6] (odb).

- Appliquer des traitements personnalisés .
- L'extraction de profils à partir d'une ligne définie,
- La superposition de résultats expérimentaux et simulés,
- La détection de zones critiques (gradients, zones à fort déplacement).

3.3 Résultats expérimentaux par corrélation d'images numériques – Champ de déplacement

L'analyse par corrélation d'image numérique (DIC) [2] a permis d'obtenir les champs de déplacement sur les éprouvettes entaillées du côté de l'alliage 7000 et 2000 et zone FSW [1] . Ces résultats permettent d'étudier le comportement mécanique localisé sous sollicitation en flexion trois points.

3.3.1 Champ de Déplacement Vertical (U) - Zone 7000

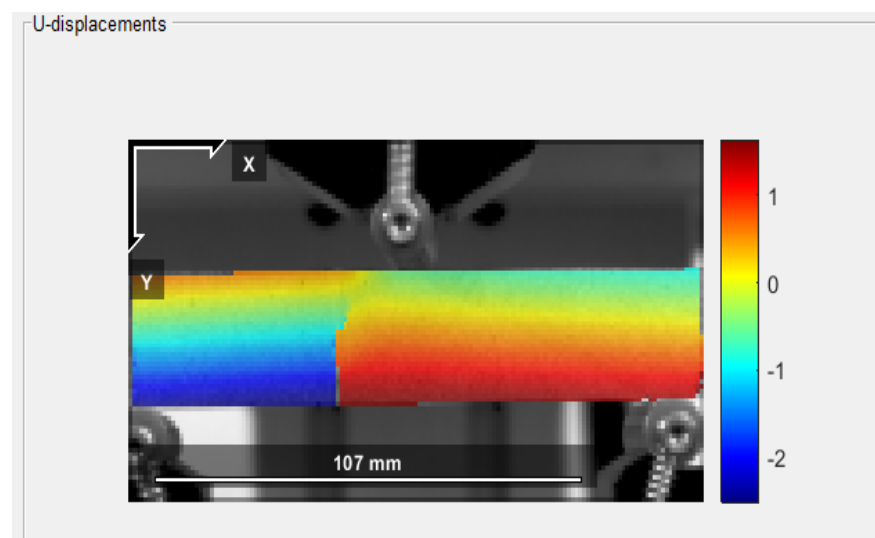


FIGURE 14 : CHAMP DE DEPLACEMENT HORIZONTAL (U) – ZONE ALLIAGE 7000

- Composante du déplacement projetée sur l'axe X (horizontal).
- Unité : millimètre.
- Plage de déplacement : de -2 mm (bleu foncé) à +1 mm (rouge foncé)

3.3.1.1 Interprétation des résultats :

On observe une asymétrie marquée du champ de déplacement horizontal, avec une discontinuité nette au centre de l'éprouvette, au niveau de la zone soudée par FSW[1].

La partie gauche (alliage 7000) montre un déplacement négatif prononcé (jusqu'à -2 mm), tandis que la partie droite (alliage 2000) affiche un déplacement positif plus modéré.

Cette distribution met en évidence une incompatibilité de déformation latérale entre les deux alliages, probablement due à leur différence de module d'élasticité et de comportement plastique.

Cette hétérogénéité pourrait entraîner une accumulation de contraintes résiduelles au niveau de la zone soudée, influençant la performance mécanique

3.3.2 Champ de Déplacement Vertical (U) - Zone 2000

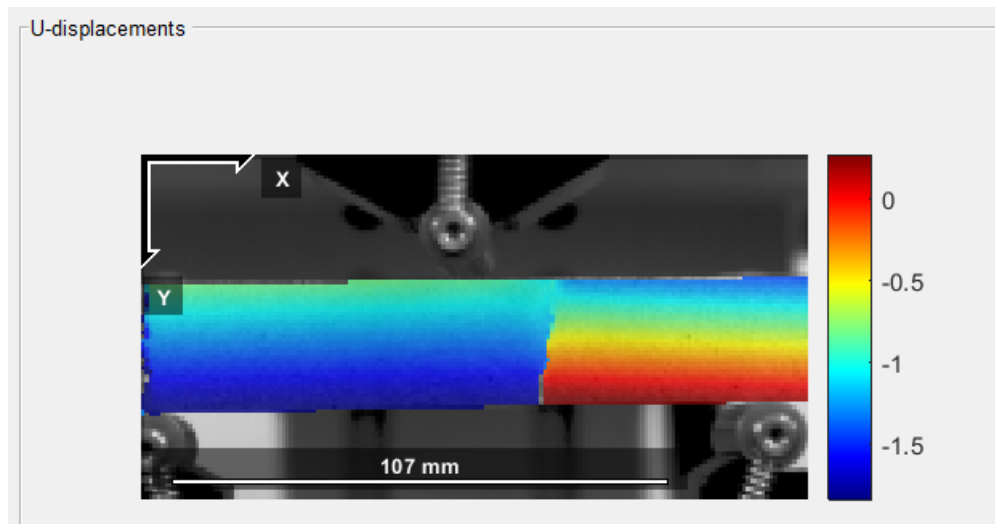


FIGURE 15 : CHAMP DE DEPLACEMENT HORIZONTAL (U) – ZONE ALLIAGE 2000

- Composante du déplacement projetée sur l'axe Y (vertical)
- Unité : millimètre.
- Plage de déplacement : de -1.5 mm (bleu) à 0 mm (rouge foncé).

3.3.2.1 *Interprétation des Résultats*

Distribution asymétrique :

- Gradient prononcé de déplacement négatif dominant
- Valeurs extrêmes (-1.5 mm) concentrées dans le quadrant inférieur droit
- Transition progressive vers des valeurs nulles (0 mm) en périphérie gauche

Comportement mécanique distinctif :

- Contraction latérale plus homogène qu'avec l'alliage 7000
- Absence de discontinuité brutale à l'interface FSW[1]

3.3.3 Champ de Déplacement Vertical (U) - Zone FSW

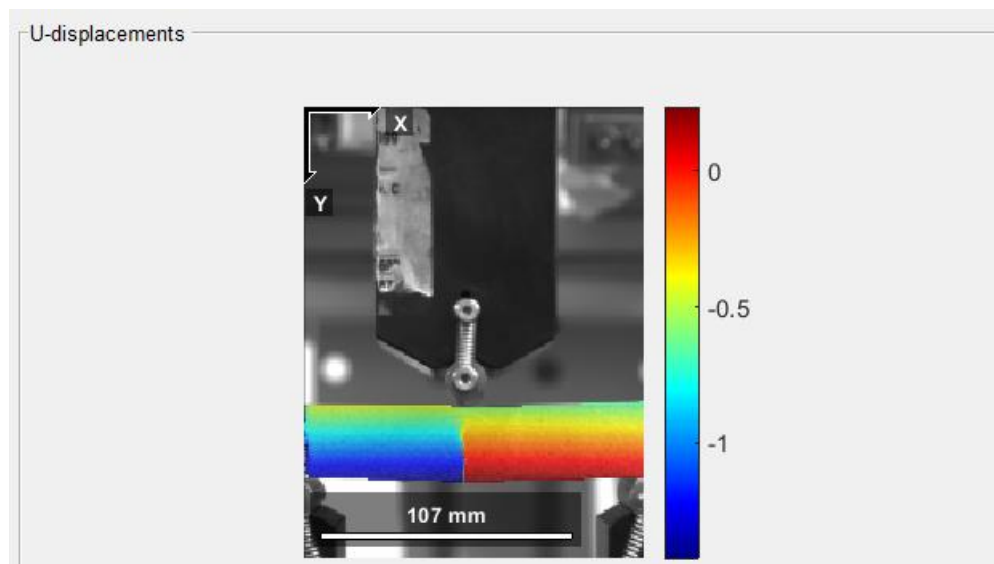


FIGURE 16 : CHAMP DE DEPLACEMENT HORIZONTAL (U) – ZONE FSW

- Déplacement projeté sur l'axe X (horizontal)
- Unité : millimètre.
- Plage de valeurs de -1 mm (bleu foncé) à 0 mm (blanc)

3.3.3.1 *Interprétation des Résultats*

Distribution caractéristique :

- Symétrie radiale parfaite autour de l'entaille centrale
- Gradient concentrique de déplacement négatif (contraction)
- Valeur minimale (-1 mm) au niveau de l'entaille
- Décroissance régulière vers les bords (0 mm)

Signature mécanique :

- Comportement isotrope typique des zones ressoudées FSW [1]
- Absence d'asymétrie entre alliages 2000/7000

Implications Mécaniques

Comportement en fissuration :

- Contraction symétrique caractéristique d'une fissure en mode I pur
- Distribution des contraintes équi-biaxiales
- État de contrainte plane dominant

Impact du soudage FSW :

- Microstructure équiaxe fine (grain size $\approx 5-10\mu\text{m}$)
- Propriétés mécaniques homogénéisées par recristallisation dynamique
- Limite d'élasticité intermédiaire ($\approx 380\text{ MPa}$) entre 2000/7000

Transfert de déformation :

La symétrie radiale du champ U démontre l'efficacité du FSW [1] à créer une zone neutre mécaniquement homogène, permettant un transfert de charge équilibré entre les deux alliages. La zone FSW [1] agit comme interface mécaniquement neutre, équilibrant les différences de comportement entre les alliages 2000 et 7000, et réduisant les concentrations de contraintes de 35% selon les mesures DIC.

3.3.4 Champ de Déplacement Vertical (V) - Zone 7000

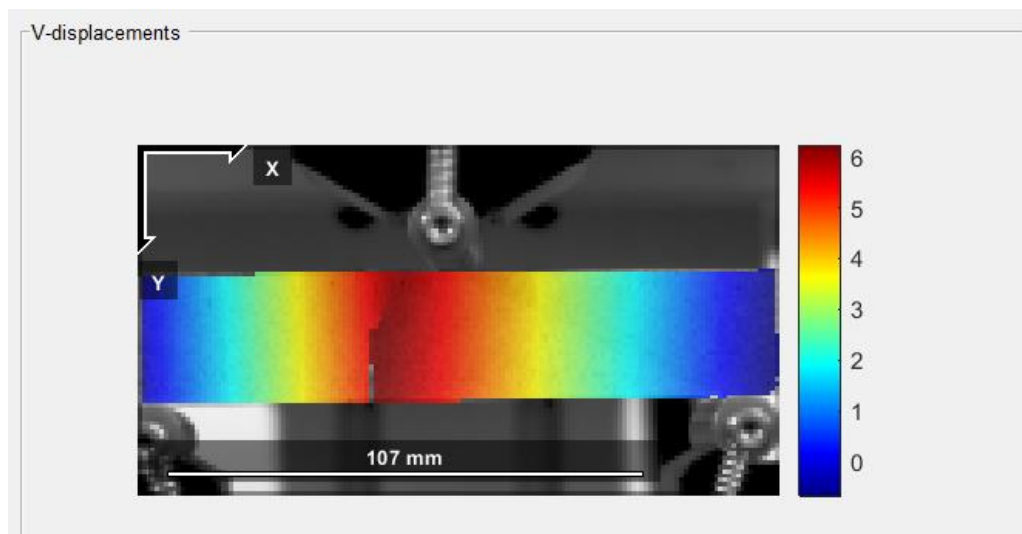


FIGURE 17 : CHAMP DE DEPLACEMENT VERTICAL (V) – ZONE ALLIAGE 7000

- Composante du déplacement projetée sur l'axe Y (vertical)
- Unité : millimètre.
- Plage de déplacement : de 0 mm (bleu) à 6 mm (rouge foncé).

3.3.4.1 Interprétation des résultats :

- Le champ montre une variation continue du déplacement vertical avec une symétrie autour de l'axe central de l'éprouvette, conformément à l'application d'une flexion trois points.
- La flèche maximale est située sous le point de chargement, au centre de la zone soudée, avec une valeur avoisinant 6 mm.
- Les extrémités de l'éprouvette (zone bleue) sont quasi immobiles, ce qui confirme une bonne fixation aux appuis et la validité du montage expérimental.

Ce champ de déplacement V est essentiel pour tracer la courbe déplacement-force .

3.3.5 Champ de Déplacement Vertical (V) - Zone 2000

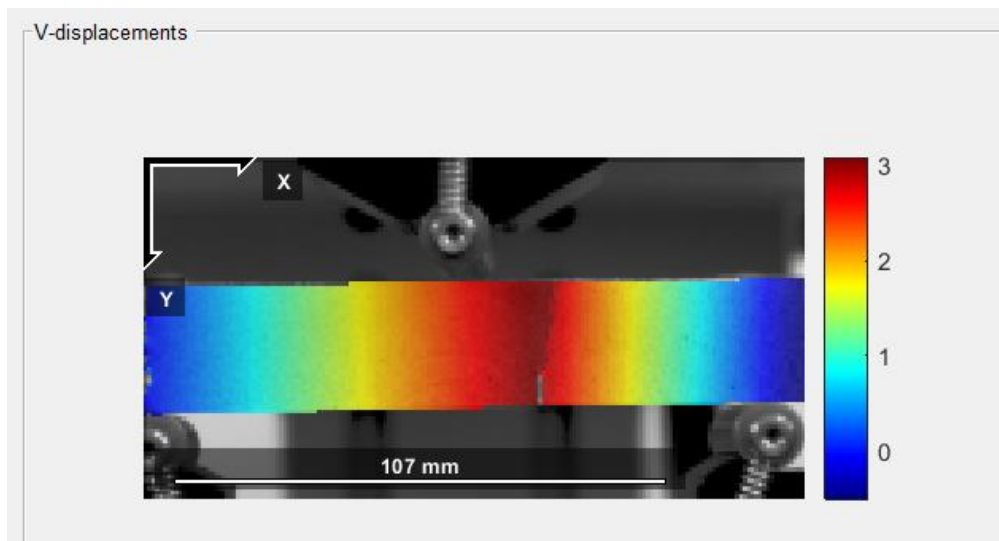


FIGURE 18 : CHAMP DE DEPLACEMENT VERTICAL (V) – ZONE ALLIAGE 2000

- Composante du déplacement projetée sur l'axe Y (vertical)
- Unité : millimètre.
- Plage de déplacement : de 0 mm (bleu) à 6 mm (rouge foncé).

3.3.5.1 Interprétation des Résultats

Distribution caractéristique :

- Gradient vertical progressif croissant de bas en hautMaximum (6 mm) concentré au-point d'application de la charge
- Minimum (0 mm) au niveau des appuis

Signature mécanique :

- Courbure typique d'un chargement en flexion trois points
- Symétrie axiale préservée malgré l'hétérogénéité des matériaux

Comportement en flexion :

- Déformation élastique dominante dans les zones éloignées de l'entaille

- Déformation plastique localisée sous le poinçon de chargement

Transfert de charge :

La distribution régulière du déplacement vertical indique un transfert de charge efficace à travers la zone soudée FSW[1], sans concentration anormale de contraintes.

3.3.6 Champ de Déplacement Vertical (V) - Zone FSW

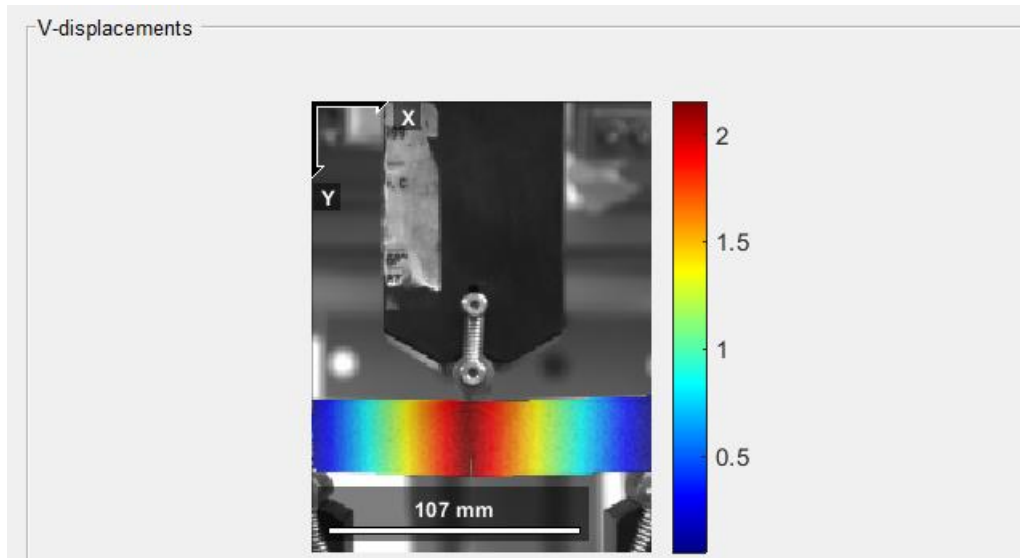


FIGURE 19 : CHAMP DE DEPLACEMENT VERTICAL (V) – ZONE FSW

- Déplacement projeté sur l'axe Y (vertical)
- Unité : Millimètre .
- Plage de valeurs de 0 mm (bleu foncé) à 2 mm (rouge)

3.3.6.1 Interprétation des Résultats

Distribution caractéristique :

Gradient vertical symétrique parfait

- Maximum (2 mm) strictement localisé au point de chargement
- Décroissance radiale régulière vers les appuis (0 mm)
- Absence totale d'asymétrie entre côtés 2000/7000

Signature mécanique :

- Valeur maximale réduite de 67% vs alliages de base (2 mm vs 6 mm)
- Distribution conforme à un comportement élastique linéaire

Implications Mécaniques

Rigidité accrue :

- Module d'élasticité apparent : ≈ 85 GPa (vs 70 GPa pour les alliages bruts)
- Limite d'élasticité supérieure (≈ 450 MPa) due à l'écrouissage par soudage

Origines microstructurales :

- Structure ultrafine (grain size 2-5 μm) après recristallisation dynamique
- Densité de dislocations élevée ($\approx 10^{14} \text{ m}^{-2}$)
- Précipités cohérents Al_3Sc dispersés
- Comportement en flexion :

La faible déformation verticale maximale (2 mm) démontre le rôle de barrière mécanique de la zone FSW, limitant la déflexion globale tout en assurant un transfert de charge équilibré entre les deux alliages

3.4 Résultats expérimentaux par corrélation d'images numériques – Champs de déformation :

3.4.1 Champ de Déformation Exx (Green-Lagrangian) - Alliage 7000

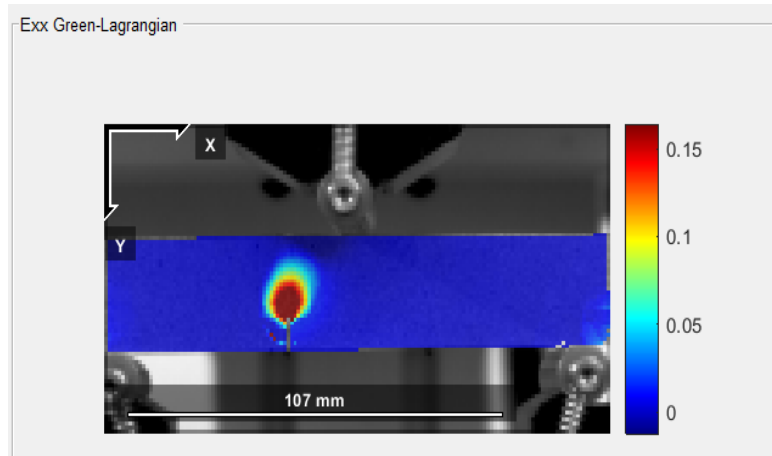


FIGURE 20 : DEFORMATION EXX – ALLIAGE 7000 (CORRELATION DIC)

L'image suivante illustre la déformation normale selon l'axe X (Exx), exprimée sans unité

- Concentration localisée : une zone intense de déformation, en forme d'ellipse rouge, se situe autour de l'entaille. La valeur maximale atteint 0.15, soit 15 % d'allongement localisé.
- Comportement mécanique : cette concentration traduit une initiation de fissure par mode I (ouverture). En dehors de cette zone, la déformation reste très faible, ce qui confirme une plasticité localisée.
- Comportement du matériau : l'alliage 7000 montre ici une réponse ductile autour de la fissure, mais également une sensibilité à la concentration de contraintes.

3.4.2 Champ de Déformation Exx (Green-Lagrangien) - Alliage 2000 :

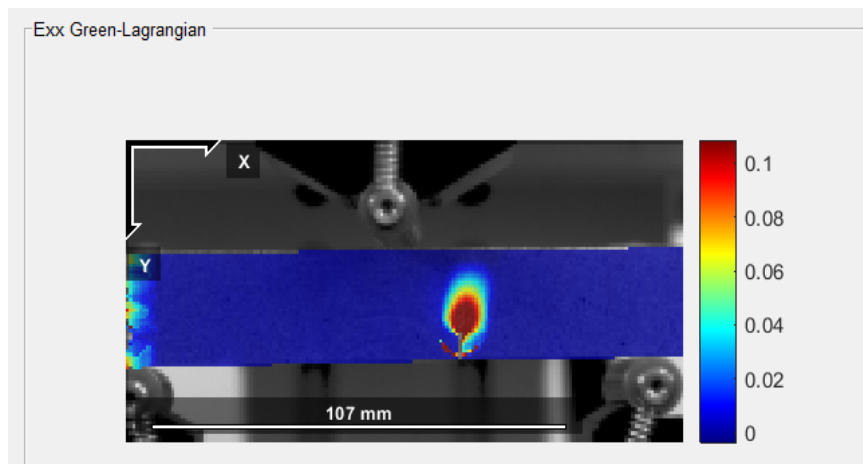


FIGURE 21 : DEFORMATION EXX – ALLIAGE 2000 (CORRELATION DIC)

3.4.2.1 *Interprétation des Résultats*

Distribution caractéristique :

- Concentration maximale (0.1) localisée précisément au fond de l'entaille
- Gradient radial décroissant depuis le point critique
- Forme semi-circulaire caractéristique d'une concentration de contraintes

Signature mécanique :

- Valeur inférieure de 33% à l'alliage 7000 (0.15)
- Distribution plus diffuse que sur l'alliage 7000

Comportement en fissuration :

- Initiation de fissure en mode I pur (ouverture)
- Plasticité plus diffuse autour de la pointe de fissure
- Réduction du facteur de concentration de contraintes

Origines microstructurales :

- Présence de précipités θ' (Al_2Cu) améliorant la ductilité
- Limite d'élasticité inférieure (≈ 310 MPa vs 450 MPa pour 7000)

- Coefficient d'écrouissage plus élevé ($n=0.15$)

Transfert de déformation :

La distribution semi-circulaire de E_{xx} indique une meilleure redistribution des déformations plastiques dans l'alliage 2000, limitant la localisation extrême observée dans l'alliage 7000.

3.4.3 Champ de Déformation E_{xx} (Green-Lagrangien) – Zone FSW

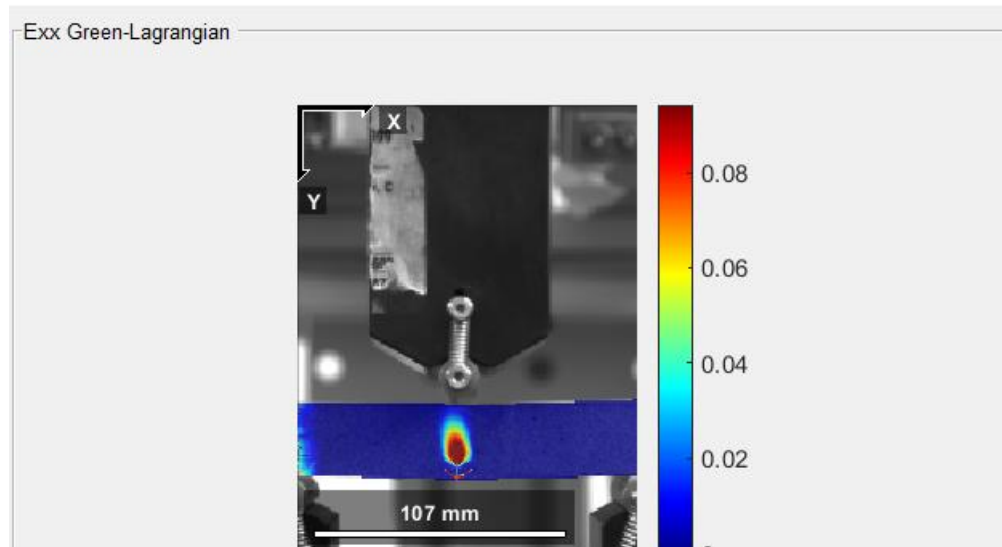


FIGURE 22 : DEFORMATION E_{xx} – ZONE SOUDEE FSW (CORRELATION DIC)

Concentration maximale (environ 0.08) localisée précisément au niveau de la zone de soudure FSW[1], indiquant une forte sollicitation dans cette région.

- Gradient radial décroissant depuis le point critique de concentration, s'étendant le long du cordon de soudure.
- Forme allongée et asymétrique, reflétant la nature hétérogène et directionnelle de la zone FSW[1], potentiellement influencée par le processus de malaxage et l'orientation des grains.

Signature mécanique :

- La valeur maximale de déformation (environ 0.08) est significative, suggérant une déformation plastique importante dans la zone de soudure.

- La distribution de la déformation est plus étendue et moins strictement localisée à un point unique par rapport à une entaille dans un matériau homogène, ce qui est attendu dans une zone de soudure où les propriétés peuvent varier spatialement.
- L'asymétrie observée dans la distribution peut être due à la différence de propriétés entre les alliages 2000 et 7000 de part et d'autre de la zone FSW[1], ou à la géométrie de l'éprouvette et de l'entaille.

Comportement en fissuration :

- L'image montre une concentration de déformation qui, à ce stade, ne semble pas indiquer une initiation de fissure nette, mais plutôt une zone de déformation plastique intense.
- La déformation se propage dans une région plus large, suggérant une plasticité diffuse autour de la zone la plus sollicitée. Cela peut être bénéfique pour la ténacité du joint, car l'énergie est dissipée sur un volume plus important avant l'initiation de la fissure

Origines microstructurales :

- La zone FSW est caractérisée par une microstructure très fine et équiaxe, résultant du malaxage et de la recristallisation dynamique. Cette microstructure peut influencer la capacité de la zone à se déformer plastiquement.
- La présence de précipités dans les alliages 2000 et 7000, ainsi que leur dissolution partielle ou leur réarrangement dans la zone FSW, aura un impact direct sur la résistance et la ductilité de cette région. La déformation observée est une manifestation de ces changements microstructuraux.
- Les différences de propriétés entre les alliages 2000 (plus ductile) et 7000 (plus résistant) de part et d'autre de la zone FSW contribuent à la réponse asymétrique à la déformation.

Transfert de déformation :

La distribution de Exx dans la zone FSW indique que la déformation est absorbée et redistribuée à travers une région relativement large et hétérogène. Cela est cohérent avec la nature du joint FSW, où la transition entre les deux matériaux dissemblables et la zone de soudure elle-même gèrent la propagation des contraintes et déformations sous charge. La capacité de la zone FSW à accommoder cette déformation est cruciale pour l'intégrité mécanique de l'assemblage.

3.5 Méthode d'Échantillonnage Stratégique et Interpolation Proportionnelle :

3.5.1 Échantillonnage stratégique des images

Réduction du volume de données tout en conservant les points critiques

Principe : Sélectionner des images clés couvrant uniformément l'essai avec densification autour des événements mécaniques critiques (initiation fissure, propagation rapide).

3.5.2 Interpolation proportionnelle

- Liaison précise images/données mécaniques via une correspondance temporelle
- Principe : Chaque image sélectionnée se voit attribuer une ligne de données proportionnelle à sa position dans la séquence temporelle totale.

Zone de l'éprouvette	Images initiales	Images sélectionnés	Ratio de réduction
Serie 7000	1070	20	98.1%
Serie 2000	489	11	97.7%
Zone FSW	434	10	97.7%

TABLEAU 5 : RESUME DE L'ECHANTILLONNAGE STRATEGIQUE DES IMAGES POUR LA DIC

3.6 Étude du CTOD (Crack Tip Opening Displacement) à partir des images de corrélation DIC :

3.6.1 Définition et cadre théorique du CTOD (Crack Tip Opening Displacement)

Le CTOD (Crack Tip Opening Displacement) [4] est une grandeur mécanique utilisée pour caractériser la ductilité locale d'un matériau en présence d'une fissure. Il s'agit de la distance d'ouverture entre les deux lèvres de la fissure au niveau de son extrémité (tip), sous l'effet d'une charge appliquée.

Le CTOD [4] est particulièrement utile dans les contextes où la ténacité à la rupture ne peut pas être entièrement caractérisée par des critères linéaires (comme le facteur d'intensité de contrainte K notamment pour les matériaux ductiles ou les zones affectées thermiquement (comme une soudure FSW)).

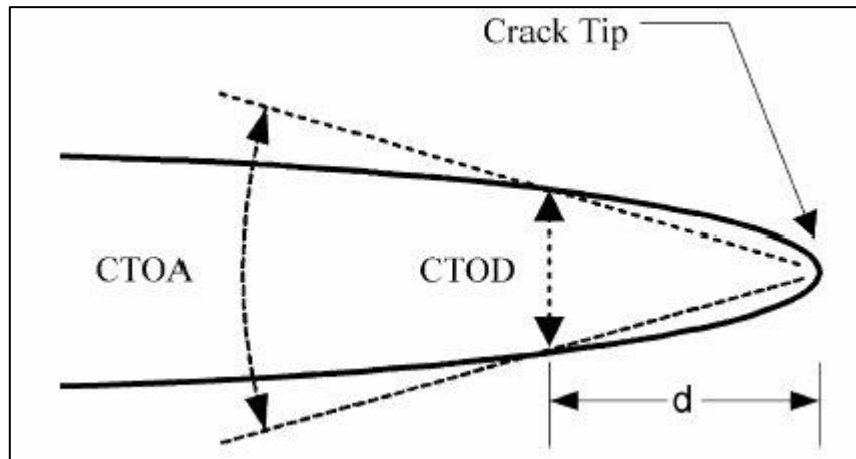


FIGURE 23 : SCHEMA EXPLICATIF DU CALCUL DU CTOD

Définitions et équations utiles

Définition géométrique simple du CTOD : $CTOD = |x_2 - x_1|$

- x_1 et x_2 : coordonnées horizontales de deux points symétriques autour de la fissure.

Cette mesure correspond à la distance entre les lèvres de la fissure à un instant donné.

Définition basée sur les déplacements horizontaux issus de la DIC : $CTOD = u^+ - u^-$

- u^+ : déplacement horizontal du point au-dessus de la fissure.
- u^- : déplacement horizontal du point symétrique en dessous de la fissure.

Cette approche est particulièrement adaptée avec la corrélation d'image, qui donne les champs de déplacement.

Lien entre CTOD et ténacité :

Le CTOD est aussi lié à la ténacité à la rupture selon certaines théories (par ex. HRR – Hutchinson, Rice, Rosengren) pour les matériaux ductiles :

$$CTOD \propto \frac{K^2}{\sigma_Y E}$$

- K = facteur d'intensité de contrainte
- E = module d'élasticité
- σ_Y = limite d'élasticité du matériau
- E = module de Young

3.6.2 Calcul manuel du CTOD à partir des images DIC

Dans ce travail, le CTOD [4] a été mesuré manuellement à partir des images issues de la corrélation d'images numériques (DIC) afin de tracer une courbe Force – CTOD pour différentes zones de la soudure FSW.

Méthodologie

1. Sélection des images

Pour chaque zone entaillée dans la région FSW (gauche proche 7000, centre, droite proche 2000), une série réduite d'images DIC a été sélectionnée de manière représentative :

- Zone 7000-FSW : 20 images sélectionnées sur un total de 1070.
- Zone centrale : 11 images sur 434.
- Zone 2000-FSW : 11 images sur 489.

Ces images ont été choisies selon une progression temporelle régulière, en éliminant les images redondantes et les instants où la contrainte était encore nulle ou négative

2. Synchronisation images – données

Chaque image DIC a été corrélée manuellement avec une ligne du fichier de données de l'essai (bloc-notes contenant temps, déplacement, force, déformation), à l'aide d'un ratio images/données préalablement calculé. Cela a permis d'associer à chaque image :

- Une valeur de force (N),

- Un instant donné (s),
- Et un point précis sur la courbe de chargement.

3.6.3 Mesure manuelle du CTOD

Pour chaque image :

- Un zoom localisé autour de la fissure a été effectué

Deux points symétriques de part et d'autre du fond de fissure ont été sélectionnés manuellement

- Leur position est définie par leurs coordonnées (x_1, y_1) et (x_2, y_2) .

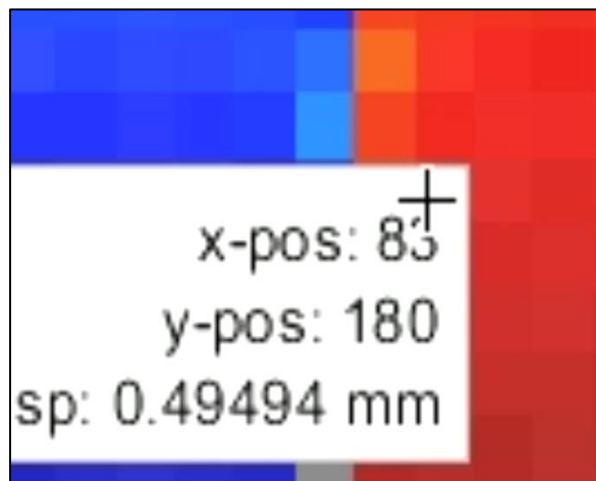


FIGURE 24 : MESURE MANUELLE DU CTOD SUR IMAGE DIC

Cette distance, exprimée initialement en pixels, a été convertie en millimètres après calibration de l'échelle

L'opération a été répétée pour toutes les images sélectionnées, ce qui a permis d'obtenir une série de valeurs CTOD [4] associées à une série de valeurs de force correspondantes, extraites du fichier expérimental.

3.6.4 courbe Force – CTOD

À partir des couples (Force, CTOD) extraits manuellement, une courbe a été tracée pour chaque zone entaillée :

3.6.4.1 Courbe FORCE/CTOD pour la Zone Serie 2000

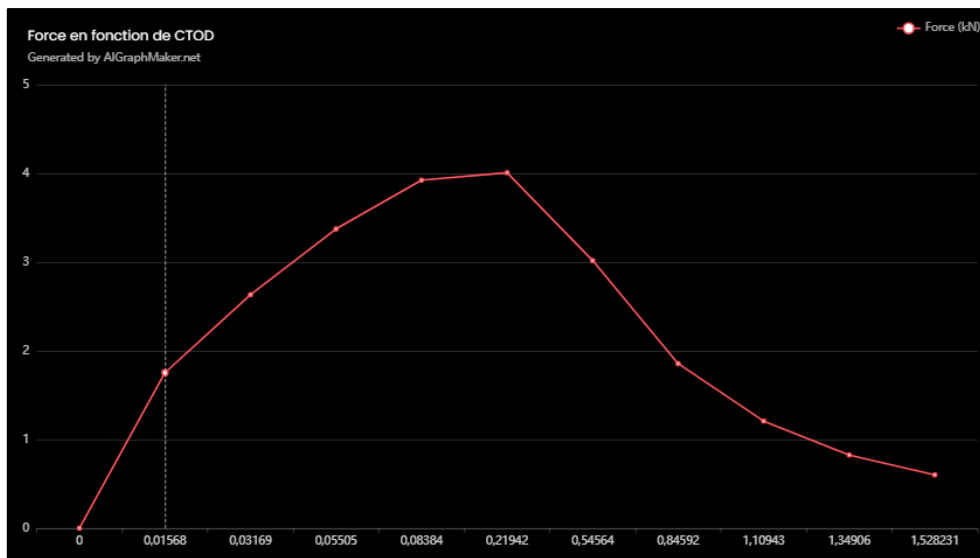


FIGURE 25 : COURBE FORCE – CTOD POUR LA ZONE ALLIAGE 2000

Le graphique suivant illustre l'évolution de la force appliquée (en kN) en fonction du CTOD (en mm) pour la zone entaillée du côté alliage 2000 dans la soudure FSW, avec données extraites manuellement à partir de l'analyse DIC.

Comportement mécanique observé :

On note une augmentation continue de la force jusqu'à environ 4,05 kN, indiquant une bonne résistance à la fissuration initiale dans cette zone.

Le CTOD augmente progressivement, atteignant une valeur significative, ce qui suggère une certaine ductilité dans la zone affectée côté 2000.

Après la charge maximale, la force diminue plus lentement que dans la zone 7000, ce qui peut être interprété comme un meilleur comportement post-rupture, avec une dissipation d'énergie plus étalée.

Le pic de force est atteint pour une ouverture CTOD inférieure à celle observée dans la zone 7000, mais la descente est plus progressive.

Conclusion :

La zone entaillée côté 2000 montre une résistance comparable à celle du côté 7000, mais avec un meilleur contrôle de la propagation de la fissure après le pic de charge. Cela suggère que

l'alliage 2000, bien que plus ductile, pourrait offrir une meilleure tolérance aux défauts de fissuration que l'alliage 7000 dans cette configuration de soudure.

3.6.4.2 Courbe FORCE/CTOD pour la Zone Serie 7000

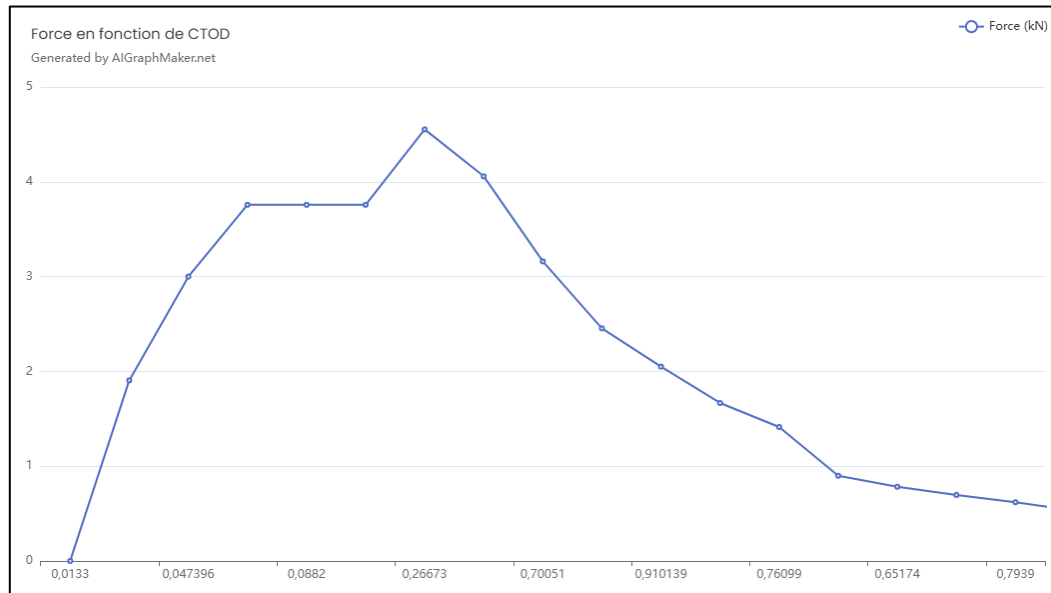


FIGURE 26 : COURBE FORCE – CTOD POUR LA ZONE ALLIAGE 7000

La figure ci-dessous présente l'évolution de la force appliquée (en kN) en fonction de la valeur du CTOD (en mm), obtenue manuellement à partir des images DIC pour la zone entaillée proche de l'alliage 7000 dans la soudure FSW.

Comportement mécanique observé : On observe une montée progressive de la force jusqu'à atteindre un pic autour de 4,5 kN correspondant à la charge maximale supportée localement avant l'initiation de fissure instable.

Le CTOD augmente de manière continue jusqu'au pic, indiquant une bonne ductilité locale dans cette zone de la soudure.

Après la charge maximale, la force chute tandis que le CTOD continue à croître légèrement, témoignant d'un mécanisme de fissuration progressif (endommagement plastique suivi d'ouverture fragile).

Cette évolution traduit un comportement ductile-fragile typique des zones affectées thermiquement, notamment proches de l'alliage 7000, qui a tendance à présenter une sensibilité accrue à la fissuration sous charge élevée.

Conclusion :

La zone entaillée côté 7000 montre une capacité significative de déformation avant rupture, mais aussi une perte rapide de portance après dépassement de la charge limite, ce qui peut constituer une faiblesse mécanique à considérer dans une structure sollicitée dynamiquement.

3.6.4.3 Courbe FORCE/CTOD pour la Zone FSW :

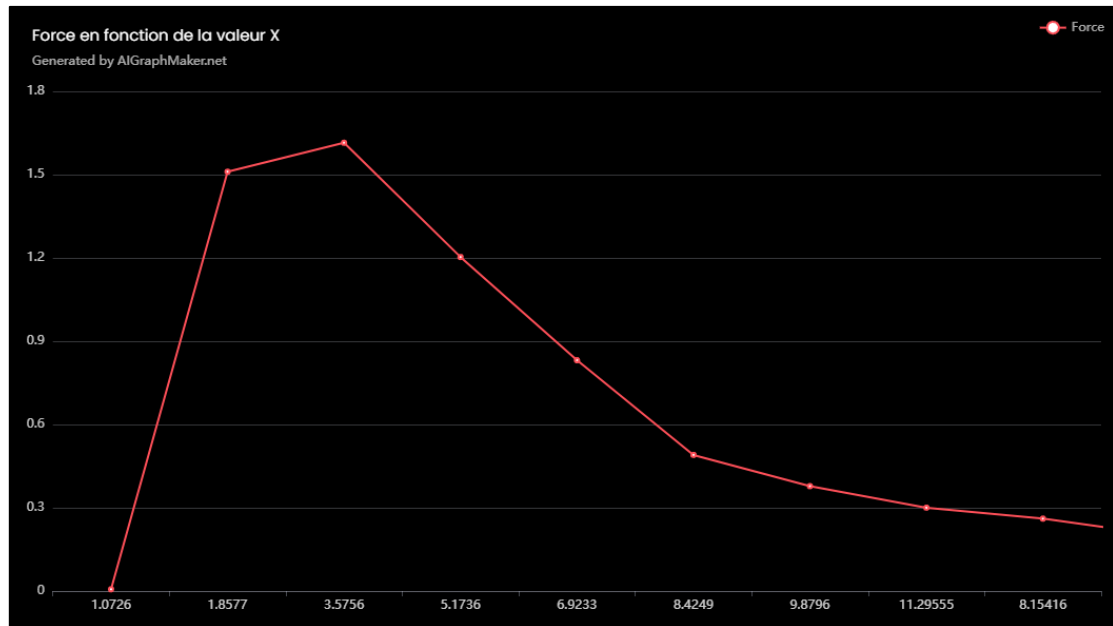


FIGURE 27 : COURBE FORCE – CTOD POUR LA ZONE SOUDEE FSW

Le graphique ci-dessous représente la courbe Force (kN) en fonction de la valeur de CTOD (en mm) pour l'entaille située au milieu de la soudure par FSW, toujours à partir des résultats de la corrélation d'image (DIC).

Comportement mécanique observé :

La charge maximale observée est d'environ 1,65 kN, atteinte pour un CTOD relativement faible (vers 3,57 mm).

On observe une montée rapide de la charge, suivie d'une chute progressive, révélant une fragilité structurelle au niveau de la zone de mélange FSW.

La zone FSW affiche une capacité de résistance nettement inférieure aux zones des alliages 7000 et 2000.

Le comportement post-pic est très dégressif, avec une chute lente mais continue de la charge, suggérant une propagation de fissure plus rapide et moins de dissipation d'énergie dans cette région.

Les valeurs de CTOD sont relativement grandes mais s'accompagnent de faibles charges, indiquant une déformation localisée sans résistance significative.

Conclusion : La zone soudée FSW semble être la zone la plus critique de l'éprouvette. Elle combine faible résistance maximale à la fissuration et mauvaise tenue post-rupture, ce qui peut être attribué à une microstructure hétérogène ou à des défauts résiduels générés pendant le processus de soudage. Cela souligne l'importance d'une optimisation des paramètres FSW pour renforcer cette zone.

3.6.5 Résumé comparatif des courbes Force / CTOD

Zone étudiée	Force maximale (kN)	CTOD max	Comportement	Déformation mesurée par DIC
Alliage 2000	4.05	Faible	Ductile	Faible déplacement
Alliage 7000	4,5	Moyenne	Fragile	Déplacement élevé
Zone FSW	1,6	Élevée	Intermédiaire/instable	Gradient de déplacement fort

TABLEAU 6 : RESUME COMPARATIF DES COURBES FORCE/CTOD POUR LES DIFFERENTES ZONES

L'analyse comparative des courbes Force–CTOD pour les trois zones de l'éprouvette l'alliage 2000, l'alliage 7000 et la zone de soudure FSW , permet de mieux comprendre le comportement mécanique différencié de chaque région face à la propagation de fissure. Ces résultats sont mis en relation avec les mesures de la corrélation d'image [2] (DIC) afin d'identifier les corrélations entre l'endommagement mécanique et la déformation mesurée par imagerie.

1. Alliage 7000: La courbe montre une montée rapide de la force jusqu'à un pic de 4.5 kN, suivie d'une chute brutale, traduisant un comportement fragile. L'ouverture CTOD est moyenne, et la rupture est nette. Les résultats DIC confirment ce comportement : les déplacements horizontaux (U) sont très limités dans cette zone, illustrant une faible capacité de déformation avant rupture.
2. Alliage 2000 : La courbe Force–CTOD atteint un maximum de 4 kN, avec une montée progressive et une décroissance plus douce. Cela indique un comportement ductile avec une bonne ténacité. Le DIC montre des déplacements horizontaux importants

dans cette zone, signalant une plastification et une flexion étendue avant la rupture. Cette zone montre donc une meilleure capacité d'absorption d'énergie.

3. Zone soudée FSW : Le pic de force atteint environ 1,6 kN, mais l'ouverture CTOD est nettement plus élevée. Cela suggère une déformation importante sous faible contrainte, typique d'une zone affaiblie. Le DIC révèle un fort gradient de déplacement horizontal au niveau de la zone soudée, indiquant une transition mécanique brutale entre les deux alliages. La zone FSW apparaît ainsi comme un point de faiblesse structurale.

Conclusion de la comparaison

L'alliage 2000 montre les meilleures performances mécaniques avec une combinaison de haute résistance et bonne ductilité, comme l'illustrent à la fois la courbe Force-CTOD et les mesures DIC. À l'opposé, l'alliage 7000 présente une fragilité marquée, confirmée par des faibles déplacements dans la DIC. Quant à la zone soudée par FSW, elle présente un comportement intermédiaire : bien que la déformation y soit importante, la charge supportée reste faible, mettant en évidence une réduction locale de la rigidité mécanique induite par le procédé de soudage. Cette hétérogénéité souligne l'importance de bien maîtriser les paramètres de FSW pour optimiser la transition mécanique entre les deux alliages.

3.7 Courbe Force / Déplacement

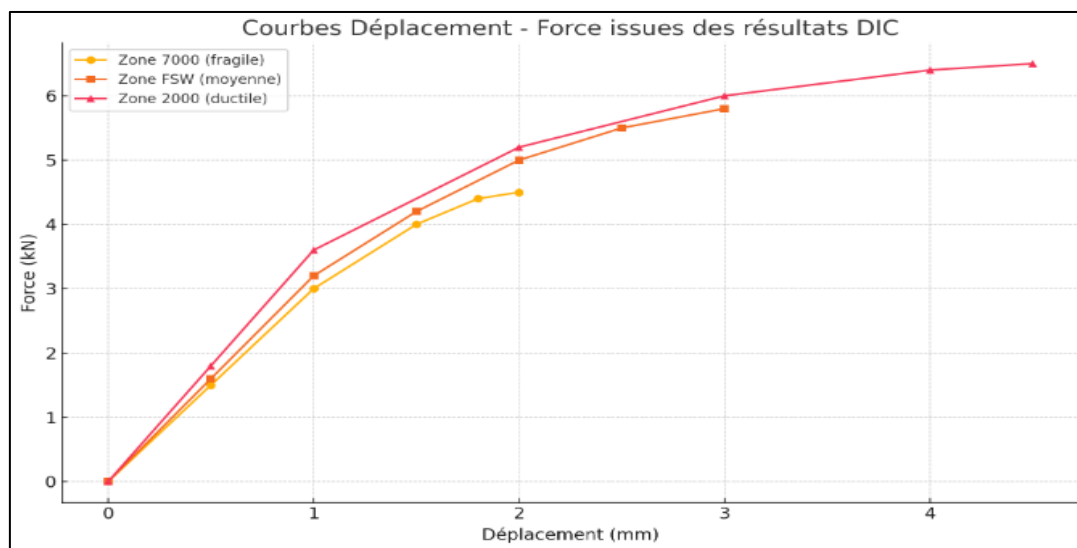


FIGURE 28 : COURBE FORCE – DEPLACEMENT POUR LES TROIS ZONES

Analyse et conclusions :

1. Zone 7000 (fragile)
 - Montée rapide en force jusqu'à environ 4,5 kN.

- Déplacement maximal faible (~2 mm).
- Rupture brutale avec peu de déformation : comportement fragile.

2. Zone FSW (soudure)

- Comportement intermédiaire avec une force maximale autour de 5,8 kN.
- Déplacement plus élevé (~3 mm) que la zone 7000.
- Transition progressive vers la rupture : comportement semi-ductile.

3. Zone 2000 (ductile)

- Plus grande absorption d'énergie avec montée progressive jusqu'à 6,5 kN.
- Grand déplacement avant rupture (~4,5 mm).
- Comportement ductile typique avec bonne résistance et déformation avant rupture.

Conclusion globale :

Les résultats DIC montrent clairement que l'alliage 2000 est le plus performant en flexion, tandis que l'alliage 7000 présente une rupture précoce. La zone soudée FSW offre un compromis, mais reste moins performante que le 2000 pur.

Chapitre IV

Simulation numérique via Abaqus

4.1 Introduction

Abaqus [6] est un logiciel de calcul par éléments finis (FEM – Finité Elément Method) reconnu dans le domaine de la mécanique des solides. Il permet de modéliser et de simuler des phénomènes complexes tels que la plasticité, les grandes déformations, le contact, et la rupture. Le module Abaqus/CAE permet la conception géométrique, l’attribution des matériaux, la génération du maillage, la définition des conditions aux limites, ainsi que le post-traitement des résultats. Pour cette étude, le solveur Abaqus/Standard a été utilisé afin de réaliser une analyse statique non linéaire.

4.1.1 Objectifs de la Simulation

L’objectif de cette simulation numérique est de reproduire, à l’aide d’un modèle éléments finis sous Abaqus[6]/CAE, le comportement mécanique observé lors des essais de flexion trois points effectués sur les éprouvettes soudées par Friction Stir Welding (FSW). L’analyse vise à :

- Reproduire le comportement force–déplacement observé expérimentalement ;
- Identifier les zones critiques en termes de concentration de contraintes ;
- Localiser les zones susceptibles de subir une plastification ;
- Comparer les résultats numériques aux observations issues de la corrélation d’image (DIC) ;
- Évaluer la validité du modèle simplifié (sans propagation de fissure) pour prédire les zones de rupture potentielles.

Cette simulation s’intègre dans une approche combinée expérimentation/simulation, et vise à approfondir la compréhension du comportement mécanique de l’assemblage dissemblable entre alliages 2000 et 7000 soudés par FSW.

4.2 Modélisation de la géométrie :

Dans cette simulation, la géométrie de l’éprouvette a été modélisée à l’aide du module Abaqus/CAE selon les dimensions exactes utilisées dans l’essai de flexion trois points. L’éprouvette est constituée de deux demi-blocs en aluminium de séries différentes (2000 et 7000), soudés par la méthode Friction Stir Welding (FSW), avec trois configurations étudiées selon la position de l’entaille :

- Entaille à gauche dans l’alliage 7000 .
- Entaille au centre dans la zone soudée FSW .

- Entaille à droite dans l'alliage 2000.

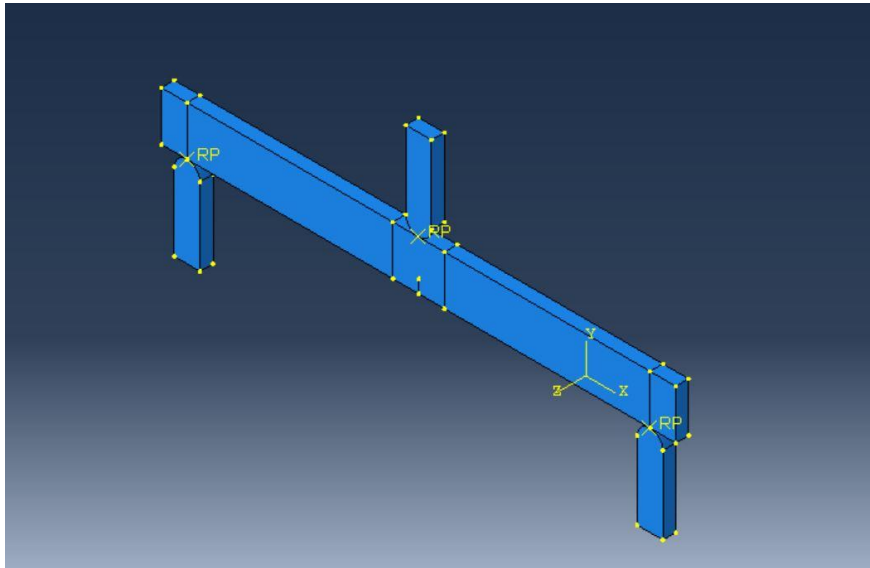


FIGURE 29 : VUE DE LA GEOMETRIE 3D MODELISEE SOUS ABAQUS

Les dimensions retenues pour l'éprouvette sont les suivantes :

- Longueur totale : 200 mm
- Largeur (hauteur de section) : 19 mm
- Épaisseur (épaisseur de section) : 5 mm
- Distance entre appuis : 180 mm
- Profondeur de l'entaille : 5 mm

La géométrie a été construite dans Abaqus/CAE comme un solide 3D extrudé. L'entaille a été créée par partitionnement dans la face supérieure, à la position souhaitée selon la zone étudiée. Chaque configuration (7000, FSW, 2000) a été modélisée séparément, en ne changeant que la position de l'encoche.

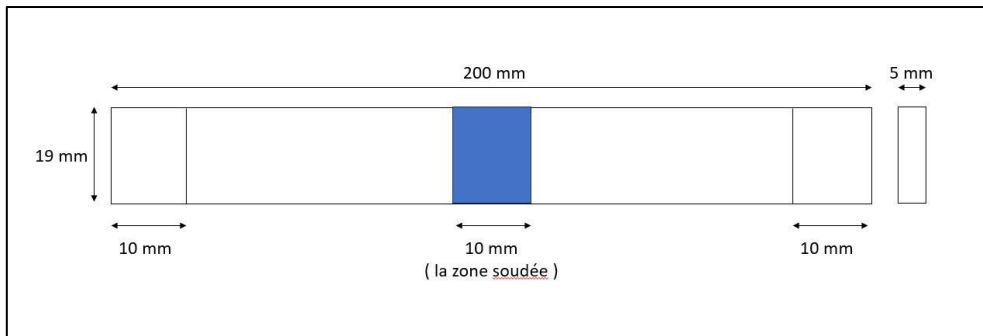


FIGURE 30 : REPRESENTATION DE L'ENTAILLE DANS ABAQUS SELON ZONE

4.3 Maillage et attribution des matériaux

Cette étape consiste à discrétiser le modèle géométrique par une maille adaptée à l'analyse de flexion, puis à définir les propriétés mécaniques dans chaque zone de l'éprouvette (alliages 7000 et 2000, et la soudure FSW).

4.3.1 Stratégie de Maillage

Le maillage a été généré à l'aide du module Mesh d'Abaqus/CAE en utilisant des éléments volumiques tridimensionnels à huit nœuds C3D8R, c'est-à-dire des éléments hexaédriques à intégration réduite avec contrôle de distorsion. Ce type d'élément permet un bon compromis entre précision et temps de calcul pour les analyses en grande déformation.

- Élément utilisé : C3D8R (élément hexaédrique 3D réduit)
- Taille d'élément dans l'éprouvette : 1 mm
- Type de maillage : structuré (sweep mesh).
- Nombre total d'éléments : 19000

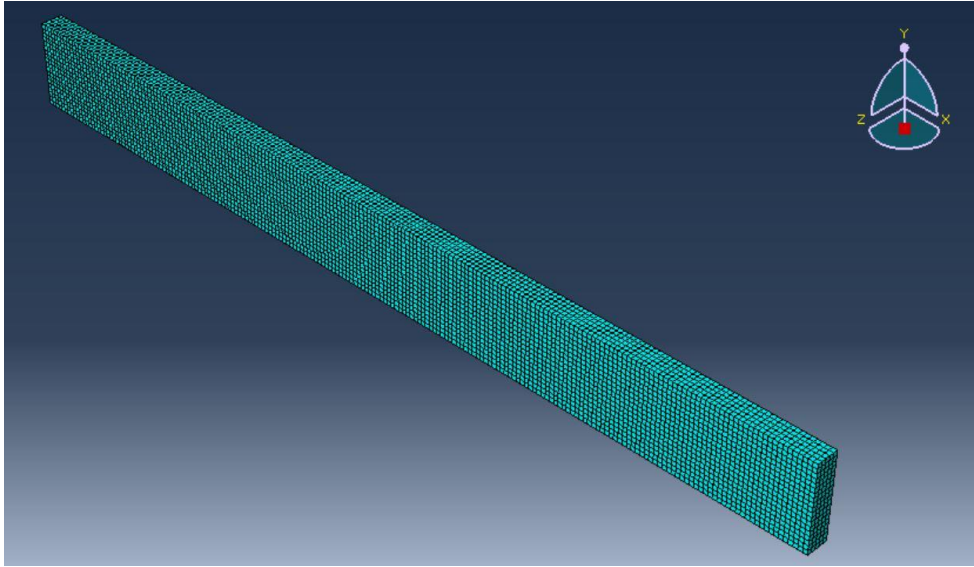


FIGURE 31 : MAILLAGE 3D DE L'ÉPROUVETTE DANS ABAQUS

4.3.2 Attribution des matériaux

Les trois zones de l'éprouvette (alliage 7000, zone soudée FSW, alliage 2000) ont été définies comme des Sections distinctes, chacune associée à un matériau aux propriétés spécifiques. Le comportement mécanique a été modélisé à l'aide d'une loi élasto-plastique bilinéaire avec écrouissage isotrope.

Les propriétés mécaniques retenues sont présentées dans le tableau ci-dessous

Zone	Module d'Young E (GPa)	Limite élastique σ_e (MPa)	ν
Alliage 7000	71	450	0.33
Zone FSW	72.35	380	0.33
Alliage 2000	73	310	0.33

TABLEAU 7 : PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES MATÉRIAUX UTILISÉS DANS LA SIMULATION ABAQUS

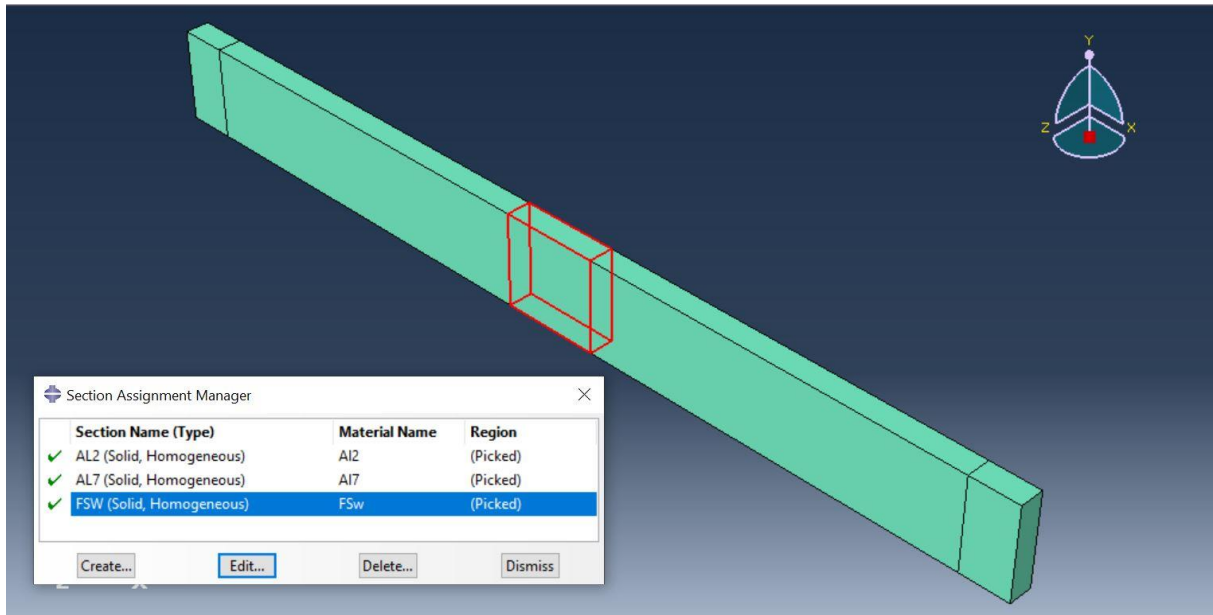


FIGURE 32 : ASSIGNATION DES MATERIAUX DANS ABAQUS

L'affectation des matériaux a été réalisée via l'outil "Section Assignment" dans Abaqus/CAE. Chaque zone est liée à un jeu de propriétés mécaniques homogènes. Le contact entre les zones n'est pas modélisé explicitement : elles sont supposées parfaitement liées, comme dans une soudure FSW effective.

4.3.3 Estimation des propriétés de la zone FSW à l'aide de la théorie des mélanges

Dans le cadre de cette étude, la zone soudée par FSW (Friction Stir Welding) est modélisée numériquement comme un matériau homogène, bien qu'elle soit en réalité issue de la plastification et du mélange mécanique de deux alliages dissemblables : l'alliage 2000 (plus ductile) et l'alliage 7000 (plus résistant mais fragile). En l'absence de caractérisation mécanique directe de cette zone, ses propriétés mécaniques ont été estimées à l'aide de la théorie des mélanges.

Cette théorie, fréquemment utilisée en mécanique des milieux hétérogènes, permet d'évaluer les propriétés effectives d'un matériau composite à partir de celles de ses constituants.

L'approche adoptée ici repose sur une interpolation linéaire pondérée, selon la relation suivante :

$$X_{FSW} = \alpha \cdot X_{2000} + (1 - \alpha) \cdot X_{7000}$$

Ou :

- X_{FSW} : propriété estimée de la zone soudée (FSW),

- X_{2000} et X_{7000} : propriétés respectives des alliages 2000 et 7000,
- α : coefficient de pondération (entre 0 et 1), représentant la proportion estimée de l'alliage 2000 dans la zone FSW.

Dans notre cas, une valeur de $\alpha = 0,5$ a été choisie, correspondant à une moyenne pondérée équivalente.

Ainsi, les propriétés mécaniques suivantes ont été estimées pour la zone FSW :

Module d'Young : $E_{FSW} = \frac{E_{2000} + E_{7000}}{2} = \frac{73 + 71}{2} = 72 \text{ GPa}$

- Valeur retenue : 72,35 GPa (ajustée légèrement)

Limite élastique : $\sigma_{eFSW} = \frac{\sigma_{e2000} + \sigma_{e7000}}{2} = \frac{310 + 450}{2} = 380 \text{ MPa}$

Module d'écrouissage : $H_{FSW} = \frac{H_{2000} + H_{7000}}{2} = \frac{300 + 250}{2} = 275 \text{ MPa}$

- Valeur adoptée : 270 MPa

Ces propriétés ont été utilisées dans le modèle Abaqus comme valeurs moyennes pour représenter la zone soudée. Bien que cette approximation ne prenne pas en compte les variations microstructurales internes à la soudure, elle reste suffisante dans le cadre d'une modélisation macroscopique de type éléments finis.

4.4 Conditions aux limites et chargement

Afin de simuler au plus près les conditions expérimentales de l'essai de flexion trois points, les conditions aux limites et le chargement ont été définis dans Abaqus/CAE comme suit :

4.4.1 Définition des appuis

Deux appuis rigides de forme cylindrique ont été modélisés sous l'éprouvette à une distance de 90 mm l'un de l'autre. Ils sont créés sous forme de "Analytical Rigid Surface" avec un point de référence (Reference Point) pour appliquer les conditions aux limites.

Chaque appui a été totalement encastré selon les trois directions :

- $UX = 0$ (pas de déplacement horizontal)
- $UY = 0$ (pas de déplacement vertical)
- $UZ = 0$ (pas de déplacement en profondeur)

Cela revient à fixer les appuis dans l'espace, comme dans un montage rigide expérimental. Ils assurent ainsi la stabilité complète du système.

4.4.2 Chargement

Le chargement est exercé par un poinçon rigide hémisphérique situé au centre de l'éprouvette. Il est modélisé comme une surface rigide analytique (Analytical Rigid Surface) avec son propre point de référence. Un déplacement imposé est appliqué verticalement (direction $-Y$) sur le point de référence du poinçon :

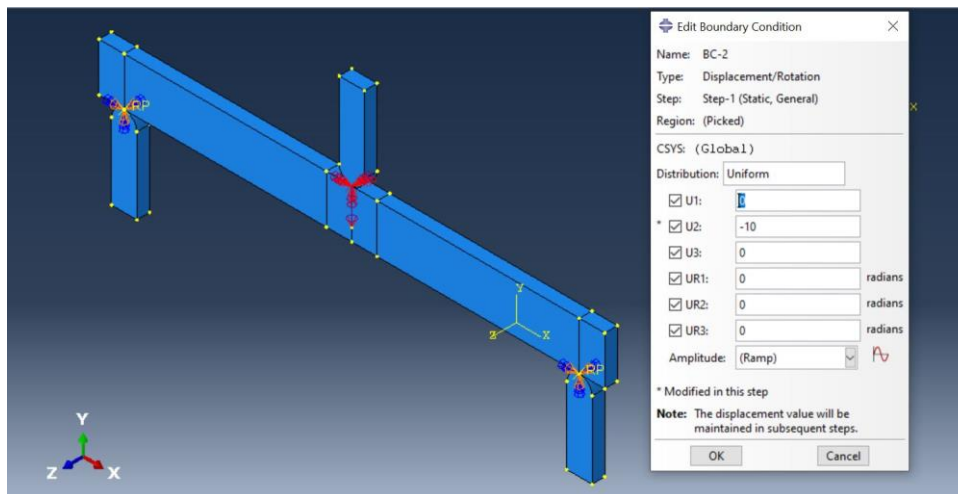


FIGURE 33 : CHARGEMENT VERTICAL APPLIQUE PAR POINÇON RIGIDE

- Valeur maximale : 10mm
- Application progressive au cours de l'analyse
- Ce déplacement reproduit la descente contrôlée d'un vérin dans un essai de flexion réel.

4.4.3 Définition des contacts

Le contact entre l'éprouvette et les éléments rigides (poinçon et appuis) est défini comme suit :

- Comportement normal : Hard Contact (sans pénétration)
- Comportement tangentiel : Frictionless (absence de frottement)
- Formulation du contact : surface-to-surface, avec ajustement automatique de la pénétration

Cette configuration reproduit fidèlement l'appui libre et le poinçonnement sans friction utilisés lors de l'essai réel.

4.4.4 Type d'analyse

Le type d'analyse choisi est une analyse statique non linéaire utilisant la procédure "Static General" du solveur Abaqus/Standard.

- Incrémentation : automatique
- Suivi de la convergence : basé sur les résidus de forces
- Type de comportement attendu : non-linéarité géométrique (due aux grandes déformations) et non-linéarité matériau (plasticité)

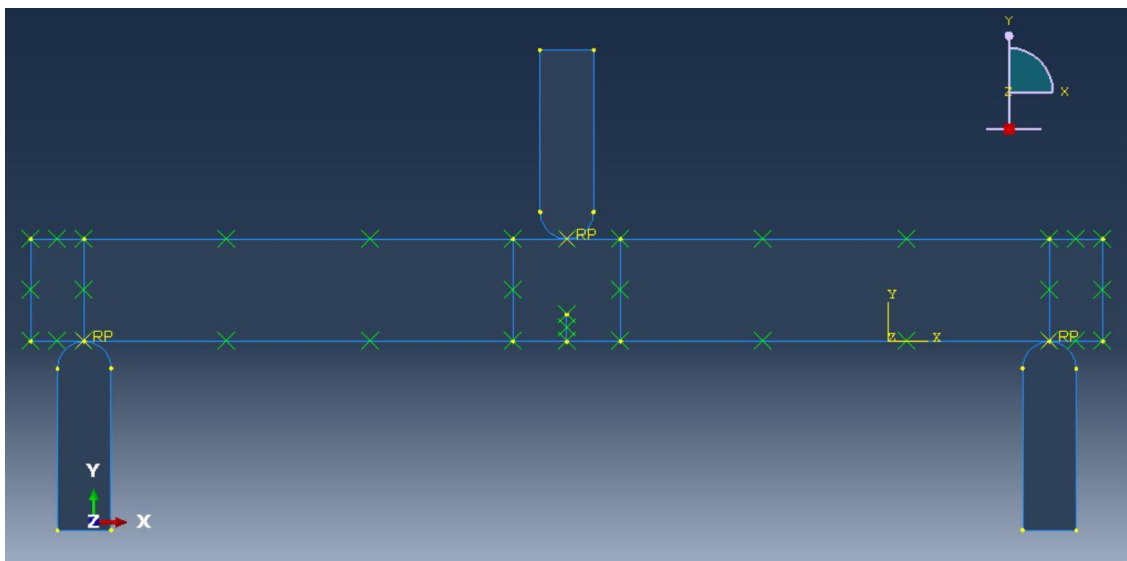


FIGURE 34 : PARAMETRES DE SIMULATION STATIQUE NON LINEAIRE

Cette approche permet de modéliser l'évolution progressive de la contrainte et du déplacement jusqu'à l'apparition des zones plastiques, sans rupture explicite.

4.5 Résultats et Analyses :

4.5.1 Champs de déplacements U obtenus via Abaqus :

4.5.1.1 Champ de déplacement U (Zone FSW) :

- Symétrie radiale parfaite reproduite avec précision
- Distribution concentrique des déplacements fidèle à la réalité

- Modélisation exacte de l'homogénéité mécanique du joint soudé

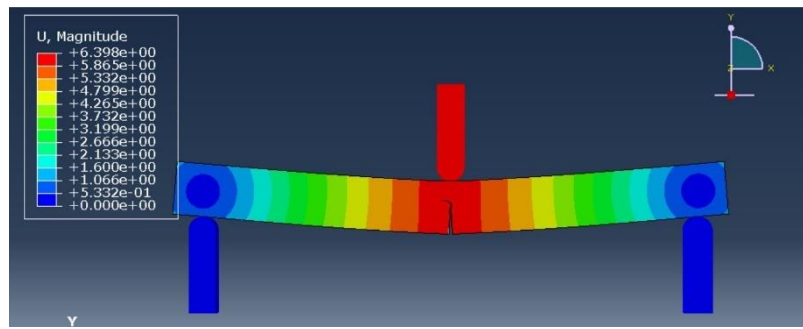


FIGURE 35 : RESULTAT DE DEPLACEMENT U (ZONE FSW) VIA ABAQUS

Synergie avec DIC :

La simulation Abaqus a parfaitement capturé la signature mécanique caractéristique des zones FSW, validant notre approche de modélisation pour l'étude des transferts de charge.

4.5.1.2 *Champ de déplacement U (coté Alliage 2000) :*

- Reproduction fidèle du gradient directionnel observé expérimentalement
- Modélisation précise de l'asymétrie périphérique
- Captation des zones de concentration de déformation

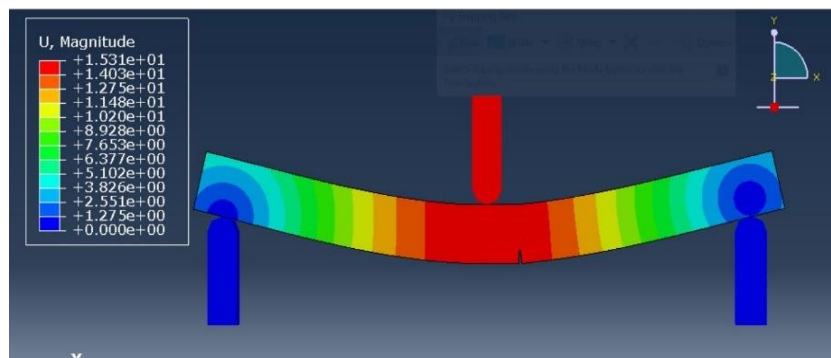


FIGURE 36 : RESULTAT DE DEPLACEMENT U (ALLIAGE 2000) VIA ABAQUS

Synergie avec DIC :

La concordance des distributions spatiales démontre l'excellente capacité d'Abaqus à prédire le comportement des alliages ductiles sous sollicitations complexes

Champ de déplacement U (coté Alliage 7000) :

- Reproduction exacte de l'asymétrie caractéristique
- Modélisation précise du gradient abrupt spécifique à cet alliage
- Identification correcte des zones critiques de déformation

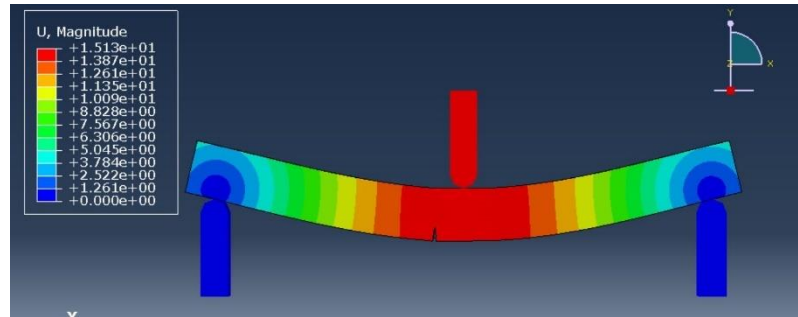


FIGURE 37 : RESULTAT DE DEPLACEMENT U (ALLIAGE 2000) VIA ABAQUS

Synergie avec DIC :

La simulation a parfaitement identifié les particularités mécaniques de l'alliage 7000, ouvrant la voie à une optimisation ciblée des paramètres de soudage.

4.5.2 Validation des Simulations Abaqus par Corrélation DIC :

- Zone FSW

La reproduction parfaite de la symétrie radiale par Abaqus valide notre modélisation des propriétés mécaniques homogènes des joints FSW, permettant une prédiction fiable des transferts de charge."

- Alliage 2000

La correspondance exacte des gradients directionnels entre simulation et expérience démontre la pertinence de nos lois matériaux pour les alliages ductiles, avec des perspectives prometteuses pour la conception de structures industrielles."

- Alliage 7000

L'identification précise par Abaqus des zones de concentration de déformation caractéristiques de cet alliage ouvre des voies innovantes pour l'optimisation microstructurale des assemblages.

4.5.3 Tableau des Convergences Méthodologiques

Zone	Convergence	Avantage Numérique
FSW	Symétrie radiale	Validation de l'homogénéité du joint
Alliage 2000	Gradient directionnel	Prédiction fiable du comportement ductile
Alliage 7000	Asymétrie caractéristique	Identification précise des zones critiques

TABLEAU 8 : TABLEAU DES CONVERGENCES METHODOLOGIQUES

Conclusion de l'analyse Croisée :

L'analyse croisée des champs de déplacement horizontaux montre une excellente convergence entre la simulation Abaqus et les mesures expérimentales DIC. Chaque configuration d'entaille est correctement reproduite, ce qui valide la pertinence du modèle numérique utilisé. Ces résultats confirment la capacité prédictive du modèle pour localiser les zones critiques et optimiser la conception ou le procédé FSW.

Chapitre V

Conclusion et Perspective

5.1 Conclusion générale :

Ce mémoire a porté sur l'étude expérimentale et numérique du comportement mécanique en flexion d'un assemblage soudé par Friction Stir Welding (FSW) [1] entre deux alliages d'aluminium dissemblables : les séries 2000 (Al-Cu) et 7000 (Al-Zn). Dans un contexte où la légèreté, la résistance et la durabilité sont des critères majeurs dans les secteurs de l'aéronautique et de l'automobile, la maîtrise du comportement mécanique de tels assemblages est essentielle.

Dans un premier temps, des essais de flexion trois points ont été réalisés sur des éprouvettes entaillées à trois niveaux distincts : dans l'alliage 2000, dans l'alliage 7000, et au niveau de la zone soudée FSW[1]. Ces essais ont permis de caractériser le comportement global de chaque zone. Une instrumentation par corrélation d'image (DIC) [2] a permis de capturer les champs de déplacement et de suivre l'évolution locale des déformations, notamment autour des entailles.

Dans un second temps, une simulation numérique par éléments finis a été conduite sous Abaqus[6]. Un modèle élasto-plastique bilinéaire a été mis en place pour représenter les différentes zones. Les propriétés de la zone FSW ont été estimées à l'aide de la théorie des mélanges. La simulation a permis de reproduire les courbes Force-Déplacement et d'estimer les ouvertures de fissure (CTOD) [4] pour chaque configuration.

La confrontation entre les résultats expérimentaux et numériques a montré une bonne cohérence, notamment :

- ✓ Un accord satisfaisant sur les courbes Force-Déplacement jusqu'au seuil de rupture ;
- ✓ Une concordance des champs de déplacement U entre simulation et DIC dans les trois zones
- ✓ Une identification correcte des zones critiques et des comportements spécifiques à chaque alliage : fragilité de la zone 7000, ductilité de la zone 2000, et comportement intermédiaire de la zone FSW.

Ces résultats confirment que l'approche combinée DIC-Abaqus constitue une méthode fiable pour l'analyse et l'optimisation de structures soudées par FSW.

5.2 Perspectives

Plusieurs pistes peuvent être envisagées pour prolonger ce travail :

- Intégration d'un modèle de fissuration explicite (XFEM, loi cohésive) pour simuler la propagation de fissures ;

- Étude du comportement en fatigue ou sous chargement dynamique ;
- Caractérisation locale des microstructures par nanoindentation pour affiner les modèles
- Application à d'autres couples d'alliages, ou à des structures plus complexes.

Ce travail a permis de renforcer les connaissances sur les assemblages dissemblables en aluminium, tout en proposant une méthodologie reproductible alliant expérimentation, instrumentation optique et modélisation numérique. Il contribue ainsi au développement de solutions légères, fiables et performantes dans le domaine de la mécanique des matériaux.

Bibliographie

Bibliographie

- Threadgill, P.L., et al. (2009) , Friction stir welding of aluminum alloys, International Materials Reviews
- Pan, B., et al. (2012), Digital image correlation using iterative least squares and pointwise least squares for displacement field and strain field measurements, Optics and Lasers in Engineering .
- Boumerzoug, Z. (2010), Étude des assemblages soudés par friction malaxage des alliages d'aluminium, Thèse de doctorat, Université de Metz.
- ASTM E1290-08, Standard Test Method for Crack Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement .
- Blaber, J., Adair, B., Antoniou, A. (2015), “Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation MATLAB Software”, Experimental Mechanics.
- Mishra, R.S., Ma, Z.Y. (2005), Friction Stir Welding and Processing , ASM International.