



République Algérienne Démocratique et Populaire



الجمهورية الجزائرية الشعبية الديمقراطية

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Université de Blida 1 Saad Dahleb

جامعة سعد دحلب البلدية 1

Instituts d'Aéronautique et des Etudes Spatiales IAES

معهد الطيران و الدراسات الفضائية

Département de construction aérienne

Projet de fin cycle

En vue l'obtention du diplôme de master en aéronautique

Option Structure d'avion

## Thème

**Caractérisation des contraintes résiduelles des structures aéronautiques soudées par FSW en utilisant la méthode des ultrasons**

**Encadré par :**

**Mm .Sari Elkahina**

**Co-encadré par :**

**Mr. Mimouni Oussema**

**Mr .Halimi Rafik**

**Rédigé par :**

**Yahla Ikram**

**Guerri Yanis**

## Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes parents qui m'ont apporté un soutien inconditionnel, merci de me soutenir et m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs. Merci pour le soutien financier et moral, si je suis ici aujourd'hui c'est grâce à vous,

A mes frères, mes sœurs, et toute ma famille qui sont une source de joie et de bonheur, qui m'avez toujours soutenu et encouragé durant mes années d'études,

A mes très chères meilleures amies,

Rayane, mon complice, c'est un vrai bonheur de t'avoir dans ma vie, qu'importe ce que je fais, ce que je traverse, tu es toujours présente à mes côtés, notre rencontre inattendue m'a permis de découvrir qu'il est possible, d'un seul regard, de se reconnaître et de se comprendre. J'espère que dans trente ans, nous pourrons faire un bilan de notre amitié de toute une vie. Merci pour votre soutien et ton aide dans ce travail.

Chaima, pour ton amour sincère, avec toi j'ai réellement passé de très bons moments. Mon respect le plus profond et ma gratitude la plus sincère pour ton aide, ton soutien moral, et toutes tes qualités humaines.

Noussaiba, ma chère amie qui est toujours là pour moi, avec toi je ne me sens jamais triste, t'es un bonheur, merci pour ton soutien durant mes années d'études.

A mes très chères meilleures amies Faiza, Asma,

A mes camarades de promotion, je les remercie pour les années passées ensemble, dans les meilleurs moments comme dans les pires,

A mon binôme Yanis.

Yahla Ikram

## Dédicace

Je dédie ce travail avant tout à mon père qui m'a soutenu corps et âme durant tout mon parcours universitaire.

à ma mere qui a toujours veillé à ce que je ne manque de rien et à mon grand frère et son soutien au quotidien.

Je tiens aussi à remercier ma fiancée pour ses encouragements lors de mes moments de faiblesse.

À mes amis qui ont toujours été à mes côtés dans la cité universitaire pendant ces cinq longues années Zaki, Dhia, Zinou, Mohammed lamine, kamel, Mohamed Salah, Hakim, Ammar, Fadi, Abdelkader les autres se reconnaîtront

Je tiens aussi à remercier mon binôme de toujours depuis notre première année Ikram, sans qui ce travail ne serait pas ce qu'il est aujourd'hui.

Yanis Guerri

## **Remerciement**

Nous tiens tout d'abord à remercier Dieu, le tout puissant, de nous avoir insufflé suffisamment de force, de courage et de patience pour entreprendre ce modeste travail.

Ce travail de mémoire intervient à un moment charnière de nos études. Au cours de ces derniers mois, nous avons découvert et explorés de nouvelles disciplines. Cette progression et ces découvertes n'auraient pas été possibles sans l'aide de la personne qui nous 'a encadré, conseillé et soutenue au cours des derniers mois.

***Madame Sari Elkahina,***

Nous vous exprimons notre gratitude et notre reconnaissance pour avoir dirigé notre encadrement, pour votre grande disponibilité, pour vos précieux conseils et pour votre gentillesse, compréhension et compassion.

***Les membres de jury***

Nos vifs remerciements vont également aux membres de jury ***Mr.Bennoud Salim et Mr.Azazzen Mohammed*** pour l'intérêt qu'ils ont portés à notre travail en acceptant de l'examiner .

Nous exprimons également toute notre gratitude au Co-encadreurs ***Mr. Mimouni Oussama et Mr. Halimi Rafik***

Nous exprimons aussi toute notre gratitude au personnel du :

- Centre de recherche en technologie industrielle de Cheraga CRTI.
- Etablissement de rénovation des matériels aéronautiques de Dar el Baida ERMA.

## Résumé

Dans ce projet de fin d'étude, on a caractérisé les contraintes résiduelles par la méthode ultrasonore dans des structures aéronautique soudées par FSW en choisissant les alliages 7075A T-6 pour ces bonnes caractéristiques mécaniques et bénéficient d'un bon durcissement structural. Les contraintes résiduelles comme le premier axe de notre recherche est un sujet d'actualité qui demeurent dans une structure ou une pièce mécanique en absence de toutes sollicitations extérieures. Elles existent dans beaucoup de pièces mécaniques qui peuvent modifier la structure et les propriétés mécaniques initiales du matériau. Leurs présences dans ce dernier peuvent aussi bien avoir des effets bénéfiques que néfastes. Le deuxième axe de notre recherche consiste à faire des soudures par friction malaxage qui est un nouveau procédé permettant l'assemblage à l'état solide et donc de supprimer les défauts liés à la solidification, ce procédé ne nécessite aucun métal d'apport. L'utilisation de ce procédé dans la construction des avions permet de réduire les coûts de fabrication et, indirectement, les coûts d'opération grâce aux allègements structuraux. Le troisième axe de notre recherche, est dédié aux techniques de mesures des contraintes résiduelles en utilisant le contrôle par ultrason, qui consiste à balayer une pièce par un faisceau pour déceler les défauts de discontinuité géométrique soit par transmission ou par réflexion.

## **Abstract**

In this end of study project, we characterized the residual stresses by the ultrasonic method in aeronautical structures welded by FSW by choosing the 7075A T-6 alloys for these good mechanical characteristics and benefit from good age hardening. Residual stresses as the first axis of our research is a topical subject that remain in a structure or a mechanical part in the absence of any external stresses. They exist in many mechanical parts which can modify the structure and the initial mechanical properties of the material. Their presence in the latter can have both beneficial and harmful effects. The second axis of our research is to make friction stir welds which is a new process allowing solid state assembly and therefore eliminating solidification-related defects, this process does not require any filler metal. The use of this process in the construction of aircraft reduces manufacturing costs and, indirectly, operating costs through structural lightening. The third axis of our research is dedicated to techniques for measuring residual stresses using ultrasound testing, which consists of scanning a part with a beam to detect geometric discontinuity defects either by transmission or by reflection.

## ملخص

في نهاية مشروع الدراسة هذا ، قمنا بتمييز الضغوط المتبقية بطريقة الموجات فوق الصوتية في هياكل الطيران الملحومة بواسطة FSW باختبار سبائك A T-6 7075 لهذه الخصائص الميكانيكية الجيدة والاستفادة من التصلب الجيد مع تقدم العمر. الضغوط المتبقية باعتبارها المحور الأول لبحثنا هي موضوع موضعي يبقى في هيكل أو جزء ميكانيكي في غياب أي ضغوط خارجية. توجد في العديد من الأجزاء الميكانيكية التي يمكنها تعديل الهيكل والخصائص الميكانيكية الأولية للمادة. يمكن أن يكون لوجودهم في الأخير آثار مفيدة وضارة. المحور الثاني لبحثنا هو عمل اللحامات ذات التقليل الاحتكاكي وهي عملية جديدة تسمح بتجميع الحالة الصلبة وبالتالي القضاء على العيوب المتعلقة بالتصلب ، وهذه العملية لا تتطلب أي معدن حشو. إن استخدام هذه العملية في بناء الطائرات يقلل من تكاليف التصنيع ، وبشكل غير مباشر ، من تكاليف التشغيل من خلال الإضاءة الهيكلية. تم تخصيص المحور الثالث لبحثنا لتقنيات قياس الضغوط المتبقية باستخدام اختبار الموجات فوق الصوتية ، والذي يتكون من مسح جزء بحزمة للكشف عن عيوب الانقطاع الهندسي إما عن طريق الإرسال أو الانعكاس.

# Table des matières

Table des matières

Liste des figures

Liste des tables

INTRODUCTION GENERALE.....	1
I.Chapitre I : Procédé de soudage FSW.....	4
Introduction : .....	5
I.1    Principe de procédé de soudage FSW .....	5
I.1.1    Historique .....	5
I.1.2    Le principe du procédé .....	6
I.1.3    Description de la machine .....	7
I.2    Différentes phases de soudage FSW .....	8
I.3    Paramètres du soudage FSW .....	11
I.3.1    Vitesse de rotation et vitesse d'avance .....	11
I.3.2    Force verticale exercée par l'outil .....	12
I.3.3    Outil de soudage.....	13
I.3.4    L'épaulement.....	15
I.3.5    Le pion.....	16
I.4    Caractérisation des joints soudés(les différentes zones d'une pièce soudée par FSW).....	16
I.4.1    Métal de base (MB).....	17
I.4.2    Zone affectée thermiquement (ZAT).....	17
I.4.3    Zone affectée thermo mécaniquement (ZATM).....	18
I.4.4    Zone fondue.....	18
I.4.5    Dureté en travers du joint .....	19
I.5    Avantages du procédé et limites de la technique.....	21
I.6    Domaine d'application du procédé : .....	25
I.7    Conclusion.....	28
II.Chapitre II : les méthodes de CND .....	29
Introduction .....	30
II.1    Méthode de DRX.....	30
II.1.1    Principe de la méthode .....	30
II.1.2    Loi de Bragg.....	31
II.1.3    Champ d'application du DRX .....	32
II.1.4    Méthode.....	33
II.1.5    Applications.....	34



II.1.6	Définition des angles de rotations et appareils de DRX .....	35
II.2	Le courant de Foucault .....	37
II.2.1	Historique .....	37
II.2.2	Principe du contrôle par courants de Foucault .....	38
II.2.3	Capteur et technique de contrôle .....	39
II.2.4	Calcul de l'impédance de la bobine.....	40
II.2.5	Avantages et limites de la méthode de mesure.....	42
II.3	Le bruit de Barkhausen.....	43
II.3.1	Description .....	43
II.3.2	Applications.....	44
II.4	La méthode des ultrasons .....	45
II.4.1	Principe.....	45
II.4.2	Fonctionnement d'un appareil à ultrasons.....	46
II.4.3	Différents types d'ondes.....	48
II.4.4	Equation de Hughes et Kelly sur les vitesses de propagation dans un milieu contraint	51
II.5	Conclusion.....	55
III.	Chapitre III : Modélisation (soudage FSW et contraintes résiduelles).....	56
Introduction	.....	57
III.1	Définition des contraintes résiduelles.....	57
III.2	Classification des contraintes résiduelles .....	58
III.3	Origine des contraintes résiduelles.....	60
III.4	Effets des contraintes résiduelles.....	60
III.5	Modélisation des contraintes résiduelles pour le soudage FSW.....	65
III.5.1	Couplage thermomécanique .....	65
III.5.2	Équation de la mécanique (Loi de comportement viscoplastique, loi de Norton Hof) .	67
III.5.3	Équation de chaleur (Loi du comportement thermoviscoplastique).....	73
III.6	Résolution numérique des équations de soudage par la méthode des éléments finis.....	78
III.6.1	Principe de la méthode des éléments finis.....	78
III.6.2	Méthode des éléments finis pour le soudage FSW .....	80
III.6.3	Limitation de la MEF et des méthodes avec maillage.....	82
III.7	Conclusion.....	83
IV.	Chapitre IV : Expérimentation, résultats et interprétations.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Introduction	.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
IV.1	Caractéristiques mécaniques, chimiques, et physiques des alliages d'Aluminium série 7000	
86		
IV.1.1	Caractéristiques Mécanique.....	86

IV.1.2	Caractéristiques chimiques .....	86
IV.1.3	Caractéristiques physiques .....	87
IV.2	Description de montage FSW et ses paramètres .....	88
IV.2.1	Vitesses de rotation et d'avance .....	89
IV.2.2	Force exercée par l'outil .....	89
IV.2.3	Angle d'inclinaison de l'outil .....	89
IV.3	Inspection visuelle et microscopique des échantillons. ....	91
IV.3.1	Observation microscopique des joints soudés .....	92
IV.4	Description du montage de contrôle ultrasonore et dispositif de mesure. ....	94
IV.4.1	Dispositif de Mesure.....	96
IV.5	Détermination des contraintes résiduelles par la méthode ultrasonore .....	97
IV.5.1	Résultats d'étalonnage de l'alliage 7075 sur le métal de base et la zone ZAT.....	97
IV.5.2	Présentation des signaux ultrasonores. ....	102
IV.5.3	Détermination des vitesses sur les zones de soudage .....	104
IV.5.4	Détermination des contraintes résiduelles sur les zones de soudage .....	104
IV.5.5	Présentation du profil de vitesses et contraintes résiduelles .....	105
IV.6	Interprétation des résultats et conclusion.....	106
IV.7	Conclusion.....	107
V.	CONCLUSION GENERALE .....	108
V.1	Perspective et recommandation.....	110
	Références : .....	101

## Liste des figures

Figure I.1: Paramètres du procédé de soudage par FSW [1].	6
Figure I.2: a) Machine réel de FSW. b) Schéma de machine FSW [30].	8
Figure I.3: maximale est montrée au niveau de la pointe du pion [5].	9
Figure I.4: Illustration du procédé de FSW [9] et [10].	10
Figure I.5: État du joint SFM en AA7020-T6 de 4,4 mm d'épaisseur et la force mesurée (a) 4 kN, (b) 6 kN, (c) 7,4 kN et (d) 10,4 kN [33].	12
Figure I.6: outil FSW.	13
Figure I.7: Différents types d'outils, leurs caractéristiques et leurs applications [11].	14
Figure I.8: Différentes formes d'épaulement disponibles [11].	15
Figure I.9: Types classiques d'outils [35].	16
Figure I.10: Coupe macrographique d'un cordon de soudure montrant quatre zones distinctes [13].	17
Figure I.11: Formes de noyaux a) cuvette b) ellipsoïdale [36].	18
Figure I.12: Durcissement par écrouissage [38].	19
Figure I.13: Durcissement par précipitation [37].	20
Figure I.14: Opération de soudage FSW	21
Figure I.15: Coupe transversale dans un joint FSW en AA5083 de 8 mm d'épaisseur qui montre les bavures en surface et une ligne d'oxyde dans le joint. En (b) un agrandissement de la zone au fond du joint [38].	22
Figure I.16: Fenêtre opératoire pour assurer la bonne qualité d'un joint FSW en ADC12 (alliage d'aluminium coulé équivalent à l'A383. de 4 mm d'épaisseur [40] [41].	23
Figure I.17: Micrographie d'un joint FSW en AA7075-T6 de 4,85 mm d'épaisseur qui présente une défautuosité en zigzag. En (b) un agrandissement de la zone au fond du joint où la défautuosité a eu lieu [42].	24
Figure I.18: Micrographie d'un joint SFM en AA5083-A321 de 8 mm d'épaisseur [39].	24
Figure I.19: Assemblage de l'avion Eclipse avec le procédé de FSW [7].	25
Figure I.20: Bateau en aluminium construit en utilisant le procédé FSW [8].	26
Figure I.21: Technique de soudage des carrosseries des trains Hitachi [32].	27
Figure I.22: Soudage « friction-malaxage » par point utilisé pour l'automobile [31].	27
Figure II.1: Cône de diffraction et mesure de $\theta$ [17].	31
Figure II.2: Démonstration de la loi de Bragg [26].	32
Figure II.3: Deux tubes radiogènes [27].	33
Figure II.4: Définition des angles de rotation [29].	36
Figure II.5: Photo d'un appareil de DRX et définition des différentes rotations [29].	36
Figure II.6: Montage pour mettre en évidence les courants de Foucault [43].	37
Figure II.7: Principe des courants de Foucault (mesure sur matériau métallique) [43].	38
Figure II.8: Relation entre tension et fem induite.	41
Figure II.9: Mesure par courants de Foucault sur une pièce industrielle [43].	43
Figure II.10: Palpeurs ultrason.	45
Figure II.11: Appareil à ultrasons.	47
Figure II.12: Bloc d'étalonnage.	47
Figure II.13: Propagation d'une onde longitudinale [47,48].	48
Figure II.14: Propagation d'une onde transversale [49].	49
Figure II.15: Plaque soumise à un état de contraintes biaxiales.	53

Figure II.16: Influence de la direction de propagation et de polarisation sur le changement relatif de vitesses sur acier à rail [51].	54
Figure III.1: Définition schématique des différents ordres de contraintes pour un matériau monophasé [58,59].	59
Figure III.2: Diagramme de Haigh (a)et Goodmann(b) [57].	61
Figure III.3: Longueur de la fissure en fonction du nombre de cycle [66].	62
Figure III.4: Longueur de la fissure en fonction du nombre de cycle [66].	63
Figure III.5: Evolution de la vitesse de fissuration sous l'influence d'une surcharge [72].	64
Figure III.6: Couplage thermique, mécanique et métallurgique du procédé FSW [97].	66
Figure III.7: Description du domaine de calcul et des frontières [4].	71
Figure III.8: Cinématique procédé [4].	71
Figure III.9: Schéma du contact [4].	73
Figure III.10: Présentation des conditions aux limites du FSW [96].	78
Figure III.11: Schématisation d'une étude sur le soudage par friction malaxage par MEF, maillage des plaques et de l'outil [82].	80
Figure III.12: Champs de température à gauche et champs des déformations à droite avec une approche lagrangienne. [83]	81
Figure IV. 1: montage sur la machine	88
Figure IV. 2: Angle d'inclinaison de l'outil [11].	90
Figure IV. 3: l'échantillon	91
Figure IV. 4: Cartographie des zones de plaque soudée 7075 après attaque chimique. Microscopie optique.	92
Figure IV. 5: Bain D'immersion	94
Figure IV. 6: Oscilloscope WaveSurfer 10	95
Figure IV. 7: dispositif de mesure des vitesses	96
Figure IV. 8: Courbe de variations relatives du temps de propagation en fonction de contrainte – Détermination de K1 [98].	99
Figure IV. 9: Courbe de variations relatives du temps de propagation en fonction de contrainte effectué sur la ZATM (max) – Détermination de K1 [98].	101
Figure IV. 10: Signale Ultrasonore Zone 1	102
Figure IV. 11: Signale Ultrasonore Zone 2	102
Figure IV. 12: Signale Ultrasonore Zone 3	103
Figure IV. 13: Signale Ultrasonore Zone 4	103
Figure IV. 14: Profil des vitesses de la partie droite de l'axe de soudure obtenu sur l'échantillon soudé.	105
Figure IV. 15: Profil des contraintes résiduelles de la partie droite de l'axe de soudure obtenu sur l'échantillon soudé.	106

## Liste des tables

Table IV.1 : caractéristiques mécaniques d'alliage 7075 [99]. .....	86
Table IV.2 : les éléments d'addition présents dans l'AA7075 [99]. .....	87
Table IV.3 : les caractéristiques physiques des alliages d'aluminium série 7000 [99]. .....	87
Table IV.4 : les différents paramètres de soudage.....	90
Table IV.5: Dimension de l'éprouvette AA7075 .....	97
Table IV.6: Résultats des mesures d'étalonnage effectuées sur le métal de base pour l'obtention de K1. [98]. .....	98
Table IV.7: Résultats des mesures d'étalonnage effectuées sur la zone affectée thermomécaniquement, pour l'obtention de K1 [98]......	100
Table IV.8: Vitesses de propagation des ondes dans les différentes zones de l'échantillon. ....	104
Table IV.9 : Détermination des contraintes résiduelles sur les zones de soudage. ....	105



# INTRODUCTION GENERALE

Les alliages d'aluminium à durcissement structural (série 2000, 5000, 6000, 7000) sont utilisés dans le cadre de l'allègement des structures de transport aérien, naval et terrestre. En contrepartie, ce type alliage est difficilement soudable par la voie classique et le moyen principal d'assemblage reste le rivetage. Jusqu'à une époque récente, seuls le rivetage et le boulonnage étaient utilisés en tant que moyens d'assemblage. Pourtant, ces procédés présentent de nombreux désavantages en plus de celui de la masse et une jonction hétérogène entre les deux tôles. Premièrement, le rivetage implique des fortes concentrations de contraintes non négligeables qui sont bien évidemment néfastes pour la tenue mécanique des assemblages, particulièrement responsable de la formation de fissures de fatigue. Le second problème est lié à la mauvaise résistance à la corrosion des structures rivetées. Enfin, le rivetage est difficilement automatisable et donc cher. Le soudage est une voie possible de remplacement du rivetage.

L'étude des procédés de soudage apparaît comme un domaine de recherche à la fois simple et complexe, car il demande de mettre en commun des connaissances issues de domaines distincts de la physique et de la mécanique. La plus part des procédés met en jeu des phénomènes aussi variés, des modifications microstructurales des matériaux soudés, les transferts de chaleur, l'apparition des contraintes résiduelles,....

Par exemple le soudage conventionnel par fusion des alliages d'aluminium représente un défi à cause de certaines caractéristiques inhérentes : une grande solubilité de l'hydrogène, une couche d'oxyde tenace qui doit être éliminée pour éviter la contamination du joint, une conductivité thermique élevée qui requiert une énergie de soudage élevée et un coefficient d'expansion thermique élevé qui cause de la distorsion. La conductivité thermique, la distorsion du joint et la large étendue de l'intervalle de solidification rendent les joints soudés susceptibles à la fissuration à chaud. Les alliages à durcissement structural posent des défis supplémentaires à cause des éléments d'additions; les alliages de la série 6000 sont difficilement soudables et les alliages des séries 2000 et 7000 sont pratiquement non soudables. La présence du cuivre et du magnésium, éléments importants pour l'amélioration des propriétés mécaniques de ces alliages, augmente leur sensibilité à la fissuration après soudage.

A travers l'ensemble des procédés de soudage, ce lui que nous avons étudié et réalisé est le procédé de soudage par friction malaxage ou Friction Stir Welding(FSW), il apparaît relativement récent vis-à-vis des autres procédés de soudage.

Le soudage par friction malaxage (Friction Stir Welding) est un nouveau procédé d'assemblage mis au point par TWI (The Welding Institute) en 1991, il est considéré comme la plus grande invention dans le domaine du soudage. L'originalité de ce procédé consiste de souder à l'état solide, ce qui sous-entend que les matériaux de base à souder ne sont jamais en fusion durant l'opération de soudage. Ce qui supprime les défauts liés à la solidification et conduit à des contraintes internes faibles par rapports aux soudage classique (soudage laser ou à l'arc). Cela a permis évidemment d'ouvrir de nombreuses portes technologiques. Il devient alors possible d'assembler des alliages dits "difficilement soudables" comme par exemple le soudage des alliages d'aluminium des séries 2XXX et 7XXX, réputés non soudables selon les procédés classiques par fusion. Le soudage par FSW présente un intérêt évident : c'est un procédé qui présente des avantages considérable et économique. Cependant c'est un procédé assez nouveau qu'il faut apprendre à maîtriser. Ce procédé ne nécessite aucun métal d'apport, consomme moins d'énergie que les procédés de soudage par fusion et ne nécessite pas de gaz de protection. Il est considéré comme écologique comparativement aux procédés de soudage par fusion.

L'analyse et la caractérisation des joints soudés fait aussi parti de notre étude, on peut distinguer plusieurs zones au sein de la soudure. Les recherches disponibles dans la littérature scientifique indiquent que le SFM peut produire des joints possédant une performance en fatigue supérieure à celle des joints rivetés. Néanmoins, les déformations causées par les contraintes résiduelles, le fini de surface, la chute de la dureté dans la zone thermiquement affectée, le contrôle de procédé, les coûts associés à l'acquisition des machines et les gabarits de soudage et la disponibilité de données sur la vie en fatigue sont les principaux facteurs qui limitent actuellement l'utilisation de ce procédé.

Les contraintes résiduelles peuvent modifier la structure et les propriétés mécaniques initiales du matériau. Leurs présences dans ce dernier peuvent aussi bien avoir des effets bénéfiques que néfastes. En effet, il est généralement observé que les contraintes résiduelles de compression ont un effet bénéfique sur la durée de vie de la pièce car elles limitent l'apparition des fissures. Par contre, les contraintes résiduelles de traction favorisent la génération des fissures. Par conséquent, il est nécessaire de déterminer les contraintes résiduelles au mieux. Les techniques de mesures des contraintes résiduelles utilisées traditionnellement peuvent être regroupées en deux classes : les techniques destructives et non



destructives. Parmi les méthodes non destructives, la méthode ultrasonore qui dans notre étude nous nous sommes intéressés. La détermination des contraintes résiduelles par ultrasons se traduit par la dépendance de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores en fonction de l'état de contrainte. Les études antérieures effectuées dans ce domaine nous orientent vers l'utilisation des ondes longitudinales subsurfaciques pour la détermination des contraintes résiduelles superficielles qui sont généralement les plus élevées (critiques).

Ce mémoire vise à étudier la caractérisation des contraintes résiduelles des structures aéronautiques soudées par FSW en utilisant la méthode des ultrasons, et afin de faire ce travail on a étudié un alliage de la série 7000 (A7075\_T6).

Plusieurs chapitres constituent le contenu de ce mémoire, à l'issue desquels une conclusion générale présentera un bilan global :

- Le premier chapitre contient une revue bibliographique sur l'historique du procédé de soudage par friction malaxage, ses différentes phases et ses paramètres, ainsi que la caractérisation des joints soudés en détaillant les différentes zones de ce soudage, et on parle de ses avantages et limites.
- Le second chapitre traite les différentes méthodes de CND, qui sont la méthode la diffraction des rayons X, la méthode des courants de Foucault, le bruit de Barkhausen, et finalement on va aborder méthode des ultrasons.
- le troisième chapitre, est consacré à la modélisation de FSW ainsi que les contraintes résiduelles, incluant la définition et la classification des contraintes résiduelles avec son origine et ses effets. On clôturera avec la résolution numérique des équations de soudage par la méthode des éléments finis.
- Enfin, le quatrième chapitre, parle de caractéristiques des alliages d'Aluminium série 7000, avec la description de montage qui nous permet de déterminer les contraintes résiduelles par la méthode des ultrasons. Et finalement, une dernière partie concernera les principaux résultats de notre étude.

## **Chapitre I : Procédé de soudage FSW**

## **Introduction :**

Les procédés d'assemblages permanents entrent dans la fabrication de 80 % des produits manufacturés. Le soudage représente une grande majorité de ces procédés, car il permet l'obtention d'une liaison complète entre deux pièces.

Dans ce chapitre on va présenter une revue bibliographique des travaux de recherche publiés sur le procédé de soudage par FSW, ainsi que ses différentes phases et ses paramètres, en parlant des joints soudés et sa caractérisation qui inclut les différentes zones de ce soudage, en mentionnant les avantages et les limites de cette technique ainsi que son domaine d'application.

### **I.1 Principe de procédé de soudage FSW**

#### **I.1.1 Historique**

Depuis sa création au début des années 1990 par Thomas, Nicholas et al. 1991, le soudage par frottement-malaxage est devenu attrayant pour plusieurs entreprises. En conséquence, il a été abondamment étudié dans plusieurs départements de sciences appliquées et d'ingénierie dans les universités du monde entier. Dans les années 1990, le cœur des travaux a porté sur la faisabilité du soudage à l'aide de ce procédé et l'exploration des possibilités de ce dernier : soudage de différentes configurations de joint, soudage de deux alliages différents, soudage de composites à matrice métallique, utilisation de différentes formes d'outils, etc. Ces travaux ont permis de connaître suffisamment le procédé pour qu'il soit utilisé industriellement, surtout pour le soudage des alliages d'aluminium dans les industries navales et ferroviaires.

L'industrie aéronautique s'est tout de suite intéressée à ce procédé car il rend possible le soudage des alliages d'aluminium de la famille des 2XXX et des 7XXX, alliages d'aluminium réputés insoudables par d'autres procédés. Sur les avions, ces alliages sont assemblés par rivetage.

Le soudage par friction-malaxage étant un procédé récent, il demeure encore un sujet de recherches actif, pour mieux appréhender certains points comme l'écoulement de la matière, l'influence de la forme de l'outil, la simulation de la microstructure.

Ce dernier point est particulièrement important pour les alliages 2XXX et 7XXX. En effet, ce sont des alliages d'aluminium à durcissement structural, c'est-à-dire que leurs propriétés mécaniques dépendent étroitement de leur état de précipitation. Par ailleurs, le FSW se distingue des autres procédés de soudage par la présence d'une zone affectée thermiquement et mécaniquement.

Ce procédé est adaptés à plusieurs matériaux : Acier, Titanium, le cuivre et plus particulièrement aux alliages d'aluminium a durcissement structural (série 2000, 6000, 7000), difficilement soudable par voie classique. [5].

### I.1.2 Le principe du procédé

Touchez et serrez fermement les deux pièces à souder. Ensuite, l'outil Principalement composé d'épaulement et d'axe rotatif (pion en rotation 400 à 1400 tr / min) pénètre dans la substance. Le frottement de pion sur la pièce provoque une augmentation de la température à l'interface, provoquant le ramollissement du matériau. Cela rend possible passer le pion à l'interface entre les pièces à assembler jusqu'à ce que l'épaulement soit tiré vers le contact entre eux (**Fig 1**), et l'outil se déplace le long du point de soudage, la vitesse est d'environ 30 à 1000 mm / min. [1]

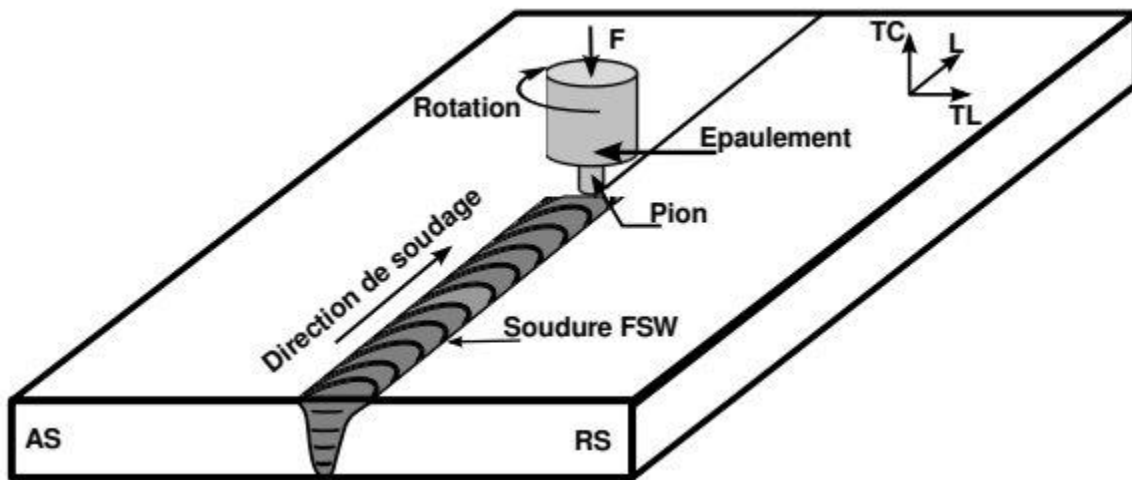


Figure I.1: Paramètres du procédé de soudage par FSW [1].

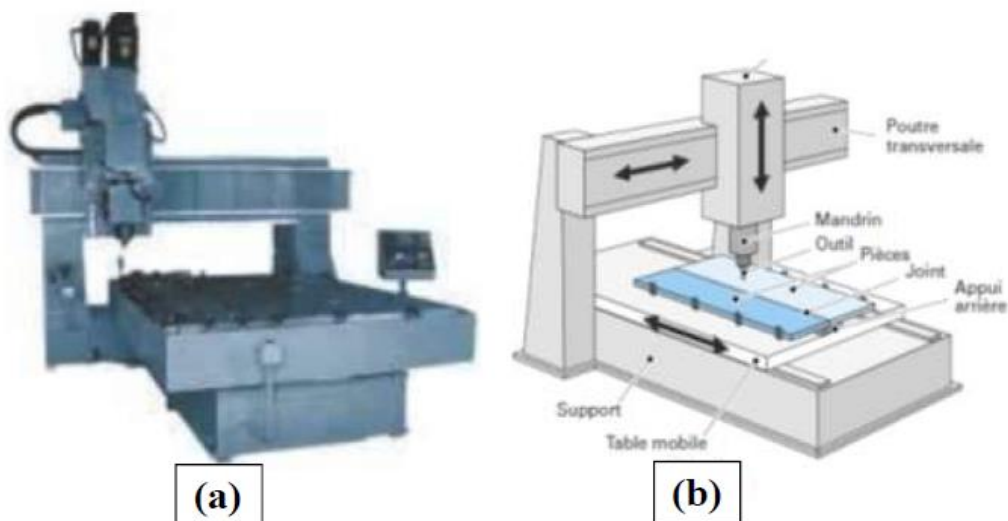
Une fois l'épaulement en contact avec les pièces à souder, une force est maintenue sur la pièce de liaison, pour empêcher le matériau de monter et permettre au matériau de se forger. Une fois le matériau ramolli, ce dernier devient une pâte, ce qui favorise le mouvement de l'outil le long du joint à souder. Le mouvement de rotation du pion permet le malaxage. La combinaison des mouvements de translation et de rotation de l'outil entraîne En déformant plastiquement le matériau placé, le matériau se déplace devant le pion. Ce matériau malaxé est composé de différents matériaux de soudage, se retrouve et forme une soudure à l'arrière de l'outil. Par conséquent, le joint formé est formé Uniquement du métal de base pour l'assemblage des pièces, aucun métal d'apport [1]. La vitesse d'avance et la vitesse tangente de la soudure sont La direction de l'outil (due à la rotation) est la même, appelée Advancing Side(AS), ce côté inverse, la vitesse d'avance est opposée à la vitesse de rotation de l'outil Retreating Side(RS). Les principaux paramètres du procédé de soudage FSW sont Vitesse de l'outil ( $\omega$  / min), vitesse de soudage ( $v$ , mm / min), force de forgeage  $F$  appliqué à l'outil (le long de l'axe  $z$ , direction TC) et la profondeur de pénétration de l'outil dans l'outil Section .Les valeurs de ces trois paramètres dépendent du matériau de base et l'épaisseur de la plaque à souder. Elles conditionnent l'état de surface du cordon, sa microstructure et donc ses caractéristiques mécaniques ainsi que la puissance dissipée par frottement et par déformation plastique. À ces paramètres se rajoute l'angle d'inclinaison de l'outil par rapport à la surface de la pièce à souder. Cela permet un meilleur malaxage du matériau et son entraînement de l'avant vers l'arrière du pion [2]. Le soudage FSW est Considéré comme l'un des développements les plus importants de l'assemblage Structure métallique. En outre sa particularité, le soudage des alliages n'est pas autorisé peut être soudé par des procédés traditionnels, considérés comme une technologie «verte» en raison de sa bonne efficacité énergétique, de sa propreté et du respect de l'environnement (Pas de rejet de pollution). Contrairement aux méthodes de soudage traditionnelles, FSW consomme beaucoup moins d'énergie sans utiliser de gaz ni produire de gaz. Produire de la fumée et permettre le soudage de matériaux de différentes compositions [1]. Le processus ne nécessite aucun métal d'apport pour empêcher la formation de phases dures et faibles. Ce qui évite la formation de phases dures et fragilisantes. Le joint reste donc homogène chimiquement, ce qui constitue un avantage du point de vue de la tenue à la corrosion [3].

### **I.1.3 Description de la machine**

Le montage se compose d'un appareil utilisé pour serrer la planche et le dynamomètre à souder, permettant d'enregistrer directement la force et le couple sur les trois axes ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ).

Machine Soudage enregistre le courant fourni à chaque axe et la puissance fournie à chaque axe Broche de la machine. Les données machine permettent de retrouver la force appliquée sur chaque axe à partir des données actuelles, même si nous verrons plus tard Cette méthode n'est pas précise. Système d'acquisition de machines Le dynamomètre est programmé pour saturer la force dépassant la valeur Il est essentiel d'éviter d'endommager les composants de ce dernier.

Le pas de temps pour la chaîne d'acquisition de la machine de commande numérique est fixé par le constructeur à 30 ms alors que celui de la table dynamométrique est modifiable et il a été choisi 1ms afin de pouvoir analyser les périodes de variations des efforts dont la fréquence sera le triple de la fréquence de rotation de l'outil "trigone". Par ailleurs, ne disposant pas de système de pilotage en force.



**Figure 0I.2: a) Machine réel de FSW. b) Schéma de machine FSW [30].**

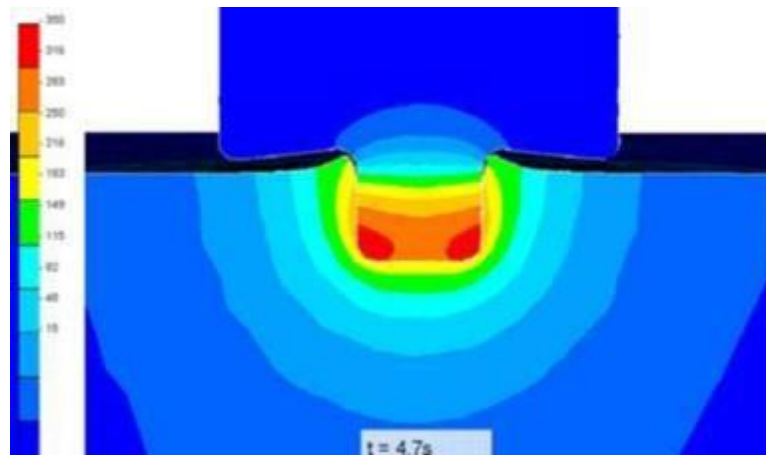
## **I.2 Différentes phases de soudage FSW**

Afin de développer des produits de soudage avec une productivité plus élevée et des coûts moindres, de nombreuses expériences et études numériques ont été menées dans le domaine industriel. Leur objectif est d'étudier la faisabilité et l'optimisation des paramètres de fonctionnement, ainsi que d'analyser l'état d'utilisation des composants. L'analyse thermique est généralement réalisée pour comprendre les différentes phases du processus: phase de plongée, temps de maintien et phase de soudage.

Expérimentalement, la technologie thermocouple peut être utilisée pour mesurer le cycle thermique, mais il est impossible de mesurer dans la zone affectée par thermomécanique. De

même, si le panneau soudé est très fin, il est difficile d'évaluer avec précision le gradient de température sur toute l'épaisseur. Dans ce cas, l'utilisation d'une caméra infrarouge semble être une solution.

Pendant la phase de plongée, le pion s'enfonce progressivement dans le matériau pour former le premier trou. La lente chute de l'outil produira une déformation plastique, de sorte que la température du matériau augmentera progressivement. Une autre étude numérique menée par Guerdoux et al. [4] montre qu'au niveau de la pointe du pion, le niveau de température est le plus élevé, (Fig 3).

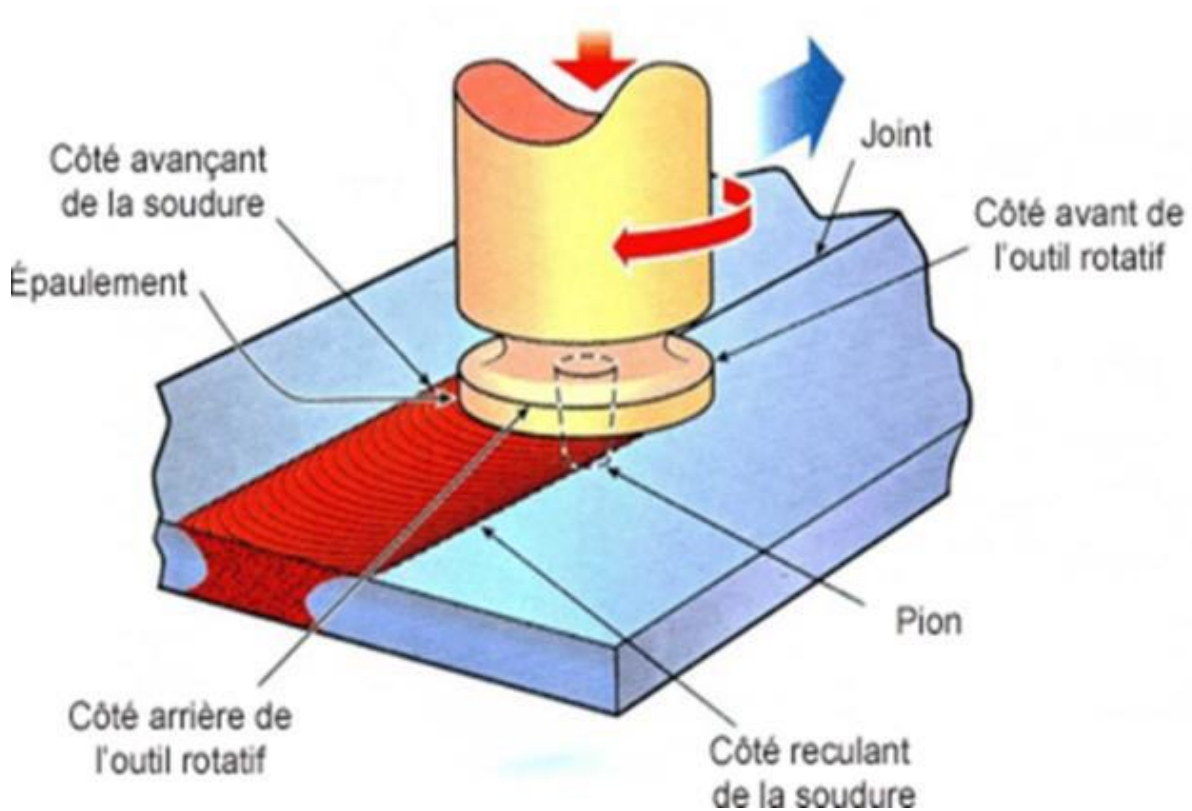


**Figure 0I.3: maximale est montrée au niveau de la pointe du pion [5].**

Le pion et l'épaulement assurent ensemble le frottement et le malaxage: le ramollissement de la matière et la géométrie du pion aboutissent à un matériau extrudé qui remonte le long du pion. La matière arrachée par ce dernier est écrasée et confinée aux épaules. La durée de ce processus dépend de la température moyenne de la zone de contact, qui est d'environ 70% de la température de fusion. Habituellement, cette étape est appelée «dwell time» ou «temps de maintien». Le matériau autour de l'outil doit être amené à un état viscoplastique adapté au démarrage de l'opération de soudage. La durée de cette phase a été étudiée dans plusieurs travaux expérimentaux.

Lorsque l'épaulement est en contact avec le matériau extrudé, l'outil commence à se déplacer le long de la surface de séparation pour terminer le joint, qui est la phase de soudage proprement dite. Lorsque l'épaulement frotte, pétrit et ramène le matériau dans la rainure formée, le pion insérée au niveau de la surface de séparation continuera à creuser.

La matière est ainsi forgée et déformée plastiquement durant toute la phase pour assurer la jonction. Pendant cette phase, la température atteint 0,75 à 0,8  $T_f$  ( $T_f$  indique la température de fusion) selon le matériau étudié ainsi que les paramètres opératoires choisis. La phase de soudage est fréquemment analysée expérimentalement et modélisée et simulée numériquement.



**Figure I.4: Illustration du procédé de FSW [9] et [10].**



### I.3 Paramètres du soudage FSW

De nombreux paramètres ont un effet important sur la qualité de l'assemblage, tels que:

- La vitesse d'avance de l'outil,
- La vitesse de rotation,
- L'effort axial  $F_z$  appliqué sur l'outil suivant son axe de rotation, afin de compenser la pression formée dans la zone de soudure,
- La profondeur de plongée de l'outil,
- Les dimensions de l'outil : diamètres de l'épaulement et du pion et la longueur du pion,
- L'angle d'inclinaison de l'outil dénommé angle de déplacement,
- La localisation de la plongée de l'outil (ce paramètre donne l'endroit où est introduit l'outil dans les plaques en fonction des bords des plaques),
- La durée de stabilisation de l'outil (temps s'écoulant entre la fin de la phase de plongée de l'outil et le début de la phase d'avancement).

Le réglage de ces paramètres dépend: du matériau, de l'épaisseur de soudage et de la géométrie de l'outil. Les conditions générales dépendent de l'apport d'énergie, du flux de matière, de la formation des billes, des propriétés mécaniques des composants et des forces générées. Parmi ces paramètres, les plus influents sont: l'outil de soudage, le couple, la vitesse et l'avance.

#### I.3.1 Vitesse de rotation et vitesse d'avance

La vitesse de rotation et la vitesse d'avance de l'outil varient en fonction de la nature de l'alliage à assembler et de la taille de la pièce. Par conséquent, ces paramètres doivent être ajustés pour optimiser le chauffage et le mélange des matériaux tout en assurant une bonne vitesse de soudage. La vitesse de rotation est généralement exprimée en tours par minute et la vitesse d'avance est exprimée en millimètres par seconde. La sélection de ces deux valeurs de vitesse est liée entre elles. Les rapports suivants sont généralement présentés pour évaluer le soudage:

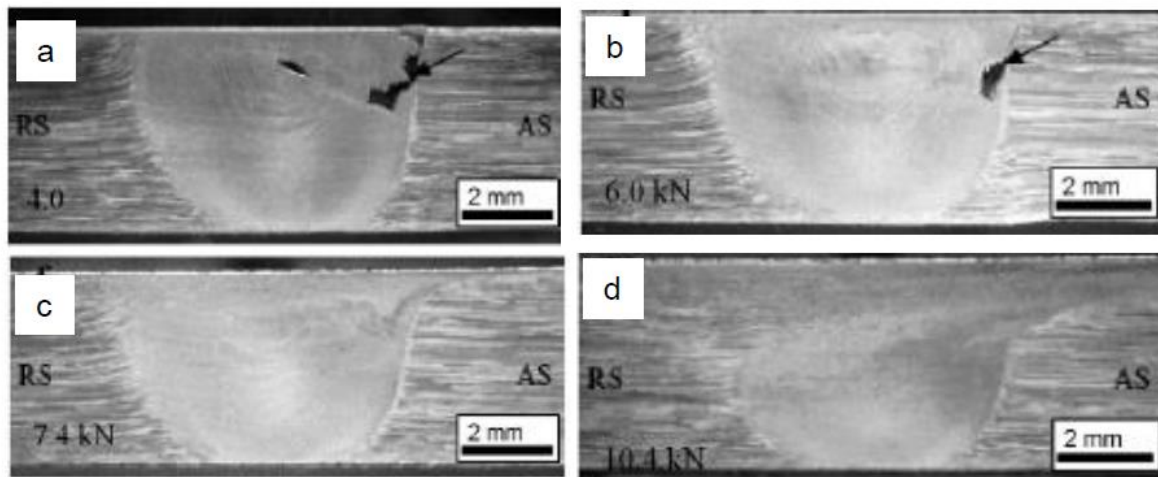
$$\text{(Vitesse de soudage)} / (\text{Rayon du pion} * \text{Vitesse de rotation}) \quad (1.1)$$

Si le rapport est très grand, nous l'appellerons soudage à froid, car la chaleur dissipée du fait du frottement entre l'outil et la plaque et le mélange des matériaux n'introduit pas de

températures élevées dans la pièce. Par rapport au meilleur soudage, la température sera plus basse. À l'inverse, si le rapport est faible, nous l'appellerons soudage thermique car la chaleur dissipée par mélange et frottement sera élevée et des températures élevées seront générées.

### I.3.2 Force verticale exercée par l'outil

Dans le soudage par friction-malaxage, la rotation de l'outil force le métal plastifié à se déplacer vers la surface du joint. Par conséquent, le métal qui est poussé sous l'épaule de l'outil exerce une pression dans un effort pour éloigner l'outil de l'articulation. Par conséquent, il est nécessaire d'appliquer une force verticale sur l'outil pour maintenir le contact entre l'outil et la pièce à souder. Cette force est également nécessaire pour fournir une force de forgeage, ce qui permet de consolider l'articulation. Kumar et Kailas (2008) ont évalué l'effet de la force verticale sur la qualité du FSW dans un AA7020-T6 de 4,4 mm d'épaisseur en contrôlant la force de pénétration de l'outil et en mesurant la force de réaction verticale correspondante. La coupe transversale du joint montre que Les poches d'air diminuent au fur et à mesure que les outils sont insérés dans les articulations, et par conséquent, la force verticale appliquée augmente. Lorsque la force verticale a atteint 7,4 kN, les défauts sont complètement disparus (Fig.I.5).



**Figure I.5: État du joint SFM en AA7020-T6 de 4,4 mm d'épaisseur et la force mesurée (a) 4 kN, (b) 6 kN, (c) 7,4 kN et (d) 10,4 kN [33].**

Le frottement entre l'outil rotatif et la pièce à usiner génère de la chaleur. Valeur calorifique dépend de la force appliquée, du coefficient de frottement à l'interface outil-pièce, la géométrie, la vitesse et la vitesse d'avance de l'outil. Par conséquent, le contrôle de cette force est afin de répondre à toutes les conditions de base du soudage, une certaine force doit être appliquée. Joint parfait. Cette force doit être considérée conjointement avec les paramètres de processus suivants: Assurer une bonne adhérence entre les deux parties du joint [34].

### I.3.3 Outil de soudage

La forme de l'outil de soudage constitue la base du procédé car elle ouvre des applications potentielles en termes de matériaux, d'épaisseur soudable et de performances techniques et économiques. L'outil utilisé pour les joints à recouvrement est différent de l'outil utilisé pour le soudage bout à bout, il peut donc mélanger deux matériaux.









Outil

**Figure I.6: outil FSW**

Le choix de l'outil dépend de l'application. La géométrie de l'outil affecte la chaleur générée, le débit du métal et l'énergie nécessaire au soudage. L'épaulement de l'outil et le pion ont des fonctions différentes. Lors du soudage de joints minces, l'épaulement génère la majeure partie de la chaleur et empêche le métal ramolli de s'échapper. L'épaulement et le méson contrôlent ensemble le flux de métal [11]. Lors du soudage de coutures épaisses, les broches génèrent la majeure partie de la chaleur. La forme de la broche affecte la quantité et le flux de métal déplacé, ainsi que la vitesse de mélange dans les directions horizontale et verticale du joint.

Les matériaux utilisés pour les outils sont principalement des aciers résistant à haute température et ayant un bon comportement à l'usure du fait que lors du fonctionnement, la température de l'outil peut s'élever de 300 à 400 ° C.

La première génération d'outil avait une forme cylindrique simple. La quantité de métal déplacée par ce type d'outil était très limitée et la vitesse de soudage devait être faible. Depuis, plusieurs formes d'outils ont émergé. L'évolution de l'outil a porté simultanément sur l'épaulement et le pion.

Tool	Cylindrical	Whorl™	MX triflute™	Flared triflute™	A-skew™	Re-stir™
Schematics						
Tool pin shape	Cylindrical with threads	Tapered with threads	Threaded, tapered with three flutes	Tri-flute with flute ends flared out	Inclined cylindrical with threads	Tapered with threads
Ratio of pin volume to cylindrical pin volume	1	0.4	0.3	0.3	1	0.4
Swept volume to pin volume ratio	1.1	1.8	2.6	2.6	Depends on pin angle	1.8
Rotary reversal	No	No	No	No	No	Yes
Application	Butt welding; fails in lap welding	Butt welding with lower welding torque	Butt welding with further lower welding torque	Lap welding with lower thinning of upper plate	Lap welding with lower thinning of upper plate	When minimum asymmetry in weld property is desired

**Figure I.7: Différents types d'outils, leurs caractéristiques et leurs applications [11].**

### I.3.4 L'épaulement

Le frottement entre l'épaulement et les pièces génère beaucoup de chaleur et contrôle le cycle thermique et l'état de surface du joint, ce qui affecte directement ou indirectement les performances du joint soudé. Il est largement rapporté dans la littérature que la rupture des joints FSW en aluminium durci structurellement (sous tension monotone) se produit dans la ZAT. Le cycle thermique de la soudure détermine la structure et la dureté de la zone affectée thermiquement et affecte l'intégrité du joint. Le ramollissement du ZAT est principalement causé par la chaleur générée par le frottement entre l'épaulement de l'outil et la pièce [15], et la température maximale varie entre 360 ° C et 370 ° C. Lors du soudage, la température la plus élevée se situe au centre du joint et diminue progressivement à mesure que la température passe du centre à la température ambiante. Il y aura toujours une zone avec une température entre 360 ° C et 370 ° C.

L'existence de zones de dureté réduite est quasi inévitable et ne dépend pas du diamètre de l'épaulement. L'effet du diamètre est limité à la distance entre le centre du joint et la zone de dureté réduite. L'endommagement de la surface d'étanchéité est affecté par l'écoulement généré par l'outil et la force exercée par l'épaulement. La forme la plus couramment utilisée est une épaulement concave. Lorsque la broche pénètre, la cavité d'épaulement agira comme un réservoir pour recevoir le métal déplacé. Le mouvement ultérieur de l'outil amène le nouveau métal dans la cavité d'épaulement et pousse le métal existant dans l'articulation. L'efficacité de l'épaulement peut être déterminée par le nombre de bavures, la finition de surface et l'uniformité des joints.

D'autres détails comme des cavités (poches), des rainures ou des spirales sont ajoutées à l'épaulement pour augmenter la quantité du métal déplacé par ce dernier. Les spirales dirigent le métal déplacé de l'extrémité de l'outil vers le centre, ce qui minimise la nécessité d'incliner l'outil par rapport à la surface du joint.

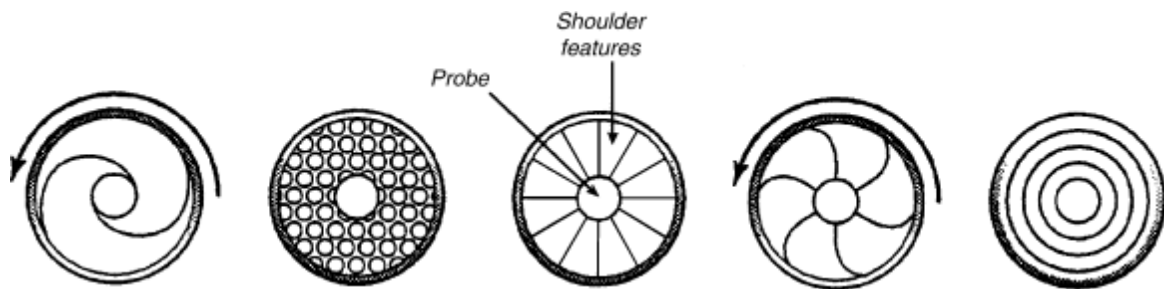


Figure I.8: Différentes formes d'épaulement disponibles [11]

### I.3.5 Le pion

La taille du pion est adaptée à la nature du matériau et à l'épaisseur à souder. Sa longueur est adaptée à la pénétration et ne doit pas excéder l'épaisseur de la plaque à souder. Par conséquent, le pion peut prendre diverses formes simples ou complexes, généralement tronconiques et / ou prismatiques, avec des spirales concaves ou finement réparties en forme de col. Certains profils intéressants ont fait l'objet de marques déposées.

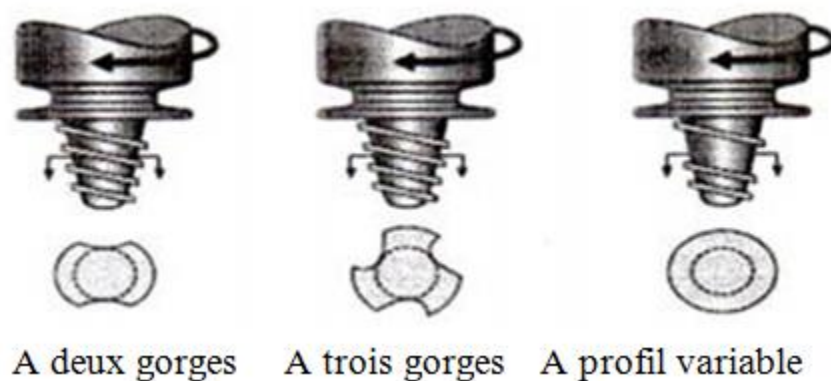
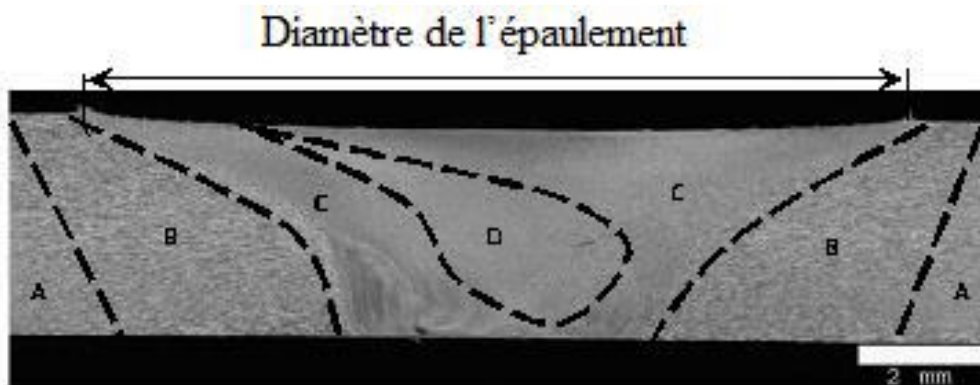


Figure I.9: Types classiques d'outils [35].

### I.4 Caractérisation des joints soudés (les différentes zones d'une pièce soudée par FSW)

Le procédé de soudage FSW introduit des changements importants dans le procédé de soudage. La microstructure dans et autour du joint. Influence du processus sur les caractéristiques micro, macro et mécanique provoquent de forts changements. Caractéristiques du cordon et comportement mécanique local et global. Beaucoup de travaux de recherche ont été menés pour définir le comportement des joints soudés. Ceci est particulièrement vrai pour FSW en termes de traction quasi-statique et de résistance à la fatigue. Malgré cela, le comportement mécanique cyclique et problèmes de zone d'initiation de fissure. Jusqu'à présent, les problèmes de soudage n'ont pas été entièrement résolus. La raison est-il nécessaire d'expliquer pourquoi les fissures de fatigue ne sont pas la plus petite zone de micro dureté? Pourquoi des fissures sont déclenchées dans le noyau, et Quel est le rôle de la macro structure, de la micro structure, de la dureté et de l'état de compression?

Les pièces soudées FSW se caractérisent par les caractéristiques structurales de leurs joints. Mahoney et al. [12] ont mené la première étude sur les alliages d'aluminium dans ce sens et ont montré l'inhomogénéité structurale de la jonction. Cette structure n'est visible que dans la section transversale du joint.



**Figure I.10: Coupe macrographique d'un cordon de soudure montrant quatre zones distinctes [13].**

#### **I.4.1 Métal de base (MB)**

Par conséquent, à l'écart des billes, le métal de base (MB) n'est ni déformé ni suffisamment chauffé pour changer de structure. C'est la partie la plus éloignée du centre de la soudure. Dans cette zone, le matériau ne se déformera pas.

#### **I.4.2 Zone affectée thermiquement (ZAT)**

Dans la zone plus proche du centre de la soudure, le métal a subi un cycle thermique et sa température maximale dépassera  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ , modifiant ainsi la microstructure ou les propriétés mécaniques. Cependant, aucune déformation significative ne s'est produite dans cette zone (surtout observable au microscope optique). La forme des grains est la même que celle rencontrée dans les métaux communs.

### I.4.3 Zone affectée thermo mécaniquement (ZATM)

Cette zone entoure la zone centrale et est unique à FSW. Il subit à la fois une déformation plastique et est affecté par la chaleur. La limite entre la zone de soudure centrale et ZATM est généralement très évidente, généralement plus du «côté avant». Une recristallisation partielle a également été observée le long de cette limite. L'évolution des précipitations dans ZATM est due à la dissolution partielle des précipités durcis et à la précipitation inégale des précipités non durcis. En prenant l'alliage d'aluminium comme exemple, la plage de température atteinte dans cette zone est de 300 ° C à 400 ° C.

### I.4.4 Zone fondue

La zone au centre de la soudure est généralement appelée zone de fusion. Cela correspond à la déformation et à la température maximale. La mesure de la température dans cette zone est très détaillée et est estimée sur la base de la microstructure finale du joint. Pour les alliages d'aluminium, la température maximale sera comprise entre 425 ° C et 500 ° C. La forme du noyau est très variable et dépend étroitement de l'alliage et des paramètres du procédé, il peut avoir une forme de bol ou une forme ovale. Son diamètre est légèrement supérieur au diamètre de la broche. La structure du grain est produite par le processus de recristallisation dynamique continue qui se produit pendant le processus de soudage. Dans le noyau, le précipité se redissout et précipite hors phase lors du refroidissement.

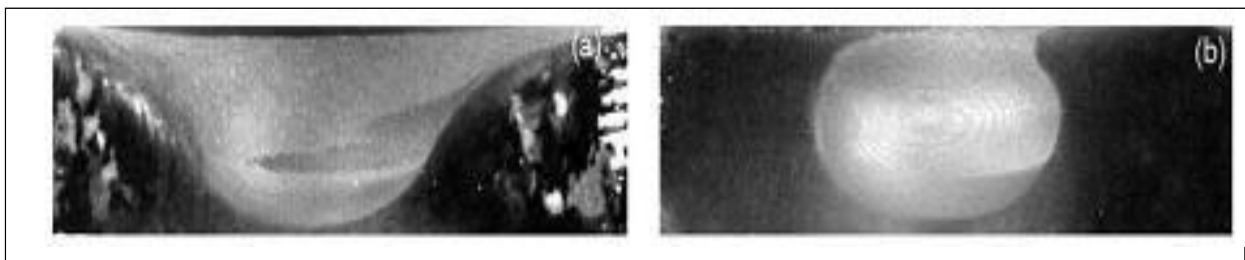


Figure I.11: Formes de noyaux a) cuvette b) ellipsoïdale [36].



### I.4.5 Dureté en travers du joint

La forme du profil de dureté sur la soudure FSW dépend des propriétés de durcissement du matériau, qu'il soit durci ou précipité par la pièce. [14].

#### I.4.5.1 Durcissement par écrouissage

Pour effet de restaurer l'organisation, notamment la recristallisation de l'organisation. Si l'état initial recristallise (état O), la dureté du joint soudé sera proche de l'état initial. Le durcissement peut être observé en fonction de la taille des grains dans le grain. Après recristallisation du matériau à l'état d'écrouissage (état H), la dureté de la zone de soudure est considérablement réduite. Par conséquent, le traitement thermomécanique appliqué au noyau de fer élimine toutes les différences entre les deux états initiaux.

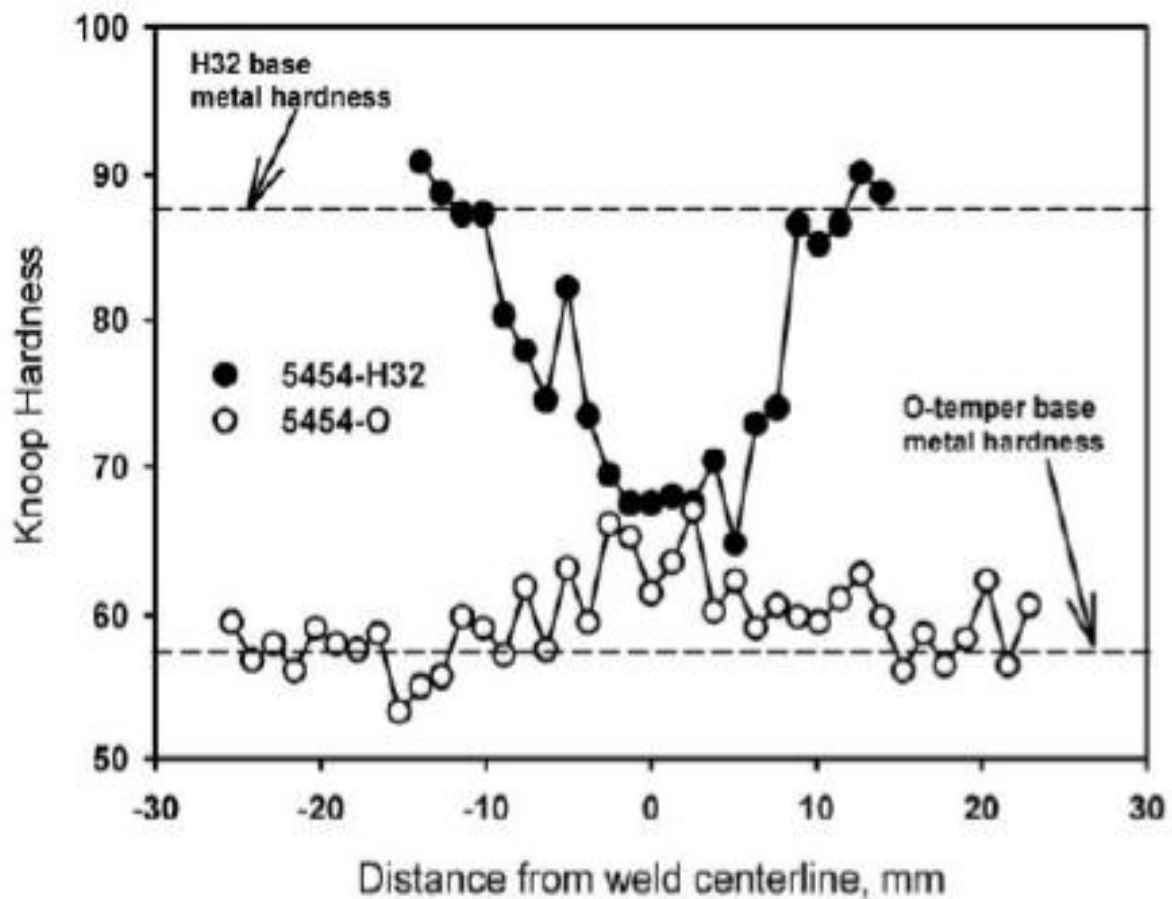


Figure I.12: Durcissement par écrouissage [38].

### I.4.5.2 Durcissement par précipitation

Les soudures FSW des matériaux durcis par vieillissement présentent les caractéristiques suivantes: "W". Dans le noyau, on suppose que le cyclage thermique dissoudra tous les précipités durcis, dont certains re-précipiteront de manière hétérogène après refroidissement, et le reste mûrira à température ambiante. Cela a pour effet d'éliminer tous les traitements thermiques antérieurs.

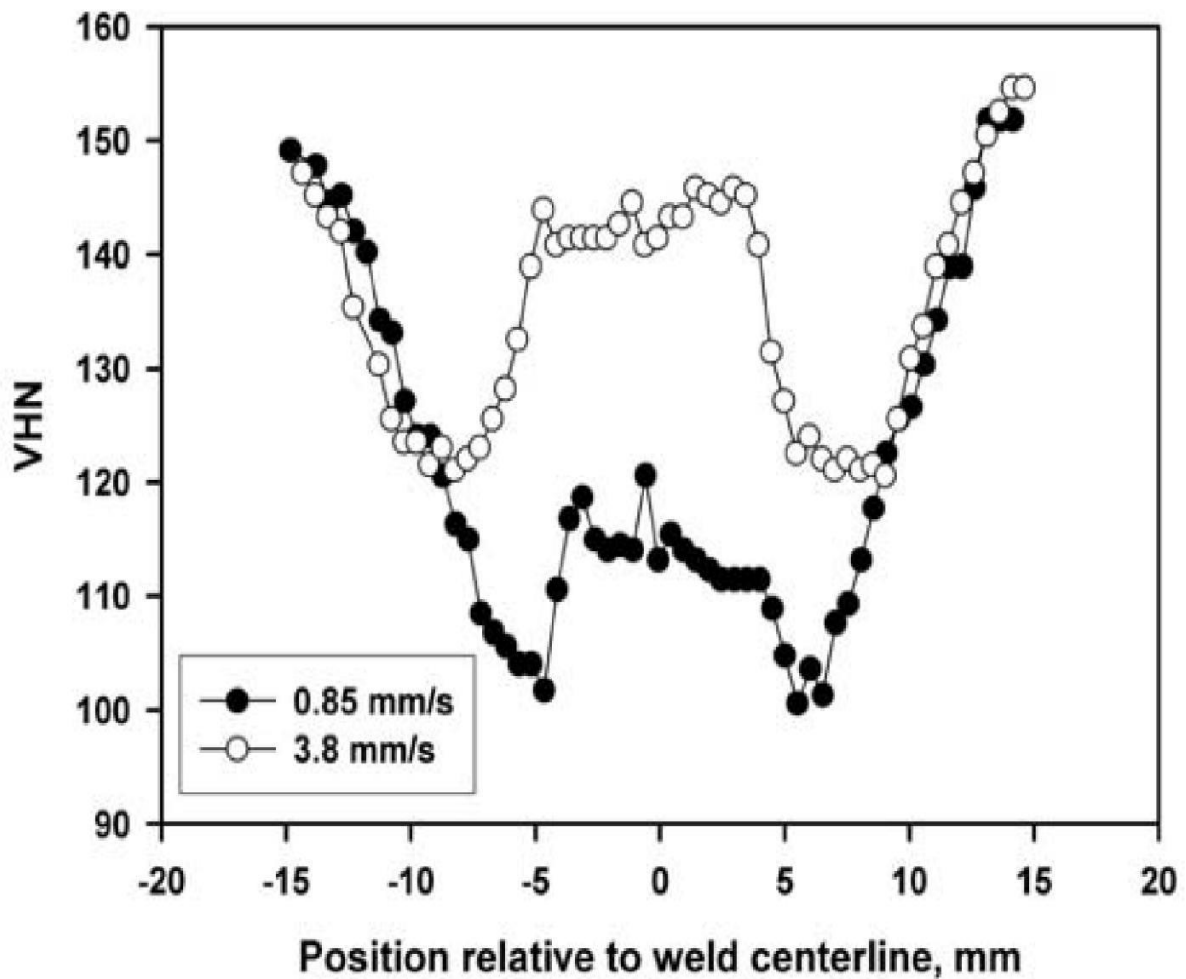


Figure I.13: Durcissement par précipitation [37].

## I.5 Avantages du procédé et limites de la technique

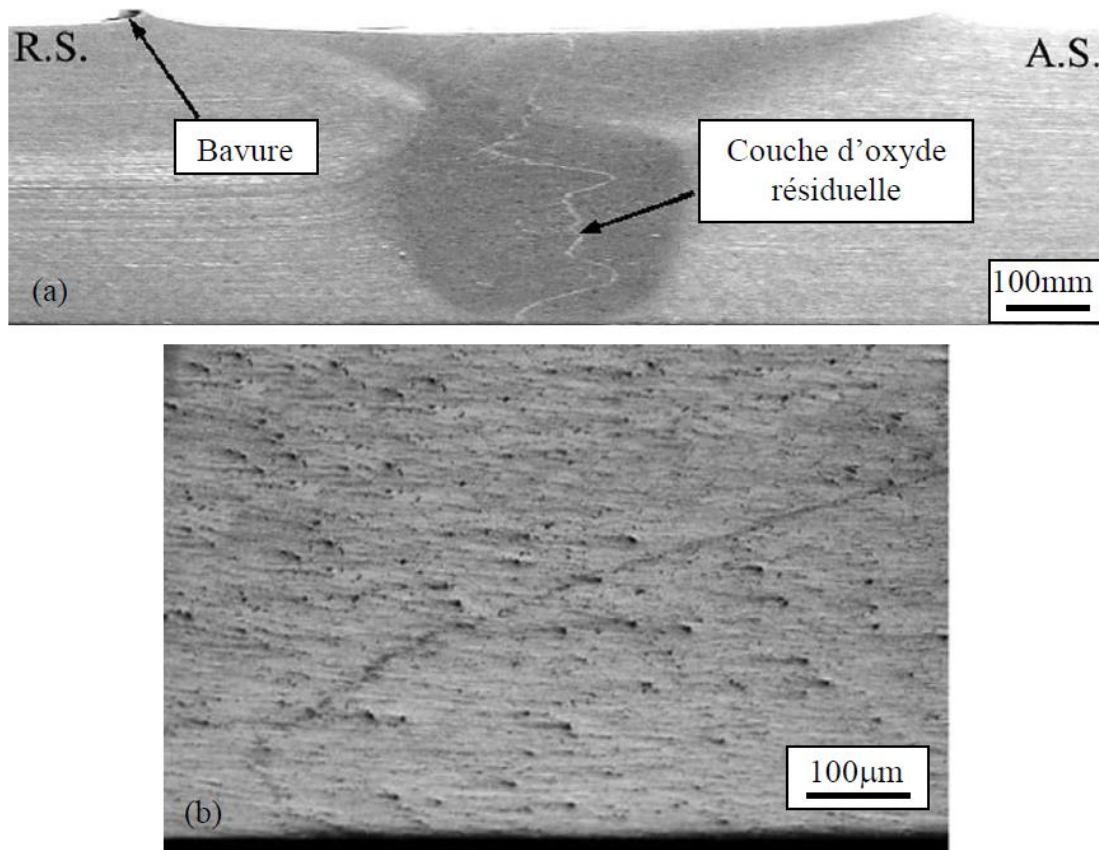
Parmi ses avantages, on peut citer :

- Pas de métal d'apport ni de gaz.
- Absence de discontinuité.
- Temps de cycle court.
- Reproductible.
- Automatisable.
- Absence de fumées et de projection.
- Aucun métal d'apport ne peut réaliser des joints d'homogénéisation chimique.
- Défauts internes dans le processus de fusion, tels que manque de compacité, cloquage, pas de fissures, pas de fissures à chaud. [15]. [14].
- En soudant au lieu de riveter, le coût de la structure peut être réduit, le poids peut être augmenté et la corrosion et la fatigue par frottement autour du rivet peuvent être éliminées.
- Permet de réaliser des soudures hétérogènes.



**Figure 0I.14: Opération de soudage FSW.**

Les défauts dans les joints soudés FSW réduiront les propriétés mécaniques des joints. Ils peuvent Diviser en deux catégories : défauts de surface visibles à l'œil nu (rainures et Bavures excessives) et défauts internes du joint, qui doivent être inspectés Autre (cavité, couche d'oxyde résiduel et manque de perméabilité).

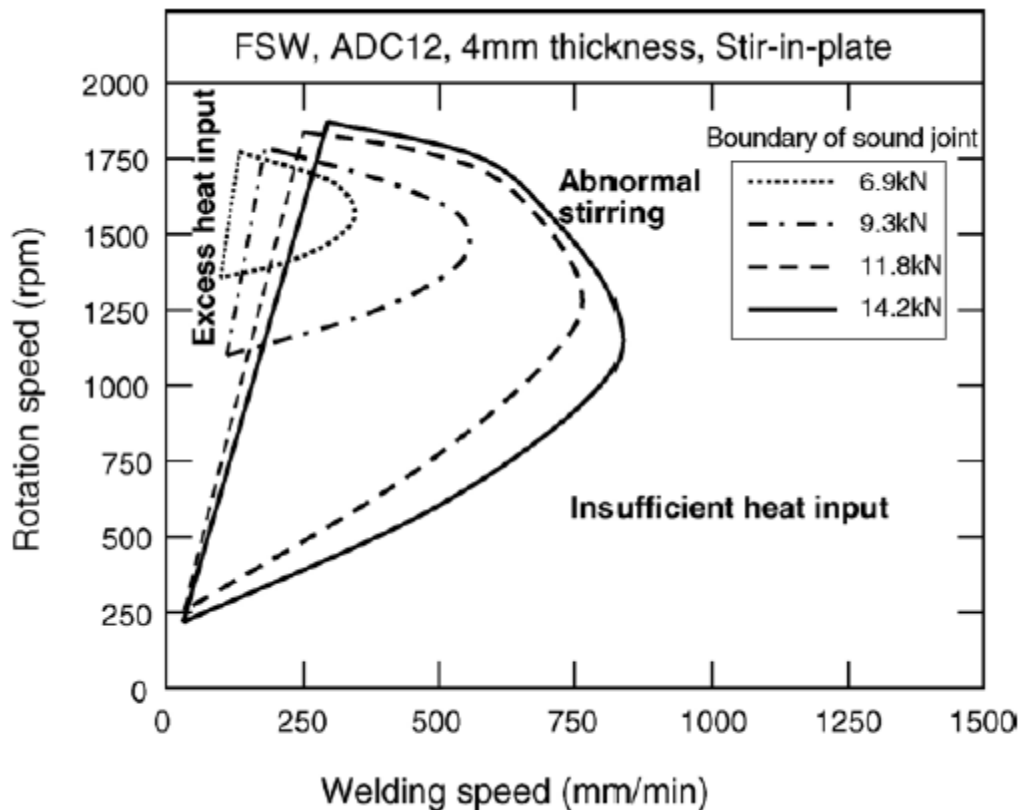


**Figure I.15: Coupe transversale dans un joint FSW en AA5083 de 8 mm d'épaisseur qui montre les bavures en surface et une ligne d'oxyde dans le joint. En (b) un agrandissement de la zone au fond du joint [38].**

La distance et la hauteur des sillons dépendent du rapport vitesse d'avancement / vitesse de rotation du godet. L'outil et la force verticale appliquée par l'outil. Augmentation de puissance Matériau ramolli et déchargé. De grosses bavures à la surface du joint sont des signes de chaleur Haute. Étant donné que la majeure partie de la chaleur de surface est causée par le frottement entre l'épaule de l'outil et la pièce à usiner, la force verticale et la vitesse appliquées par l'outil sont contrôlées La rotation aide à réduire la gravité de ces défauts.

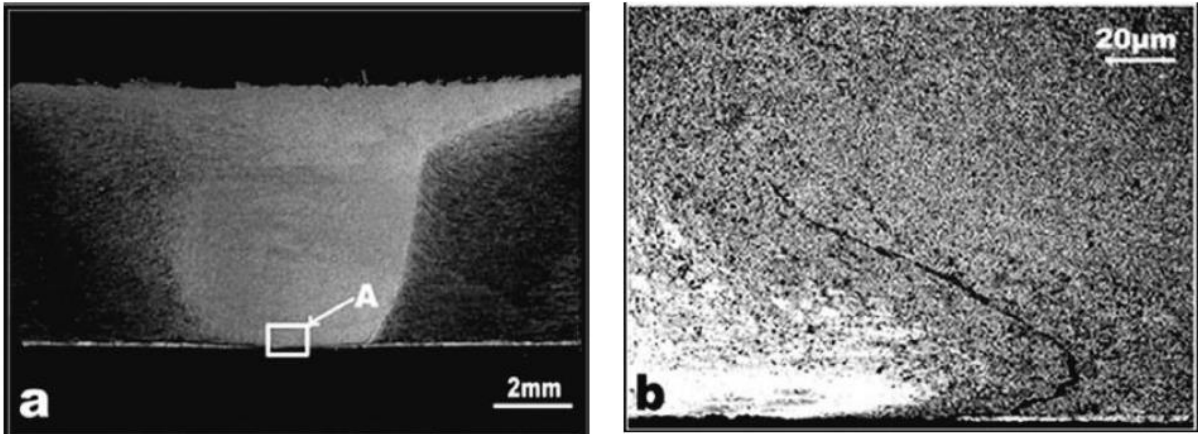
Les types les plus courants de défauts souterrains trouvés dans les joints SFM sont Cavités, liaisons "couche d'oxyde résiduel" incomplètes et manque de perméabilité. La présence de cavités peut être facilement détectée par des méthodes d'inspection non destructives Comme

les rayons X ou les rayons gamma. Ce type de défaillance est lié aux paramètres de soudage. Optimiser la vitesse et la vitesse d'avance Tous les paramètres peuvent être placés dans la zone de fonctionnement et éviter de tels défauts.



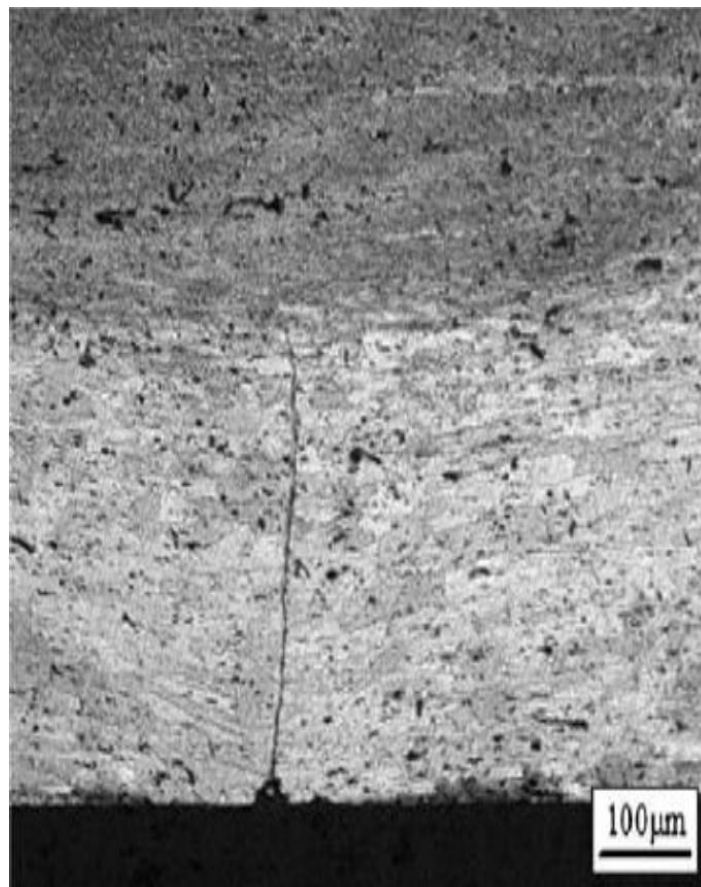
**Figure I.16: Fenêtre opératoire pour assurer la bonne qualité d'un joint FSW en ADC12 (alliage d'aluminium coulé équivalent à l'A383, de 4 mm d'épaisseur [40] [41]).**

Les défauts de type "couche d'oxyde résiduel" sont difficiles à détecter. Ce défaut consiste en une couche d'oxyde discontinue initialement située en surface La surface du métal. Lorsque la ligne d'oxydation devient continue, on l'appelle une forme en zigzag. Ces types de défauts peuvent être évités par une meilleure sélection des outils et des paramètres de soudage.



**Figure I.17: Micrographie d'un joint FSW en AA7075-T6 de 4,85 mm d'épaisseur qui présente une défautuosité en zigzag. En (b) un agrandissement de la zone au fond du joint où la défautuosité a eu lieu [42].**

Le manque de pénétration se manifeste, par exemple, par des fissures dans le bas du joint. Ce type de défaut peut être corrigé en ajustant la profondeur de la goupille par rapport au support Plaque de métal.



**Figure I.18: Micrographie d'un joint SFM en AA5083-A321 de 8 mm d'épaisseur [39].**

## I.6 Domaine d'application du procédé :

Il est principalement utilisé dans l'industrie de la construction et du transport, telle que l'industrie spatiale, aéronautique, ferroviaire, automobile, maritime comme par exemple :

- **Industrie aéronautique:** soudage de la tôle pour remplacer le rivetage des ailes, du fuselage, des réservoirs de stockage à basse température, des réservoirs de stockage de kérosène et du soudage du corps de missile.



**Figure 0L19: Assemblage de l'avion Eclipse avec le procédé de FSW [7].**

- **Construction navale:** pont, plate-forme d'atterrissage d'hélicoptères, coque de bateau.

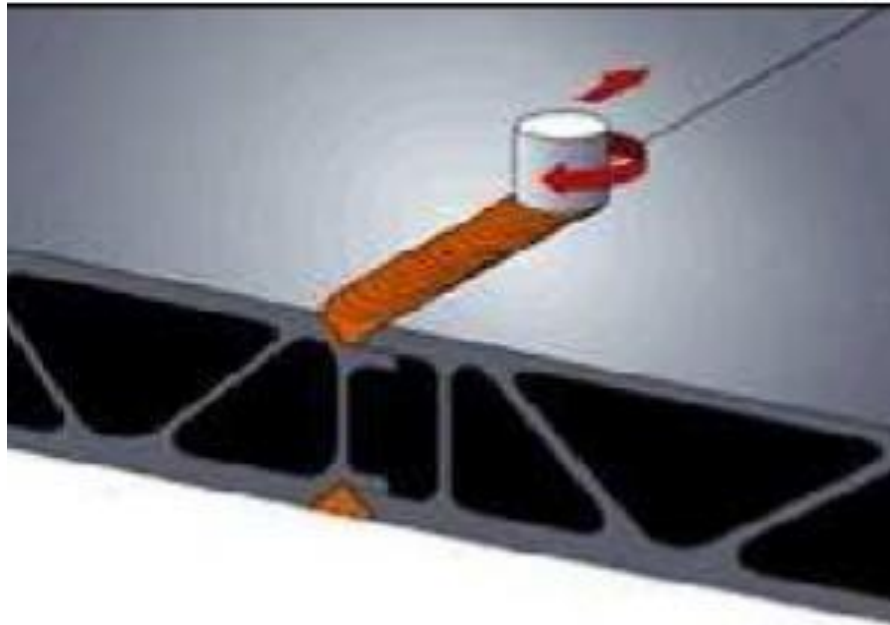
La première application de FSW dans l'industrie navale a été réalisée par une société scandinave en 1995 pour l'aluminium extrudé. Actuellement, dans le secteur de la construction navale, trois entreprises scandinaves et plusieurs entreprises japonaises utilisent le procédé de fabrication de grands panneaux en aluminium, fabriqués à partir d'extrusions d'aluminium. Des machines FSW de recherche et commerciales sont maintenant disponibles et comprennent des installations complètes pour souder jusqu'à 16 m de longueur.



**Figure 0I.20: Bateau en aluminium construit en utilisant le procédé FSW [8].**



- **Transport ferroviaire** : planchers de voitures, corps de container.



**Figure 0I.21: Technique de soudage des carrosseries des trains Hitachi [32].**

- **Automobile** : réservoir d'essence, carter de moteur électrique, jantes.



**Figure I.22: Soudage « friction-malaxage » par point utilisé pour l'automobile [31].**

## **I.7 Conclusion**

Ce premier chapitre du manuscrit correspond à une introduction générale relative à l'historique et le principe du procédé de soudage par friction malaxage ainsi que ses différentes phases, en parlant de la multiplicité de ses paramètres avec les différents géométriques de l'outil soulignent la complexité de ce processus.

La littérature est riche des travaux décrivant d'une part, les différentes zones d'une pièce soudée par FSW, et d'autre part, les avantages et les limitations de cette technique. Ce qui a permis de présenter le soudage par friction malaxage « Friction Stir Welding » comme un procédé de soudage permettant de résoudre une partie des problèmes.

On terminant par le domaine d'application de ce procédés qui très vaste, et qui est principalement utilisé dans la construction du transport, par exemple dans l'aéronautique.

## **Chapitre II : les méthodes de CND**

# Introduction

Le contrôle non destructif (CND) est un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader, soit au cours de la production, soit en cours d'utilisation, soit dans le cadre de maintenances.

Dans ce chapitre on va parler de ces méthodes qui sont ; la méthode de DRX qui est une technique d'analyse fondée sur la diffraction des rayons X par la matière, particulièrement quand celle-ci est cristalline, ainsi que la méthode des courants de Foucault, elle est largement utilisée dans la sidérurgie, l'aéronautique, l'automobile ou encore dans le nucléaire. C'est l'une des nombreuses méthodes d'essais électromagnétiques utilisées en contrôles non destructifs (CND) faisant usage de l'induction électromagnétique pour détecter et caractériser les défauts de surface et de sous surface dans les matériaux conducteurs et dans les métaux plus spécifiquement. On va discuter aussi sur le bruit de Barkhausen ainsi qu'on va aborder la méthode des ultrasons.

## II.1 Méthode de DRX

### II.1.1 Principe de la méthode

Comme toute méthode de détermination de la pression, le principe est de mesurer déformations et corréliser ces déformations avec les contraintes en utilisant principes des milieux continus. L'analyse du niveau de contrainte résiduelle présent dans le matériau en fait partie recherche spécifique que la technologie peut effectuer. A partir de la diffraction, on peut la diffusion élastique du réseau est utilisée pour décrire la déformation, et pour étudier le déplacement et la forme des pics de diffraction [16]. Chaque grain de poly cristallin est en fait un monocristal composé d'empilements Atomes métalliques réguliers. La pile peut être décrite par un ensemble plat Le cristal cristallin défini par la distance du réseau  $d$  est facilement mesuré par diffraction des rayons X par la loi de Bragg.

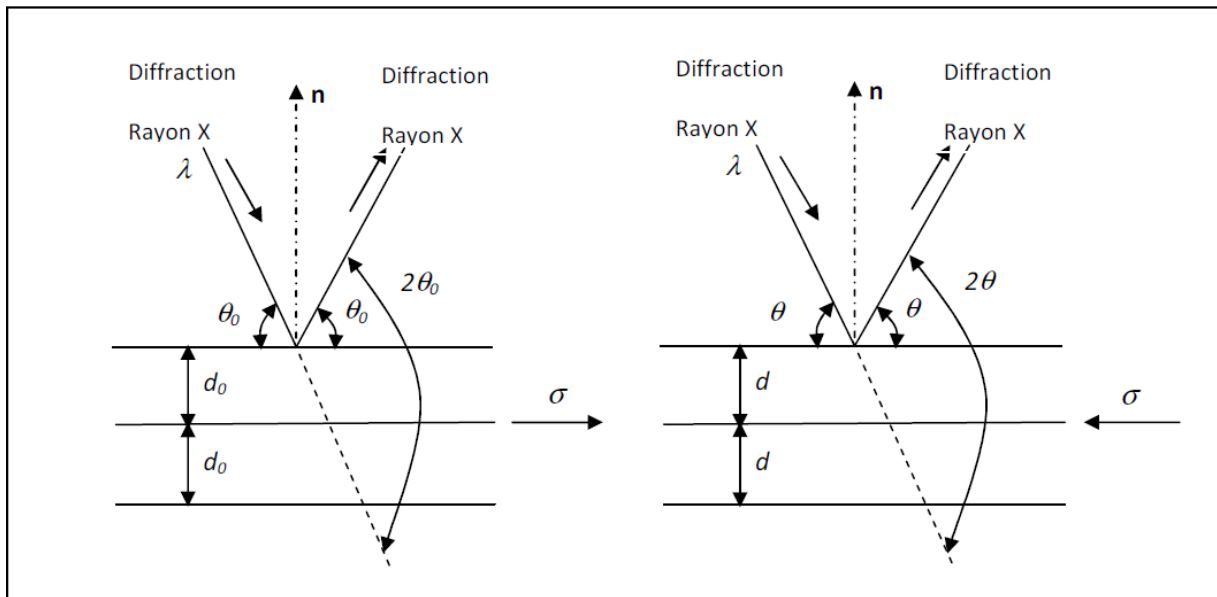
$$2d \sin(\theta) = n\lambda \quad (2.1)$$

Avec :  $d$  : Distance interréticulaire

$\theta$  : L'angle du rayonnement incident ou diffracté avec le plan réticulaire

$n$  : Ordre de réflexion (un nombre entier)

$\lambda$  : La longueur d'onde des rayons X



**Figure II.1: Cône de diffraction et mesure de  $\theta$  [17].**

En effet, imposer des contraintes au système modifiera la distance. La connaissance de  $\mathbf{d}$  peut donc le ramener aux contraintes contact. Si  $\mathbf{d}$  diminue à partir d'une valeur connue, le réseau est dans un état compressé. Si  $\mathbf{d}$  a Augmenté, c'est en traction.

### II.1.2 Loi de Bragg

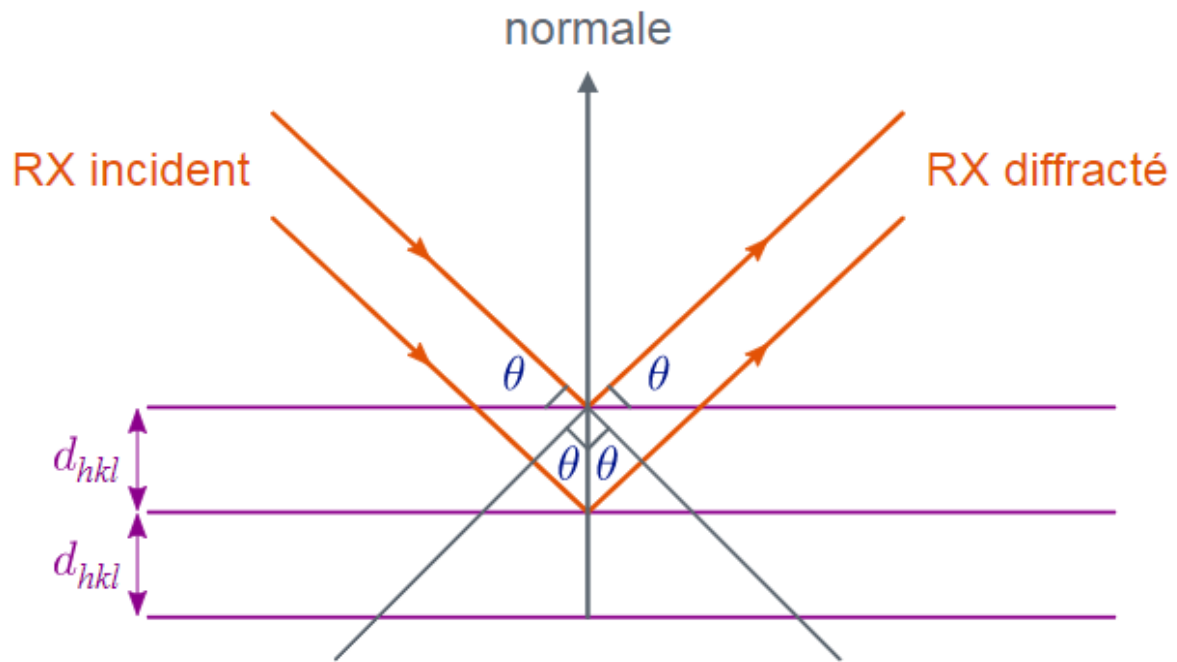
Chacun des faisceaux diffractés se comporte en ce qui concerne sa direction comme s'il était réfléchi selon la loi classique de la réflexion sur l'un des plans réticulaires du cristal : chaque plan cristallographique joue le rôle de miroir et réfléchit environ  $10^{-1}$  à  $10^{-3}$  pour cent de la radiation incidente.

Considérons un faisceau de rayon  $\mathbf{X}$  de longueur d'onde  $\lambda$  tombant avec une incidence  $\theta$  sur une famille de plans cristallins (hkl) définis par leur distance interréticulaire  $\mathbf{d}_{hkl}$ .

Il y a diffraction si la loi suivante, appelée loi de Bragg, est vérifiée :

$$2\mathbf{d}_{hkl}.\sin(\theta)=\mathbf{n}.\lambda \quad (2.2)$$

On peut démontrer la loi de Bragg en considérant la figure suivante. La différence de marche entre les deux faisceaux diffractés par deux plans réticulaires consécutifs est égale à  $2\mathbf{d}_{hkl}.\sin(\theta)$ . Une interférence additive apparaît lorsque cette différence de marche est un multiple entier n de la longueur d'onde  $\lambda$ .



**Figure 0II.2: Démonstration de la loi de Bragg [26].**

géométriquement, remarquons que le faisceau incident, la normale aux plans diffractant et le faisceau diffracté sont coplanaires et que le faisceau diffracté fait un angle  $2\theta$  avec le faisceau incident, par rapport à la réflexion de la lumière sur un miroir pour laquelle celle-ci a lieu pour toutes les incidences, il faut noter que la diffraction ne s'effectue que pour certaines directions, bien que diffraction et réflexion soient des phénomènes totalement différents, l'usage veut que l'on emploie indifféremment ces deux termes. Ainsi on parlera aussi bien de plans diffractant que de plans réflecteurs, de faisceaux diffractés que de faisceaux réfléchis, bien que seul le terme de diffraction soit correct.

### II.1.3 Champ d'application du DRX

La diffractométrie de rayons X est une méthode d'analyse physico-chimique. Elle ne fonctionne que sur la matière cristallisée (catalyseurs [18][19], minéraux, métaux, céramiques[20], polymères semi cristallins, produits organiques cristallisés, semi-conducteurs[21]) mais pas sur la matière amorphe (liquides, polymères amorphes, verres) toutefois, la matière amorphe diffuse les rayons X, et elle peut être partiellement cristallisée, la technique peut donc se révéler utile dans ces cas-là. Par contre, elle permet de reconnaître des produits ayant la même composition chimique brute, mais une forme de cristallisation différente, par exemple de distinguer les différentes silices (qui ont toutes la même formule

brute  $\text{SiO}_2$  : quartz, cristobalite,...), les différents aciers (acier ferretique, austénite,...) [22][23], alliages[24][25], ou les différentes alumines (qui ont toute la même formule  $\text{Al}_2\text{O}_3$  : corindon/alumine...).

#### II.1.4 Méthode

On prépare l'échantillon sous la forme d'une poudre aplanie dans une coupelle, ou bien sous la forme d'une plaquette solide plate. On envoie des rayons X sur cet échantillon, et un détecteur fait le tour de l'échantillon pour mesurer l'intensité des rayons X selon la direction. Pour des raisons pratiques, on fait tourner l'échantillon en même temps, ou éventuellement on fait tourner le tube produisant les rayons X.

##### II.1.4.1 Les tubes produisant les rayons X

Les tubes à rayons X sont des dispositifs permettant de produire des rayons X, en général pour trois types d'applications :

- Radiographie, tomographie.
- Cristallographie des rayons X (DRX).
- analyse chimique élémentaire par spectrométrie de fluorescence des rayons X.

Et il existe plusieurs types de tubes.



Figure II.3: Deux tubes radiogènes [27].

### **II.1.4.2 Principe de fonctionnement**

Quel que soit le type de tube, la génération des rayons X se fait selon le même principe.

Une haute tension électrique (de l'ordre de 20 à 400 KV) est établie entre deux électrodes. Il se produit alors un courant d'électron de la cathode vers l'anode (parfois appelée « anticathode » ou « cible »).

Les électrons sont freinés par les atomes de la cible, ce qui provoque un rayonnement continu de freinage, dont une partie du spectre est dans le domaine des rayons X.

Ces électrons excitent les atomes de la cible, et ceux-ci réémettent un rayonnement X caractéristique par le phénomène de fluorescence X.

Le spectre sortant du tube est donc la superposition du rayonnement de freinage et de la fluorescence X de la cible.

Les tubes de rayons X ont une efficacité énergétique extrêmement mauvaise, la majeure partie de la puissance électrique (99 %) étant dissipée sous forme de chaleur. Les tubes doivent donc être refroidis, en général par une circulation d'eau, bain d'huile ou par un système d'anode tournante.

### **II.1.5 Applications**

La technique est utilisée pour caractériser la matière. Cela concerne :

- la recherche : lorsque l'on crée un nouveau matériau (souvent des céramiques), que l'on veut connaître le résultat d'une réaction chimique ou physique (par exemple en métallurgie, pour reconnaître les produits de corrosion ou savoir quel type d'acier on a fabriqué), en géologie (géochimie) pour reconnaître la roche prélevée à un endroit, en biologie pour étudier la structure des protéines par exemple.
- pour le suivi de production dans une usine (contrôle de la qualité du produit) : dans les cimenteries les fabriques de céramique, etc...
- Dans l'industrie mécanique : pour qualifier et suivre les états de contrainte générés par les processus de production (grenailage, rectification...) [28].
- L'industrie pharmaceutique : en recherche : les nouvelles molécules sont cristallisées, et les cristaux sont étudiés par diffractométrie de rayons X. en production : cela sert notamment à vérifier que l'on n'a pas fabriqué une autre molécule de même formule, mais de forme différente.



### II.1.6 Définition des angles de rotations et appareils de DRX

La figure 1 illustre un exemple d'angle de rotation utilisé dans le processus d'acquisition Par DRX. L'angle  $\frac{\pi}{2} - \theta$  définit l'angle entre les normales du plan de diffraction (équivalent à Vecteur  $\mathbf{q}$ ) et rayons incidents.  $2\theta$  Décrit l'angle entre le faisceau incident et le faisceau diffracté.  $\psi$  Est l'angle entre la normale du plan échantillon et la normale du plan de diffraction.  $\phi$  Est l'angle de rotation autour de la normale du plan échantillon.

L'équipement XRD (diffractomètre) que l'on trouve couramment dans les laboratoires de recherche est similaire à l'équipement illustré dans (Fig.27). Le diffractomètre se compose de cinq parties: tube à rayons X, optique primaire, goniomètre, optique secondaire et système de détection. Les tubes à rayons X peuvent générer des photons à rayons X. L'optique primaire permet de limiter la taille et la divergence du faisceau incident, qui diverge complètement à la sortie du tube à rayons X. Il permet également la mise en place de filtres pour éliminer la ligne surnageant  $\mathbf{K}\beta$  du rayonnement initial. L'équipement optique principal commun est le collimateur circulaire, la rainure croisée, le miroir multicouche et le multi-capillaire (assemblage de fibre optique).

L'élément optique auxiliaire sélectionne la direction des photons X diffractés par l'échantillon. Si le détecteur est à l'heure et que le composant est focalisé (composant Bragg-Brentano), il est confiné à un espace vertical dont la largeur doit être adaptée à la résolution requise. Une fente de Soller horizontale peut être utilisée pour limiter la divergence verticale. Ces détecteurs peuvent mesurer l'intensité de la diffraction d'un échantillon en comptant le nombre de photons. Selon le type d'application, ils peuvent être ponctuels (scintillateur, compteur proportionnel, diode), linéaires (détecteur sensible à la position), courbes (CPS 120) ou bidimensionnels.

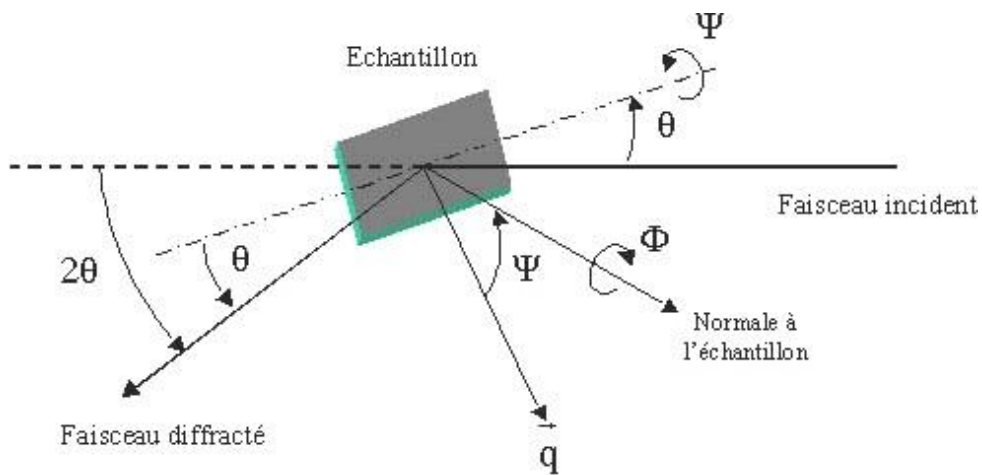


Figure 0II.4: Définition des angles de rotation [29].

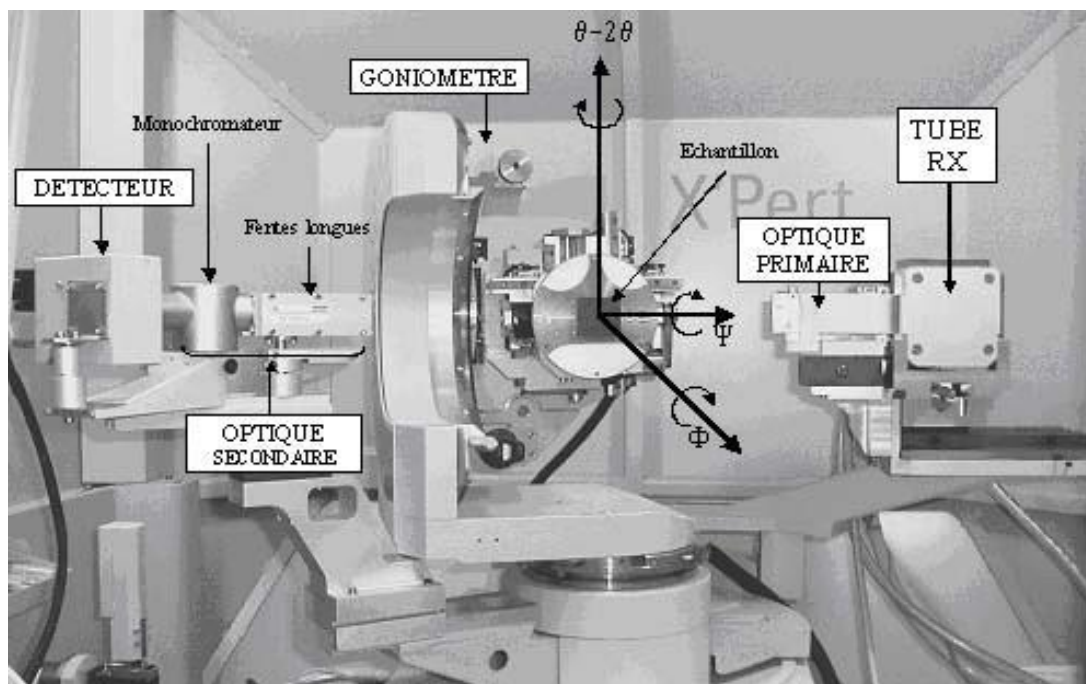


Figure 0II.5: Photo d'un appareil de DRX et définition des différentes rotations [29].

## II.2 Le courant de Foucault

### II.2.1 Historique

Le phénomène des courants tourbillonnants, ou courants induits, a été découvert par le physicien et astronome français Léon Foucault en 1851. Ces courants sont communément appelés courants de Foucault. Léon Foucault est connu principalement pour son expérience démontrant la rotation de la terre autour de son axe (expérience dite du pendule de Foucault). Il détermina aussi la vitesse de la lumière et inventa le gyroscope.

La méthode découverte par le physicien a été d'utiliser un disque de cuivre se déplaçant dans un fort champ magnétique pour montrer que les courants de Foucault (des champs magnétiques) sont produits quand un matériel conducteur se déplace dans un champ magnétique appliqué.

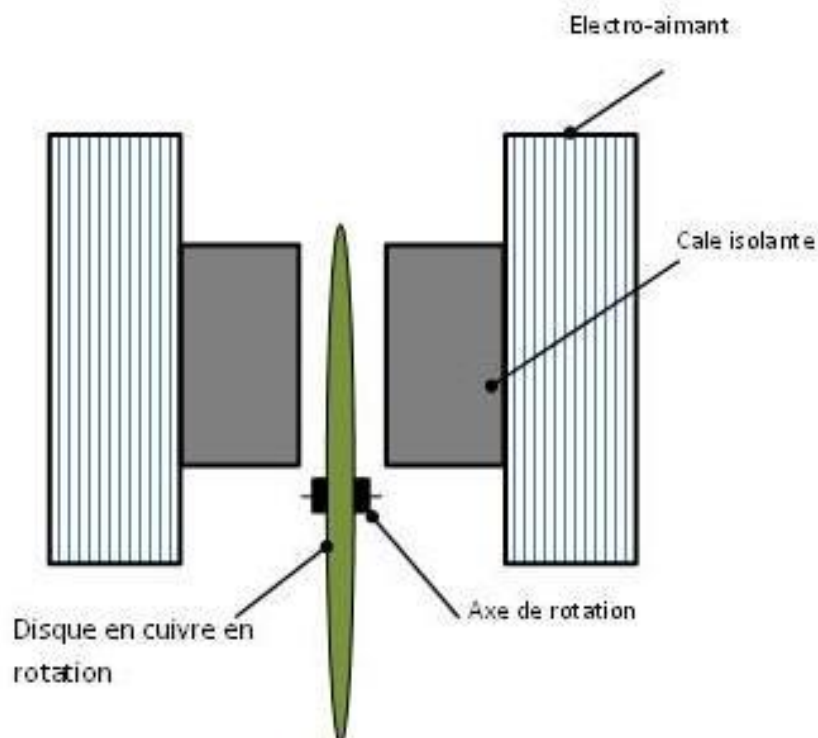


Figure II.6: Montage pour mettre en évidence les courants de Foucault [43].

## II.2.2 Principe du contrôle par courants de Foucault

Le contrôle par courants de Foucault est basé sur la loi de l'induction magnétique (Faraday trouvé). Nous appelons vortex, c'est-à-dire Matériaux conducteurs qui modifient le flux par induction magnétique. Selon la loi de Lenz, Le développement de ces tendances est contraire au phénomène qui les a produites. Par conséquent, dans le matériau, le changement de module induit est La phase dépend de l'épaisseur qu'elle traverse. L'intensité de distribution de l'induction et l'intensité de distribution des courants de Foucault dépendent principalement de :

- La conductivité
- La perméabilité
- La fréquence du courant d'excitation
- La géométrie du conducteur (siège des courants induits)
- La géométrie de l'inducteur
- La présence éventuelle défaut
- De l'entrefer inducteur matériau sous contrôle

L'amplitude du courant induit diminue rapidement à mesure qu'il s'éloigne de la source L'excitation et l'induction sont les mêmes. De plus, ces intensités sont liées à l'importance des changements de débit. En effet, plus Le flux varie fortement, plus l'intensité du courant à proximité est grande, et cette intensité diminue plus rapidement avec la profondeur. Pour que l'énergie électromagnétique puisse être injectée dans la pièce Pas de contrôle des contacts. Évoluer grâce à une mesure appropriée Cette énergie fournira certaines informations sur les pièces métalliques (conductivité, perméabilité, existence de défauts...).

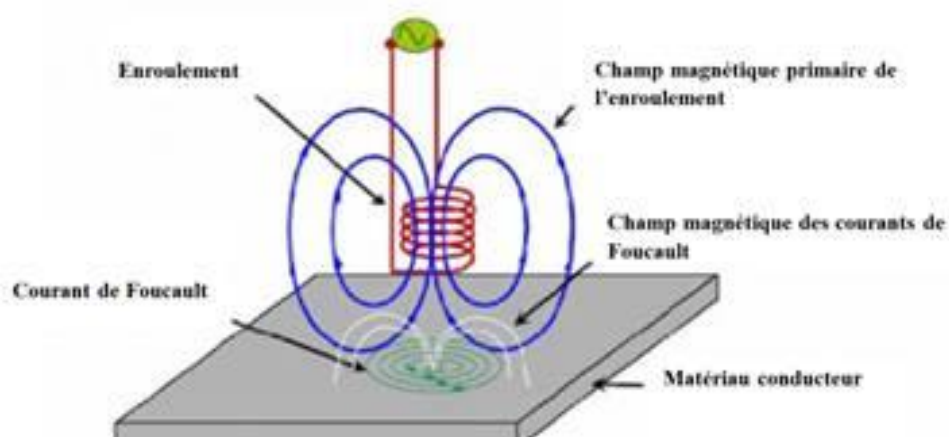


Figure II.7: Principe des courants de Foucault (mesure sur matériau métallique) [43].

## II.2.3 Capteur et technique de contrôle

### II.2.3.1 Eléments d'excitation et de mesure

L'excitation est en fait fournie par une bobine de tension ou à travers Courant variable. Pour faciliter la production, la bobine est formée rond. Trois principaux types de capteurs sont utilisés : la bobine encerclante, la bobine ponctuelle et la sonde.

La bobine encerclante est un capteur, et la partie à contrôler se produit dans L'intérieur du bobinage. Ce type de capteur est très adapté pour l'inspection de tubes ou de barres. La bobine ponctuelle est un capteur utilisé pour l'inspection locale de la surface La pièce à contrôler. En fait, il s'agit d'une petite bobine qui peut se déplacer sur ou près de la surface. Il couvre une superficie égale à sa surface. Il permet d'accéder à des zones étroites connues pour être difficiles à utiliser avec des capteurs conventionnels.

Enfin, la sonde est un capteur qui est utilisé pour inspecter le tuyau des manières suivantes à l'intérieur. Il peut être déplacé à travers des tuyaux ou des tuyaux. Il y a une soi-disant sonde "Tournante", (sonde dont le bobinage est enroulé autour de son axe de translation) Et la sonde dite « rotative » (constituée d'une bobine ponctuelle tournant autour d'un axe) sa traduction). Ce type de capteur est principalement développé pour la détection Tubes de générateurs de vapeur dans les centrales nucléaires, contrôle des tubes L'extérieur est impossible. La réponse de l'appareil au stimulus est déterminée par un Éléments sensibles aux grandeurs électromagnétiques, dans la plupart des cas, La différence de potentiel correspondant au changement de flux. La mesure est effectuée Les bobines sont généralement utilisées.

D'après leurs fonctions, on distingue deux types de capteurs :

- Le capteur dit "à double fonction" est un dispositif dans lequel un même enroulement assure les fonctions de détection et de réception. L'opération à partir de la mesure de l'impédance équivalente de la bobine, le calcul de cette impédance est sur la base du modèle de transformateur, le primaire est une bobine et le secondaire est court-circuité Fait de matériaux.
- Le capteur dit " à fonction séparées", en l'occurrence la fonction L'excitation et la réception sont assurées par des composants séparés. Ensuite, la réception peut Dans un endroit séparé de l'excitation, au niveau de la mesure, ce type d'équipement Il peut surmonter le changement d'impédance de la bobine causé par la dérive thermique. De plus, leur sensibilité est supérieure à celle des capteurs à double fonction.

Dans la plupart des cas, l'élément de mesure est une petite bobine utilisée pour mesurer la différence de potentiel induite. Cependant, des composants qui mesurent directement l'intensité de l'induction magnétique, tels que des sondes à magnétorésistance ou à effet hall, peuvent être utilisés. La mesure effectuée avec ce type d'équipement est une mesure unique de l'un des composants de détection, et la détermination et l'orientation de l'élément de mesure sont cruciales pour un tel équipement. Dans la plupart des cas, elles sont réalisées expérimentalement, mais la simulation numérique permet de déterminer le choix des pièces utilisées et la meilleure position de l'élément de mesure en fonction de la pièce à tester.

### **II.2.3.2 Les techniques de mesures**

Les méthodes de mesure existantes sont les suivantes :

- Le mode 'absolu' : Utilise un seul élément de mesure. Mesure par rapport à une référence fixe. ce type utilise de capteur lorsque le signal change assez haut (mesure d'épaisseur, conductivité, etc.).
- Le mode 'différentiel' : Deux des éléments de mesure indépendants sont intégrés dans Capteur, le signal de mesure est la différence entre les valeurs fournies par le capteur élément. La mesure différentielle comprend la comparaison de deux mesures effectuées en même temps Dans deux zones adjacentes. Cette méthode peut mettre en évidence des défauts Des discontinuités brutales dans la métallurgie et la conductivité (fissures, fissures...).

Les deux dernières méthodes sont mises en œuvre en utilisant des structures du type pont de Wheatstone.

### **II.2.3.3 Signaux d'excitation et exploitation**

Il y a trois modes d'excitation pour les capteurs à courants de Foucault :

- L'alimentation mono fréquence.
- L'alimentation multi fréquentielle.
- L'alimentation par de courants pulsés.

### **II.2.4 Calcul de l'impédance de la bobine**

La reconnaissance d'un défaut se fait, en étudiant l'impédance de la bobine. En négligeant la résistance de l'enroulement, la tension aux bornes de la bobine dans le tube s'écrit :

$$Z = \frac{U}{I} \quad (2.3)$$

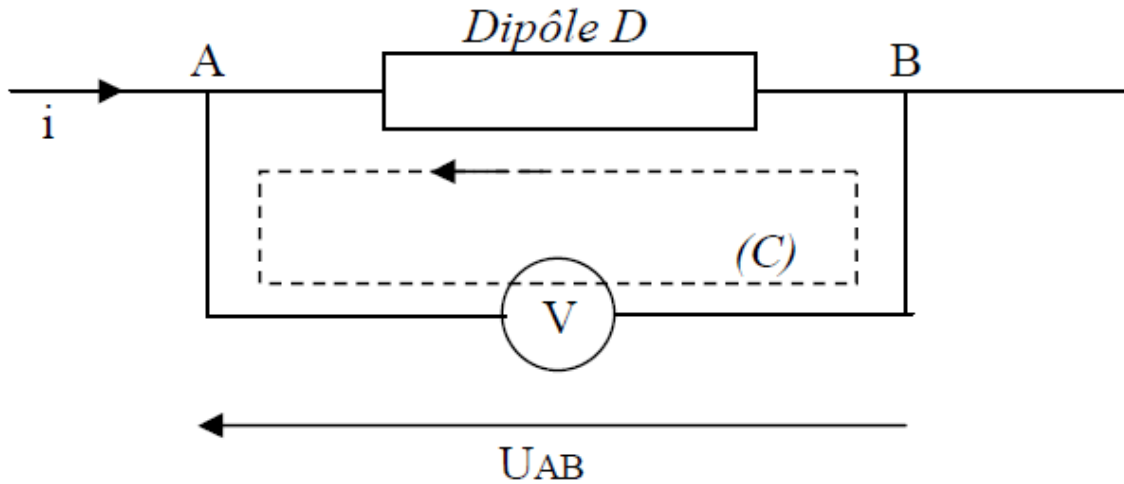


Figure II.8: Relation entre tension et fem induite

La loi de Faraday qui lie la **f.e.m.** induite dans la bobine et le champ magnétique **B** s'écrit :

$$e = - \frac{d\phi}{dt} \quad (2.4)$$

$$\text{Où } \phi(t) = \iint_s \vec{B} \cdot \vec{n} \cdot dS \quad (2.5)$$

La relation de Maxwell-Faraday sous forme intégrale donne alors :

$$\oint_c \vec{E} \cdot \vec{dl} = - \iint_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \vec{n} \cdot dS = - \frac{d\phi}{dt} \quad (2.6)$$

D'où :

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_{AB} = \int_{AVB} \vec{E} \cdot \vec{dl} = \int_{ADB} \vec{E} \cdot \vec{dl} - \int_c \vec{E} \cdot \vec{dl} = \int_{ADB} \vec{E} \cdot \vec{dl} + \iint_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \vec{n} \cdot dS \quad (2.7)$$

Soit :

$$\mathbf{u} = \int_{ADB} \vec{E} \cdot \vec{dr} + \frac{d\phi}{dt} = r i + \frac{d\phi}{dt} \quad (2.8)$$

Dans le cas où la bobine est de résistance négligeable :

$$\mathbf{u}_B = \frac{d\phi}{dt} = -e \quad (2.9)$$

$$\mathbf{u}_B = \frac{d\phi}{dt} = \mathbf{j}L_B\omega \cdot \mathbf{i}_B + \mathbf{j}\omega \sum_{q=1}^N \mathbf{M}_{qB} \mathbf{i}_q \quad (2.10)$$

D'où

$$\mathbf{Z} = \mathbf{j}L_B\omega + \mathbf{j}\omega \sum_{q=1}^N \mathbf{M}_{qB} \frac{\mathbf{i}_q}{\mathbf{i}_B} \quad (2.11)$$

Cependant on préfère exprimer une autre grandeur  $\Delta Z$  correspond à la différence de l'impédance de la bobine dans le tube et de l'impédance de la bobine seule dans l'air.

L'impédance de la bobine seule dans l'air s'écrivant :

$$\mathbf{Z}_0 = \mathbf{j}L_B\omega \quad (2.12)$$

Il vient :

$$\Delta \mathbf{Z} = \mathbf{Z} - \mathbf{Z}_0 = \mathbf{j}\omega \sum_{q=1}^N \mathbf{M}_{qB} \frac{\mathbf{i}_q}{\mathbf{i}_B} \quad (2.13)$$

C'est l'impédance de détection du tube.

## II.2.5 Avantages et limites de la méthode de mesure

Comme pour toute technique de contrôle CND, la méthode des courants de Foucault possède des avantages et des limitations. Au niveau des avantages, cette méthode peut détecter les défauts de surface et ceux près de la surface. La sonde d'essai n'a pas besoin d'entrer en contact direct avec la pièce testée. De plus, la méthode peut être utilisée pour plus d'applications que la seule détection de défauts et enfin une préparation minimale des pièces est nécessaire. Il existe cependant des limitations.

Tout d'abord, la méthode est restreinte aux matériaux conducteurs. De plus, l'inspection des matériaux ferromagnétiques peut être influencée par la perméabilité magnétique. Ensuite, la profondeur d'inspection (pénétration) est limitée. Les compétences et la formation requises sont plus importantes que pour les autres techniques de CND. Notons aussi que la finition et la rugosité de la surface peuvent interférer. Les courants de Foucault sont applicables sur les défauts débouchant. Et enfin, des normes de références sont nécessaires pour la configuration [43].





**Figure II.9: Mesure par courants de Foucault sur une pièce industrielle [43].**

## **II.3 Le bruit de Barkhausen**

### **II.3.1 Description**

Comme nous le savons tous, nous devons à Barkhausen en 1919 que le processus d'aimantation des matériaux ferromagnétiques se produit par des sauts soudains. Ces discontinuités peuvent être observées par l'impulsion de tension d'un champ magnétique alternatif externe aux bornes du circuit d'induction autour de l'échantillon ferromagnétique. Cet effet doit être considéré comme la première preuve de l'existence du domaine Weiss. Un matériau ferromagnétique est composé de plusieurs volumes élémentaires aimantés à saturation. La magnétisation signifie un changement soudain de la magnétisation locale, Faites-le face à la direction du champ magnétique externe. Depuis l'expérience de Barkhausen, de nombreux travaux sur cet effet ont été publiés. L'auteur essaie de déterminer le nombre de domaines de Weiss ; d'autres formes d'impulsion ; et certaines sont la vitesse de propagation de ces impulsions.

Cette conférence sera limitée à l'étude de l'effet de Barkhausen comme bruit de fond, qui se produit comme tension induite aux bornes d'un circuit entourant un matériau ferromagnétique soumis à un champ magnétique extérieur variable alternativement.

Cette méthode magnétique est basée sur l'interaction entre le champ de contraintes résiduelles à l'intérieur du matériau et le mouvement des parois des domaines magnétiques sous l'effet d'une excitation magnétique variable appliquée. Cette interaction génère un bruit appelé bruit Barkhausen [44] qui peut être détecté par ses effets magnétiques. Dans le domaine élastique, le niveau du bruit Barkhausen croît avec la valeur de la contrainte résiduelle. Une bobine de fil conducteur est placée près de l'échantillon. Quand l'échantillon est contraint, un signal d'induction électromagnétique qui est appelé bruit de Barkhausen peut être mesuré. Cette méthode présente l'inconvénient de ne s'appliquer qu'aux matériaux ferromagnétiques et nécessite un étalonnage délicat car elle est sensible à de nombreux paramètres micro structuraux.

### **II.3.2 Applications**

L'intensité des perturbations de Barkhausen, pour chaque matériau, mesure la quantité d'impuretés ou de dislocations du cristal, etc. et fournit une bonne indication des propriétés mécaniques d'un tel matériau.

L'analyse du bruit Barkhausen permet de suivre:

- Les variations de microstructure
- Les variations de contraintes résiduelles
- Les variations de dureté

L'amplitude du signal augmente avec les contraintes résiduelles et diminue avec la dureté [45].

C'est pourquoi l'effet Barkhausen est utilisé en contrôle non destructif de la dégradation des propriétés mécaniques dans les matériaux magnétiques soumis à des chargements cycliques, les particules de haute énergie ou les aciers à haute résistance soumis à l'abrasion.

L'application industrielle la plus courante est la recherche de brulures de rectification. Ce procédé de contrôle vient remplacer l'attaque Nital [46].

L'effet Barkhausen peut aussi mettre en évidence l'endommagement d'une couche mince au cours de divers procédés de nano fabrication telle la gravure ionique réactive.

## **II.4 La méthode des ultrasons**

### **II.4.1 Principe**

Il consiste à balayer une pièce par un faisceau pour détecter les défauts de discontinuité géométrique Il existe deux types de procédures d'analyse :

- Méthode par transmission.
- Méthode par réflexion.

#### **II.4.1.1 Méthode par transmission**

Il nécessite l'utilisation de deux palpeurs : l'un émetteur et l'autre récepteur qui reçoit la quasi-totalité de l'énergie acoustique émise. Si un défaut se trouve dans le parcours du faisceau ultrasonore, l'énergie est partiellement ou totalement occultée.



**Figure II.10: Palpeurs ultrason.**

#### **II.4.1.2 Méthode par réflexion**

Cette méthode est largement utilisée et une seule sonde fonctionne comme émetteur et récepteur. Les ondes ultrasonores sont émises de manière discontinue (impulsions courtes) pendant une longue période la période de temps entre un millionième et trois secondes (microsecondes). Entre deux La sonde à impulsions reçoit les ondes réfléchies, qui se distinguent de l'émission dans le temps.

Lorsque l'émission est modulée par impulsions, les signaux réfléchis par différents obstacles peuvent être séparés.

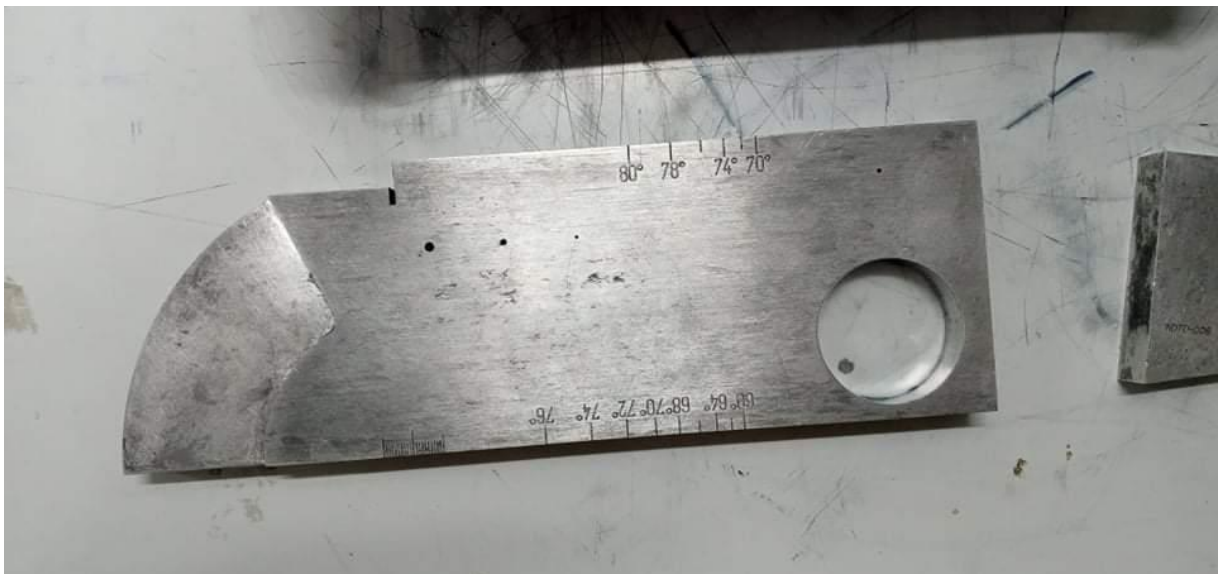
La méthode permet de détecter un défaut à condition qu'il présente une surface réfléchissante normale au faisceau ultrasonore (réflexion spéculaire), sinon l'onde réfléchie revient au palpeur mais faiblement (l'écho n'est pas observé). L'étalonnage correct de la base de temps de l'écran de l'oscilloscope de l'appareil à ultrasons permet de déterminer la position du défaut.

#### **II.4.2 Fonctionnement d'un appareil à ultrasons**

Le générateur envoie des impulsions avec une fréquence de répétition de plusieurs centaines Hertz, grâce à une horloge qui excite la sonde piézoélectrique à plusieurs tensions Des centaines de volts. En réception, le signal provoqué par l'écho est très faible (quelques millivolts) ; Il se produit entre deux impulsions. Le signal d'écho est affiché sur l'écran par l'affichage Système d'amplification haute performance (gain de 100 dB) large bande pour réduire le bruit. L'horloge contrôle la base de temps synchronisée par l'émetteur. Au niveau de la sonde, Le signal est instantanément transformé en ultrasons. Lorsque le faisceau d'ultrasons En rencontrant le côté opposé de la pièce, si le défaut est sur le chemin de la pièce, il y aura des reflets Faisceau ultrasonique. Une partie des ondes ultrasonores sera immédiatement réfléchi vers la sonde, La partie supplémentaire arrive au fond de la salle. Sur l'écran, on observe un écho intermédiaire qui révèle sa position et dont l'amplitude est fonction de la dimension et de l'orientation du défaut. Le contrôle par ultrasons utilise généralement les blocs d'étalonnage V1 et V2.



**Figure 0.11: Appareil à ultrasons**



**Figure II.12: Bloc d'étalonnage.**

### II.4.3 Différents types d'ondes

#### A. Les ondes longitudinales :

Aussi connu sous le nom d'onde de compression, qui se caractérise par La vibration est parallèle à la direction de propagation des ondes. Ce gars Les ondes se propagent dans les milieux solides et liquides. C'est prouvé en théorie Milieu élastique lié à la vitesse de propagation des ultrasons Les propriétés des matériaux sont liées par les éléments suivants [47,48] :

$$V_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2.14)$$

Avec :

**E** : module de Young

**$\nu$** : Coefficient de poisson

**$\rho$** : Masse volumique

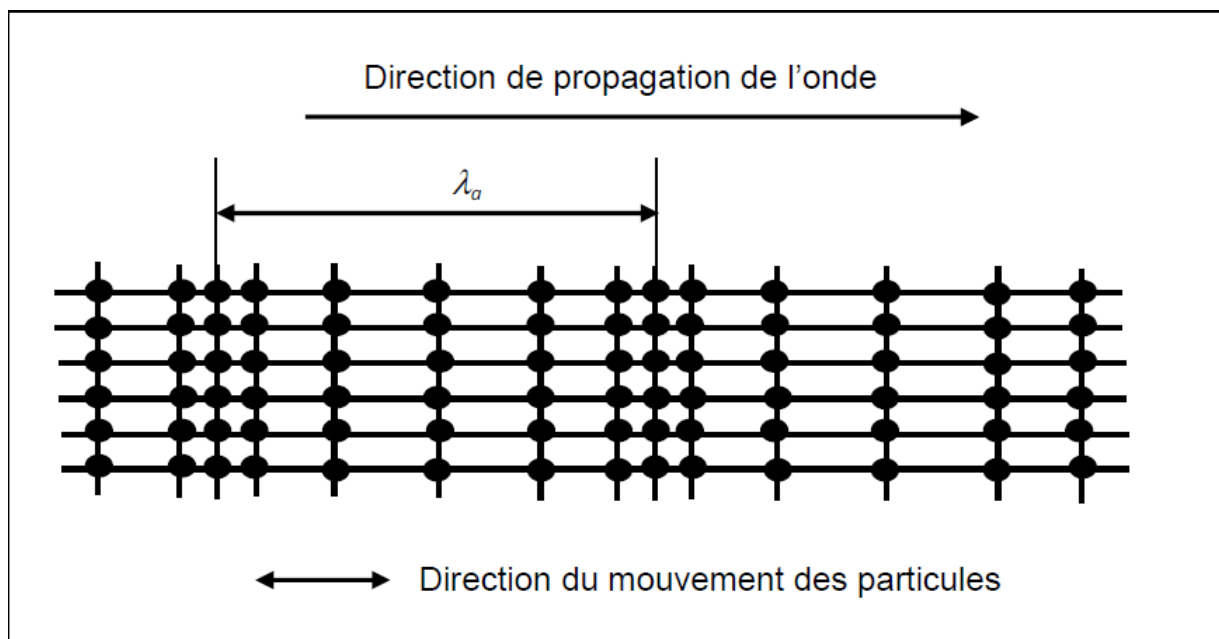


Figure II.13: Propagation d'une onde longitudinale [47,48].

## B. Les ondes transversales :

Appelées également ondes de cisaillement. Pour les particules qui vibrent perpendiculairement à la direction de propagation La vitesse de propagation des ondes transversales est liée aux propriétés du matériau par la relation suivante :

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (2.15)$$

Avec :

**E** : module de Young

**$\nu$** : Coefficient de poisson

**$\rho$** : Masse volumique

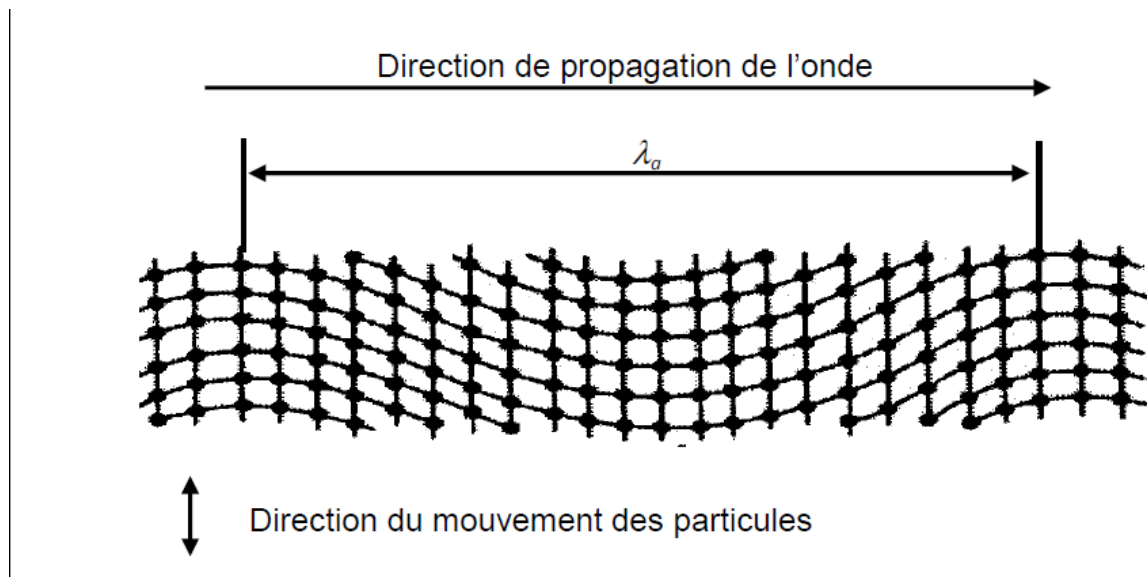


Figure II.14: Propagation d'une onde transversale [49].

Dans le cas d'un milieu isotrope, on a les deux relations suivantes [49]

➤ Ondes de compression :

$$V_L = \sqrt{\left(\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}\right)} \quad (2.16)$$

Avec :

$\lambda$ : La longueur d'onde

$\mu$  : Constante de Murnaghan

➤ Ondes de cisaillement :

$$V_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.17)$$

Ces deux types d'ondes sont les plus couramment utilisés en contrôle non destructif. Il est possible de générer d'autres types d'ondes, comme par exemple l'onde de Rayleigh appelé l'onde de surface ; c'est une onde composite constituée à la fois par des déplacements de particules longitudinaux et transversaux.

La longueur d'onde  $\lambda$  est liée à la vitesse de propagation  $V$  par la relation :

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (2.18)$$

Où  $f$  est la fréquence de la vibration.

### C. Les ondes de surfaces :

Les ondes de Rayleigh ont été découvertes en 1885 par le physicien Lord Rayleigh. C'est une onde dite de surface. Elle se propage à la surface libre d'un solide semi-infini, c'est un agencement particulier entre onde de compression et onde de cisaillement. Par hypothèse la propagation se fait selon une direction horizontale.



#### II.4.4 Equation de Hughes et Kelly sur les vitesses de propagation dans un milieu contraint

Le changement de vitesse de propagation reflète l'influence du champ de déformation vue macro de la propagation des ondes. L'expression de la vitesse de propagation L'échographie est obtenue en résolvant les équations de base de la cinétique. La composante  $T_{rs}$  du tenseur des contraintes est obtenue à partir de l'énergie déformation.

$\frac{\partial^2 U_r}{\partial t^2}$  Est le gradient de la transformation exprimé à partir de l'état initial.

$$\frac{\partial T_{rs}}{\partial x_s} = \rho \frac{\partial^2 U_r}{\partial t^2} \quad (2.19)$$

Les vecteurs déplacements associés aux trois solutions réelles de  $V$  sont orthogonaux. Leurs directions coïncident avec les directions principales ( $k_1, k_2, k_3$ ) du tenseur des déformations ( $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ ). Les expressions des composantes de vitesse de propagation suivant la direction  $k_1$  sont données par [49, 50, 51] :

$$\rho_0 V_{11}^2 = \lambda + 2\mu + (2l + \lambda)\theta + (4m + 4\lambda + 10\mu)\alpha_1 \quad (2.20)$$

$$\rho_0 V_{12}^2 = \mu + (\lambda + m)\theta + 4\mu\alpha_1 + 2\mu\alpha_2 - \frac{1}{2}\alpha_3 \quad (2.21)$$

$$\rho_0 V_{13}^2 = \mu + (\lambda + m)\theta + 4\mu\alpha_1 + 2\mu\alpha_3 - \frac{1}{2}\alpha_2 \quad (2.22)$$

Où :

$V_{ij}$  ( $j = 1, 2, 3$ ) est la vitesse de propagation d'une onde ayant une direction de propagation suivant  $k_i$  et une polarisation suivant  $k_j$ ,  $\rho_0$  représente la masse volumique à l'état non contraint du matériau et  $\theta = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$  la trace de la matrice des déformations.

$\mu$  et  $\lambda$  : constantes de second ordre de lamé.

$l$  et  $m$  : constantes de troisième ordre de Murnaghan.

#### II.4.4.1 Etat de contraintes uniaxiales

Le champ de déformation dû à une sollicitation uniaxiale a pour composantes principales :

$$\alpha_1 = \varepsilon_1 \quad (2.23)$$

$$\alpha_2 = \alpha_3 = -\nu \varepsilon_1 \quad (2.24)$$

$\varepsilon_1$  : la déformation dans la direction  $x_1$

$\nu$  : Le coefficient de Poisson.

##### ❖ Propagation dans la direction de la contrainte

$$\rho_0 V_{11}^2 = \lambda + 2\mu + [4(\lambda + 2\mu) + 2(\mu + 2m) + 2\nu\mu \left(1 + \frac{2l}{\lambda}\right)] \varepsilon_1 \quad (2.25)$$

$$\rho_0 V_{12}^2 = \rho_0 V_{13}^2 = \mu + [4\mu + \nu \left(\frac{n}{2}\right) + m(1 - 2\nu)] \varepsilon_1 \quad (2.26)$$

##### ❖ propagation perpendiculaire à la direction de contrainte

$$\rho_0 V_{22}^2 = \rho_0 V_{33}^2 = \lambda + 2\mu + [2l(1 - 2\nu) - 4\nu(m + \lambda + 2\mu)] \varepsilon_1 \quad (2.27)$$

$$\rho_0 V_{21}^2 = \rho_0 V_{31}^2 = \mu + [(\lambda + 2\mu + m(1 - 2\nu) + 0.5n\nu)] \varepsilon_1 \quad (2.28)$$

$$\rho_0 V_{23}^2 = \rho_0 V_{32}^2 = \mu + [(\lambda + m)(1 - 2\nu) - 6\nu\mu + 0.5n\nu] \varepsilon_1 \quad (2.29)$$

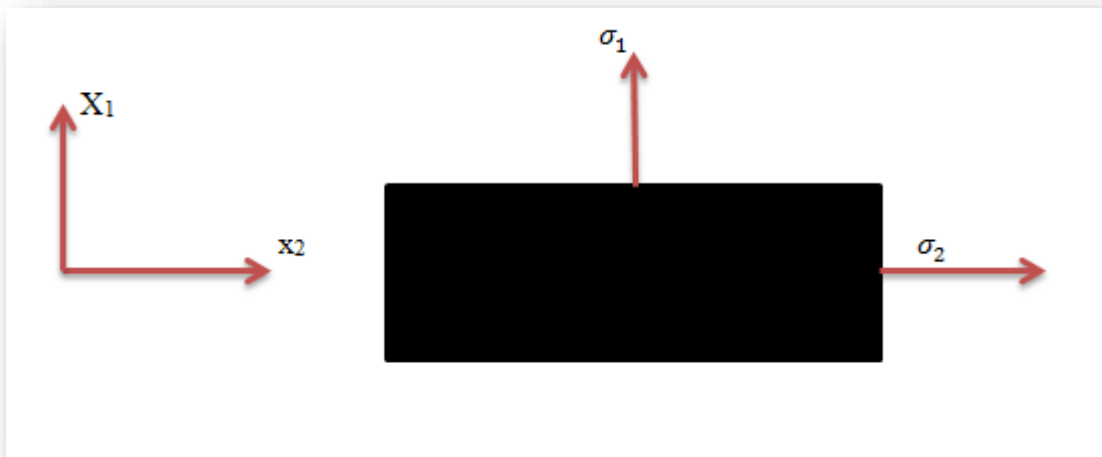
#### II.4.4.2 Etat de contrainte biaxiale

Dans le cas d'un champ de contrainte biaxiale (contrainte plane), les composantes de déformation dépendent de deux variables indépendantes  $\varepsilon_1$  et  $\varepsilon_2$ . Les composantes principales du champ de déformation correspondant sont données par :

$$\alpha_1 = \varepsilon_1 - \nu\varepsilon_2 \quad (2.30)$$

$$\alpha_2 = \varepsilon_2 - \nu\varepsilon_1 \quad (2.31)$$

$$\alpha_3 = -\nu\varepsilon_1 - \nu\varepsilon_2 \quad (2.32)$$



**Figure 0.15: Plaque soumise à un état de contraintes biaxiales.**

On obtient les relations suivantes :

$$\rho_0 V_{11}^2 = \lambda + 2\mu + K\varepsilon_1 + L\varepsilon_2 \quad (2.33)$$

$$\rho_0 V_{12}^2 = \mu + M\varepsilon_1 + N\varepsilon_2 \quad (2.34)$$

$$\rho_0 V_{13}^2 = \mu + P\varepsilon_1 + Q\varepsilon_2 \quad (2.35)$$

Avec  $(K, L, M, N, P, Q) = f(\lambda, \mu, \nu, l, m, n)$

#### II.4.4.3 Expression utilisées pour la détermination des contraintes résiduelles

Une complète description tensorielle de l'effet acoustoélastique dans un matériau isotrope, basée sur le formalisme de Murnaghan [52], a été proposée par Hughes et Kelly [53]. Une fois exprimé en termes de variation de vitesse, le résultat peut être écrit sous la forme suivante [54] :

$$\frac{V_{pp} - V_{pp}^0}{V_L^0} = k_1 \sigma_{pp} + k_2 (\sigma_{qq} + \sigma_{ss}) \quad (2.36)$$

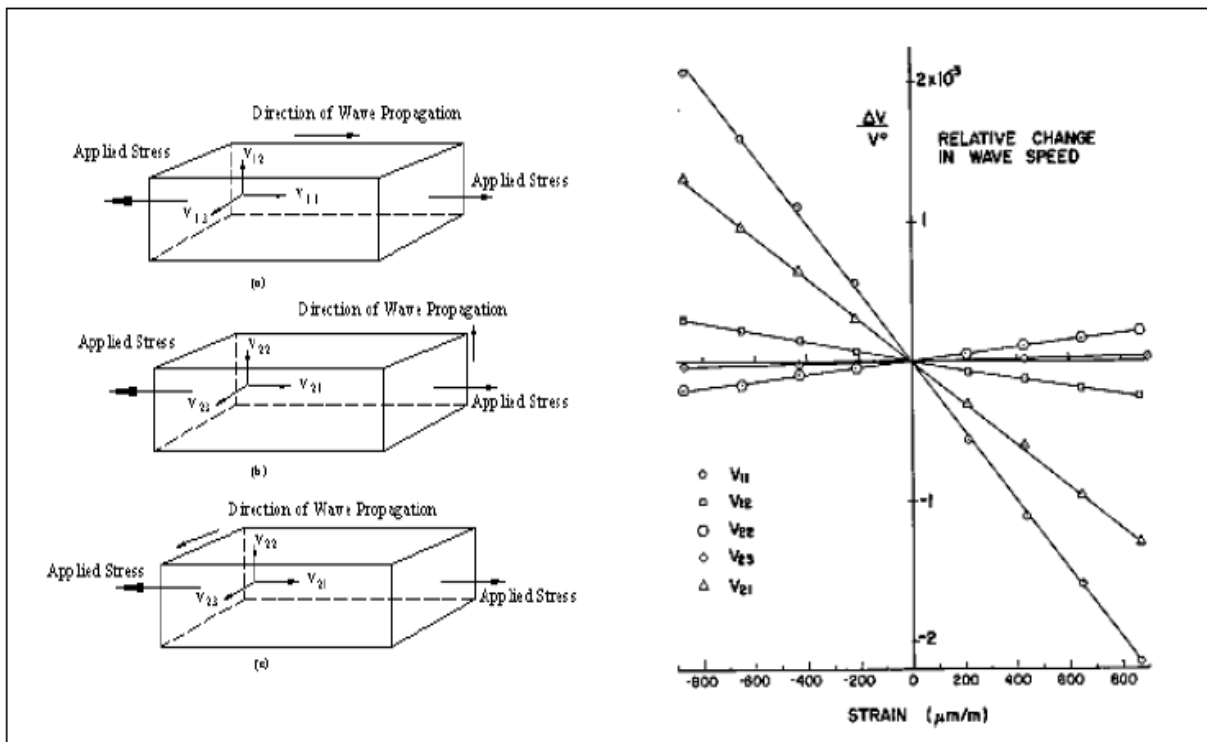
$$\frac{V_{pq} - V_{pq}^0}{V_{pq}^0} = k_3 \sigma_{pp} + k_4 \sigma_{qq} + k_5 \sigma_{ss} \quad (2.37)$$

Où :

$V_{pp}$  Et  $V_{qq}$ : sont les vitesses de propagation respectivement des ondes longitudinale et transversale dans un matériau isotrope non contraint.

$V_{pq}$  Est la vitesse de propagation de l'onde, où  $p$  se réfère à la direction de propagation et  $q$  la direction de polarisation.

L'indice  $s$  représente la direction orthogonale aux directions  $p$  et  $q$ ,  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$  et  $K_5$  sont les constantes acoustoélastiques.



**Figure II.16: Influence de la direction de propagation et de polarisation sur le changement relatif de vitesses sur acier à rail [51].**

## II.5 Conclusion

À la lumière de la revue bibliographique, il ressort quelques-uns des concepts basiques du processus de méthodes expérimentales de mesures non destructives qui sont disponibles pour la détermination des contraintes résiduelles. Chaque méthode possède des points positifs et négatifs.

Les méthodes non destructives sont des techniques souvent assez coûteuses, longues à mettre en œuvre et parfois sensibles à la microstructure. Ces techniques sont très bien développées pour la caractérisation surfacique de l'état de contraintes résiduelles.

Les méthodes les plus utilisées en ingénierie sont ; méthode de diffraction des rayons X (DRX), qui permet une investigation surfacique du champ de contraintes, aussi la méthode de courant de Foucault qui est une technique fondée sur la circulation de courants induits dans un matériau conducteur électrique.

Dans ce chapitre on a parlé aussi de bruit de Barkhausen et on a examiné que l'effet de Barkhausen est la variation discontinue de magnétisation des corps ferromagnétiques sous l'effet d'une fluctuation du champ magnétique.

Mettre le point final à la méthode des ultrasons qui la méthode que nous avons l'utilisé dans notre étude et dans l'expérimentation ainsi que les calculs des contraintes résiduelles. C'est une méthode permettant la détection de défaut à l'intérieur d'un matériau, basé sur la transmission et la réflexion d'onde de type ultrasons à l'intérieur d'un matériau.

## **Chapitre III : Modélisation (soudage FSW et contraintes résiduelles)**

# Introduction

l'équilibre, c'est-à-dire libre de tout effort extérieur. Suivant leur amplitude et leur profil, ces contraintes peuvent introduire des déformations non désirables du produit si l'équilibre interne est modifié.

Donc dans ce chapitre on parlera de définition des contraintes résiduelles et sa classification, ainsi que son origine et ses effets, en discutant aussi sur sa modélisation c'est-à-dire on va aborder la loi du comportement thermoviscoplastique qui est le couplage entre la loi de mécanique et la loi thermique et tout ça est pour le soudage FSW. On clôturera avec la résolution numérique des équations de soudage par la méthode des éléments finis.

## III.1 Définition des contraintes résiduelles

La contrainte résiduelle est une contrainte multiaxiale statique, qui existe dans un système isolé sans force ni moment extérieur, et est dans un état d'équilibre mécanique [55]. La source de contrainte peut provenir d'une déformation macroscopique, mésoscopique ou d'échelle microscope.

Dans la phase qui n'est pas affectée par les Les contraintes résiduelles sont les contraintes internes qui existent dans un matériau à

contraintes mécaniques externes, les grains cristallins il peut généralement être considéré comme un monocristal. Lorsque la charge externe est suffisamment élevée pour provoquer une déformation plastique, les sous-connexions des grains et des unités de dislocation apparaîtront à l'intérieur des grains. Ces sous-joints et éléments sont le résultat de l'interaction et du réarrangement des dislocations lors de la déformation. Alors le grain sera divisé par les discontinuités de ces réseaux.

Dans le cas des matériaux déformés plastiquement, les unités de sous-grains et de dislocations peuvent être considérées comme un ensemble de petites régions basiques de structure cristalline parfaite séparées par des défauts cristallins. Dans le cas des matériaux recristallisés, on peut également considérer des grains cristallins qui sont divisés par de petits éléments de même nature. Ces éléments sont appelés domaine de cohérence [56]. Chaque domaine de cohérence est composé d'un empilement atomique régulier, Il peut être défini par

un ensemble de mailles unitaires identiques et parallèles. Quelle que soit l'échelle du matériau que nous considérons, nous pouvons investir la preuve d'une contrainte résiduelle due à la déformation garantit Continuité des matériaux.

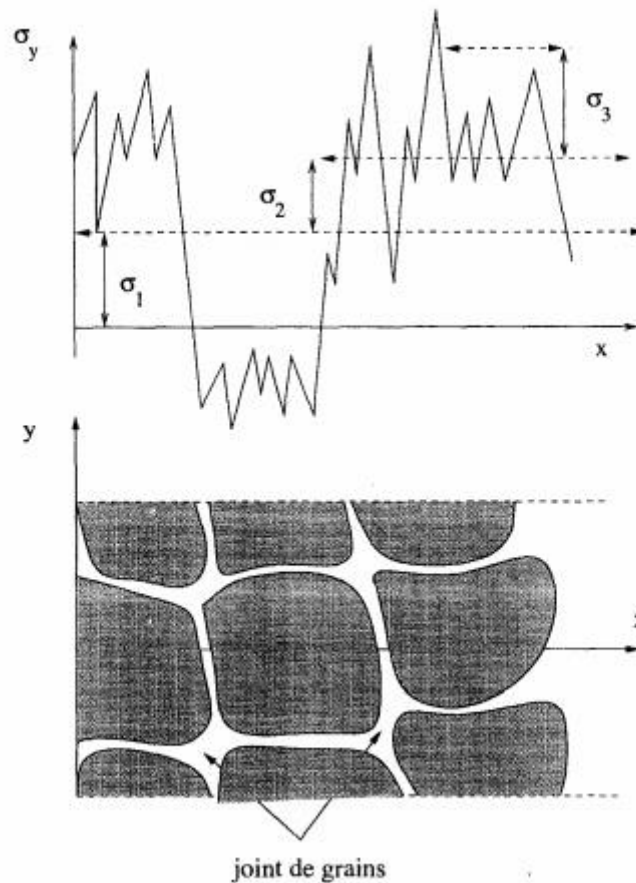
### **III.2 Classification des contraintes résiduelles**

Des contraintes résiduelles existent dans pratiquement toutes les pièces rigides, métalliques ou non (bois, polymère, verre, céramique, etc.). Elles traduisent l'histoire métallurgique le cas échéant et mécanique de chaque point et de l'ensemble de la pièce au cours de son élaboration. Elles existent à différents niveaux. On en distingue en général trois qui dépendent de l'échelle à laquelle on les observe [57] :

- ❖ Les contraintes résiduelles du 1<sup>er</sup> ordre : Homogène dans une très large gamme Le nombre de zones matérielles (quelques particules : de l'ordre de quelques dixièmes de millimètre à quelques millimètres). Les forces internes associées à ces contraintes sont en équilibre dans chaque section, et les moments associés à ces forces sont nuls sur n'importe quel axe. Les changements dimensionnels macroscopiques sont toujours causés par des changements dans l'équilibre des forces et des moments associés à ces contraintes.
  
- ❖ Les contraintes résiduelles du 2<sup>ème</sup> ordre : dues à l'hétérogénéité et à l'anisotropie du cristal, sous sollicitation mécanique (traction tels que des spécimens uniformes et lisses), certains grains orientés Atteindront avantagement la limite d'élasticité avant les autres, ce qui lorsque la charge est supprimé, donc le retour flexible sera différent et plus ou Moins librement dépendant des céréales, ce qui les fera entrer dans l'état contrainte résiduelle non nulle. Cependant, la moyenne de ces contraintes, c'est-à-dire la force résultante générale suivant l'axe de traction, sera nulle à la fin de l'essai (contrainte résiduelle dans l'ordre macroscopique). Ce type de contraintes peut être mesuré par Diffraction des rayons X.
  
- ❖ Les contraintes résiduelles du 3<sup>ème</sup> ordre : Le plus inégal petite surface de matière (distance entre certains atomes : à l'échelle de la dizaine de nanomètres). Force interne et moment Les facteurs liés à ces limitations sont en équilibre sur un très petit



territoire. Au niveau sub-micro, de nouvelles discontinuités apparaissent dans Grains de cristal, tels que dislocations, sous-articulations vacantes, parois et cellules.



**Figure 0.1: Définition schématique des différents ordres de contraintes pour un matériau monophasé [58,59].**

Dans le cas de matériaux réels, l'état des contraintes résiduelles résulte de superposition des contraintes d'ordre 1, 2 et 3, dans le cas d'un matériau monophasé [58,59]. La courbe des contraintes sur (**fig.39**) est représentée par la contrainte  $\sigma_y$  en fonction de l'abscisse  $x$  traversant plusieurs grains. Les contraintes d'ordre 1 s'étendent par définition sur plusieurs grains. Les contraintes d'ordre 2 s'étendent sur un seul grain et existent du fait des incompatibilités des déformations plastiques des grains. Les contraintes d'ordre 3 oscillent autour de la valeur moyenne des contraintes dans un grain et représentent la variation locale

de la déformation due à de nouvelles discontinuités apparaissant à l'intérieur des grains ou sous-grains.

Les contraintes d'ordre 1 sont celles qui sont souvent prises en compte de façon macroscopique (c'est-à-dire de façon mécanique), parce que ce sont elles qui sont atteintes le plus facilement par l'analyse expérimentale et par le calcul. Les effets des contraintes d'ordre 2 et d'ordre 3 sont souvent difficiles à distinguer, on considère alors les micros contraintes qui sont reliées aux déformations introduites par les défauts existant dans la microstructure (joints de grains, de phase, sous joints, défauts de réseau, dislocations ...) et qui correspondent à la somme des contraintes d'ordre 2 et d'ordre 3.

### **III.3 Origine des contraintes résiduelles**

Il existe de nombreuses sources de contraintes résiduelles. Elles sont produites en différentes étapes de fabrication des pièces :

- Pendant la solidification
- Lors du démoulage
- Au cours du traitement thermique et en particulier de l'opération de trempe.

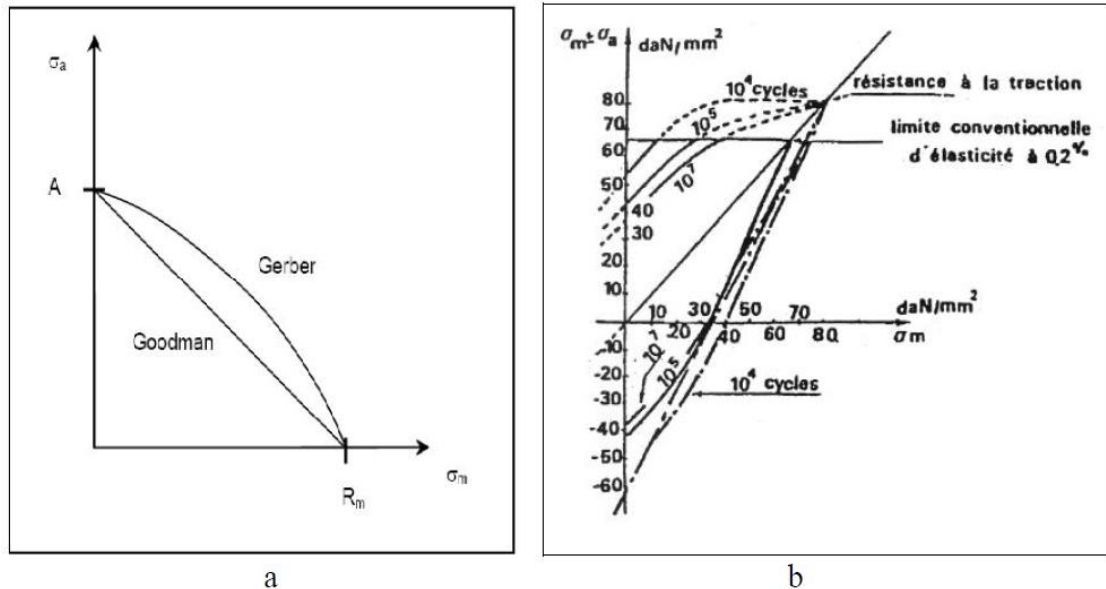
Elles peuvent être divisées en trois catégories : mécaniques, thermiques et métallurgie. On voit souvent une combinaison de ces différentes raisons pour la génération de contraintes résiduelles. Par exemple, en cas de rectification, les contraintes sont générées par trois processus :

- résultant de la déformation plastique en absence d'échauffement
- résultant du dépassement de la limite d'élasticité à la suite de la présence d'un gradient thermique
- résultant de changements de phases métallurgiques.

### **III.4 Effets des contraintes résiduelles**

Les contraintes résiduelles jouent un rôle essentiel dans la résistance à la fatigue des matériaux. Elles peuvent être considérées comme des contraintes moyennes ou statiques. Superposé à la contrainte de boucle. Cet effet du stress moyen conduit à Lorsque la contrainte

moyenne augmente, la résistance à la fatigue diminue, ce qui est reflété dans le diagramme de Haigh et Goodman.



**Figure 0.2: Diagramme de Haigh (a) et Goodman (b) [57].**

Diagramme de Haigh, donnant la limite d'endurance en fonction de l'effort Moyenne. Cette représentation est la plus courante ; on distingue les cartes de Haigh plusieurs formes différentes de limites d'endurance et Pression moyenne, comprenant principalement :

- la droite de Goodman, l'interaction linéaire la plus simple et la plus pessimiste (adoptée dans les codes de construction).
- la parabole de Gerber, un peu moins sévère.

L'effet des contraintes résiduelles sur la propagation de la fissure de fatigue est d'une grande importance et a été le centre de beaucoup de recherche et études [57,60]. Il y a de nombreuses méthodes pour générer des contraintes résiduelles sous forme de contrainte mécanique soit par grenailage, écrouissage, choc de laser, préchargement mécanique et par expansion.

Lorsque la charge de traction simple est appliquée, il provoquera une déformation plastique par compression. Un inconvénient de ce processus est la contrainte résiduelle inégale autour de la fissure.

L'expansion à froid des trous est une technique employée fréquemment par l'industrie aéronautique pour améliorer la durée de vie des structures en fatigue au niveau des trous des

rivets. Le processus de l'expansion a été développé par Boeing Company vers la fin des années 60 [61]. Fatigue Technologie Inc. a lancé une méthode efficace admise comme norme pratique aux Etats-Unis [62]. Le processus propose d'augmenter radialement un trou pour créer une zone de contrainte résiduelle de compression autour d'un trou qui retarde la progression de la fissure sous un chargement cyclique. L'expansion a été étudiée dans de nombreuses études. Beaucoup des solutions analytiques pour le calcul des contraintes résiduel ont été développées, mais peu corrobore avec des résultats expérimentaux [63-64].

Introduire une contrainte résiduelle par l'expansion des trous dans l'alliage, la durée de vie de l'aluminium [65] est considérablement augmentée, par rapport aux trous non dilatés, la vitesse de propagation est réduite. Recherche expérimentale et numérique sur l'effet de la dilatation à froid de l'alliage 6005 T5 [66] montre qu'une augmentation du degré d'expansion des pores conduira à prolonger la durée de vie. Contrainte de compression résiduelle causé par ce processus est un paramètre important de cette amélioration sur l'initiation ou la propagation des fissures de fatigue.

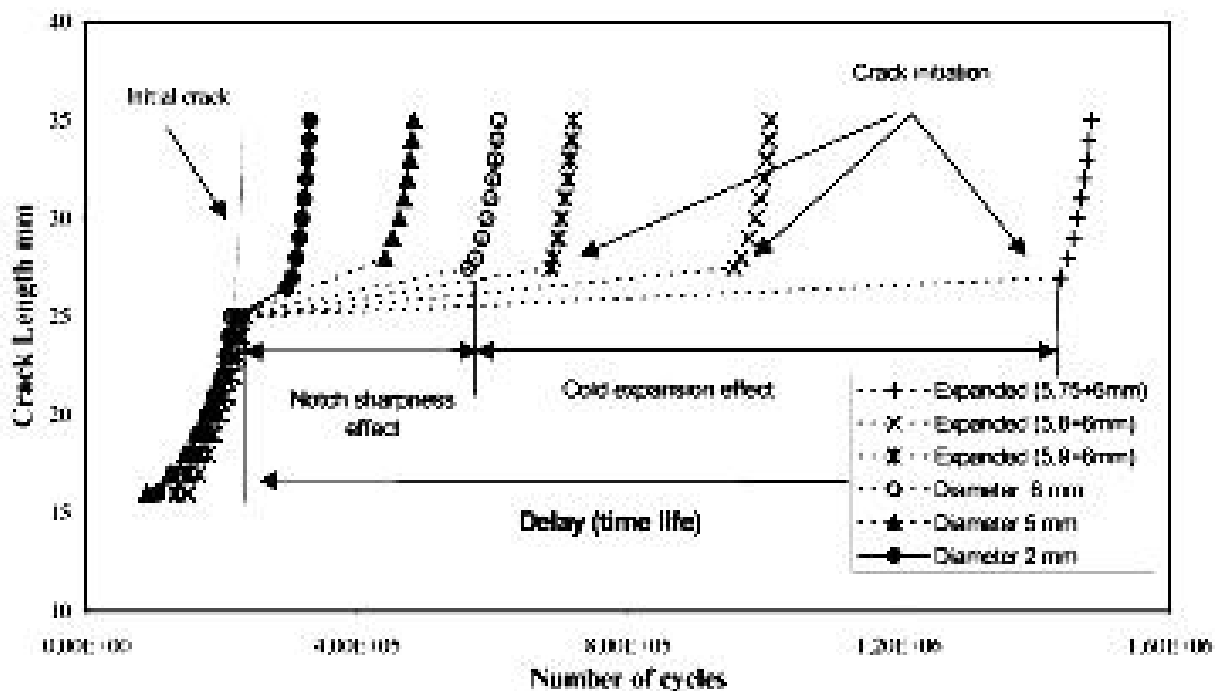


Figure 0.3: Longueur de la fissure en fonction du nombre de cycle [66].

L'effet des contraintes résiduelles par soudage sur la vitesse de propagation des fissures de fatigue a été mis en évidence sur des éprouvettes M(T) et C(T) en alliage d'aluminium 2024 T351 [67].

Les contraintes résiduelles peuvent être aussi induites au cours du service sous forme de surcharges [68, 69]. En effet, une surcharge appliquée lors d'un chargement d'amplitude constante provoque un retard sur la propagation de fissure.

Halliday [70] a étudié l'effet de surcharges pour différents rapport de charge sur la vitesse de propagation sur l'alliage d'aluminium 2024 T351. Un retard de la vitesse de propagation par rapport à celui immédiatement avant la surcharge, a été observée pour un essai à  $R = 0,05$ . La vitesse de propagation minimum a eu lieu à -2 microns -3 microns et au-delà des positions des deux fronts de fissures avant application de la surcharge. De même, si une sous-charge [71] intervient dans ce type de chargement une accélération du taux de propagation peut être observée.

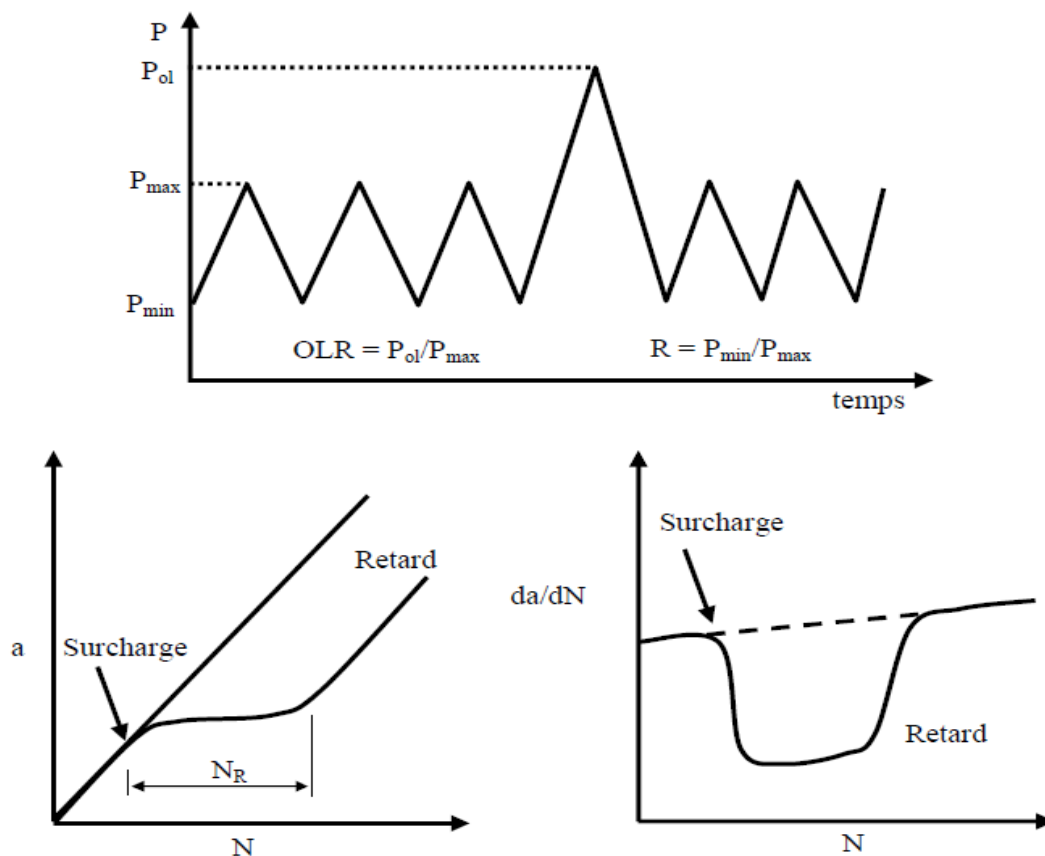


Figure 0.4: Longueur de la fissure en fonction du nombre de cycle [66].

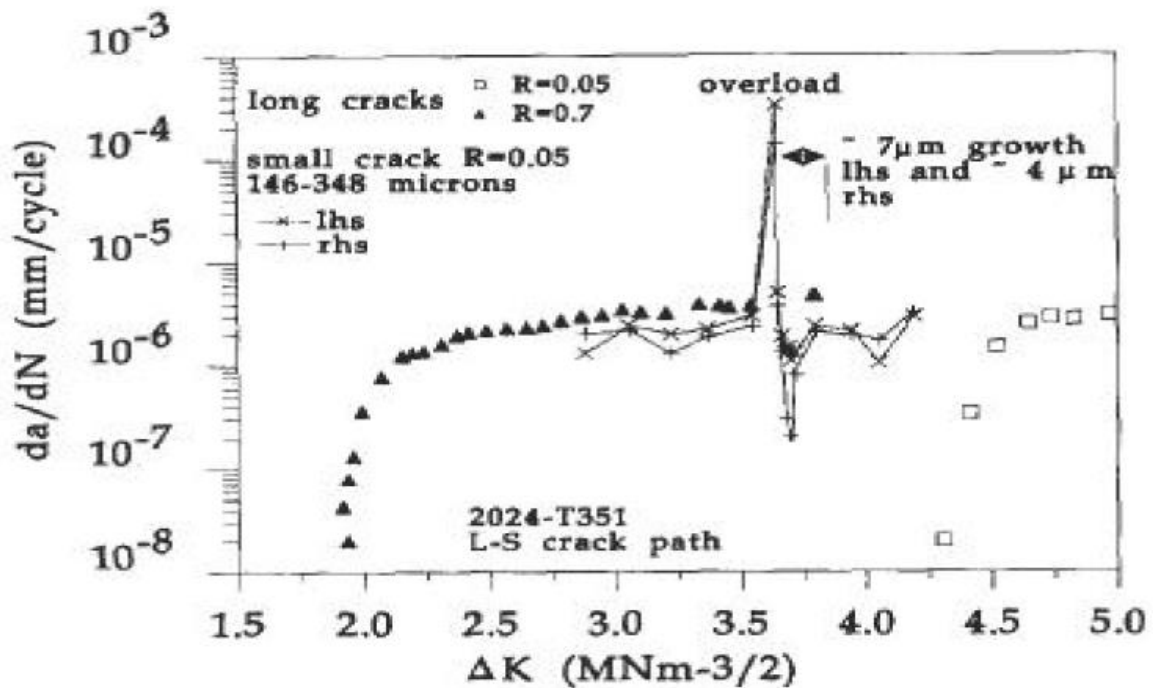


Figure 0.5: Evolution de la vitesse de fissuration sous l'influence d'une surcharge [72].

Lam et Lian [73] ont également utilisé la méthode de déformation plastique localisée (LPD) pour générer une contrainte résiduelle dans l'alliage d'aluminium type 2024 T3. Ils ont également expliqué l'effet du rapport de charge sur la propagation Fissures de fatigue. Calculant le facteur d'intensité de contrainte résiduelle par la méthode des éléments finis et la méthode de la fonction de poids, où  $R_{eff}$  est déterminé.  $R_{eff}$  représente le rapport de charge effectif, qui dépend du coefficient La définition de l'intensité de contrainte résiduelle  $K_r$  est la suivante :

$$R_{eff} = \frac{K_{min} + K_r}{K_{max} + K_r} \quad (3.1)$$

L'évaluation de  $R_{eff}$  a permis d'étudier l'effet des contraintes résiduelles sur la propagation de la fissure de fatigue. La méthode d'évaluation du rapport de charge effectif  $R_{eff}$  est aussi utilisée par le code AFGROW [74].

En plus des méthodes d'introduction des contraintes résiduelles déjà citent, on peut introduire des contraintes résiduelles par préchargement mécanique. L'utilisation de cette méthode a fait l'objet de plusieurs études [75,76]. Des contraintes résiduelles par préchargement de flexion

(plastification) ont été introduites par Pintschovius et Jung [77], Benachour [78] et Jones et al. [79].

Certaines structures possédant des entailles sont soumises à des préchargements de traction.

Le but de notre mémoire est d'étudier l'effet des préchargements de traction sur la distribution des contraintes résiduelles dans une plaque à trou central et par conséquent leurs effets sur la propagation des fissures de fatigue.

### **III.5 Modélisation des contraintes résiduelles pour le soudage FSW**

#### **III.5.1 Couplage thermomécanique**

Beaucoup de pièces mécaniques sont soumises à la fois à des sollicitations mécaniques et thermiques. C'est le cas par exemple des aubes de turbines soumises à des températures élevées et aux efforts d'inertie, ou d'une pièce forgée qui s'échauffe quand elle se déforme. La simulation de tels problèmes peut nécessiter de résoudre à la fois un problème thermique (détermination du champ de température dans l'aube) et un problème mécanique (détermination de la contrainte dans l'aube).

Dans certains cas, il peut arriver que ces deux problèmes soient liés. Par exemple quand on chauffe une pièce, elle se dilate et donc se déforme. Si la pièce ne peut se déformer librement, on a création de contraintes. Une sollicitation thermique provoque une contrainte ou une déformation mécanique. Au contraire, si l'on déforme fortement un matériau métallique, il s'échauffe. Une sollicitation mécanique engendre alors un effet thermique. On dit que les problèmes de mécanique et de thermique sont couplés et on parle de couplage thermomécanique.

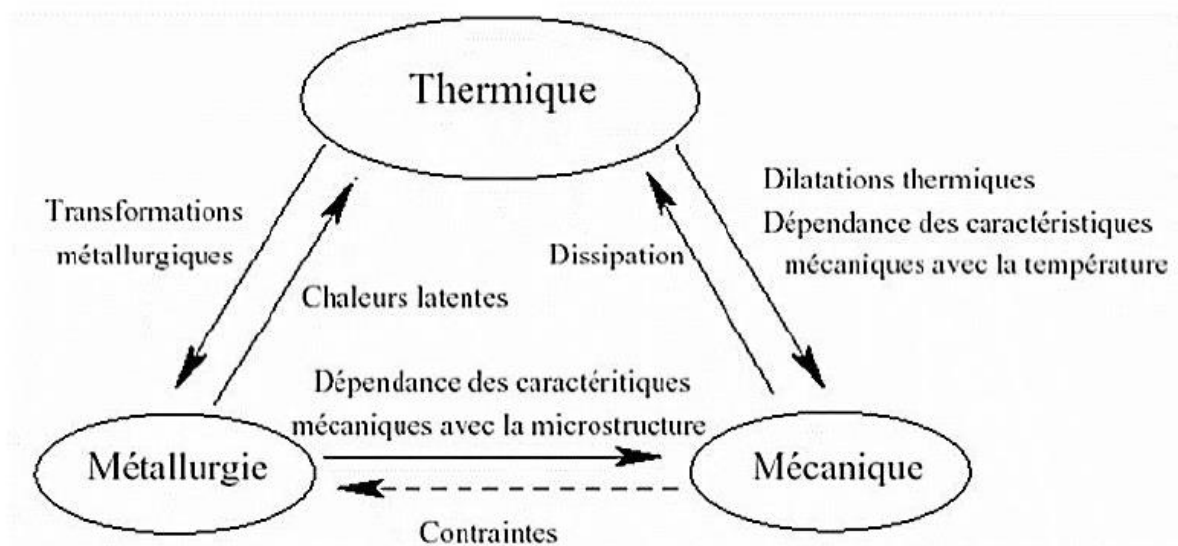
En outre quand on parle de soudage par friction malaxage on observe des phénomènes physiques mis en jeu pendant le processus de soudage, soit mécanique soit thermique.

Généralement, les phénomènes mécaniques sont dus au frottement à l'interface entre l'outil et les pièces soudées et à la déformation plastique du matériau. La source de frottement est le contact de l'outil en rotation avec le matériau. Le frottement est caractérisé par une contrainte de cisaillement à l'interface. La déformation plastique trouve sa source dans le mouvement du matériau en rotation sous l'effet du frottement à l'interface outil plaques et dans le malaxage dû au pion. La déformation plastique est importante dans la région située sous l'outil.

Par ailleurs, il existe des phénomènes thermiques et d'après ces phénomènes on observe deux principaux au cours du procédé FSW, qui sont ; la génération et la conduction de la chaleur. La génération de la chaleur vient d'une source de chaleur surfacique due au

frottement à l'interface et une source volumique due à la déformation plastique du matériau. La répartition de la génération de la chaleur entre ces deux sources dépend de la condition de contact entre l'outil et le matériau. En effet, pour un contact presque collant, la chaleur est principalement générée par la déformation plastique du matériau. Par contre, pour un contact glissant, la plus grande partie de la chaleur est créée par le frottement. La chaleur générée est transférée principalement par conduction. Le transfert par conduction dans les pièces soudées dépend de deux choses. Premièrement, il dépend de la conductivité thermique du matériau soudé, par exemple, l'aluminium est caractérisé par une grande conductivité thermique, ce qui contribue à évacuer rapidement la chaleur créée. En second, il dépend de la chaleur évacuée dans la plaque support et dans l'outil c'est-à-dire la résistance des interfaces de contact aux transferts thermiques. Finalement, la chaleur est évacuée aussi par convection entre l'outil, les deux plaques à souder, la plaque support avec le milieu extérieur (ambiance).

Les phénomènes mécaniques et thermiques, dans l'ensemble des procédés de soudage par fusion, entraînent une modification de la microstructure du matériau de base et ses propriétés mécaniques. Cet inconvénient provient des phénomènes métallurgiques qui apparaissent lors du soudage et qui représentent le lieu de concentration des contraintes dans le cas des sollicitations externes.



**Figure III0.6: Couplage thermique, mécanique et métallurgique du procédé FSW [97].**



Le gradient des températures est relié au vecteur densité de flux de chaleur à partir de la loi de Fourier :

$$\vec{j}_g = -\lambda \cdot \overrightarrow{grad}(T) \quad (3.2)$$

Où  $\lambda$  est la conductivité thermique.

Le problème mécanique est résolu en temps par le schéma d'Euler implicite ; pour le champ de vitesse «  $y$  » en tous points du volume, nous avons :

$$y^{t+\Delta t} = y^t + \dot{y}^{t+\Delta t} \Delta t \quad (3.3)$$

Cette résolution permet de calculer les termes sources et les conditions aux limites du problème thermique. Ce dernier est ainsi couplé incrémentalement au problème mécanique et intégré temporellement selon le schéma de Crank-Nicholson. La température calculée est ensuite utilisée à l'incrément suivant pour calculer les paramètres thermo-dépendants du problème mécanique. Avec un problème thermomécanique fortement couplé et l'utilisation d'une interpolation linéaire de Galerkin, des oscillations numériques peuvent apparaître sur le champ de température. Ils sont dus à des gradients thermiques trop grands pour le pas de temps utilisé et imposé par le calcul mécanique ; ils ne peuvent être absorbés en un seul incrément de temps. Dans ce cas, le problème thermique est résolu avec un pas de temps plus grand et adapté au gradient thermique, puis les champs thermiques sont interpolés linéairement à la fin du pas de temps, plus faible, de la mécanique.

### **III.5.2 Équation de la mécanique (Loi de comportement viscoplastique, loi de Norton Hof)**

La loi de Norton proposée en 1929, pour représenter le fluage stationnaire et unidimensionnel de certains aciers à haute température est très utilisée pour décrire le comportement quasi-statique de nombreux matériaux et cela pour une double raison : d'une part, elle ne fait intervenir qu'un faible nombre de paramètres identifiables facilement par l'expérience ; d'autre part, sa formulation mathématique est très simple.

Elle a été généralisée par Odqvist, puis par Hoff, pour le cas des sollicitations multidimensionnelles. Elle est appelée depuis : loi de Norton-Hoff.

La loi de Norton-Hoff dépend d'un exposant  $p$ , souvent compris entre 1 et 2, fonction de la température et du matériau. Quand  $p$  passe de 2 à 1, cette loi passe de la loi de comportement du fluide Newtonien ( $p = 2$ ) à la loi de la plasticité parfaite de Von Mises ( $p = 1$ ).

Récemment cette loi a été généralisée pour différentes lois de la plasticité parfaite par Friaâ. Ces généralisations ont permis de trouver une nouvelle méthode de calcul de la charge limite d'une structure rigide parfaitement plastique.

L'intérêt de cette méthode réside dans le fait que contrairement à la méthode cinématique classique l'on n'a pas besoin de définir des surfaces ou des lignes de glissement pour déterminer le convexe des chargements potentiellement supportables d'une structure constituée d'un matériau rigide-parfaitement plastique. En effet quand le matériau de Norton-Hoff (généralisé) tend vers le matériau de Von Mises (ou le matériau rigide-parfaitement plastique sous-jacent au matériau de Norton-Hoff généralisé), ces discontinuités de vitesses tangentielles apparaissent comme une forte variation de vitesses (continues), dans une zone étroite de la structure.

Le deuxième intérêt de cette méthode est que la fonctionnelle à minimiser est différentiable, tandis que dans la méthode cinématique classique ce n'est pas le cas.

### **III.5.2.1 Description de la loi Norton-Hoff**

La loi de Norton se limite aux cas des sollicitations unidimensionnelles, alors qu'en pratique, celles-ci sont souvent multidimensionnelles.

Odqvist est arrivé à généraliser la loi de Norton pour le cas des sollicitations tridimensionnelles, sous les hypothèses :

- le matériau est incompressible.
- la vitesse de déformation  $\dot{\epsilon}$  est indépendante de la pression hydrostatique.
- il existe un potentiel de fluage (ou les tenseurs de contraintes et des vitesses de déformations sont coaxiales).
- le matériau est isotrope.
- la loi de Norton est vérifiée pour le cas unidimensionnel.

Plus tard, Hoff a promu la loi de Norton et a obtenu la même relation. Friaâ résume la loi Norton-Hoff comme Loi de Norton-Hoff généralisée de toute loi de plasticité parfaite. Reconnaisant qu'il s'agit d'un cas limite, la loi résumée par Odqvist et Hoff est généralement

appelée Norton-Hoff. Il relie le tenseur de vitesse de déformation  $\dot{\epsilon}_{ij}$  ;  $i,j=1,2$  et  $3$  au déviateur du tenseur des contraintes  $S_{ij}$  :

$$\begin{cases} \dot{\epsilon}_{ij} = \alpha |s|^{n-1} s_{ij} \\ \dot{\epsilon}_{ii} = 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

Où  $\alpha$  et  $n$  sont deux paramètres positifs dépendants de la température et du matériau et  $|s| = \sqrt{s_{hl}s_{hl}}$

En posant  $n = q - 1$  et  $p = \frac{q}{q-1}$  (conjugué de  $q$ ), la loi de Norton-Hoff devient :

$$\begin{cases} \dot{\epsilon}_{ij} = \alpha |s|^{q-2} s_{ij} \\ \dot{\epsilon}_{ii} = 0 \end{cases} \quad (3.5)$$

### III.5.2.2 Équation de la mécanique dans le soudage FSW

Il y a deux équations principales en mécanique ; la première est la conservation de la masse encore appelée équation de continuité :

$$\partial_t \rho + \text{div}(\rho \vec{v}) = 0 \quad (3.6)$$

Où  $\rho$  est la masse volumique et  $\vec{v}$  est le vecteur des vitesses matérielles.

Le matériau est considéré comme rigide viscoplastique et incompressible. En effet, dans la zone thermomécaniquement affectée, la composante élastique de la déformation est négligeable devant la composante plastique. Dans la zone thermiquement affectée et plus généralement dans la plaque, la composante élastique de la déformation est faible. Elle doit être prise en compte pour le calcul des contraintes résiduelles dues aux retours élastiques en aval de l'outil lorsque le matériau refroidit [4].

Ainsi, nous écrivons :

$$\text{div}(\vec{v}) = 0 \quad (3.7)$$

$$\begin{cases} \text{div}(\sigma) + \rho \vec{g} = \rho \partial_t \vec{v} \\ \sigma = s - pI \end{cases} \quad (3.8)$$

Où  $\vec{g}$  est le vecteur de pesanteur,  $\sigma$  est le tenseur des contraintes de Cauchy,  $s$  est la partie déviatorique des contraintes,  $p$  est la pression hydrostatique et  $I$  est la matrice identité.

La gravité et l'inertie sont négligeables :

$$\text{div}(\sigma) = \text{div}(s) - \nabla p = \vec{0} \quad (3.9)$$

En FSW, le matériau est chaud et à l'état pâteux dans la zone de grandes déformations proche de l'outil. La loi de Norton-Hoff devient :

$$s = 2k(T)(\sqrt{3}\bar{\epsilon})^{m(T)-1}\dot{\epsilon} \quad (3.10)$$

Où  $\dot{\epsilon} = \frac{1}{2}(\nabla\vec{v} + \nabla\vec{v}^T)$  est le tenseur des vitesses de déformation

Et  $\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3}}\dot{\epsilon}$  :  $\dot{\epsilon}$  est le taux de déformation généralisé.

La contrainte équivalente de Von Mises est déduite par la relation suivante :

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{2}{3}}s : s = \sqrt{3}k(T)(\sqrt{3}\bar{\epsilon})^{m(T)} \quad (3.11)$$

Où  $(T)$  la température,  $k(T)$  est la consistance du matériau et  $m(T)$  est le coefficient de sensibilité à la vitesse de déformation, qui dépendent de la température.

Les conditions aux limites mécaniques de surface libre sont imposées sur la surface de la pièce  $\Gamma_l$  qui n'est pas en contact avec l'outil :

$$\sigma \cdot \vec{n} = 0 \text{ sur } \Gamma_l \quad (3.12)$$

Où  $\vec{n}$  est la normale à la surface.

La vitesse :

$$\vec{v} = \vec{v}_0 \text{ sur } \Gamma_e \text{ et } \Gamma_s \quad (3.13)$$

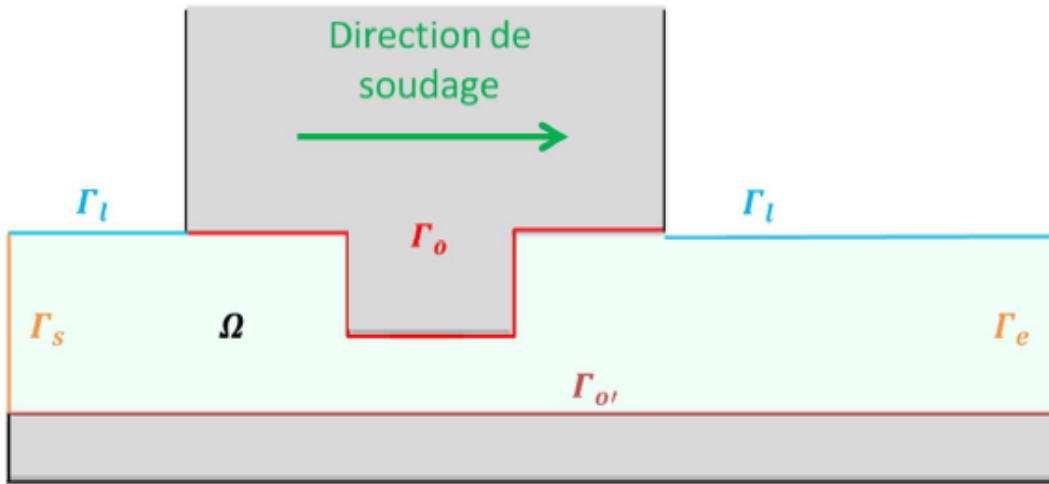


Figure 0.7: Description du domaine de calcul et des frontières [4].

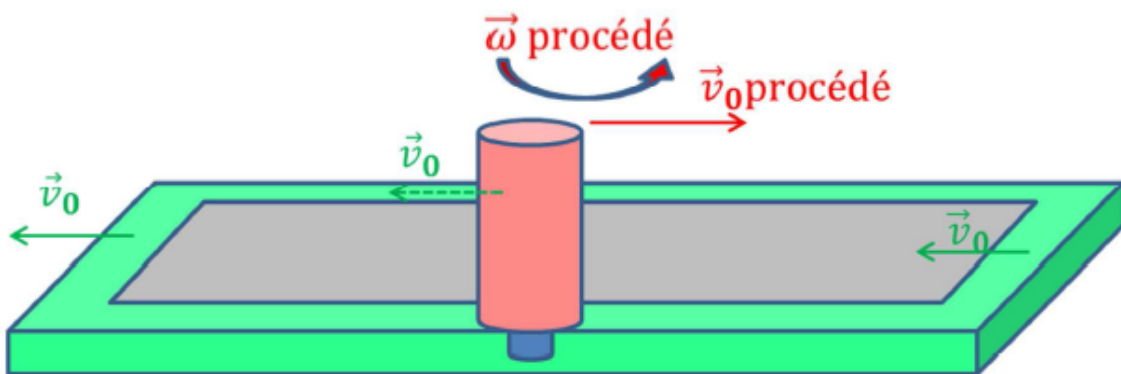


Figure 0.8: Cinématique procédé [4].

On utilise la condition de non pénétration, A l' instant  $(t + \Delta t)$ , par convention, la distance, d'un nœud à la surface d'un outil, est positive ou nul si le nœud se trouve à l'extérieur :

$$\delta^{t+\Delta t} \geq 0 \quad (3.14)$$

En écrivant un développement limité en  $t$ , cela donne :

$$\delta(M^{t+\Delta t}) = \delta(M^t) + d_t \delta(M^t) \cdot \Delta t + 0(\Delta t^2) \geq 0 \quad (3.15)$$

Avec  $\delta(M^t)$  la distance du nœud  $M^t$  à son projeté  $P^t$  sur la surface de l'outil au temps  $t$ .

$$d_t \delta(M^t) = d_t(\overrightarrow{M^t P^t} \cdot \vec{n}^t) = (\overrightarrow{v_{outil}^t} - \vec{v}^t) \cdot \vec{n}^t + \overrightarrow{M^t P^t} \cdot d_t(\vec{n}^t) \quad (3.16)$$

$$d_t \delta(M^t) = (\overrightarrow{v_{outil}^t} - \vec{v}^t) \cdot \vec{n}^t \quad (3.17)$$

$$d_t \delta(M^t) \cdot \Delta t = (\overrightarrow{u_{outil}^t} - \vec{u}^t) \cdot \vec{n}^t \quad (3.18)$$

Soit la formulation en déplacements suivante :

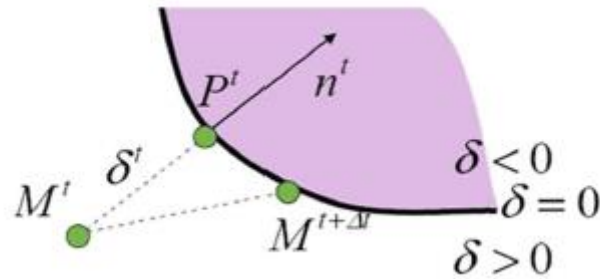
$$(\overrightarrow{u_{outil}^t} - \vec{u}^t) \cdot \vec{n}^t - \delta^t \leq 0 \quad (3.19)$$

Où  $\vec{u}^t$  est le déplacement du nœud  $M^t$  de la pièce au temps  $t$ ,  $\overrightarrow{u_{outil}^t}$  est de même le déplacement de l'outil.

Les équations du contact à l'interface  $\Gamma_0$  entre l'outil et la pièce s'écrivent de manière plus générale suivant Signorini, toujours avec une formulation explicite en déplacements :

$$\left\{ \begin{array}{l} (\overrightarrow{u_{outil}^t} - \vec{u}^t) \cdot \vec{n}^t - \delta^t \leq 0 : \text{condition de non pénétration} \\ \sigma_n^t = (\sigma^t \cdot \vec{n}^t) \cdot \vec{n}^t \leq 0 : \text{compression} \\ [(\overrightarrow{u_{outil}^t} - \vec{u}^t) \cdot \vec{n}^t - \delta^t] \sigma_n^t = 0 : \text{décollement ou contact} \end{array} \right. \quad (3.20)$$

Où  $\sigma_n^t$  est la pression de contact. Ces inéquations empêchent la pénétration d'un point de matière dans l'outil, autorisent son glissement le long de la surface de l'outil, ou permettent à un point en contact avec l'outil de quitter sa surface.



**Figure III.9: Schéma du contact [4].**

Une condition de frottement, qui est exprimée par la définition de la scission de frottement, s'ajoute aux conditions de contact à l'interface  $\Gamma_0$  :

$$\vec{\tau} = (\sigma \vec{n}) - (\sigma_n) \vec{n} \quad (3.21)$$

Le frottement de Norton dépend de la vitesse de glissement  $\vec{v}_g$  qui relie la vitesse de la matière et la vitesse de l'outil :

$$\begin{cases} \vec{\tau} = -\alpha K(T) \|\vec{v}_g\|^{q-1} \vec{v}_g \\ \vec{v}_g = (\vec{v} - \vec{v}_{outil}) - [(\vec{v} - \vec{v}_{outil}) \cdot \vec{n}] \vec{n} \end{cases} \quad (3.22)$$

Où  $\alpha$  est le coefficient de frottement (si il tend vers 0, le frottement tend à être parfaitement glissant ; si il tend vers 1, le frottement tend à être collant),  $q$  est le coefficient de sensibilité à la vitesse de glissement (si il tend vers 0, le comportement de l'interface tend à être solide ; si il tend vers 1, le comportement tend à être liquide).

### III.5.3 Équation de chaleur (Loi du comportement thermoviscoplastique)

L'équation de la chaleur en une dimension est donnée par l'équation différentielle partielle suivante :

$$\frac{\partial u}{\partial t}(x, t) = c \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x, t), \quad x \in \mathbb{R}, t > 0, \quad (3.23)$$

Où  $c > 0$  est une constante donnée,  $u$  est une fonction inconnue réelle de deux variables  $x$  et  $t$ . L'équation de la chaleur est l'exemple le plus simple d'une équation parabolique. En général, les équations aux dérivées partielles sont classées en trois catégories : elliptique, parabolique et hyperbolique.

Ici,  $u = u(x, t)$  est la température dans un conducteur d'une dimension. La valeur de  $u(x, t)$  dépend du temps  $t \geq 0$  et de la position  $x$ .

En général, la valeur de  $u(x, t)$  en  $t = 0$  est donnée.

Nous voulons donc résoudre le problème de Cauchy :

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t}(x, t) = c \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x, t), & x \in \mathbb{R}, t > 0, \\ u(x, 0) = f(x), & x \in \mathbb{R} \end{cases} \quad (3.24)$$

### III.5.3.1 Description physique

Considérons une barre de longueur illimitée. Pour écrire l'équation de la chaleur, supposons que le conducteur a une petite section d'aire  $\Delta s$ .

La quantité de chaleur à travers la section au point  $x$  est (en accord avec l'expérience) approximativement proportionnelle au gradient  $\frac{\partial u}{\partial x}$  en  $x$ . La quantité de chaleur dans la direction des  $x$  croissants pendant un court temps  $\Delta t$  est :

$$-k \frac{\partial u}{\partial x} \Delta s \Delta t \quad (3.25)$$

Où  $k$  est une constante strictement positive dépendant du matériau. Notons que la positivité de  $k$  est en accord avec le fait que la chaleur circule du chaud vers le froid. Evidemment, supposons que  $u$  et  $\frac{\partial u}{\partial x}$  ne changent pas rapidement,  $k \frac{\partial u}{\partial x}$  est la quantité de chaleur par seconde et par unité d'espace circulant le long des  $x$  dans la direction négative.

Cherchons comment varie au cours du temps la température  $u$  aux différents points de la barre. Ecrivons l'équation des échanges de chaleur de l'intervalle  $[a, b]$ .

La quantité totale de chaleur sortant de  $[a, b]$  au temps  $\Delta t$  est approximativement



$$-k \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right) (b, t) - \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right) (a, t) \right] \Delta s \Delta t \quad (3.26)$$

D'un autre côté, supposons que  $b-a$  est si petit qu'est  $\frac{\partial u}{\partial t}(x, t)$  presque constant pour  $x \in [a, b]$ , l'augmentation de température étant  $\frac{\partial u}{\partial t} \Delta t$ , la même quantité totale de chaleur sortante est approximativement égale

$$-k_1 (b - a) \Delta s \frac{\partial u}{\partial t} \Delta t \quad (3.27)$$

Où  $k_1$  est une constante strictement positive, la chaleur spécifique par unité de volume.

En général, la quantité spécifique  $c_g$  est donnée par unité de masse donc si le matériau a la densité  $\rho$  alors  $k_1 = \rho c_g$

On écrit ensuite que les deux termes sont égaux, on divise par  $\Delta s \Delta t (b - a)$  et on fait tendre  $b - a$  vers zéro d'où

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{k}{k_1} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (3.28)$$

### III.5.3.2 Loi de Fourier : équation de la chaleur

Tous les matériaux suivent la loi de Fourier du moins en première approximation si on ne chauffe pas de manière trop fort ou de manière trop rapide.

On en déduit que la forme la plus simple, parmi les formes compliquées pour l'expression du flux de chaleur est bien :

$$q = -k \frac{\partial}{\partial x} T \quad (3.29)$$

C'est la loi de Fourier (François Marie Charles Fourier 1772-1837).  $K$  le coefficient de conductivité thermique est positif (et comme  $T$  est toujours positif).

$q$  est en fait un vecteur, ici dans notre cas où il n'y a de variations qu'en  $x$ , le flux est un vecteur dirigé par  $\vec{e}_x$

$$\vec{q} = -k \left( \frac{\partial}{\partial x} T \right) \vec{e}_x \quad (3.30)$$

### III.5.3.3 Équations de chaleur dans la pièce à souder

Dans un système de coordonnées mobile on peut écrire l'équation de transfert de chaleur dans la pièce à souder comme suit:

$$\frac{\partial(C\rho T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S + v_w \frac{\partial(C\rho T)}{\partial x} \quad (3.40)$$

Où :  $C$  la capacité thermique,  $\rho$  la densité,  $k_x$ ,  $k_y$ ,  $k_z$ , sont les composantes de la conductivité thermique.

$v_w$  : la vitesse de soudage.  $S$  est la source volumique dans la pièce et elle est négligée par rapport à la source de chaleur principale issue par frottement. Cette dernière chaleur principale est considérée dans les conditions aux limites.

#### ➤ Modèle de source de chaleur

Dans le FSW, il existe deux grands apports de chaleur : la chaleur engendrée à l'interface du pion / pièce à souder et la chaleur engendrée par le frottement à l'interface épaulement /pièce à souder.

Cette dernière source de chaleur est supposée comme suit :

$$q_s = 2\pi \cdot C_f F_n R_i \omega \quad (3.41)$$

Où

$R_i$  la distance entre l'axe de rotation de l'outil et un point à l'interface au-dessous de l'épaulement.

$\omega$  La vitesse de rotation de l'outil (tr/mn).

$C_f$  le coefficient du frottement sur l'épaulement.

$F_n$  la force de forgeage verticale au déplacement.

La chaleur engendrée à l'interface pion/pièce se compose par trois parties :

- la chaleur générée par le cisaillement de la matière,
- la chaleur générée par le frottement sur la surface de filetage du pion,
- la chaleur engendrée par le frottement sur la surface verticale du pion.

➤ **Conditions aux limites**

- Le type d'échange thermique entre la pièce à souder et son milieu ambiant (S1) est convectif, il est modélisé par un coefficient de convection thermique  $h_\infty$ . L'équation décrivant cette condition sur la surface (S1) est donnée par :

$$k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = h_\infty (T - T_0) \quad (3.42)$$

- Les conditions aux limites sur la surface (S2) à l'interface :

A/ épaulement / pièce à souder est :

$$k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = q_s \quad (3.43)$$

B/ pion / pièce à souder est :

$$k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = q_p \quad (3.44)$$

Avec :

$$q_p = \frac{2\mu\bar{Y}\pi r_p H V r_p}{\sqrt{3(1+C_f^2)}} \quad (3.45)$$

Où

$\bar{Y}$  Est la contrainte de cisaillement moyenne du matériau,

$r_p$  Est le diamètre du pion d'outil,

$H$  est l'épaisseur de la pièce à souder,

$C_f$  est le coefficient de frottement.

- Le transfert de chaleur à l'interface de contact (S3), (la pièce à souder avec le support inférieur et l'outil de soudage) est donné par :

$$k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = \bar{h} (T - T_0) \quad (3.46)$$

- Puisque les deux pièces à souder sont symétriques de part et d'autre du plan vertical, du soudage (parallèle au cordon de soudure) et aussi bien l'outil. Donc, on peut supposer que le gradient de température selon la direction transversal au soudage est

nul, le long de ce plan :

$$\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{x \text{ sym}} = 0 \quad (3.47)$$

### ➤ Les conditions initiales

La température à l'état initial de l'outil et de la pièce à souder est :

$$T(x, y, z, 0) = T_i \quad (3.48)$$

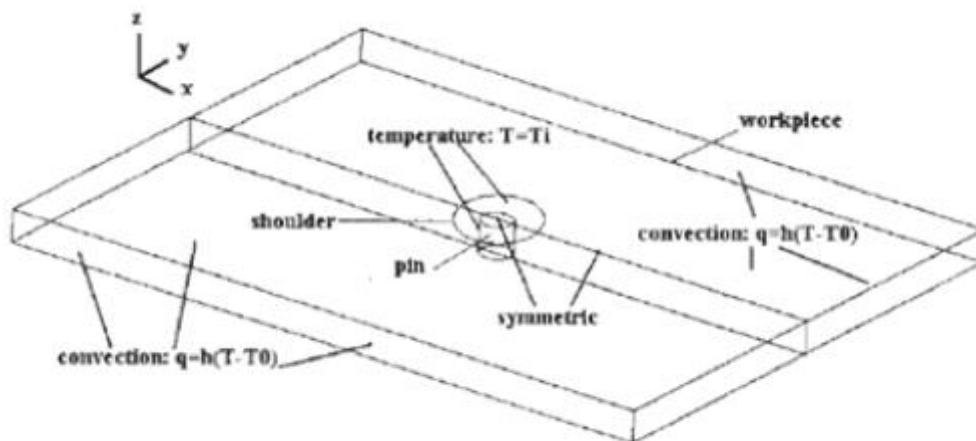


Figure 0.10: Présentation des conditions aux limites de l'équation de chaleur [96].

## III.6 Résolution numérique des équations de soudage par la méthode des éléments finis

### III.6.1 Principe de la méthode des éléments finis

Considérons un domaine  $\Omega$  (typiquement une portion de l'espace) dont la frontière est notée  $\delta\Omega$  ou  $\Sigma$ . Nous cherchons à déterminer une fonction  $u$  définie sur  $\Omega$ , qui est une solution d'une équation aux dérivées partielles (EDP) pour des conditions aux limites données. L'EDP décrit

le comportement physique du système, il s'agit par exemple des lois de l'élasticité pour un problème de résistance des matériaux ou des équations de Maxwell pour les problèmes d'électromagnétisme. Les conditions aux limites sont les contraintes s'exerçant sur le système. Par exemple, pour un problème de résistance des matériaux, on impose le déplacement de certaines parties du système, par exemple, on impose qu'une zone d'appui soit immobile, et on impose des efforts sur d'autres zones (poids, pression de contact...).

La méthode des éléments finis (MEF) permet de résoudre de manière discrète et approchée ce problème ; on cherche une solution approchée « suffisamment » fiable.

La discrétisation consiste à « découper » le domaine  $\Omega$  c'est-à-dire à chercher une solution du problème sur un domaine polygonal ou polyédrique par morceaux, il y a donc une redéfinition de la géométrie. Une fois la géométrie approchée, il faut choisir un espace d'approximation de la solution du problème. Dans la MEF, cet espace est défini à l'aide du maillage du domaine (ce qui explique aussi pourquoi il est nécessaire d'approcher la géométrie). Le maillage du domaine permet d'en définir un pavage dont les pavés sont les éléments finis.

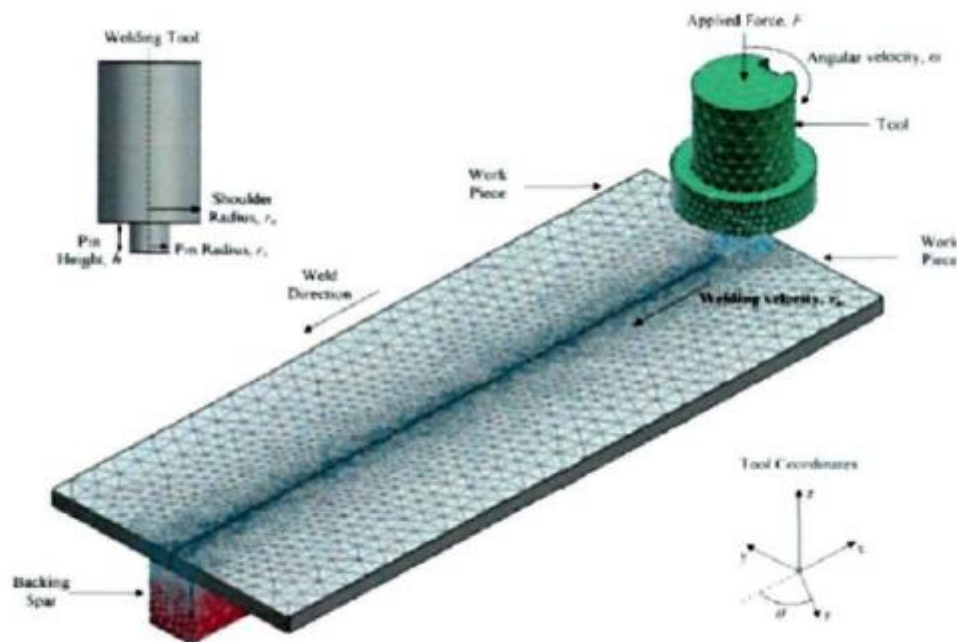
Sur chacun des éléments finis, il est possible de linéariser l'EDP, c'est-à-dire de remplacer l'équation aux dérivées partielles par un système des équations linéaires par approximation. Ce système d'équations linéaires peut se décrire par une matrice ; il y a donc une matrice par élément fini. Cependant, les conditions aux frontières sont définies sur les frontières du système global et pas sur les frontières de chaque élément fini ; il est donc impossible de résoudre indépendamment chaque système. Les matrices sont donc réunies au sein d'une matrice globale. Le système d'équations linéaires global est résolu par l'ordinateur (des systèmes simples peuvent être résolus à la main et constituent en général des exercices d'apprentissage).

L'EDP est résolue aux nœuds du maillage, c'est-à-dire que la solution est calculée en des points donnés (résolution discrète) et non en chaque point du domaine  $\Omega$ . Cela nécessite de pouvoir interpoler, c'est-à-dire déterminer les valeurs en tout point à partir des valeurs connues en certains points. On utilise en général des fonctions polynomiales.

Un élément fini est la donnée d'une cellule élémentaire et de fonctions de base de l'espace d'approximation dont le support est l'élément, et définies de manière à être interpolantes.

### III.6.2 Méthode des éléments finis pour le soudage FSW

Les modèles numériques par éléments finis utilisent principalement le référentiel lagrangien et donnent des résultats intéressants qui sont souvent très près des mesures expérimentales [80,81] pour le soudage par friction malaxage. Ils permettent de mieux comprendre les mécanismes physiques derrière le procédé qui influencent la fiabilité et la qualité des soudures réalisées avec cette technique. La figure dessous illustre le maillage d'un modèle thermique utilisant les éléments finis.



**Figure 0.11: Schématisation d'une étude sur le soudage par friction malaxage par MEF, maillage des plaques et de l'outil [82].**

Les logiciels commerciaux lagrangiens utilisés pour la modélisation du FSW sont les suivants :

- Ansys
- Abaqus
- Deform

Les approches sont parfois explicites, comme avec Abaqus, ce qui accélère les calculs, mais rend la convergence conditionnellement stable. Deform et Forge utilisent une approche implicite. La description lagrangienne présente l'avantage de calculer directement l'histoire thermomécanique de chaque particule par simple intégration temporelle.

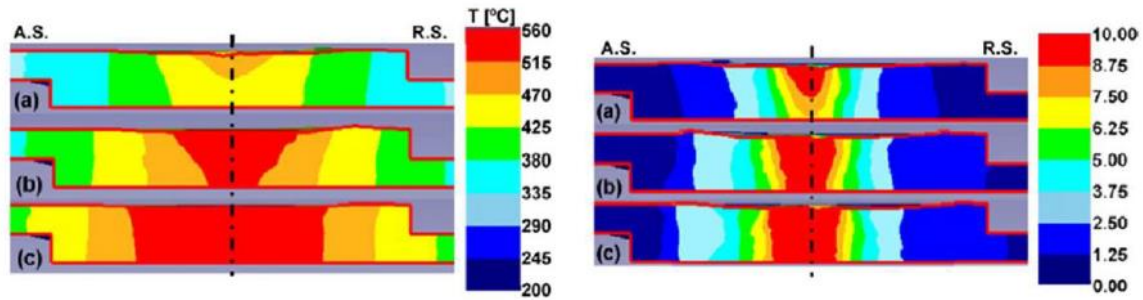


Fig. 13. Temperature distribution in a transverse section for (a) R= 500 rpm, (b) R= 700 rpm and (c) R= 1000 rpm case studies (T3).

Fig. 14. Strain distribution in a transverse section for (a) R= 500 rpm, (b) R= 700 rpm and (c) R= 1000 rpm case studies (T3).

**Figure 0.12: Champs de température à gauche et champs des déformations à droite avec une approche lagrangienne. [83]**

Au fur et à mesure que le flux et le maillage évoluent, la zone de contact Tant que l'état statique n'est pas atteint, la relation entre les outils et les matériaux peut évoluer. Alors La formule lagrangienne peut calculer avec précision l'état de contact sur une période de temps sous les épaulés et autour des pièces d'échecs. Le contact permet de gérer la non-pénétration le nœud dans l'outil, il peut être de différents types, unilatéral ou bilatéral. Friction, Il peut être considéré comme collant ou glissant. Contact unilatéral défini sur l'interface entre outils Et la matière signifie que la matière peut se déplacer dans la direction normale tangent à l'outil ; c'est-à-dire qu'il peut tomber de l'outil sans pénétrer passer. En revanche, le contact bilatéral n'autorise que les substances en il est impossible de séparer dans la direction tangentielle.

Seul le contact unilatéral permet donc de modéliser les pertes de contact entre l'outil et la pièce afin d'étudier la mise en place de défauts et plus particulièrement des trous 'tunnel' présents en FSW. La formulation lagrangienne permet donc de modéliser complètement le procédé au travers des phases transitoires de plongée et de début d'avance. Cependant, les grandes déformations, dues à l'écoulement fortement rotationnel proche de l'outil, engendrent des distorsions importantes du maillage et ainsi une dégénérescence des éléments le constituant. Ainsi, pour considérer précisément le flux de matière proche de l'outil, il est nécessaire de recourir à de fréquents remaillages. Plusieurs techniques sont utilisées telles que le remaillage automatique [84, 85], global ou local. Pour contrôler la qualité des calculs, nous

pouvons recourir à un remaillage adaptatif [86, 87, 88] c'est-à-dire qu'un critère de taille de maille local est appliqué. Il est basé sur une estimation de l'erreur de discrétisation. Le coût temporel de la simulation croît avec les procédures de remaillages. D'autre part, il y a une diffusion numérique plus importante lors des transports de champs. Ceci est une conséquence de l'interpolation des champs de vitesse, de déformations et des contraintes après remaillage, entre des maillages incompatibles. La description EF lagrangienne permet donc de disposer de l'histoire thermomécanique des particules tout en permettant une gestion du contact et des interfaces assez précises, mais le remaillage à chaque pas de temps entraîne des coûts élevés de calcul et engendre une perte de précision des résultats. Ce type de formulation s'adapte difficilement au malaxage du matériau. C'est pourquoi certains chercheurs ont développé des méthodes particulières ou sans maillage décrites dans le paragraphe suivant, dans le but de réduire ces coûts de calculs et de suivre l'évolution de chaque particule des matériaux à souder.

### **III.6.3 Limitation de la MEF et des méthodes avec maillage**

La méthode d'utilisation de maillage est principalement utilisée dans les logiciels (MEF et MDF) et est généralement très efficace. Pourtant, Certaines situations sont problématiques. Par exemple, en utilisant la méthode d'Euler, il est difficile Maillage de géométries complexes et gestion des conditions aux limites mobiles. Et, il est presque impossible d'obtenir l'historique du nœud. Quant à l'approche une grande déformation lagrangienne provoquera une déformation du maillage Conduire à des résultats incohérents. La technologie informatique intensive peut utiliser pour pallier ces problèmes (remaillage dynamique, changements de variables, Etc.), mais ils ont aussi des limites. Quel que soit la méthode de résolution utilisée, les méthodes avec maillage sont limitées pour l'étude du SFM car les grandes déformations produites lors du soudage causent plusieurs problèmes en raison de la distorsion du maillage et dans le traitement des conditions aux limites du domaine. Les modèles sont donc très souvent simplifiés et des hypothèses simplificatrices doivent être posées. Notamment, les modèles MEF de Schmidt [89], Santiago [90], Zhang [91] et coll. n'ont pu tenir compte à la fois de la température et des déformations dans une analyse unifiée. De plus, la plupart des modèles simulent le régime permanent du soudage (lors que l'outil est déjà entré dans le métal avec une vitesse d'avance constante) et, afin de simuler quelques secondes de soudage, un remaillage dynamique est souvent requis [92] ce qui empêche de conserver l'historique des nœuds. L'étude de l'écoulement du matériau est donc très difficile à



réaliser à partir de ces modèles. Quelques chercheurs, dont Oliphant [93], ont étudié la première phase du soudage soit le plongeon de l'outil dans le métal, mais les pas de calcul étaient de quelques picosecondes pour assurer une convergence de calcul. Par ailleurs, la majorité de ces modèles thermiques et thermomécaniques ne tiennent pas compte de toutes les pertes thermiques [94], [95]. Les valeurs de température calculées sont souvent plus élevées que les données obtenues de manières expérimentales.

### **III.7 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons parlé de contraintes résiduelles, sa définition, sa classification qui nous mettre distinguer 3 types de contraintes résiduelles. Toutefois, on a entamé l'origine et les effets de contraintes résiduelles.

Il est parfaitement reconnu qu'ignorant les effets des contraintes résiduelles pourraient conduire à des situations délicates, voir catastrophiques. Il apparaît bien clair qu'il n'est pas souhaitable toujours d'éliminer les contraintes résiduelles dans une structure. Cependant, il est

souvent nécessaire de trouver le meilleur profil qui puisse optimiser le comportement d'une structure, ou même le créer.

Dans la présente étude, nous avons fait parler de la modélisation thermique et la modélisation mécanique du comportement des contraintes résiduelles de ce type de soudage, en détaillant les différentes équations de mécanique qui sont basés sur la loi de Norton Hoff, et de chaleur c'est-à-dire on a parlé de loi de comportement thermoviscoplastique. Qui permettraient non seulement d'obtenir une compréhension de ce processus, mais aussi de faciliter la modélisation thermomécanique du procédé de soudage FSW. Et à la fin on conclure notre chapitre avec une petite résolution numérique des équations de soudage par la méthode des éléments finis, on parlant des logiciels utilisés dans la modélisation ainsi que le principe et limitations de la méthode des éléments finis.

## **Chapitre IV : expérimentation, résultats et interprétations**

## Introduction

Ce chapitre est une partie d'expérimentation, qui contient des essais sur le soudage FSW. D'abord, on parle de caractéristiques des alliages d'aluminium série 7000, ensuite, le montage de FSW qu'on a fait dans notre expérimentation, en mentionnant ses paramètres. En outre, on fait une inspection visuelle et microscopique des échantillons utilisés, après on parle de montage de contrôle ultrasonore qu'on a utilisé dans notre essais afin de déterminer les contraintes résiduelles. On finit cette partie par interprétations des résultats obtenus.

### IV.1 Caractéristiques mécaniques, chimiques, et physiques des alliages d'Aluminium série 7000

#### IV.1.1 Caractéristiques Mécanique

Table IV.1 : caractéristiques mécaniques d'alliage 7075 [99].

Alliage	Etat	Caractéristiques Mécaniques En Traction				Dureté de Brinell	Module de Young En MPa	Résistance au Cisaillement
		Rp 0.2 mini MPa	Rm Mini	Rm Max	A 5.65 mini MPa			
7075	T6	475	545	/	8	150	72000	305

#### IV.1.2 Caractéristiques chimiques

La teneur du zinc (l'élément d'addition principal de cet alliage) varie de 5,1 à 6,1 %. Le zinc est très soluble dans l'aluminium. Seul, il n'exerce pas une influence appréciable sur la microstructure. Dans l'AA7075, l'addition de magnésium est faite pour provoquer le durcissement structural via la formation de précipités intermétalliques appelés zones de Guinier Preston (GP) du composé  $MgZn_2$  (Davis 1993).

**Table IV.2 : les éléments d'addition présents dans l'AA7075 [99].**

Alliage	-	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr	Zr + Ti	Autres chaque	Autres total	Al
7075	Min.	/	/	1,20	/	2,1	0,18	5,1	/	/	/	/	/	Le reste
	Max.	0,4	0,5	2,00	0,3	2,9	0,28	6,1	0,2	/	/	0,05	0,15	

Les concentrations sont en pourcentage massique.

### IV.1.3 Caractéristiques physiques

**Table IV.3 : les caractéristiques physiques des alliages d'aluminium série 7000 [99].**

/	7020	7075
Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	2,78	2,80
Intervalle de fusion	605-645	475-630
Coefficient de dilatation linéique (0 à 100 °C) (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )	23,0	23,5
Module d'élasticité (MPa) (1)	71 500	72 000
Coefficient de Poisson	0,33	0,33
Conductivité thermique (0 à 100 °C) (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	État T5 : 140	État T6 : 130
Résistivité à 20 °C (μΩ cm)	État T5 : 4,9	État T6 : 5,2
Capacité thermique massique (0 à 100 °C) (J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	920	915
Limité d'élasticité RP0.2 (MPa)	210 (2)	470 (3)
Limité à la rupture Rm (MPa)	320 (2)	535 (3)
Allongement (%)	14 (2)	8 (3)
Limité d'élasticité RP0.2 (MPa)	/	390 (4)
Limité à la rupture Rm (MPa)	/	475 (4)
Allongement (%)	/	7 (4)

## IV.2 Description de montage FSW et ses paramètres

Le soudage des plaques FSW a été réalisé sur une machine **PMER VST300** à l'**ERMA dar el Beida**. Les plaques à souder ont été préalablement frottées à l'aide d'une éponge abrasive afin d'enlever la couche d'oxyde de quelques microns d'épaisseur de chaque côté du joint sur environ 1 cm de largeur. Ensuite, elles ont été nettoyées à l'aide de papier imbibé d'éthanol. Cet exercice est fait environ 2 minutes avant le soudage afin de garder le joint le plus propre possible et d'empêcher que la couche d'oxyde ne se recrée entretemps deux plaques de 5mm d'épaisseur sont installées bout à bout dans le sens de la longueur sur une plaque de support en acier de 5 cm d'épaisseur fixée rigidement à la machine. La plaque de support possède une dénivellation d'environ 3mm de hauteur. Cette dénivellation est placée parfaitement parallèle à l'axe Y de la machine (parallèle à la direction longitudinale du joint). Le long côté d'une des plaques est adossé à cette dénivellation afin de garder le joint sur la trajectoire de l'outil en suivant une position constante sur l'axe Y de la machine. Des profilés en L et des serres ont été utilisés pour brider les tôles sur la plaque de support. La distance entre les profilés et le milieu du joint est la même des deux côtés du joint. Cette distance est établie pour laisser environ 3mm de jeu entre l'outil et les profilés de fixation afin d'éviter une collision entre les deux.



**Figure IV. 1: montage sur la machine**

### **IV.2.1 Vitesses de rotation et d'avance**

La vitesse de rotation en soudage par friction malaxage est la vitesse de rotation de l'outil de soudage, en revanche la vitesse d'avance est la vitesse de déplacement de l'outil dans la plaque à souder. La combinaison des deux vitesses assure le malaxage de matériaux.

Le choix de vitesse d'avance est généralement lié directement à la vitesse de rotation. La vitesse de soudage influe sur les caractéristiques mécaniques des joints obtenus par soudage par friction malaxage. La formation de défauts et des discontinuités sont commandés par la vitesse d'avance.

Plusieurs chercheurs ont étudié l'effet de la vitesse de soudage sur les caractéristiques mécaniques des joints obtenus par soudage par friction malaxage. L'augmentation excessive de vitesse de soudage risque d'induire des défauts internes de type macro-pores et des défauts sous forme de tunnel

### **IV.2.2 Force exercée par l'outil**

Pour effectuer un joint soudé, il est nécessaire d'appliquer une force verticale sur l'outil pour maintenir le contact entre l'outil et les pièces à souder ce qui permet d'assurer l'apport d'énergie par frottement et de contenir le matériau malaxé. Il est suivi soit par le pilotage de la position verticale de l'outil, soit par le contrôle de l'effort vertical appliqué sur l'outil au cours de la phase de soudage. Dans le cas où l'outil est piloté en position, la force est une résultante, elle augmente avec la vitesse d'avance et diminue avec la vitesse de rotation

### **IV.2.3 Angle d'inclinaison de l'outil**

L'angle d'inclinaison de l'outil par rapport à la surface des plaques à souder est un paramètre important à prendre en considération dans l'optimisation du procédé car son choix approprié permet à la matière de passer efficacement de l'avant vers l'arrière du Pion

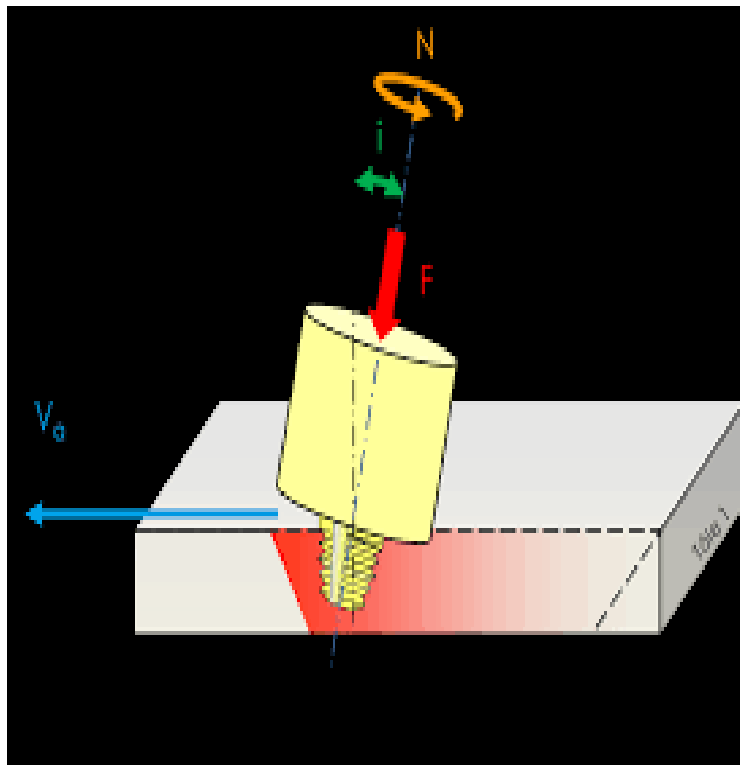


Figure IV. 2: Angle d'inclinaison de l'outil [11].

Table IV.4 : les différents paramètres de soudage.

Vitesse de rotation	Vitesse d'avance	Angle d'inclinaison de l'outil	Diamètre de l'outil
1250 tr/min	36 mm/min	2°	20mm



### IV.3 Inspection visuelle et microscopique des échantillons.



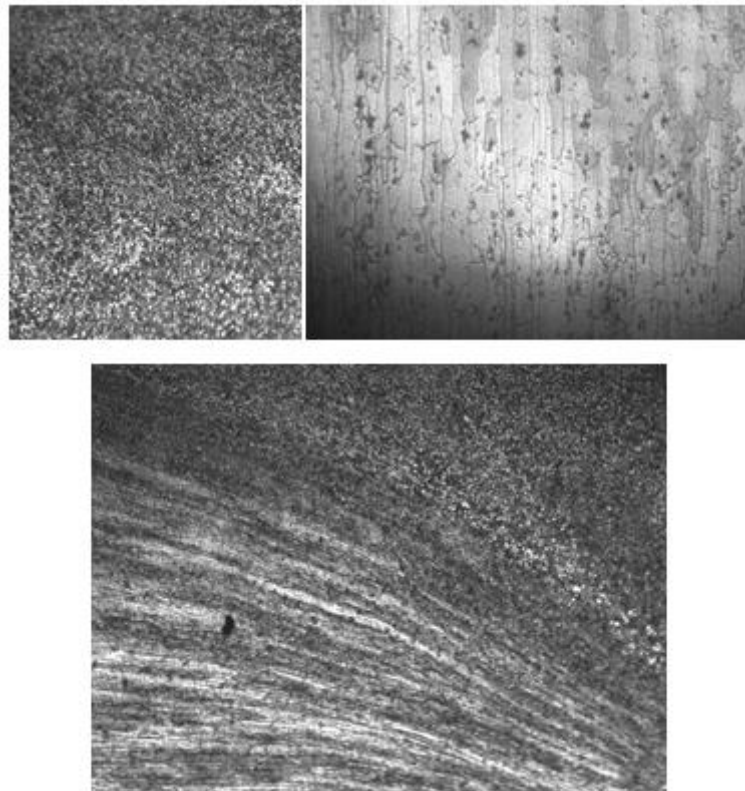
**Figure IV. 3: l'échantillon**

**Fig IV.3** représente l'échantillon après soudage par FSW, on constate qu'on peut distinguer la zone du joint du reste de l'échantillon, on remarque aussi la formation de bourrelets de soudage de chaque côté du joint, cependant le bourrelet du côté entrant du joint est plus grand que celui du côté sortant

### IV.3.1 Observation microscopique des joints soudés

Nous présenterons les différents types de microstructures composant plusieurs joints soudés. En effet, en fonction des conditions obtenues durant le soudage, température et taux de déformation, la soudure peut être décomposée en plusieurs zones ayant chacune leurs propres caractéristiques. Ces observations nous permettront d'avoir une idée des mécanismes qui se produisent durant le soudage et de comparer le comportement d'un alliage à durcissement structural.

L'observation au microscope optique de coupes transversales met en évidence les quatre zones en fonction de températures atteintes, des déformations subies ainsi des Considérations métallurgiques. Nous décrivons les principales évolutions métallurgiques au sein des quatre zones pour les alliages d'aluminium à durcissement structural.



**Figure IV. 4: Cartographie des zones de plaque soudée 7075 après attaque chimique. Microscopie optique.**

On distingue bien les quatre zones : métal de base, la zone affectée thermiquement (ZAT), la zone thermomécanique (ZATM) et la zone fondue.

- **Zone A** : métal de base dont les propriétés mécaniques globales ainsi que la microstructure restent inchangéables au cours du procédé.
- **Zone B** : zone affectée thermiquement ZAT. Les propriétés mécaniques ainsi que la microstructure sont modifiées par le passage de la source de chaleur générée par l'outil. Cette zone n'a pas subi de déformations dues aux passages de l'outil. Les températures varient entre 250°C et 400°C, la matière dans cette zone est caractérisée par une croissance des précipités durcissants.
- **Zone C** : zone affectée thermomécaniquement, ZATM les propriétés mécaniques et la microstructure sont modifiées non seulement par le passage de la source de chaleur (comme pour la zone affectée thermiquement) mais aussi par les grandes déformations causées par la rotation de l'outil. Dans cette zone la température varie entre 400°C et 450°C. Le diamètre de la zone affectée thermomécaniquement diminue avec la profondeur pour atteindre le diamètre de noyau soudé au niveau inférieur des plaques, mettant de fait en évidence l'effet de l'épaulement sur le malaxage de la matière. Dans cette zone les grains sont complètement déformés. Microscopie optique  
A C B D Diamètre de l'épaulement Échelle : 125µm
- **Zone D** : zone de noyau soudé. Cette zone connaît des déformations encore plus importantes que dans la zone affectée thermomécaniquement et la température est comprise entre 450°C et 500°C, c'est la température de fusion pour les alliages d'aluminium. Cette zone occupe le cœur du cordon, car il représente le pion de l'outil FSW.

#### IV.4 Description du montage de contrôle ultrasonore et dispositif de mesure.

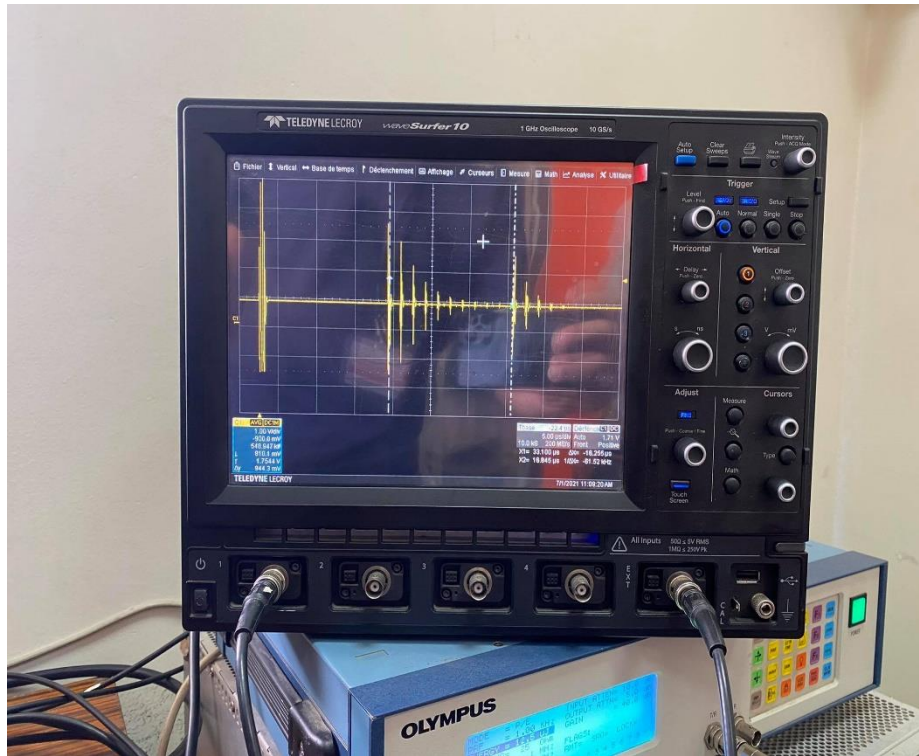
La mesure de vitesse de propagation des ondes ultrasonore dans les différentes zones de la pièce a été réalisée grâce a un dispositif de mesure au CRTI de Cheraga.

Le calcul des vitesses de propagation des ondes de volume est réalisé dans un bain d'immersion de grande dimension disponible dans les locaux du CRTI (**Fig.IV.5**). L'eau est le milieu de couplage nécessaire à la propagation des ondes ultrasonores, à l'aide d'un transducteurs piézoélectriques relié à un oscilloscope WaveSurfer 10 (**Fig.IV.6**), Nous mesurons

les vitesses de propagation des ondes ultrasonores dans les différentes zones de notre échantillon.



**Figure IV. 5: Bain D'immersion**

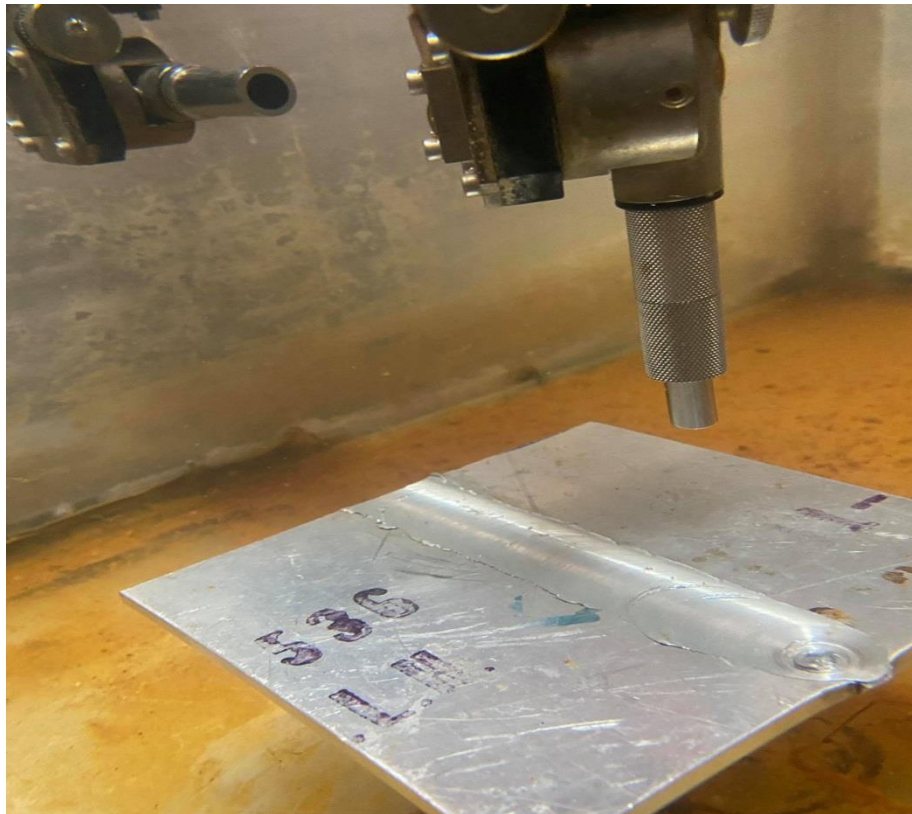


**Figure IV. 6: Oscilloscope WaveSurfer 10**



#### IV.4.1 Dispositif de Mesure

Nous mesurons les vitesses des ondes ultrasonores dans les différentes zones de l'échantillon grâce au montage cité précédemment dans le bain d'immersion (**Fig.IV.7**)



**Figure IV. 7: dispositif de mesure des vitesses**

## IV.5 Détermination des contraintes résiduelles par la méthode ultrasonore

### IV.5.1 Résultats d'étalonnage de l'alliage 7075 sur le métal de base

Pour cette étude, nous avons découpé l'éprouvette. Les dimensions de l'éprouvette que nous avons utilisées durant l'essai est une barre dont les dimensions sont mentionnées dans (Tab.IV.5).

**Table IV.5: Dimension de l'éprouvette AA7075**

<b>Eprouvette en alliage d'Al type - AA7075</b>		
<b>Longueur (mm)</b>	<b>Largeur (mm)</b>	<b>Epaisseur (mm)</b>
<b>120</b>	<b>36</b>	<b>2.8</b>

La composition chimique de l'échantillon d'alliage d'aluminium type AA7075 est donnée sur le tableau 3 (tableau composition chimique)

Caractéristiques mécaniques type AA7075 sont les suivantes :

- La limite d'élasticité  $R_p = 500$  MPa ;
- La résistance à la traction  $R_m = 570$  MPa ;
- Le module d'élasticité  $E = 72$  GPa.

#### IV.5.1.1 Résultats des mesures effectuées sur le métal de base

(Fig.IV.9 et Fig.IV.10) représentent les courbes de variation relative du temps de parcours de l'onde longitudinale subsurfacique en fonction de la contrainte appliquée (l'effort). Pour déterminer  $K_1$  la direction de propagation de l'onde est parallèle à la direction de l'effort appliqué. Cette courbe est une droite dont la pente représente le coefficient acoustoélastique  $K_1$

**Table IV.6: Résultats des mesures d'étalonnage effectuées sur le métal de base pour l'obtention de K1. [98].**

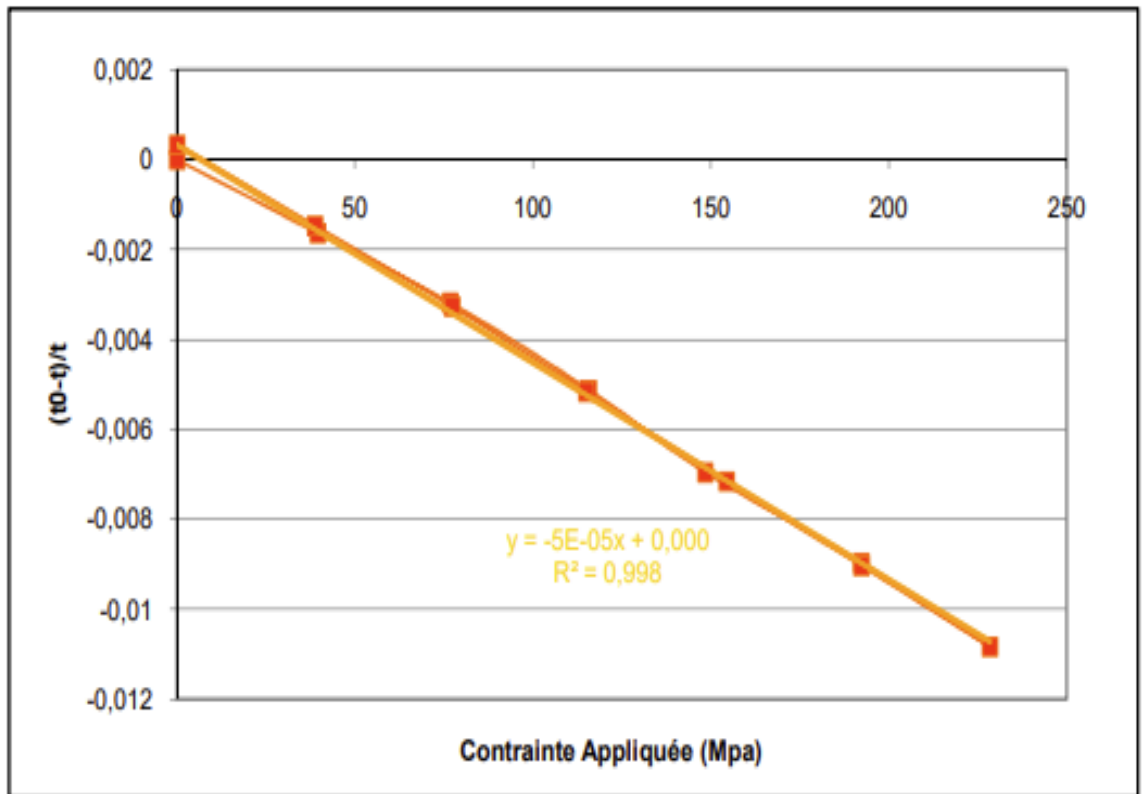
➤ 1er essai

<i>F (KN)</i>	<i>σ (MPa)</i>	<i>t (μs)</i>	$\frac{t^0 - t}{t} \times 10^3$
<i>0,01</i>	<i>0,076</i>	<i>3,023</i>	<i>0</i>
<i>5,15</i>	<i>39,615</i>	<i>3,028</i>	<i>-1,62</i>
<i>9,98</i>	<i>76,769</i>	<i>3,033</i>	<i>-3,17</i>
<i>15,05</i>	<i>115,76</i>	<i>3,039</i>	<i>-5,11</i>
<i>19,93</i>	<i>148,46</i>	<i>3,044</i>	<i>-6,95</i>
<i>25</i>	<i>192,30</i>	<i>3,050</i>	<i>-8,96</i>
<i>29,7</i>	<i>228,461</i>	<i>3,0566</i>	<i>-10,83</i>

➤ 2eme essai

<i>F (KN)</i>	<i>σ (MPa)</i>	<i>t (μs)</i>	$\frac{t^0 - t}{t} \times 10^3$
<i>0,015</i>	<i>0,1153</i>	<i>3,0225</i>	<i>-0,33</i>
<i>5</i>	<i>38,846</i>	<i>3,0279</i>	<i>-1,46</i>
<i>10,06</i>	<i>77,384</i>	<i>3,0334</i>	<i>-3,26</i>
<i>14,95</i>	<i>115</i>	<i>3,0392</i>	<i>-5,15</i>
<i>20,08</i>	<i>154,46</i>	<i>3,0453</i>	<i>-7,15</i>
<i>25</i>	<i>192,30</i>	<i>3,0511</i>	<i>-9,03</i>
<i>29,7</i>	<i>228,461</i>	<i>3,0566</i>	<i>-10,83</i>





**Figure IV. 8: Courbe de variations relatives du temps de propagation en fonction de contrainte – Détermination de K1 [98].**

$k = -5.10^{-5}MPa^{-1}$  , avec un coefficient de corrélation de  $R^2 = 0,9985$ . [98].

**IV.5.1.2 Tests effectués sur la zone affectée thermomécaniquement ZATM (max)**

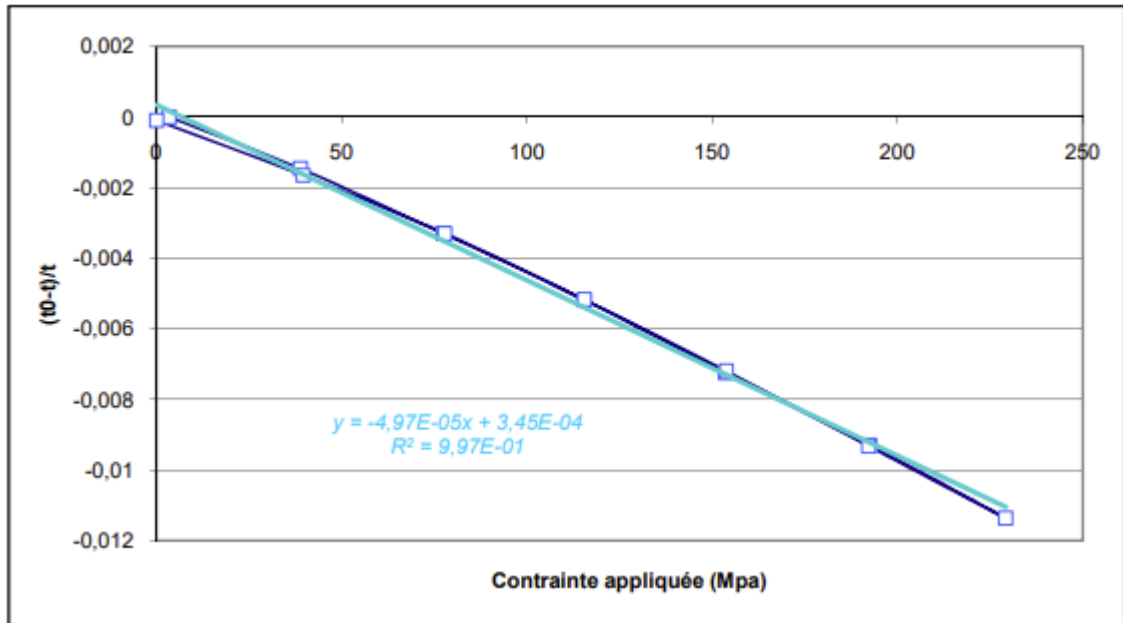
**Table IV.7: Résultats des mesures d'étalonnage effectuées sur la zone affectée thermomécaniquement, pour l'obtention de K1 [98].**

➤ **1er essai**

<i>F (KN)</i>	<i>σ (MPa)</i>	<i>t (μs)</i>	$\frac{t^0 - t}{t} \times 10^3$
<b>0</b>	<b>3,461</b>	<b>3,0335</b>	<b>0</b>
<b>5,052</b>	<b>38,861</b>	<b>3,0380</b>	<b>-1,45</b>
<b>10,06</b>	<b>77,384</b>	<b>3,0436</b>	<b>-3,29</b>
<b>15,01</b>	<b>115,461</b>	<b>3,0493</b>	<b>-5,18</b>
<b>19,97</b>	<b>153,615</b>	<b>3,0557</b>	<b>-7,24</b>
<b>25,03</b>	<b>192,538</b>	<b>3,0620</b>	<b>-9,28</b>
<b>29,8</b>	<b>229,230</b>	<b>3,0684</b>	<b>-11,36</b>

➤ **2eme essai**

<i>F (KN)</i>	<i>σ (MPa)</i>	<i>t (μs)</i>	$\frac{t^0 - t}{t} \times 10^3$
<b>0,01</b>	<b>0,076</b>	<b>3,0338</b>	<b>-0,09</b>
<b>5,15</b>	<b>39,615</b>	<b>3,0385</b>	<b>-1,65</b>
<b>10,12</b>	<b>77,846</b>	<b>3,0436</b>	<b>-3,29</b>
<b>15,02</b>	<b>115,538</b>	<b>3,0493</b>	<b>-5,16</b>
<b>20</b>	<b>153,846</b>	<b>3,0555</b>	<b>-7,19</b>
<b>24,99</b>	<b>192,230</b>	<b>3,0621</b>	<b>-9,32</b>
<b>29,8</b>	<b>229,230</b>	<b>3,0684</b>	<b>-11,36</b>



**Figure IV. 7: Courbe de variations relatives du temps de propagation en fonction de contrainte effectué sur la ZATM (max) – Détermination de K1 [98].**

Les valeurs des coefficients acoustoélastiques déterminées sont :  $k = -4,97 \cdot 10^{-5} MPa^{-1}$

Avec un coefficient de corrélation de  $R^2 = 0,997$  . [98]

On remarque que le coefficient acoustoélastique est pratiquement le même dans le métal de base que dans la zone affectée thermiquement, ceci s'explique par l'absence du métal d'apport dans le procédé FSW contrairement aux autres procédés classiques.

## IV.5.2 Présentation des signaux ultrasonores.

Après les mesures réalisées grâce au montage précédant, nous pouvons afficher les résultats suivant des signaux ultrasonores sous formes de graphes grâce au logiciel Gnuplot.

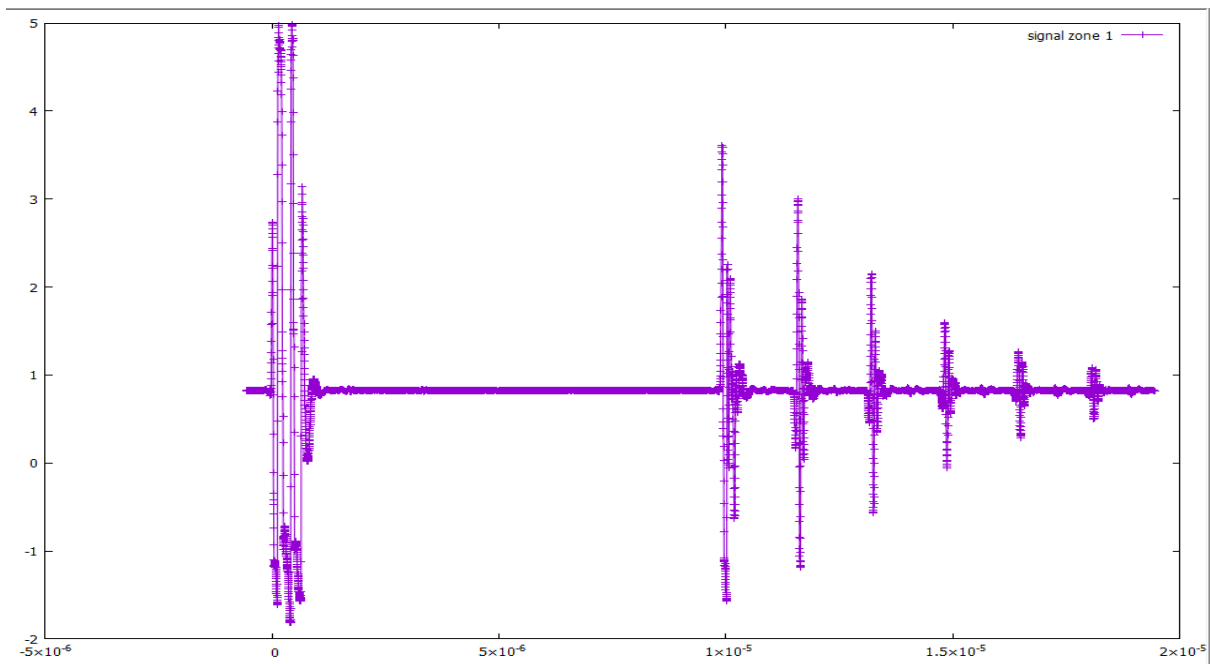


Figure IV. 10: Signale Ultrasonore Zone 1.

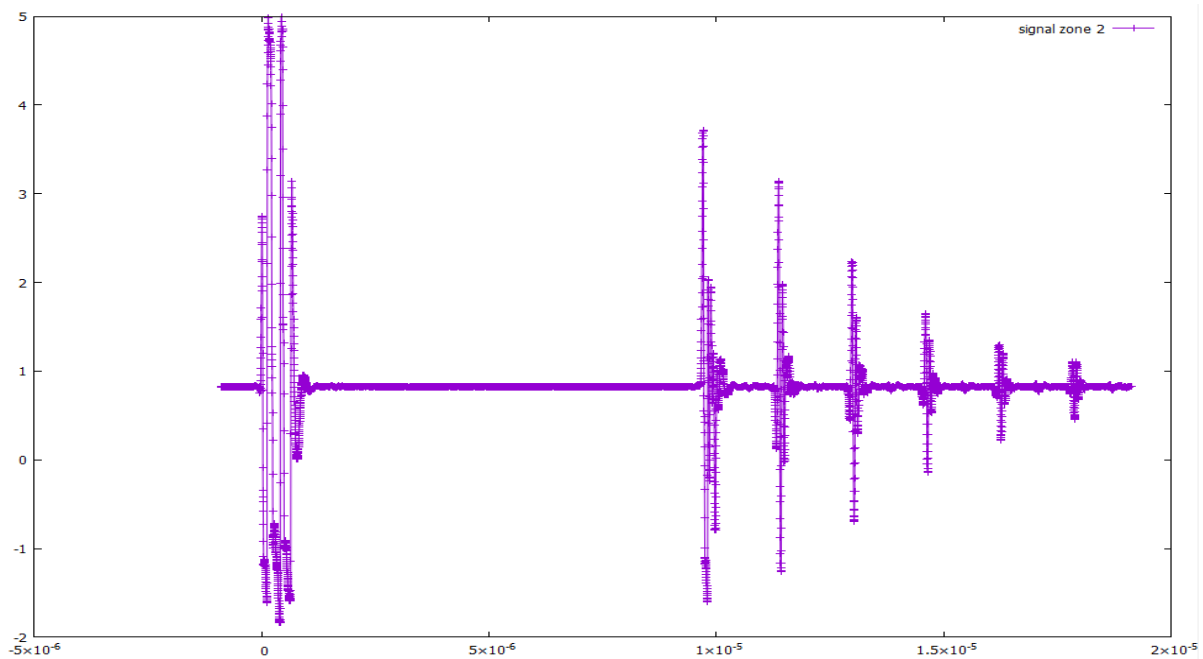
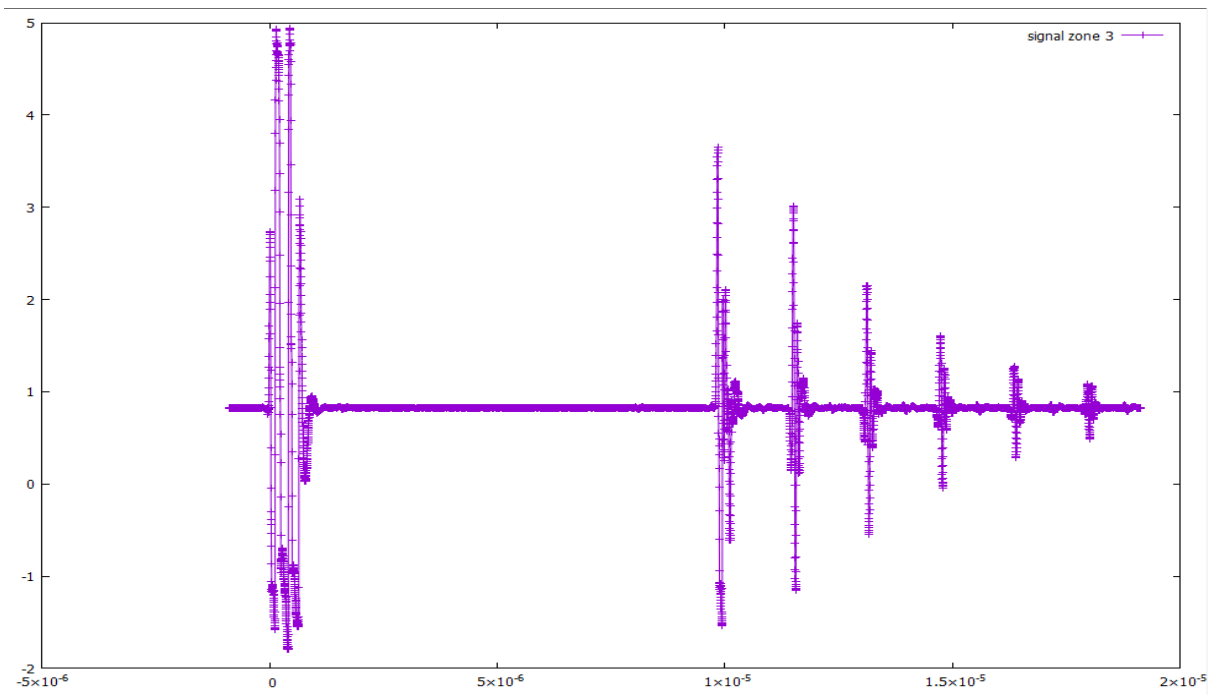
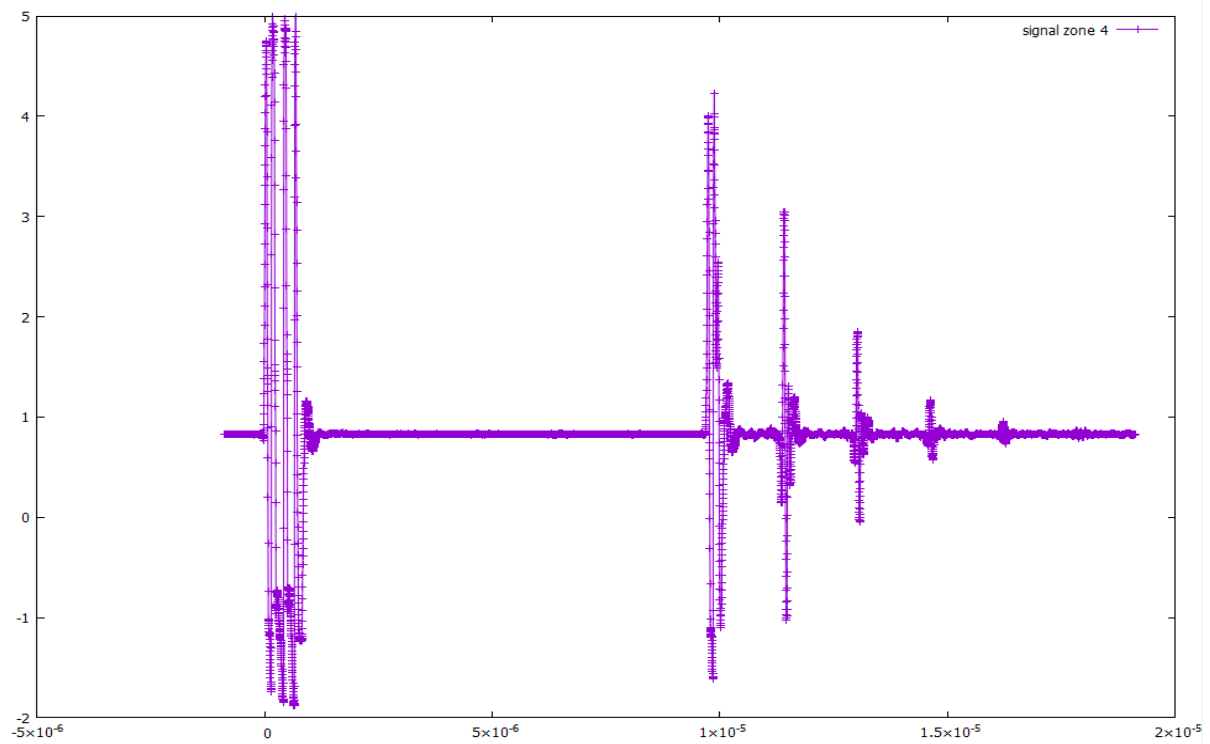


Figure IV. 11: Signale Ultrasonore Zone 2.



**Figure IV. 12: Signale Ultrasonore Zone 3.**



**Figure IV. 83: Signale Ultrasonore Zone 4.**

### IV.5.3 Détermination des vitesses sur les zones de soudage

L'écran de l'oscilloscope montre un pic d'entrée à droite et un pic de sortie à gauche. La distance entre les deux pics correspond à 2 fois l'épaisseur de l'échantillon (aller + retour). On se sert de cette information pour calculer la vitesse de la propagation des ondes.

**Table IV.8: Vitesses de propagation des ondes dans les différentes zones de l'échantillon.**

	<b>Zone 1 (y=0)</b>	<b>Zone 2 (y=1cm)</b>	<b>Zone 3 (y=2cm)</b>	<b>Zone 4 (y=3.5cm)</b>
<b>Vitesses (m/s)</b>	<b>1022,838</b>	<b>1046,352</b>	<b>1032,330</b>	<b>1030,205</b>

### IV.5.4 Détermination des contraintes résiduelles sur les zones de soudage

Grace aux vitesses figurant dans le (Tab.IV.8) nous pouvons mesurer les contraintes résiduelles grâce à la loi suivante :

$$\frac{V_{11}-V_{11}^0}{V_{11}^0} = -K_1 \sigma_{11} \quad (4.1)$$

$V_{11}$  : La vitesse de l'onde longitudinale.

$V_{11}^0$  : La vitesse de l'onde longitudinale à l'état de référence.

$K_1$  : Le coefficient acouso-élastique de l'onde longitudinale.

$\sigma_{11}$  : La contrainte résiduelle longitudinale.

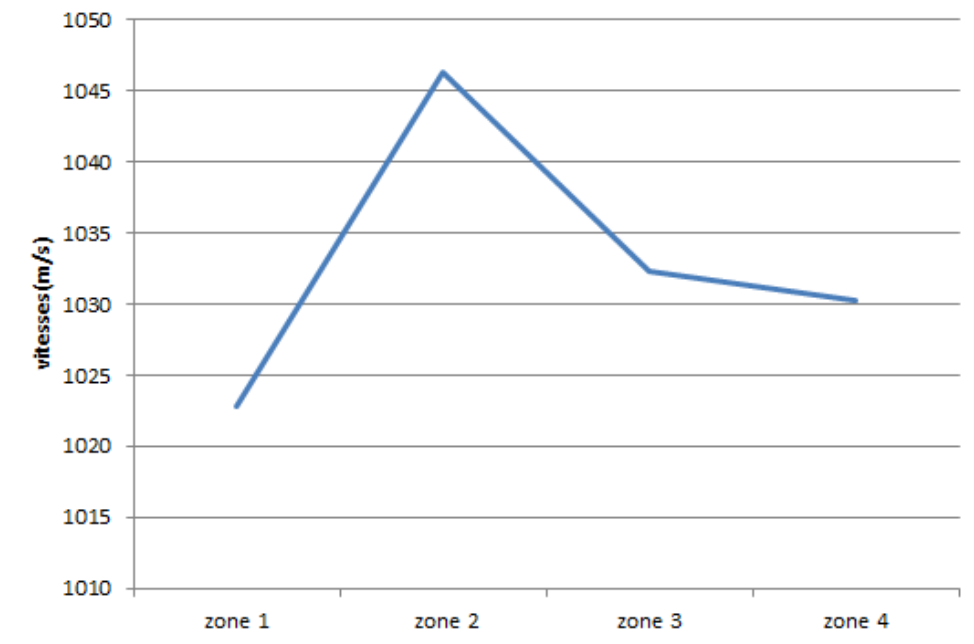
Nous résumons les résultats dans le tableau suivant :

**Table IV.9 : Détermination des contraintes résiduelles sur les zones de soudage.**

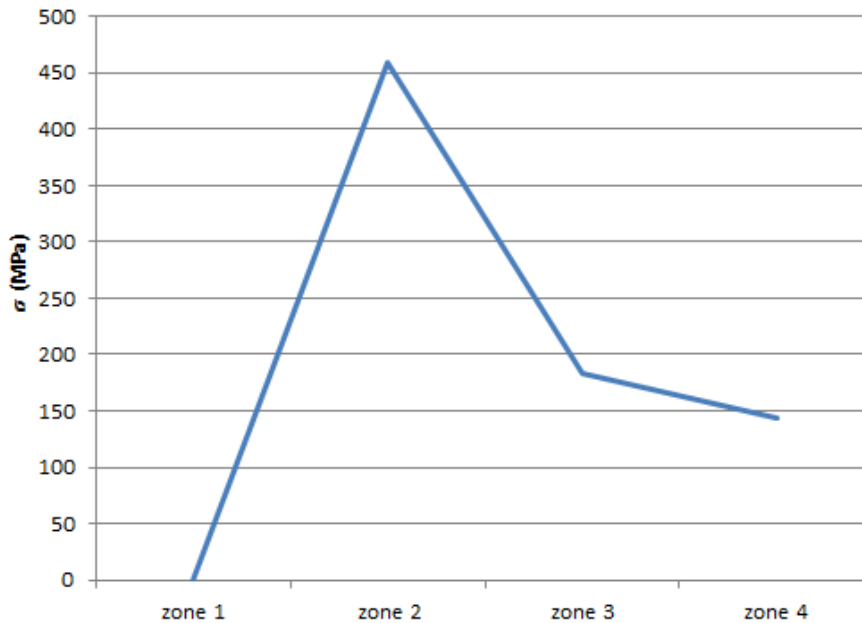
	<b>Zone 1</b>	<b>Zone 2</b>	<b>Zone 3</b>	<b>Zone 4</b>
<b>Contraintes Résiduelles (Mpa)</b>	<b>0</b>	<b>459,779</b>	<b>183,601</b>	<b>144,05</b>

#### **IV.5.5 Présentation du profil de vitesses et contraintes résiduelles**

Les figures suivantes (**Fig.IV.15 et Fig.IV.16**) représentent respectivement les profils de vitesse et des contraintes Résiduelles



**Figure IV.14: Profil des vitesses de la partie droite de l'axe de soudure obtenu sur l'échantillon soudé.**



**Figure IV. 95: Profil des contraintes résiduelles de la partie droite de l'axe de soudure obtenu sur l'échantillon soudé.**

#### **IV.6 Interprétation des résultats et conclusion**

Remarquons les résultats donnés par les figures IV. 15 et IV. 10, on constate que le coefficient acousto-elastique est pratiquement le même dans le métal de base que dans la zone affecté thermiquement, ceci s'explique par l'absence du métal d'apport dans le procédé FSW contrairement aux autres procédés classiques.

Comparons les figures IV. 15 et IV. 11, on remarque que le profil de vitesses longitudinales subsurfaciques présente la même forme que le profil des contraintes résiduelles, ce qui montre que les contraintes résiduelles évoluent sensiblement avec l'onde longitudinale.

Les résultats du tableau 9 et la figure IV. 12 montre que :

- Il y'a une faible contrainte au niveau du noyau du cordon de soudure (zone N) car dans cette zone la température est assez élevée et sévère, et suite à l'effort combiné de l'écoulement du métal et le cycle thermique, cette zone subit une recristallisation dynamique d'où l'affinement des grains et l'adoucissement des contraintes.
- la contrainte maximale se trouve aux niveau de la zone affectée thermomécaniquement ZATM (aux extrémités de l'épaulement de l'outil) générée par la chaleur de frottement entre l'épaulement et la matière et qui n'est pas assez élevée pour déclencher le mécanisme de recristallisation dynamique, ensuite elle diminue et



converge vers zéro à chaque fois qu'on s'éloigne du cordon de soudure vers le métal de base qui n'a pas subi des modifications thermiques, mécaniques ou chimiques.

Comparons le profil de contraintes résiduelles obtenues dans la littérature [98] avec nos résultats, on a trouvé une bonne concordance et une bonne compatibilité.

#### **IV.7 Conclusion**

Les résultats caractérisent le joint soudé des tôles en Al 7075-T6 par soudage FSW.

La démarche de calcul des contraintes résiduelles appliquées par la technique ultrasonore longitudinale s'effectue par la mesure du temps de parcours en chaque point, en surface de la structure soudée. Le point de référence supposé à contrainte nulle. Les résultats de contraintes résiduelles présentées sont des valeurs relatives, évaluées en utilisant le coefficient acousto-élastique déjà déterminé dans ce chapitre.

Les résultats aussi montrent que le soudage par friction malaxage (FSW) génère des contraintes résiduelles compressives.

## CONCLUSION GENERALE

L'objectif principal de cette thèse était de faire une caractérisation des contraintes résiduelles dans le soudage par friction malaxage (FSW), en utilisant l'alliage AA7075-T6. Le soudage FSW est un procédé produit des joints de bonne qualité possédant une bonne performance, il s'est bien déroulé sachant que notre matériau est difficilement soudable, il ne nécessite aucun métal d'apport. On ramène deux pièces sous forme de plaques sont mis en position de recouvrement (l'une superposée sur l'autre) ou sont placés l'une à côté de l'autre (bout à bout) et l'outil en rotation est appliqué entre les deux plaques ce qui provoquera la formation du joint soudé.

Il existe beaucoup de paramètres pouvant influencer ce procédé comme les vitesses (d'avancement, de rotation), la pression appliquée, l'angle d'inclinaison de l'outil.

Le procédé de soudage par friction malaxage FSW conduit à des changements microstructuraux. Ces changements sont liés aux cycles thermiques caractérisés par un passage de l'état solide à l'état liquide et inversement, au refroidissement et aux traitements thermiques qui peuvent être réalisés ensuite. L'étude de la microstructure du joint soudé nous a permis d'identifier plusieurs zones : le métal de base, la zone affectée thermiquement, la zone affectée thermo mécaniquement et la zone fondue.

Pendant le processus de soudage on observe des phénomènes mécaniques et physiques. Les phénomènes mécaniques sont dus au frottement à l'interface entre l'outil et les pièces soudées et à la déformation plastique du matériau. La source de frottement est le contact de l'outil en rotation avec le matériau.

Par ailleurs, les phénomènes thermiques sont ; la génération de la chaleur qui vient d'une source de chaleur surfacique due au frottement à l'interface et une source volumique due à la déformation plastique du matériau. Ensuite, la conduction de la chaleur. Le transfert par conduction dans les pièces soudées dépend de la conductivité thermique du matériau soudé, et de la chaleur évacuée dans la plaque support et dans l'outil c'est-à-dire la résistance des interfaces de contact aux transferts thermiques.

Les phénomènes mécaniques et thermiques, dans l'ensemble des procédés de soudage par fusion, entraînent une modification de la microstructure du matériau de base et ses propriétés mécaniques. Ces déformations causées par les contraintes résiduelles.

Les contraintes résiduelles sont des contraintes multiaxiales statiques, sa source peut provenir d'une déformation macroscopique, mésoscopique ou d'échelle microscope. Elles sont

produites pendant la solidification, lors du moulage, et au cours du traitement thermique et en particulier de l'opération de trempe. Elles jouent un rôle essentiel dans la résistance à la fatigue des matériaux.

Pour aboutir à notre objectif, on a utilisé un contrôle non destructif, la méthode ultrasonore, qu'il consiste à balayer une pièce par un faisceau pour déceler les défauts de discontinuité géométrique. Il existe la méthode par transmission qui nécessite l'utilisation de deux palpeurs, si un défaut se trouve dans le parcours du faisceau ultrasonore, l'énergie est partiellement ou totalement occultée. Et il y a la méthode par flexion, elle utilise une seule sonde fonctionne comme émetteur et récepteur. Lorsque l'émission est modulée par impulsions, les signaux réfléchis par différents obstacles peuvent être séparés.

On observe trois types d'ondes ; longitudinales, transversales, et surfaciques. La détermination des contraintes résiduelles par ultrasons se traduit par la dépendance de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores en fonction de l'état de contrainte. Les études antérieures effectuées dans ce domaine nous orientent vers l'utilisation des ondes longitudinales subsurfaciques pour la détermination des contraintes résiduelles superficielles qui sont généralement les plus élevées (critiques).

Le calcul des contraintes résiduelles appliquées par la technique ultrasonore longitudinale s'effectue par la mesure du temps de parcours en chaque point, en surface de la structure soudée.

Des tests de soudage ont été effectués, et d'après les résultats on constate que les contraintes résiduelles évoluent sensiblement avec l'onde longitudinale. Il existe une faible contrainte au niveau du noyau du cordon de soudure et la contrainte maximale se trouve aux niveau de la zone affectée thermomécaniquement ZATM (aux extrémités de l'épaulement de l'outil) générée par la chaleur de frottement entre l'épaulement et la matière et qui n'est pas assez élevée pour déclencher le mécanisme de recristallisation dynamique , ensuite elle diminue et converge vers zéro à chaque fois qu'on s'éloigne du cordon de soudure vers le métal de base qui n'a pas subi des modifications thermiques, mécaniques ou chimiques.

Lors de cette étude, il est nécessaire de tenir compte de la phase d'étalonnage pour déterminer les contraintes résiduelles. La phase d'étalonnage, elle est basée sur l'effet acoustoélastique, cette phase présente la variation relative du temps de parcours de l'onde longitudinale subsurfacique par rapport à la charge appliquée. Il est à noter que cette étape est surtout valable pour des chargements appliqués dans le domaine élastique du matériau.

Pour valider ces résultats expérimentaux, il était nécessaire de comparer les résultats aux travaux ultérieurs. Cette méthode a été utilisée afin d'obtenir le champ de contraintes sur une structure soudée. Les résultats obtenus sont bien en concordance à ceux des mesures faites ailleurs [98].

La méthode ultrasonore des ondes longitudinales subsurfaciques est rapide, elle donne des résultats précis et satisfaisants, comme elle peut nous renseigner sur les contraintes dans l'épaisseur à la différence des autres méthodes qui ont des profondeurs de pénétration bien fixes. La profondeur des ondes longitudinales peut être faite de quelques microns à plusieurs millimètres d'épaisseur, en faisant varier la fréquence.

## **V.1 Perspective et recommandation**

Comme perspective à cette étude, les travaux suivant peuvent être proposés :

- Simulation des contraintes résiduelles.
- Caractérisation des contraintes résiduelle par la méthode DRX.
- Estimation des contraintes résiduelles par les méthodes de processus stochastique.
- Etudes numérique et expérimentale de fatigue des tôles soudée par FSW.
- Etude de soudage hétérogène.
- Etude de l'influence des paramètres de soudage sur les contraintes résiduelles.
- Caractérisation mécanique et métallographique de tôles soudées

## Références :

- 1. Mishra R. et Ma Z. 2005.** Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering*; R 50:1–78.
- 2. Aydin H. Bayram A. Uuz A. et Akay K. S. 2009.** Tensile properties of friction stir welded joints of 2024 aluminum alloys in different heat-treated-state . *Materials and Design* ; 30: 2211 – 2221.
- 3. Genevois C. 2004.** Genèse des microstructures lors du soudage par friction malaxage d'alliages d'aluminium de la série 2000 et 5000 et comportement mécanique résultant. PhD thesis. Institut National Polytechnique de Grenoble.
- 4. Guerdoux et Fourment L. 2009.** A 3D numerical simulation of different phases of friction stir welding. *Modelling and simulation in materials science and engineering*; 17.075001.32pp.
- 5. Ma T. et Ouden G. 1999.** Softening behaviour of Al-Zn-Mg alloys due to welding, *materials science and engineering* ; Vol. A266, pp.198-204.
- 6. Park J.K. et Ardell A.J. 1983.** Microstructures of the commercial 7075 Al alloy in the T651 and T7 tempers. *Metallurgical transactions*; Vol. 14, page 1957-1965.
- 7. Arbogast W.J. 2007.** Application of FSW and related technologies; Chapitre 13; ed: ASM International (**Mishra R.S. et Mohoney N.W.**).
- 8. Rowe C.E.D. et Wayne Thomas.** *Advances in tooling materials for FSW*
- 9. Blondeau R. 2001.** procédés et applications industrielles du soudage. *Traité Mécanique et ingénierie des Matériaux* , Hernece Sciences Publications.
- 10. Gemme F. Verreman Y. Dubourg L. et Jahazi M. 2010.** Numerical analysis of the dwell phase in friction stir welding and comparison with experimental data. *Mater Sci Eng A*; 527:4152 60.
- 11. Nandan R. DebRoy T. et al. 2008.** "Recent advances in friction-stir welding - Process, weldment structure and properties. *Progress in Materials Science*; 53(6): 980-1023.
- 12. Mahoney M.W. Rhodes C.G. et Flintoff J.G. 1998.** spurling, and W.H. bingel. *Properties of Friction-Stir-Welded 7075 T651 Aluminum. metallurgical and*

materials transactions; A. 29.1955-1964.

**13. Liechty B.C. et Webb B.W. 2007.** The use of plasticine as an analog to explore material flow in friction stir welding. *Journal of Materials Processing Technology*; 184. 240-250.

**14. Clyde M. et Adams C.M. mai 1958.** Cooling rates and peak temperatures in fusing welding, *welding research Supplement*.

**15. Hwang R.Y. et Chou C.P. 1998.** The study on microstructural and mechanical properties of weldheat affected zone of 7075-T6 aluminum alloy. *Scripta Materialia*; Vol. 38, no. 2, p.215-221.

**16. Castex L. Lebrun J. L. Maeder G. et Sprauel J. M. 1981.** Théorie de la mesure des contraintes résiduelles par diffraction x. Détermination des contraintes résiduelles par diffraction des rayons X. *Laboratoire de Microstructure et Mécanique. ENSAM; Paris.*

**17. Hauk V. Hougardy H. et Macherauch E. 1991.** Residual stresses . Measurement, Calculation, Evaluation .by DGM INF.

**18. Catal J.** Surface chemistry of phase-pure M1 MoVTenb oxide during operation in selective oxidation of propane to acrylic acid ;vol. 285, 2012, p. 48-60 .

**19. Journal of Catalysis. 2014.** The reaction network in propane oxidation over phase-pure MoVTenb M1 oxide catalysts; vol. 311. p. 369-385.

**20. Aissat M. Hamouda S. et al. décembre 2019.** Characterization and application of ceramic membranes prepared from Algerian kaolin .*Cerâmica*; vol. 65, n° 376. p. 554–561.

**21. Fermin J.R. Rincón C.D. et Castro J.A. 2019.** Microstructural Analysis of AgIn<sub>5</sub>VI<sub>8</sub> (VI: S, Se, Te) Ternary Semiconductors by X-Ray Diffraction . *Materials Research*; vol. 22, n° 5.

**22. Fontes M.A. Baggio Scheid V.H. et al. 2019.** Morphology of the DIN 100Cr6 Case Hardened Steel after Plasma Nitrocarburizing Process . *Materials Research*; vol. 22, n° 3.

**23. Fu H-G. Yang Y-W. Cheng X-L. et Qu Y-H. 2019.** Effect of Quenching Process on Microstructure and performance of High-Boron High-Speed Steel; vol. 24, n° 3, *Matéria (Rio de Janeiro)*.

- 24. Iwamoto G.Y. DeArruda Rodrigues C. et al. 2019.** New Peritectoid Reaction Identified at the MnSb Alloy .Materials Research; vol. 22.
- 25. Zhang Y. Peng W. et al . 2019.** Effect of Ca Content on Properties of Extruded Mg-3Zn-0.5Sr-xCa Alloys for Medical Applications .Materials Research; vol. 22.
- 26. Philippe L. 2014.** Ecole des mines d'albi-Carmaux.
- 27. Raziol C. 2007.** Tube à rayon X.
- 28. Meliad. 2019.** Analyse par diffraction des rayons X [[archive](#)].sur [www.meliad-sas.com](http://www.meliad-sas.com).
- 29. VINSENT J. 2013.** Contribution à l'analyse par diffraction des rayons X de l'état microstructural et mécanique des matériaux hétérogènes; Lille.
- 30. Cazes R. 2003.** Soudage par friction-malaxage. Techniques de l'ingénieur. BM7746.
- 31. Kaufman J.G. 1999.** Properties of aluminum alloys: tensile, creep, and fatigue data at high and low temperatures; ASM international.
- 32. Helal Y. 2017.** L'effet de soudage par friction sur la microstructure et les propriétés mécaniques d'un joint soudé composé d'un alliage d'aluminium industriel et un acier. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider de Biskra.
- 33. Kumar et Kailas. 2008.** The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation; 367-374.
- 34. James, Bradley et al. 2005.** The relationship between process mechanisms and crack paths in friction stir welded 5083-H321 and 5383-H321 aluminium alloys. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures; 245-256.
- 35. Burford D.A. Tweedy B.M. et Widener C.A. 2006.** Influence of shoulder configuration and geometric features on FSW tranck properties. 6th International Symposium on Friction Stir Welding; St-Sauveur.Canada TWI.
- 36. Jariyaboon M. Davenport A. et al .2007.** The effect of welding parameters on the corrosion behaviour of friction stir welded AA2024-T351. Corrosion Science; 49 :877–909.
- 37. Dubost B. et Sainfort P. 1991.** Durcissement par précipitation des alliages d'aluminium. Technique de l'ingénieur ; M240 :1–37.

- 38. LT. P. JL. A. et al . 2009.** Friction stir welding of aluminium alloys. International Materials Reviews; 54.
- 39. Zhou, Yang et al. 2006.** Effect of kissing bond on fatigue behavior of friction stir welds on Al 5083 alloy. Journal of Materials Science ; 2771-2777.
- 40. Hangai . Ozeki et al. 2009.** Foaming conditions of porous aluminum in fabrication of ADC 12 aluminum alloy die castings by friction stir processing. Materials Transactions; 2154-2159.
- 41. Kim. Fujii et al. 2006.** Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy. Materials Science and Engineering ; 250-254.
- 42. Di S. Yang X. Luan G. et Jian B. 2006.** Materials Science and Engineering; A 435-436 :389–395.
- 43. Simon A. 2019.** Le contrôle des pièces par courant de Foucault.<https://metalblog.ctif.com>
- 44. Kashiwaya K. Sakamoto H. 1988.** Non-destructive measuring method of residual stress using magnetic sensors . QR of RTRI, Proceedings of VI International Congress on Experimental Mechanics; pp. 30-35.
- 45. Hans Fischer. 1982.** Werkstoffe in der Elektrotechnik. 2<sup>e</sup> édition Carl Hanser Verlag. Munich et Vienne; ISBN 3-446-13553-7.
- 46. Horst Stöcker. 2000.** Taschenbuch der Physik. 4<sup>e</sup> édition, Verlag Harry Deutsch. Francfort-sur-le-Main; ISBN 3-8171-1628-4.
- 47. Genevois C. Deschamps A. et Vacher P. 2005.** Comparative study on local and global mechanical properties of 2024 T351, 2024 T6 and 5251 O friction stir welds. Materials Science and Engineering; A 415 :162–170.
- 48. Pouget G. et Reynolds A. 2007.** Residual stress and microstructure effects on fatigue crack growth in AA 2050 friction stir welds. International Journal of Fatigue ; A 30 :463–472.
- 49. Abdllahoui Y. Walaszek H. et al. 2000.** Récents développements de la mesure des contraintes résiduelles par méthode ultrasonore. Les principales sources d'erreurs. Mec. Ind.1 ; pp. 187-200.



- 50. Farid Belahce. 2000.** Détermination des Contraintes Résiduelles par la Méthode Ultrasonore. Thèse de Doctorat. Université de Technologie de Compiègne.
- 51. Bray E. 2000.** Current directions of Ultrasonic Stress Measurement Techniques”, Revue of College Station. Texas.
- 52. Murnaghan T.D.et Willey J. 1951.**finite deformations of elastic solid John Willey, New York.
- 53. Hughes D. S. et Kelly J. L. 1953.** Second order elastic deformations in solids. Physic Revue 92(5); pp. 1145-1149.
- 54. Thompson R. B. Lu W-Y. et Clark A.V. 1996.** Semmonogrph on thechiques for residual stress measurement. Chapter Revue of Society for Experimental Stress Analysis. Connecticut.
- 55. ENSAM Paris. 1997.**Laboratoire LM3/MET-X Détermination des contraintes résiduelles par diffraction des rayons X.
- 56. Lebrun J. L.et N Ji. 1995.** Principe de l'analyse des profils de raies de diffraction des rayons X. ENSAM Paris.
- 57. Nelson D.V.** Residual Stress Effects in Fatigue, ASTM STP 776,American Society for Testing and Materials.
- 58. Maeder G. Lebrun J.L.et Sprauel J.M. 1987.**Matériaux, Mise en formes, Pièces formée.
- 59. N Ji. 1989.** Application de l'analyse des profils de raies de diffraction X IJ0711' caractériser l'étai microstructural et mécanique des matériaux métalliques. Thèse de doctorat, L'ENSAM, centre de Paris.
- 60. Stephensn R.I. Fatemi A. et Fuchs H.O. 2001.** Metal Fatigue in Engineering; ed: John Wiley & Sons, New York.
- 61. Pavier M.J. Poussard C.G.C. et Smith D.J. 1997.** “A Finite Element Simulation of the Cold Working Process for Fastener Holes” Journal of Strain Analysis; Vol. 32, No.4, pp. 287-300.
- 62. FTI. 1991.** Extending the Fatigue Life of Metal Structures. MaterialsTesting. Fatigue Technology Inc. 150 Andover Park West, Seattle, Washington.

- 63. Hsu Y.C. et Forman R.G.** “Elastic-Plastic Analysis of an Infinite Sheet Having a Circular Hole under Pressure,” *Journal of Applied Mechanics*
- 64. Zhu W. et Zha Z.** An Elastic-Plastic Analysis of Autofrettaged Thick-Walled Cylinders. *Acta Mech. Sinica*.
- 65. Poussard C. Pavier M.J. et Smith.D.J. 1995.** Analytical and Finite Element Predictions of Residual Stresses in Cold Worked Fastener Holes. *Journal of Strain Analysis* ; Vol. 30, No : 4.
- 66. Baouche Dj. 1998.** Validation numériques des paramètres de fissuration en elastoplastique. Thèse de doctorat.Université Clermont Ferrand.
- 67. Wahab A. Rohrsheim G.R. et Park J.H. 2004.** Experimental study on the influence of overload induced residual stress field on fatigue crack growth in aluminum alloy. *Journal of Materials Processing Technology*; 153-154: 945-951.
- 68. Suresh S. et Ritchie R.O. 1981.**On the influence of fatigue underload on cyclic crack growth at low stress intensities. *Materials Sciences and Engineering*; 51: 61-69.
- 69. Underwood J.H. Pook L.P. et Sharples J.K. 1977.** Flaw Growth and Fracture. ASTM STP 631. American Society for Testing and Materials; pp: 402-415.
- 70. Halliday M.D. Zhang J.Z.et al. 1997.** In situ SEM observations of the contrasting effects of an overload on small fatigue crack growth at two different load ratios in 2024-T351 aluminium alloy. *Int. J. Fatigue*; Vol. 19, No. 4, pp. 273-282.
- 71. Chandawanich N. et Sharpe Jr.W.N. 1979.** An Experimental Study of Fatigue Crack Initiation and Growth from Coldworked Holes. *Engineering Fracture Mechanics*; Vol. 11, pp. 609-620.
- 72. Fukuda S. et Tsuruta Y. 1978.** *Transactions of JWRI*; Vol. 7, pp.67.
- 73. Lam Y.C. et Lian K.S. 1989.** Effect of Residual Stress and its Redistribution on Fatigue Crack Growth. *Theoretical Applied Fracture Mechanics*; Vol. 12, No. 1, pp. 59-66.
- 74. Harter J.A. 2006.** AFGROW users guide and technical manual: AFGROW for Windows 2K/XP. Version 4.0011.14. Air Force Research Laboratory.
- 75. Mokhdani C. 1995.** Amorçage et propagation de fissures de fatigue dans un acier pour tubes de transport de gaz : Identification des lois de d’endommagement et

application aux structures tubes sous pression interne . Thèse de Doctorat en Sciences et Génie des Matériaux, Ecole des Mines de Paris.

**76. Jones K. et M. Dunn. 2009.** Predicting fatigue crack growth from a preyielded hole. *International Journal of Fatigue*; 31, pp 223-230.

**77. Pintschovius L. Jung V. et al. 1983.** Residual stress measurements by means of neutron diffraction". *Materials Sciences Engineering*; 61(1): 43-50.

**78. Benachour M. 2008.** Simulation d'une avancée d'une fissure de fatigue à travers u champ de contraintes résiduelles. Thèse de Doctorat. Université de Sidi Bel Abbes.

**79. Jones K. et Dunn M. 2008.** Fatigue crack growth through residual stress field introduced by plastic beam bending . *Fatigue Fract. Eng Mater Struct*; pp 31.

**80. Ulysse P. 2002.** Three-dimensional modeling of the friction stir-welding process. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*; 42(14): p. 1549-1557.

**81. Buffa G. Fratini L. et Shivpuri R. 2008.** Finite element studies on friction stir welding processes of tailored blanks. *Computers & Structures*; 86(1-2): p. 181-189.

**82. Hamilton C. Dymek S. et Sommers A. 2008.** A thermal model of friction stir welding in aluminum alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*; 48(10): p. 1120-1130.

**83. Buffa G. et Fratini L. 2004.** Friction Stir Welding Of AA6082-T6 Sheets: Numerical Analysis And Experimental Tests. In *Materials Processing and Design: Modeling, Simulation and Applications*. NUMIFORM; pp. 1224–1229.

**84. Gemme, F. Verreman Y. et al. 2010.** Numerical analysis of the dwell phase in friction stir welding and comparison with experimental data. *Materials Science and Engineering*; A, 527(16-17). 4152–4160.

**85. Coupez T. Soyris T. N. et Chenot J-L. 1991.** 3-D finite element modelling of the forging process with automatic remeshing. *Journal of Materials Processing Technology*, 27(1-3), 119–133.

**86. Buffa G. Fratini L. Pellegrino S. et Micari F. 2013.** On the Field Variables Influence on Bonding Phenomena during FSW Processes: Experimental and Numerical Study. *Key Engineering Materials*; 549, 484–491.

- 87. Boussetta R. Coupez T. et Fourment L. 2006.** Adaptive remeshing based on a posteriori error estimation for forging simulation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*; 195(48-49), 6626–6645.
- 88. Fourment L. et Guerdoux S. 2008.** 3D numerical simulation of the three stages of Friction Stir Welding based on friction parameters calibration. *International Journal of Material Forming*; 1(S1), 1287–1290.
- 89. Schmidt H.B. et Hattel J.H. 2008.** Thermal and Material Flow modelling of Friction Stir Welding using Comsol, in *Proceedings of the COMSOL Conference*. Hannover; p. 1-6.
- 90. Santiago D.H. et al. 2004.** Numerical modeling of welded joints by the Friction Stir Welding process. *Materials Research*; 7: p. 569-574.
- 91. Zhang Z. et Chen J.T.** The simulation of material behaviors in friction stir welding process by using rate-dependent constitutive model. *Journal of Materials Science*; 43(1): p. 222-232.
- 92. Atharifar H. Lin D.C. et Kovacevic R. 2009.** Numerical and Experimental Investigations on the Loads Carried by the Tool During Friction Stir Welding. *Journal of Materials Engineering and Performance*; 8(4): p. 339-350.
- 93. Oliphant A. 2004.** Numerical Modeling of Friction Stir Welding: A Comparison of ALE and ForgeS in Mechanical Engineering, Brigham Young University; p. 133.
- 94. St-Georges L. et al.** Prediction of optimal parameters of friction stir welding. In *6th International Symposium on Friction Stir Welding 2006*. Université du Québec à Chicoutimi: St-Sauveur (Qc); p. 1-10.
- 95. Srivatsan T. Vasudevan S. et Park L. 2007.** The tensile deformation and fracture behavior of friction stir welded aluminum alloy 2024. *Materials Science and Engineering*; A 466 :235–245.
- 96. Colegrove P. 2000.** Three-dimensional flow and thermal modeling of the friction stir welding process. In *2nd International Symposium on Friction Stir Welding- Proceedings*. Sweden.
- 97. Jacquin D. et Desrayaud C. 2009.** Modélisation de l’histoire thermomécanique des zones soudées en Friction Stir Welding. Application à la prévision des microstructures.

**98. BOUCHERIT ADEL. 2007.** Contribution au Développement du Soudage par friction malaxage « FRICTION STIR WELDING » et Mesure des Contraintes Résiduelles.

**99.** <https://almet-metal.com/informations-techniques/donnees-aluminium>