

Remerciements

Au premier lieu, nous tenons à remercier Dieu qui nous a donné le courage et la volonté pour terminer ce travail.

Nous tenons à remercier vivement tous ceux qui nous ont aidés à élaborer cet ouvrage et en particulier notre promoteur M. Mustapha TEMMAR, pour son aide et ces orientations précieuses.

Nous tenons également à remercier les honorables membres du jury, pour l'honneur qu'ils nous ont accordés en acceptant d'évaluer notre travail.

Nous remercions aussi l'ensemble des enseignants du département de génie mécanique qui ont contribué à notre formation de master en ingénierie des matériaux et des surfaces.

Que tous ceux ou celles qui nous ont apportés leur soutien et qui nous ont aidé de loin ou de près pour l'achèvement de ce projet trouvent ici l'expression de notre vive et sincère reconnaissance, en particulier nos parents, nos familles et nos amis.

DÉDICACE

Je remercie infiniment toutes les personnes qui m'ont soutenu jusqu'à cette étape dans mon parcours universitaire.

Je veux dédier ce travail à :

- **L'homme de ma vie, mon précieux offre du dieu. Tu as toujours été pour moi un homme respectueux, honnête, je tiens à honorer l'homme que tu es, mon père TIDJANI.**
- **Ma reine, tu m'as couvé de tendresse, ta prière et ta bénédiction m'ont été un grand secours pour mener à bien mes études, Merci maman. Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont vous ne cessez de me combler. Que dieu vous procure bonne santé et longue vie.**
 - **Ma chère sœur Leila, ma confidente aucune dédicace ne peut exprimer mon amour et ma gratitude de t'avoir comme sœur que dieu te protège et t'offre le bonheur et la chance.**
- **Mes deux petits frères, Abdelkader et Sidali vous êtes ma joie de vivre. En signe de l'affection et du grand amour que je vous porte, qu'Allah vous apportes la réussite**
- **ma grand-mère Houria les mots sont insuffisants pour exprimer ma profonde estime et mon amour.**
 - **Mes deux bébés, Luca et Lady je vous aime tellement.**
 - **Samsoum, aucun mot ne peut exprimer ma gratitude, mes remerciements et ma reconnaissance, cinq sur cinq a la luna.**
- **A TOUTE MA FAMILLE**

Aucun langage ne saurait exprimer mon respect et ma considération pour votre soutien et encouragements. Je vous dédie ce travail en reconnaissance de l'amour que vous m'offrez quotidiennement et votre bonté exceptionnelle. Que Dieu le Tout Puissant vous garde et vous procure santé et bonheur.
- **Mon binôme Mehdi Meraga, merci pour ta patience et ta gentillesse**
- **Chahla, Aziza , Sabrina et Razika vous êtes mes meilleures, votre présence compte beaucoup pour moi, j'espère qu'on restera toujours réunit je vous aime.**
- **Mes chers amis : Mohamed, Saadoudi, Othman, Omar, Amel, Belka, Amina, Djio, Isma, youyou, Lyly et Yacine.**

DÉDICACE

À mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur soutien, leur affection et leur prière durant mes études

À mes chers frères et ma chère sœur, pour leur encouragement, leur appui et leur soutien

À mon amie, mon binôme et mon partenaire qu'elle était à la hauteur et qu'elle fait tout son possible pour le succès de ce travail, sa patience et sa fidélité, donc merci Romaiassa Meziani je te souhaite tout le meilleur

À tous ceux qui ont participé dans ce travail et chers professeurs et enseignant (Pr.M.Temmare, Dr.A.Haddad, Dr.Y.Hadji, Dr.Y.Nemri, Pr.M.Hadji, Pr.N.Bacha, Dr.N.chiker, Mdm.Z.Sidhoum, Mdm.Khaloui) . Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tout allégués et le fruit de votre soutien infailible...tous ses choses-là ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui ... Donc merci d'être là toujours avec moi...

À mes amies et camarades.

Et je veux profiter l'occasion de dire à ceux qui ont perdu leurs familles et leurs proches à cause de COVID19 Allah sera avec vous inshaallah . Que dieu vous donne la patience. Et ne les oublie pas de faire des douaâs ...

Enfin à vous qui prenez la peine de lire ce mémoire

ملخص

هو عملية تصنيع ذات حالة صلبة، والتي توفر مزايا مهمة مقارنة (FSW) لحام الدمج الاحتكاكي في لحام سبائك FSW بعمليات اللحام بالانصهار التي يشيع استخدامها في الصناعة. يمكن استخدام الألومنيوم من سلسلة 7000، والتي تكون شديدة الحساسية للتكسير الساخن عند اللحام بالاندماج. تُستخدم هذه السبائك على نطاق واسع في صناعة الطائرات، كما أن تطوير عملية لحام فعالة منخفضة الطاقة تتمتع بإمكانيات قوية فيما يتعلق بالخصائص الميكانيكية للمفاصل لها أهمية كبيرة في صناعة الطيران.

الهدف من مشروع البحث الحالي هو زيادة كمية المعرفة الأساسية المتعلقة بالعملية من خلال الحصول هذه المعرفة مطلوبة لتحسين العملية في FSW على فهم أفضل للظواهر الفيزيائية التي تنطوي عليها سياق التطبيقات الصناعية. من أجل القيام بذلك، تم تخصيص الجزء الأول من المشروع لدراسة نظرية والقسم الأخير الذي FSW للألمنيوم وسبائكه، والجزء الثاني مخصص للحام، مع التركيز على طريقة يلخص ثلاث أطروحات أخرى لتوسيع نطاق أعمالنا بشكل أفضل المعرفة في مجال اللحام بالاحتكاك والتحرك.

RÉSUMÉ

Le soudage par frottement-malaxage (friction stir welding, FSW) est un procédé d'assemblage réalisé à l'état solide. Cette caractéristique lui confère d'importants avantages lorsqu'il est comparé aux procédés de soudage par fusion couramment utilisés dans l'industrie. Dans le contexte des alliages d'aluminium, le FSW offre la possibilité de souder les alliages de la série 7000, pourtant reconnus pour leur forte sensibilité à la fissuration à chaud. Cette famille d'alliages est souvent utilisée pour la fabrication d'avions. Le développement d'un procédé d'assemblage efficace, à faible consommation énergétique et présentant un potentiel intéressant du point de vue de la résistance mécanique est d'une grande importance pour l'industrie aéronautique.

L'objectif de ce projet de recherche est d'augmenter le capital de connaissances fondamentales relatives au procédé afin de mieux comprendre les phénomènes physiques se produisant lors du soudage. Ces connaissances profiteront ensuite aux intervenants de l'industrie aéronautique qui participent au développement industriel du procédé. Pour atteindre cet objectif, un premier volet du projet est consacré à l'étude théorique de l'aluminium et ses alliages, alors qu'un second volet sur le soudage en focalisant sur la méthode FSW, et un dernier volet qui résume trois autres thèses pour mieux élargir notre connaissance dans le domaine du soudage par frottement-malaxage.

Mots clés : Soudage par frottement-malaxage, friction stir welding, FSW, Alliages d'aluminium.

Abstract

Friction stir welding (FSW) is a solid-state manufacturing process, which gives important advantages as compared to fusion welding processes that are commonly used in the industry. FSW can be used to weld aluminum alloys of the 7000 series, which are highly sensitive to hot cracking when fusion welded. These alloys are widely used for plane manufacturing and the development of an efficient, low-energy welding process that has a strong potential regarding mechanical properties of joints is of great importance for the aerospace industry.

The aim of the present research project is to increase the amount of fundamental knowledge regarding the process by getting a better understanding of the physical phenomena involved in FSW. Such knowledge is required to improve the process in the context of industrial applications. In order to do so, the first part of the project is dedicated to a theoretical study of aluminum and its alloys, the second part is dedicated to welding, focusing on the FSW method and a final section which summarizes three other theses to better expand our knowledge in the field of friction-stir welding.

Keywords: friction stir welding, FSW, Aluminum alloys.

TABLE DES MATIERES

Remerciement

Dédicace 1

Dédicace 2

Table des matières

Liste de figures

Liste des tableaux

Liste des symboles

Introduction Générale

CHAPITRE I :

I.1 Introduction.....	1
I.2 Histoire de l'aluminium	1
I.2.1 La Découverte de l'aluminium	1
I.2.2 La Production de l'aluminium	2
I.3 Caractéristiques de l'aluminium.....	2
I.3.1 Propriétés mécaniques	2
I.3.2 Propriétés physiques	5
I.3.3 Propriétés chimiques et de surface	10
I.4 Classification des alliages d'aluminium	13
I.4.1 Mise en forme par corroyage.....	14
1. Les alliages trempants (à durcissement structural)	15
2. Les alliages non-trempant (à durcissement par écrouissage)	17
3. Types de traitements appliqués aux alliages d'aluminium	19
I.4.2 Mise en forme par fonderie	23
I.4.3 Codification des états métallurgique des alliages d'aluminium	27
I.5 Les impuretés et leur influence	29
I.6 Structure de l'aluminium	31
I.7 Les avantages et les inconvénients de l'aluminium	33

I.7.1 Les avantages de l'aluminium.....	33
I.7.2 Les inconvénients de l'aluminium	35
I.8 Conclusion	40
CHAPITRE II :	
II.1 Introduction	41
II.2 Généralités sur le soudage.....	41
II.2.1 Historique du soudage	41
II.2.2 Définitions de soudage	42
II.2.3 Procédés de soudage	42
II.3 Procédé de soudage par friction et malaxage (Friction Stir Welding FSW)	44
II.4 Le principe du soudage FSW	44
II.4.1 Le pion	45
II.4.2 L'épaulement	46
II.5 Applications.....	46
II.6 Équipements	49
II.7 Les différents types de soudage par friction malaxage	51
II.7.1 Soudage bout à bout	51
II.7.2 Soudage par recouvrement	52
II.7.3 Soudage par points	53
II.7.4 Outil à deux épaulements (bobbin tool)	54
II.8 Les phases de soudage.....	55
II.9 Paramètres du soudage	56
II.10 Phénomènes physiques observés dans le procédé	57
II.11 Caractérisation métallurgique de la zone soudée par FSW	60
II.12 Défauts rencontrés dans les soudures	63
II.13 Avantage et inconvénients du procédé du FSW	66
II.14 Conclusion	67

CHAPITRE III :

III.1 Thèse 1

III.1.1 Présentation de la problématique.....	68
III.1.2 Mesure des températures dans l’outil.....	69
III.1.3 Implémentation du modèle éléments finis sous MATLAB.....	70
III.1.4 Bilan énergétique	72
III.1.5 Calcul des flux dans les pièces à souder	72
III.1.6 Simulation numérique du soudage	74

III.2 Thèse 2

III.2.1 Description du procédé	76
III.2.2 Principe	76
III.2.3 Puissance et énergie de soudage.....	76
III.2.4 Stratégies de modélisation du soudage par frottement-malaxage	77
III.2.5 Caractérisation mécanique.....	78

LISTE DES FIGURES

Chapitre I :

Figure I.1 : Comportement en traction de l'alliage d'aluminium 5083	5
Figure I.2 : Influence du titre de l'aluminium sur le pouvoir réflecteur	9
Figure I.3 : la tenue à la corrosion.....	10
Figure I.4 : schéma de la disposition des deux métaux.....	12
Figure I.5 : Le Procédés d'anodisation.....	12
Figure I.6 : La coloration chimique.....	13
Figure I.7 : Le changement de la taille de grain en fonction de l'écroutissage.....	21
Figure I.8 : La coloration Ecroutissage et propriétés mécaniques des alliages 1000 et 3000.....	21
Figure. I.9 Diagramme de recristallisation.....	22
Figure I.10 : Structure en perspective.....	31
Figure I.11 : Schéma de la maille.....	31
Figure I.12 : Apparition de soufflures dues à l'alumine (soudage à la limite du collage).....	36
Figure I.13 : Sensibilité à la fissuration à chaud des alliages d'aluminium.....	37
Figure I.14 : Soudabilité des alliages d'aluminium.....	38
Figure I.15 : Composition schématique d'une couche d'oxydes naturelle	39

Chapitre II :

Figure II.1 : Transformateur de Thomson pour le soudage électrique par résistance.....	41
Figure II.2 : Organigramme des procédés de soudage les plus répandus.....	43
Figure II.3 : Illustration du procédé de soudage par friction et malaxage.....	45
Figure II.4 : Exemple de géométrie de pion.....	45
Figure II.5 : La géométrie de l'épaulement.....	46
Figure II.6 : Assemblage de l'avion Eclipse 500 avec le procédé de FSW.....	47

Figure II.7 : Assemblage de voiture Mazda Mx-5 avec le procédé de FSW.....	47
Figure II.8 : Technique de soudage des carrosseries des trains Hitachi.....	48
Figure II.9 : Bateau en aluminium construit en utilisant FSW.....	48
Figure II.10 : équipement de type portique CSFM-UQAC pour le FSW.....	49
Figure II.11 : Robot asservi pour le FSW doté de sa tête de soudage.....	50
Figure II.12 : Bridage mécanique de base.....	50
Figure II.13 : Etapes du Soudage bout à bout.....	51
Figure II.14 : Principe du FSW par recouvrement.....	52
Figure II.15 : Principe du FSW par points.....	53
Figure II.16 : Configuration de l’outil à double épaulement.....	54
Figure II.17 : Symétrie du cordon FSW obtenu par un outil à double épaulement	54
Figure II.18 : – (a)- Fin de phase de pénétration / (b)- Phase de chauffage	55
Figure II.19 : – (c)- Phase de translation / (d)- Trou à la fin de soudure.....	56
Figure II.20 : Transferts thermiques induits par le procédé FSW.....	58
Figure II.21 : Coupe d’une soudure sur un alliage d’aluminium.....	59
Figure II.22 : Zones principales d’un cordon de soudure par FSW.....	60
Figure II.23 : Coupe transversale d’un cordon de soudure par FSW	60
Figure II.24 : Formes de noyaux a) cuvette b) ellipsoïdale.....	61
Figure II.25 : Durcissement par écrouissage.....	62
Figure II.26 : Durcissement par précipitation.....	63
Figure II.27 : Vue en coupe de la microstructure d’un joint soudé.....	64
Figure II.28 : Schéma montrant la position des défauts en soudure bout à bout.....	64

Chapitre III :

Figure III.1 : évolution de la température aux cours du FSW.....	69
Figure III.2 : Identification des flux dans l'outil pendant la phase de soudage.....	70
Figure III.3 : Champ de température dans l'outil FSW.....	71
Figure III.4 : Présentation d'un bilan énergétique en FSW	72
Figure III.5 : Champ de température dans les pièces à souder.....	75
Figure III.6 : Profil de microdureté pour 4 alliages différents.....	78

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I:

Tableau I.1 : Principales caractéristiques mécaniques de l'aluminium.....	4
Tableau I.2 : Masse volumique de l'aluminium en fonction de la température.....	6
Tableau I.3 : Influence de la température sur la résistivité de l'aluminium.....	8
Tableau I.4 : Familles d'alliages d'aluminium mis en forme par corroyage.....	14
Tableau I.5 : Les séries d'alliage de fonderie selon l'Aluminium Association.....	24
Tableau I.6 : Subdivision de H- Ecrouissage.....	28
Tableau I.7 : Subdivision de T- Traitement Thermique.....	29

Chapitre III:

Tableau III.1 : Les coordonnées des points de mesure	69
Tableau III.2 : Les coefficients de partage à T=500°C.....	74
Tableau III.3 : Les densités de flux thermique dans les zones à souder.....	74

Liste des symboles

CFC : cubique faces centrées

E : module de young

Re : limite elastique a la traction

ν : Coefficient de Poisson

Rm : limite de resistance a la rupture

Ar : Allongement après rupture

λ : Conductivité Thermique,

ρ : Masse Volumique,

c_p : Capacité thermique massique a pression constante.

MB : Métal de base

ZAT : Zone affectée thermiquement

ZATM : Zone affectée thermomécaniquement

ZM : Zone malaxée

α_T : coefficient de dilatation thermique

P_0 : résistivité résiduelle

ρ : Résistivité électrique

T : température, en kelvin [k] ou degrés Celsius [C^0]

L : coefficient de Lorenz

GP : (Guinier-Preston) signifie une plaque composée d'atomes de soluté séparés sur un plan

F_p : Force de Peierls

C : la compacité

α : coefficient de partage thermique

ϕ_i : Densité de flux thermique imposée

H : L'énergie de soudage

M : le couple exercé sur l'outil en rotation

ω : la vitesse de rotation

η :le rendement.

CNRC : conseil nationale de recherches canada

TWI : The Welding Institute

Type de soudure :

FSW: Friction Stir Welding

TIG: Tungsten Inert Gas

MIG-MAG: Metal inert gaz et Metal active gas

MMA: Manual Metal Arc

Les éléments :

B : Bore

Al : Aluminium

Si : Silicium

Mg : Magnésium

Li: Lithium

Ti: Titane

Zn: Zinc

Cr: Chrome

Fe : Fer

Cu : Cuivre

H : Hydrogène

O: Oxygène

Ni: Nickel

Introductions générales :

Le soudage par friction malaxage (FSW) est considéré comme une technique moderne de fabrication, permettant d'assembler des alliages difficilement soudables par des procédés de soudages classiques. Ce procédé a été inventé en 1992 par l'Institut de Soudage (The Welding Institute). Le FSW est un procédé, du soudage à l'état solide est classé parmi les procédés de soudage basés sur l'échauffement de la matière, qui consiste à lier deux pièces en les amenant dans un état pâteux grâce à un pion en rotation. Lors du soudage par friction malaxage, un outil rotatif constitué d'un pion profilé et d'un épaulement est enfoncé dans la matière jusqu'à ce que l'épaulement touche la surface du matériau à souder. La matière est donc chauffée par friction à des températures où elle est facilement déformable. Lorsque l'outil avance, la matière s'écoule de l'avant vers l'arrière du pion pour former le joint soudé, performant est nécessaire pour obtenir des joints de qualité

Dans ce travail, En raison de la situation actuelle que traverse-le monde en général et notre pays en particulier, nous n'avons pas pu réaliser d'expérience ni d'étude détaillée sur notre sujet.

Le mémoire est composé de 3 chapitres.

Le premier est dédié à l'étude bibliographique qui intègre les caractéristiques de l'aluminium et la classification de ces alliages. Nous présentons aussi les types de traitements appliqués aux alliages aluminium.

Dans le deuxième, nous abordons des généralités sur le soudage. L'axe est ensuite orienté vers celui par friction malaxage connu sous l'appellation anglaise 'Friction Stir Welding' (FSW) qui est notre sujet principal. Nous avons d'abord expliqué le principe de soudage FSW et ces différents domaines d'application, puis on a cité les phénomènes physiques observés dans le procédé en reportant les avantages et les inconvénients.

Le troisième chapitre, nous avons résumé des thèses qui nous ont été transmises ne pouvant nous-même mettre en pratique ces thèses

Chapitre 1

Aluminium et Alliages d'aluminium

I.1 Introduction

Le corps simple aluminium est un métal malléable, argenté, peu altérable à l'air et peu dense. C'est le métal le plus abondant de l'écorce terrestre et le troisième élément le plus abondant après l'oxygène et le silicium ; il représente en moyenne 8% de la masse des matériaux de la surface solide de la planète. Il est, en règle générale, trop réactif pour exister à l'état natif dans le milieu naturel on le trouve combiné à plus de 270 minéraux différents. Son minerai principal est la bauxite, il y est présent sous forme d'oxyde hydraté dont on extrait l'alumine. Il peut aussi être extrait de la néphéline, de la leucite, de la sillimanite, de l'andalousite et de la muscovite.

Le métal mis à nu s'auto-passive immédiatement par oxydation, même en condition défavorable, une couche d'alumine Al_2O_3 imperméable épaisse de quelques nanomètres le protège de la corrosion (les conditions favorables sont essentiellement : environnement peu chaud, peu humide, peu pollué, peu salé ; alliage de qualité adaptée). L'oxydabilité de l'aluminium doit être techniquement contrôlée dans les processus industriels ; elle est mise à profit dans certains d'entre eux (les deux principaux sont l'oxydation rapide amplifiée forcée anodique électrolytique et le colmatage rapide par hydratation à chaud).

Sa légèreté, sa résistance à la corrosion, sa mise en forme variée et sa coloration durable en font un matériau important et très utilisé dans l'industrie et l'artisanat, malgré la technicité de sa mise en œuvre, sous forme pure ou alliée, notamment dans l'aéronautique, les transports et la construction. Sa nature réactive en fait également un catalyseur et un additif dans l'industrie chimique ; il est ainsi utilisé pour accroître la puissance explosive du nitrate d'ammonium.

I.2 Histoire de l'aluminium

I.2.1 La Découverte de l'aluminium

Bien que connu depuis l'Antiquité, l'aluminium n'a été découvert en tant que tel qu'en 1807 par le britannique Humphry Davy. Après avoir découvert le sodium et le potassium, Davy analyse la composition de l'alun et identifie un nouveau métal qu'il nommera « aluminium ». Puis en 1821, le chimiste français Pierre Berthier découvre un minerai composé à plus de 50% d'oxyde d'aluminium. Ce minerai sera baptisé bauxite en raison du lieu de sa découverte à Baux-de-Provence.

I.2.2 La Production de l'aluminium

En 1825, le chimiste danois Hans Christian Orsted parvient à produire de l'aluminium via une réaction chimique entre du chlorure d'aluminium et un mélange de mercure et de potassium. Le métal obtenu n'est pas totalement pur mais le procédé apparaît alors satisfaisant. En 1827, le chimiste allemand Friedrich Wohler fait mieux que le danois en obtenant de l'aluminium pur. Sa méthode de production permet en outre de déterminer les propriétés physico-chimiques de l'aluminium. Ce n'est qu'en 1854 qu'Henri Deville et Bunsen finissent de mettre au point une nouvelle technique de production de l'aluminium par voie chimique, qui se répand alors à travers toute l'Europe. Le prix de production de l'aluminium équivaut à cette époque à celui de l'or. Très difficile à extraire au départ, l'aluminium était considéré comme un métal précieux. Ce n'est qu'avec les progrès de l'électricité que le procédé d'électrolyse a pu être mis au point et utilisé à partir de 1886 pour l'extraction de l'aluminium associé à une baisse importante des coûts.

I.3 Caractéristiques de l'aluminium

I.3.1 Propriétés mécaniques

L'aluminium est un métal ductile et très malléable, le modèle à électrons libres de la liaison dans les métaux peut expliquer la malléabilité et la ductilité du métal, en effet il est malléable car ses liens métalliques sont non-directionnels, et ductile car les ions métalliques sont entourés par un nuage d'électrons ainsi une force d'attraction agit dans toutes les directions, quand un stress est appliqué au métal, les électrons de valence délocalisés, se déplaçant librement continuent d'exercer une attraction uniforme sur les ions positifs. Si les caractéristiques de l'aluminium pur sont faibles, comme pratiquement celles de tous les métaux purs, la gamme d'alliage très étendue permet de trouver celui qui correspond aux contraintes d'utilisation envisagées.[1]

- **Diversité des alliages**

Les propriétés mécaniques de l'aluminium peuvent être modifiées avec l'addition d'autres métaux, notamment le cuivre, le magnésium, le manganèse, le silicium, le lithium et le zinc, formant ainsi des alliages. Certains éléments sont présents dans l'alliage sans qu'ils y aient été ajoutés volontairement : ce sont les impuretés dont les plus importantes sont le fer et le silicium, et dont il faut contrôler précisément la teneur pour certaines utilisations car elles peuvent avoir une influence défavorable. Tous les éléments jouent, par leur nature et leur teneur, sur les caractéristiques de l'alliage.

Il est possible d'augmenter les caractéristiques mécaniques, mais aussi de réduire significativement la ductilité de l'aluminium ainsi que de tous ses alliages, par déformation à froid appelée écrouissage. L'écrouissage réduit également la conductivité électrique et la résistance à la corrosion des alliages, en revanche la charge de rupture et la dureté sont augmentées.

L'écrouissage d'un métal : c'est le durcissement d'un métal sous l'effet de sa déformation plastique (définitive).

- **Usinage, Décolletage**

L'aluminium et ses alliages s'usinent avec facilité à condition de prendre quelques précautions aux grandes vitesses de coupe et d'utiliser des outils adaptés. Les alliages d'aluminium s'usinent mieux que l'aluminium pur et ne provoquent pas d'étincelles lors de leur usinage. D'une manière générale, les alliages à hautes caractéristiques mécaniques c'est à dire ayant des capacités de déformation à froid faibles, s'usinent bien. (Fraisage, perçage, cisaillement...)

- **Contraintes mécaniques élevées**

Lorsque les constructions sont soumises à des contraintes importantes, l'emploi des alliages communs conduirait à des épaisseurs ou à des sections incompatibles avec le but recherché. Il est nécessaire alors d'utiliser des alliages à très hautes caractéristiques mécaniques ;

Les alliages les plus résistants peuvent avoir une charge de rupture supérieure à 700 MPa, donc largement équivalente à celles des aciers trempés. A poids égal, la résistance mécanique d'un produit en alliage d'aluminium est 2,3 fois plus forte que celle du bronze et 1,5 fois plus forte que celle d'un acier trempé

Aluminium et Alliages d'aluminium

Les propriétés mécaniques des alliages d'aluminium diminuent lorsque la température augmente. Ainsi à basse température, grâce à leur structure cristalline CFC, les alliages d'aluminium ont une bonne ductilité.

Voici un tableau montrant les principales caractéristiques mécaniques de l'aluminium :

Tableau I.1 : Principales caractéristiques mécaniques de l'aluminium.

Allongement à la rupture	Module d'élasticité (Young) E	Coefficient de Poisson ν	Capacité Calorique volumique	Limite élastique à la traction Re	Module de torsion	Limite de résistance à la rupture Rm
%	(Gpa)	(sans Dim)	(MJ/m ³ K)	(MPa)	(GPA)	(MPa)
20 à 30	67.5	0.34	2.39	30	27	60 à 125

L'allongement à la rupture de l'aluminium pur ou presque est de l'ordre de 30 %. Il en va de même pour les alliages n'ayant subi ni écrouissage ni traitement thermique ; dans ces cas, l'allongement à la rupture est compris entre 20 et 40 %. L'aluminium pur et les alliages non traités ont des propriétés mécaniques médiocres, ils sont « mous » ($20 \text{ MPa} < Re < 100 \text{ MPa}$). Après traitement(s), la résistance mécanique est augmentée ($100 \text{ MPa} < Re < 500 \text{ MPa}$) mais l'allongement à la rupture diminue fortement ($1 < A\% < 20$). Le module d'Young de l'aluminium (70 Gpa) montre qu'il est peu rigide mais cela peut être compensé par des traitements ou des alliages. Bien sûr, la pureté du métal joue quand même un rôle essentiel, car plus le métal est pur, plus la dureté, et la charge à la rupture diminuent alors que l'allongement augmente. De plus les produits en aluminium ont une surface fragile : ils sont sensibles aux coups et aux rayures.

La courbe de traction ci-dessous nous montre les différentes caractéristiques mécaniques de l'aluminium :

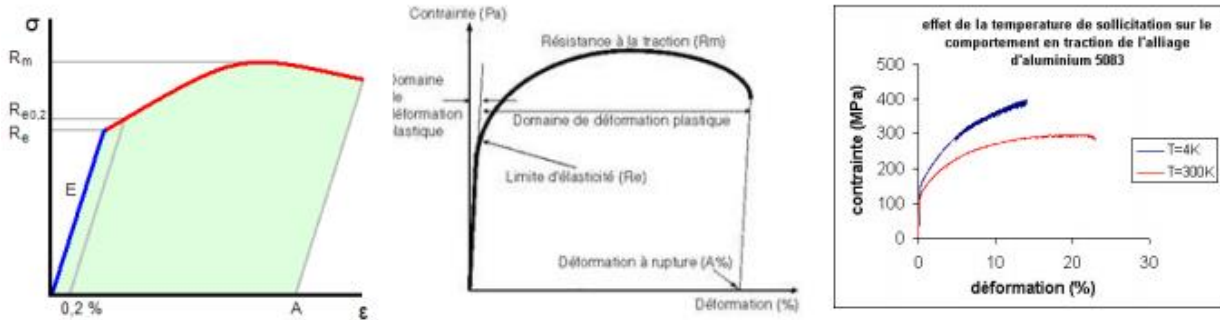


Figure I.1 : Comportement en traction de l'alliage d'aluminium 5083

Avec :

Re : « **limite d'élasticité** » : c'est la contrainte qui marque la fin du domaine élastique et le début du domaine plastique. Elle n'est pas toujours facile à repérer notamment sur les métaux purs de structure CFC.

Rm : « **Résistance maximale** » : contrainte à laquelle est soumise le matériau au maximum de la charge, c'est à dire avant que n'apparaisse la striction.

Ar (A%) : « **Allongement après rupture** » : c'est la mesure exprimée en pourcentage de l'allongement plastique total obtenu.

$$Ar = A\% = (l - l_0) / l_0 \times 100$$

I.3.2 Propriétés physiques

L'aluminium est, après le magnésium, le métal le plus léger qui puisse être utilisé industriellement. Sa densité est environ le tiers de celle du cuivre ou de celle de l'acier.

Son point de fusion relativement bas associé à une parfaite stabilité à toute température même à l'état fondu rend aisée la fusion de l'aluminium et seul l'argent, le cuivre et l'or possèdent une conduction thermique supérieure à celle de l'aluminium.

Enfin sa haute conductibilité électrique et son absence de magnétisme le désignent au même titre que le cuivre.

Ce sont là les caractéristiques physiques principales de l'aluminium dont on traitera ci-dessous :

1. Densité

L'aluminium est un métal dont la densité est faible (2,7), c'est le plus léger de tous les métaux usuels, sa masse volumique est de 2700 kg/ m³ et la masse volumique des alliages d'aluminium est comprise entre 2600 et 2800 kg/ m³. La masse volumique est fortement influencée par la température et diffère suivant que l'aluminium est à l'état solide ou liquide :

Tableau I.2 : Masse volumique de l'aluminium solide et liquide en fonction de la température

État	Température		Masse volumique <i>Kg/m³</i>
	K	C°	
Solide	298	25	2698
	373	100	2680 (2)
	573	300	2660 (2)
	773	500	2620 (2)
	933	660	2550 (2)
Liquide	933	660	2368 (3)
	973	700	2357 (3)
	1023	750	2345 (3)
	1073	800	2332 (3)
	1123	850	2319 (3)
	1173	900	2304 (3)

Aluminium de pureté 99.996%

En revanche, sa masse volumique est faiblement influencée par la présence d'impuretés. La présence de certains éléments ex : (B, Si, Mg, Li) dans l'aluminium diminue la masse volumique alors que d'autres éléments ex : (Ti, Zn, Cr, Fe, Cu) augment la masse volumique de l'aluminium.

2. Propriétés thermiques

- **Température de fusion :**

Pour casser la liaison métallique de l'aluminium, il faut fournir une énergie qui est atteinte à température de fusion qui dépend de la pureté de l'aluminium. Celle-ci varie suivant les mesures de 657 à 660 °C :

- ❖ 657 °C pour un aluminium « commercial »
- ❖ 659 °C et 660 °C pour le métal dont le titre est de 99,99 %.

La valeur maintenant admise de l'enthalpie de fusion de l'aluminium (encore couramment appelée chaleur latente de fusion) est de : 397 J.g⁻¹

Même pour le métal très pur, la fusion commence toujours aux joints de grain car les liaisons au niveau des défauts sont moins énergétiques.

Lors de la fusion, l'aluminium (pur ou allié) subit une augmentation de volume d'un peu plus de 6,26% qui, à l'inverse, se traduit à la solidification par une contraction de volume dont il faut impérativement tenir compte lors du moulage de pièces en fonderie

Le coefficient de dilatation thermique linéaire de l'aluminium est de $23 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ entre $+20^\circ\text{C}$ et $+100^\circ\text{C}$ et varie en fonction de la température.

Ce coefficient de dilatation thermique est donné par la formule :

$$\alpha_T = \frac{d}{dT} \left(\frac{\Delta L}{L_0} \right) = \frac{1}{L_0} \frac{dL}{dT}$$

- **Conduction thermique :**

L'aluminium a une conductivité thermique très élevée environ 66 % de celle du cuivre, celle des alliages d'aluminium, étant plus faible car les électrons dans l'aluminium ont une grande mobilité de mouvement (électrons libres), donc la structure de l'aluminium permet une grande diffusion de l'énergie cinétique par chocs de particule et ainsi transmettre rapidement la chaleur. La diffusivité thermique de l'aluminium est du même ordre de grandeur que celle du cuivre. La diffusivité thermique a exprimé l'aptitude d'un métal à transmettre la chaleur plutôt qu'à l'absorber. Une diffusivité élevée signifie que la chaleur y transite rapidement, ce qui est le cas pour l'aluminium.

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p}$$

Avec λ Conductivité Thermique,

ρ Masse Volumique,

c_p Capacité thermique massique a pression constante.

D'une manière générale, à température ambiante, cette propriété est peu affectée par l'état métallurgique du métal. Les déformations plastiques et élastiques, même importantes, ne réduisent que de 2 à 3 % la conductivité thermique. Dans le cas d'un aluminium de haute pureté à l'état recuit (état zéro) et présentant une résistivité résiduelle P_0 de $5,94 \cdot 10^{-12} \Omega \cdot \text{m}$ et à température ambiante, la valeur de la conductivité thermique de l'aluminium non allié est de $237 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Remarque : sa conductivité thermique est à son maximum entre 6 et 12k.

3. Propriétés électriques

L'aluminium conduit très bien l'électricité puisqu'il se place immédiatement après le cuivre dans les métaux communs.

La conductivité électrique, inverse de la résistivité électrique, mesure l'aptitude d'un matériau à conduire l'électricité. Elle est généralement exprimée en pourcentage IACS (International Copper Annealed Standard) d'un échantillon standard de cuivre recuit dans des conditions normalisées.

La valeur de la conductivité électrique de l'aluminium recuit (état 0), à 20 °C, généralement admise est de : $37,66.10^6 \text{ S.m}^{-1}$ (64,94 % IACS)

Soit une résistivité de : $2,6545.10^{-8} \Omega.m < 10^{-5} \Omega.m \Rightarrow$ **Conducteur**

- **Influence de la température :**

La résistivité augmente d'autant plus que la température du métal est élevée ainsi que l'illustrent les données du tableau concernant l'aluminium.

Si la température augmente, sa résistivité augmente car les électrons sont gênés dans leur déplacement par les chocs des particules qui vibrent (vibration thermique). Résistivité électrique ρ (n $\Omega.m$)

Tableau I.3 : Influence de la température sur la résistivité de l'aluminium

Température (C°)	0	100	200	300	400	500	600	650
Résistivité électrique ρ (n $\Omega.m$)	25,5	36,2	47,8	60,0	72,9	86,3	101	109

$$\lambda = xLT$$

avec λ (W.m⁻¹.K⁻¹) Conductivité thermique,

x (Ω⁻¹.m⁻¹) Conductivité électrique

T (K) Température

L coefficient de Lorenz = $2,3 \times 10^{-8} \text{ V}^2. \text{K}^{-2}$ pour l'aluminium pur,

$2 \times 10^{-8} \text{ V}^2. \text{K}^{-2}$ Pour les alliages d'aluminium

Remarque : L'aluminium devient supraconducteur près du zéro absolu (0 K)

4. Propriétés magnétiques

Du fait de sa valence impaire et du peu d'électrons célibataires sur les derniers niveaux d'énergies, l'aluminium est paramagnétique. Il ne possède donc pas une aimantation spontanée

mais, sous l'effet d'un champ magnétique extérieur, acquiert une aimantation dirigée dans le même sens que ce champ d'excitation. Cette aimantation disparaît lorsque le champ d'excitation est coupé, il n'y a donc pas de phénomène d'hystérésis.

Sa susceptibilité magnétique décroît avec la température.

5. Propriétés optiques

Le pouvoir réflecteur de l'aluminium poli est excellent et varie avec la longueur d'onde. Dans le spectre visible il est de l'ordre de 85% à 90%, seul l'argent peut faire mieux. Cette propriété peut être améliorée par des traitements de surface comme le polissage et le brillantage, ainsi que par un titre plus élevé, en effet, le pouvoir réflecteur dépend de l'état de la surface du métal.

Une surface rugueuse perd beaucoup en pouvoir réflecteur.

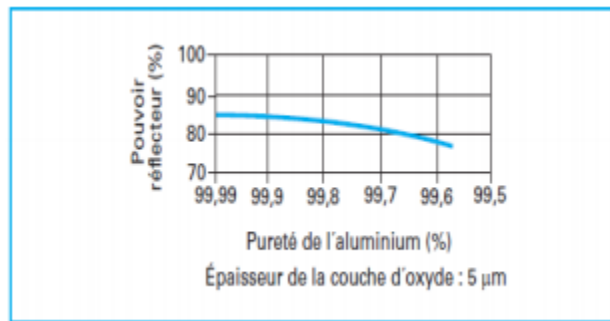


Figure I.2 : Influence du titre de l'aluminium sur le pouvoir réflecteur

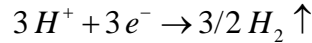
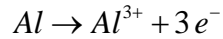
Le pouvoir réflecteur dépend du titre de l'aluminium non allié Figure I.2, c'est la raison pour laquelle les produits « grand brillant » sont en aluminium à 99,99 %.

L'aluminium est un métal qui possède des électrons libres c'est pourquoi il est opaque et non transparent.

I.3.3 Propriétés chimiques et de surface

La tendance naturelle du métal est de retourner à son état stable d'oxyde, cette réaction inverse est la corrosion dont la réaction s'écrit : $Al + 3H_2O \rightarrow Al(OH)_3 + 3/2H_2 \uparrow$

Cette réaction globale est en fait la somme de deux demi-réactions électrochimiques :



La très bonne tenue à la corrosion de l'aluminium explique le développement de ses nombreuses applications dans des milieux dans lesquels les conditions d'emploi peuvent être difficiles.

Sa tenue à la corrosion dépend de différents paramètres tels que son état métallurgique (traitement qu'à subi le matériau), l'état de surface, des caractéristiques du milieu dans lequel il est exposé c'est à-dire selon l'humidité, la température, ou encore la présence d'agents agressifs et dépend aussi de la fréquence d'entretien.

1. Résistance à la corrosion

▪ Passivation de l'aluminium :

La très bonne tenue à la corrosion de l'aluminium et de ses alliages est due à la présence permanente sur le métal d'un film continu d'oxyde d'aluminium, appelé « alumine » qui le rend passif à l'environnement. Ce film se forme dès que le métal est mis au contact d'un milieu oxydant : l'oxygène, l'air, l'eau. Il se reforme instantanément au contact de l'air lors des opérations de mise en forme : pliage, découpage, perçage et même lors du soudage.

Son épaisseur est comprise entre 5 et 10 nanomètres.

Sa stabilité physico-chimique dépend en particulier des caractéristiques du milieu. La vitesse de dissolution du film d'oxyde dépend du pH du milieu corrosif. Elle est très forte en milieu acide et alcalin, elle est faible dans les milieux proches de la neutralité de pH 5 à 9, le film est donc particulièrement résistant dans ces milieux.

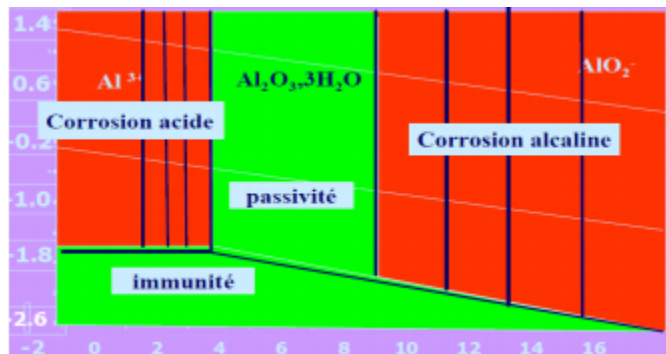


Figure I.3 : la tenue à la corrosion

Le pH n'est pas le seul critère à prendre en compte pour prévoir la tenue à la corrosion des alliages d'aluminium, il faut aussi tenir compte de la nature de l'acide base, par exemple les acides chlorhydriques et sulfuriques attaquent fortement l'aluminium et la soude caustique et la potasse même à faible concentration attaquent l'aluminium.

▪ **Corrosion par piqûres :**

La corrosion par piqûre est un phénomène électrochimique qui se produit sur des zones très restreintes de la surface de l'aluminium. Dans ces zones, la couche passive ne joue plus son rôle protecteur. Cette corrosion se caractérise par l'apparition de fines perforations après une phase d'amorçage qui peut être plus ou moins longue. Là où survient la corrosion par piqûres, il y a rupture de la couche passive. La corrosion par piqûres se produit principalement dans les milieux neutres chlorurés contenant de l'oxygène ou un oxydant et se traduit par la formation de cavités dans le métal, généralement recouvertes de pustules blanches d'alumine hydratée gélatineuse très volumineuses.

▪ **Corrosion trans ou inter cristalline :**

Cette corrosion résulte de la présence d'une zone anodique. Elle peut se propager de deux manières :

- La corrosion est trans cristalline lorsque celle-ci progresse dans toutes les directions.
- La corrosion est inter cristalline lorsque celle-ci se propage le long des joints de grains.

Elle peut provoquer une détérioration très conséquente des caractéristiques mécaniques et provoquer la ruine de la structure si la propagation est profonde.

2. Corrosion galvanique

L'aluminium et ses alliages sont plus électronégatifs que la plupart des métaux usuels.

▪ **Principe de base :**

Dès que deux métaux ou alliages de nature différente sont en contact direct ou reliés électriquement par des boulons, dans un milieu humide et conducteur, par exemple l'eau de mer, l'un des métaux peut se consommer tandis que l'autre conservera son intégrité.

Pour qu'il y ait corrosion galvanique il faut la présence d'un électrolyte et une continuité électrique entre les deux matériaux donc l'un des moyens simples pour éviter cette corrosion est d'interposer un isolant entre les deux.

Dans un milieu aqueux, le premier métal qui sera attaqué sera celui qui est le plus électronégatif. Si tous deux ont un potentiel électronégatif, ce sera celui qui est électronégatif, si l'autre est électropositif.

Donc la différence de potentiel indique le sens de la menace, mais pas son ampleur, ce n'est donc pas le seul facteur à prendre en compte. La conduction électrique du milieu, la température sont aussi des facteurs importants. [2]

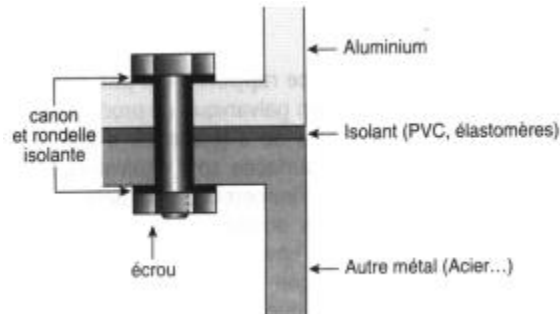


Figure I.4 : schéma de la disposition des deux métaux

3-Traitement de surface et procédés d'anodisation

▪ Procédés d'anodisation :

L'anodisation est un traitement de surface qui permet de protéger ou de décorer une pièce en aluminium par oxydation anodique.

Elle octroie aux matériaux une meilleure résistance à l'usure, à la corrosion et à la chaleur. Les propriétés de la couche d'anodisation dépendent du procédé mis en œuvre, par exemple il existe l'anodisation sulfurique utilisé pour obtenir une décoration ou une protection de surface.

Et il existe l'anodisation chromique où l'on a une meilleure aptitude au frottement que les couches d'oxydes réalisées en milieu sulfurique et procure une forte résistance à la corrosion.

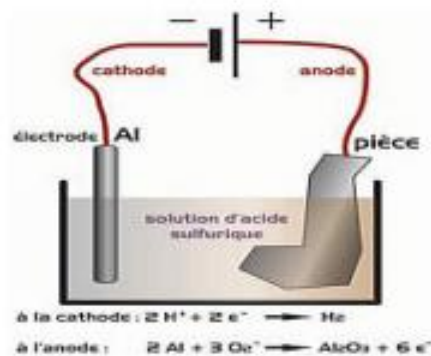


Figure I.5 : Le Procédés d'anodisation

▪ Colorations :

Il existe deux méthodes de coloration : chimique et électrolytique. Pour la coloration chimique, on utilise des colorants organiques ou minéraux qui se fixent par absorption dans les couches externes de l'alumine et peu à peu migrent vers le fond des pores.

Pour la coloration électrolytique, on vient déposer au fond des pores de très fines particules de métaux. Ces particules vont diffuser et diffracter la lumière incidente, absorbant quelques longueurs d'onde. Il en résulte des colorations, d'origine purement physique.

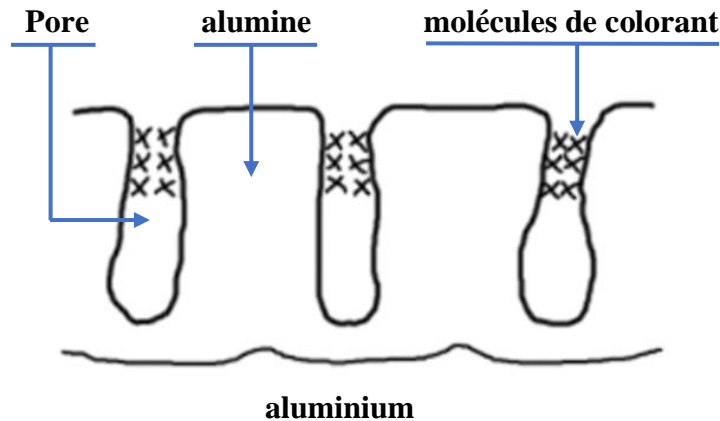


Figure I.6 : La coloration chimique

I.4 Classification des alliages d'aluminium

Un alliage d'aluminium est une composition chimique où d'autres éléments sont ajoutés à l'aluminium pur afin d'améliorer ses propriétés. La principale raison est d'augmenter sa résistance mécanique. Ces éléments comprennent le fer, le silicium, le cuivre, le magnésium, le manganèse et le zinc à des concentrations combinées pouvant représenter jusqu'à 15% de l'alliage en poids.

Les alliages peuvent être mis en forme selon deux techniques :

- Mise en forme par corroyage (déformation à chaud),
- Mise en forme par fonderie.

Le nombre total des alliages élaborés est plus de 3000 alliages [3].

I.4.1 Mise en forme par corroyage

Selon les normes de l'Aluminium Association INC (Amérique du Nord), les alliages d'aluminium corroyés sont désignés par un nombre de quatre chiffres dont:

- Le premier chiffre indique l'élément principal de l'alliage, également utilisé pour désigner les différentes séries d'alliage d'aluminium variable de (1 à 8) Tableau I.4
- Le deuxième indique s'il y a eu modification de l'alliage spécifique.
- Le troisième et le quatrième identifient l'alliage spécifique dans la série

Tableau I.4 : Familles d'alliages d'aluminium mis en forme par corroyage.

	Série	Désignation	Principaux éléments
Alliages trempant	2000	2 XXX	Cuivre
	6000	6 XXX	Magnésium et silicium
	7000	7 XXX	Zinc
Alliages non trempant	4000	4 XXX	Silicium
	1000	1 XXX	99 % d'aluminium (minimum)
	3000	3 XXX	Manganèse
	5000	5 XXX	Magnésium
	8000	8 XXX	Autres éléments
	9000	/	Série non utilisée

- Alliages, mis en forme par corroyage, **trempant** : catégorie apte pour le traitement thermique dit "durcissement structural" pour l'amélioration de leurs caractéristiques mécaniques.
- Alliages, mis en forme par corroyage, **non trempants** : catégorie apte seulement pour le traitement mécanique dit "écrouissage" afin d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques.

1. Les alliages trempants (à durcissement structural)

Principalement on retrouve la série 2000 (Al-Cu et Al-Cu-Mg), la série 6000 (Al-Mg-Si) et la série 7000 (Al-Zn-Mg et Al-Zn-Mg-Cu).

- **Série 2000 (Al-Cu et Al-Cu-Mg) :**

Les teneurs en cuivre des alliages de cette série sont comprises entre 2,6 et 6,3 % et, quand ils en contiennent, leurs teneurs en magnésium varient de 0,5 à 1,5 %. Le durcissement structural de ces alliages, qui est dû à la précipitation de formes transitoires des composés d'équilibre CuAl_2 et CuMgAl_2 , leur confère d'excellentes propriétés mécaniques. L'addition de silicium et de manganèse, à des teneurs inférieures à 0,8%, favorise la formation de composés quaternaires qui, par dispersion, améliorent les propriétés de la matrice [4]. Par contre, la présence de fer est souvent nuisible, car, à cause de la formation de Cu_2FeAl_7 , le fer diminue la quantité de cuivre nécessaire au durcissement structural ; cependant, si, en plus du fer, on ajoute du nickel, il y a formation du composé Al_9FeNi , qui confère à l'alliage une bonne tenue mécanique Jusqu'à 230°C (c'est le cas de l'alliage 2618 utilisé pour la fabrication des moteurs à turbine et des structures d'avions supersoniques).

Signalons que les alliages de la série 2000 font preuve d'une résistance médiocre à la corrosion, à l'état trempé et vieilli, à cause de la présence de précipités cathodiques par rapport à la matrice. Par ailleurs, ces alliages sont difficilement soudables ; en effet, puisque les zones adjacentes aux cordons de soudure subissent un recuit lors du cycle thermique imposé par le soudage, leurs propriétés mécaniques s'en trouvent considérablement affaiblies.

- **Série 6000 (Al-Mg-Si) :**

Le durcissement structural des alliages d'aluminium de la série 6000 est dû à la formation du composé Mg_2Si . Quand la totalité du magnésium et du silicium se combine pour former du Mg_2Si , le rapport massique Mg/Si est égal à 1,73. Pour la plupart de ces alliages, ce rapport est respecté ; on rencontre parfois un excès de silicium (cas de la nuance 6070 par exemple), ce qui améliore les propriétés mécaniques, au détriment cependant de la résistance à la corrosion. Certains alliages comportent en outre des additions de manganèse (< 0,8 %) et de chrome (< 0,3 %), qui ont pour effet d'augmenter leur résistance mécanique et leur ténacité, et d'affiner la taille des grains. L'addition de cuivre améliore également les

propriétés mécaniques de ces alliages, mais on limite sa teneur à 0,5 %, car il diminue leur résistance à la corrosion.

Si ces alliages possèdent des propriétés mécaniques moyennes par rapport aux autres alliages d'aluminium à durcissement structural, ils ont toutefois une excellente aptitude à la mise en forme à chaud (filage, forgeage, etc.) et une bonne soudabilité ; par ailleurs, leur comportement aux basses températures est fort acceptable, mais leur résistance à chaud est limitée (au-dessous de 150°C). Enfin, ils font preuve d'une excellente résistance à la corrosion atmosphérique, tout en étant insensibles à la corrosion sous tension.

- **Série 7000 (Al-Zn-Mg et Al-Zn-Mg-Cu).**

De tous les alliages d'aluminium, ceux de la série 7000 présentent, après traitements thermiques, les propriétés mécaniques les plus élevées. Leur teneur en zinc varie de 4 à 8 % et celle en magnésium, de 1 à 3 %. Leur durcissement structural est dû principalement à la précipitation de formes transitoires (zones GP) du composé $MgZn_2$. L'addition du cuivre, jusqu'à des teneurs de 2%, durcit ces alliages par solution solide et par précipitation ; par ailleurs, la présence de cuivre dans les zones GP augmente leur stabilité à chaud. Le cuivre diminue toutefois la trempabilité, la soudabilité et la ténacité des alliages Al-Zn-Mg [5]. Le chrome (< 0.3 %) améliore leur résistance à la corrosion sous tension. En plus d'avoir des propriétés mécaniques remarquables, les alliages de la série 7000 se prêtent facilement aux traitements thermiques en raison de leur grand intervalle de températures de mise en solution, de leur bonne trempabilité (on peut parfois effectuer la trempe à l'air) et de leurs températures de vieillissement relativement basses (de la température ambiante à 160°C). Grâce à cet ensemble de propriétés, les caractéristiques des joints soudés peuvent rester voisines de celles du métal de base. La soudabilité de ces alliages, favorisée par la présence de zirconium, reste moyenne.

Enfin, le principal inconvénient des alliages de cette série est leur faible résistance à chaud, dès que la température de service dépasse 120°C.

2. Les alliages non-trempant (à durcissement par écrouissage)

Avec ces alliages, le durcissement est obtenu par l'effet combiné des éléments d'addition durcissement par solution solide- et de l'écrouissage. De plus, en combinant l'effet de durcissement par écrouissage et l'effet d'adoucissement par traitement de restauration ou de recuit, on obtient pour chaque alliage, une plage étendue de dureté allant de 0 à plasticité maximale et résistance mécanique minimale, jusqu'à l'état extra dur à résistance maximale mais plasticité minimale.[6]

- **Série 1000 (aluminium pur):**

Série 1000 (aluminium pur): Cette série ne peut pas être traitée thermiquement. La résistance à la traction varie de 69 à 186 N/mm². Elle a une excellente résistance à la traction dans un large domaine de température. Cette série est souvent désignée comme aluminium pur (min. 99,00 % Al). Ces alliages sont soudables mais ont un faible intervalle de fusion de sorte que des procédures de soudage acceptables demandent quelque attention. Comme ces alliages ont des propriétés mécaniques relativement faibles, ils sont rarement utilisés dans les constructions. Ils sont cependant utilisés en raison de leur résistance élevée à la corrosion et leur bonne conductibilité électrique. Ces alliages sont soudés avec un métal d'apport en aluminium pur ou de la série 4000 (alliage de silicium).

- **Série 3000 (alliage de Mn):**

Ce sont des alliages aluminium-Manganèse (0,05 - 1,8 % Mn). La résistance maximale à la traction est de 110 à 283 N/mm². Ce sont des alliages ayant une résistance modérée avec une bonne résistance à la corrosion et une bonne capacité de mise en œuvre et pouvant être utilisés à haute température (casserolles et poêles, échangeurs de chaleur, ...). Ces alliages peuvent être soudés avec un métal d'apport de la série 1000 (à déconseiller),

- **Série 4000 (alliage de Si):**

C'est la seule série qui contienne des alliages susceptibles de durcissement par traitement thermique et non susceptibles de durcissement. Ce sont des alliages aluminium-silicium (0,6 - 21,5 % Si). Quand on allie du silicium à de l'aluminium, on a un point de fusion plus faible et une meilleure fluidité à l'état fondu. Ces propriétés sont souhaitables tant pour le soudage que pour le brasage. Quand on ajoute un peu de silicium, l'alliage n'est pas susceptible de durcissement par traitement thermique. Ces alliages avec du magnésium ou du cuivre, en plus du silicium, peuvent être trempés après mise en solution

Ces métaux d'apport ne peuvent être appliqués que quand la construction soudée est ensuite traitée thermiquement.

- **Série 5000 (alliage de Mg):**

Ce sont des alliages d'aluminium- magnésium (0,2 - 6,2 % Mn) ayant une résistance à la traction de 125 à 352 N/mm². Ils ne sont pas susceptibles de durcissement par traitement thermique et ont la résistance la plus élevée de ce groupe. Ces alliages sont très soudables et peuvent donc être utilisés pour diverses applications. Ces alliages sont souvent soudés avec des métaux d'apport choisis sur base de la composition du métal de base et de l'application. Les alliages de cette série ayant plus de 3 % Mg ne peuvent être utilisés au-dessus de 65 °C car ils peuvent alors devenir sensibles à la corrosion sous tension. Les alliages ayant moins de 2,5 % Mg peuvent être soudés avec des métaux d'apport des séries 5000 et 4000. Avec plus de 2,5 Mg, seule la série 5000 peut être utilisée comme métal d'apport avec une composition appropriée au métal de base.

3. Types de traitements appliqués aux alliages d'aluminium

3.1 Traitements Thermiques (pour les alliages trempants)

Un traitement thermique se présente par une suite d'opérations d'échauffement et de refroidissement, il a pour but de changer les propriétés mécaniques, la structure métallographique ou la répartition des contraintes résiduelles selon les nécessités d'utilisation.

Les traitements thermiques appliqués aux certaines familles corroyées ou moulées alliages d'aluminium peuvent être classés en trois types principaux :

- Les traitements dits d'homogénéisation généralement pratiqués sur les produits coulés avant leur transformation ou également sur les produits déjà corroyés ;
- Les traitements d'adoucissement par recuit ou restauration, généralement appliqués en cours ou en fin de transformation ;
- Les traitements de trempe structurale comprenant :
 - ✓ Une mise en solution,
 - ✓ Une trempe,
 - ✓ Une maturation ou /et un revenu produisant le durcissement.

Les alliages aptes aux traitements de durcissement sont dits à durcissement par précipitation, Selon la théorie de Gibbs, le mécanisme de précipitation constitué des deux phases, germination et croissance. La germination, étape initiale de la précipitation, suppose la formation, à partir de la matrice, de germes stables, riches en soluté et de composition très différente de celle de la solution solide, ces formes sont dotés d'une interface définie avec la matrice, peuvent résulter de fluctuations statistiques de composition et de taille suffisante (de l'ordre du nanomètre) au sein de la solution solide avec une cinétique de formation très rapide en présence de lacunes en sursaturation (précipitation homogène), ou se former préférentiellement sur les défauts du réseau ou les interfaces préexistantes entre les différents grains ou les particules (précipitation hétérogène). La croissance ultérieure des germes et des précipités est régie par la diffusion des atomes de soluté vers les germes, qui est thermiquement activée à la température du revenu tant que la solution solide est sursaturée.

Les mécanismes de précipitation proposés incluent la prise en compte de facteurs thermodynamiques et d'effets cinétiques et s'appliquent à la plupart des alliages d'aluminium durcis par précipitation.

La majorité des systèmes d'alliages d'aluminium qui présentent le durcissement par précipitation sont les suivants :

- Le système Aluminium-cuivre avec le durcissement par CuAl_2
- Le système Aluminium-cuivre-magnésium (magnésium intensifie précipitation)
- Le système Aluminium-magnésium-silicium avec le durcissement par Mg_2Si
- Le système Aluminium -zinc-magnésium avec le durcissement par MgZn_2
- Le système Aluminium -zinc-magnésium-cuivre

3.2 Traitements thermomécaniques (pour les alliages non trempants)

Tous les métaux et alliages peuvent être traités par déformation plastique, dans le domaine de l'aluminium cette désignation est réservée pour certaines familles comme : 1000, 3000, 4000 partiellement, 5000, et 8000.

3.2.1. Durcissement par traitement mécanique

Afin de modifier les caractéristiques mécaniques de certains alliages d'aluminium sans traitement thermique, on les sollicite à la déformation plastique macroscopique (Consolidation) ou microscopiques (écrouissage), **Figure I.7**, ces deux phénomènes multiplient le nombre des dislocations. Le déplacement et l'interaction de ces dislocations engendrent une force de résistance appelée de Peierls donnée par :

$$F_p = \left[\frac{(2G \cdot b)}{1-\nu} \right] e^{\left(\frac{-2\pi w}{b} \right)}$$

G: module de cisaillement ν : coefficient de poisson.
w: largeur de dislocation b : vecteur de burger.

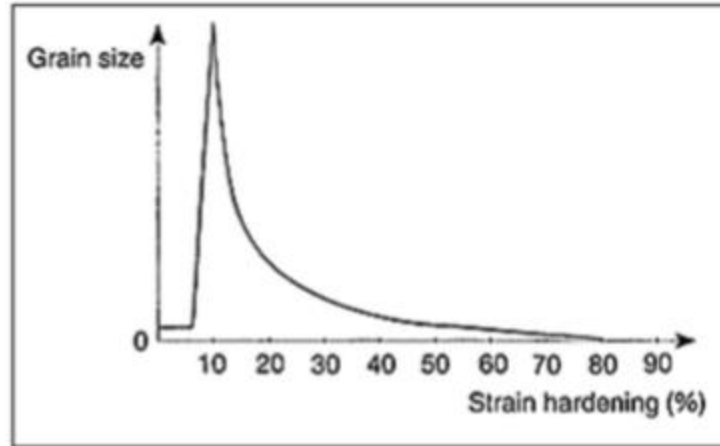


Figure I.7 : Le changement de la taille de grain en fonction de l'érouissage.

✓ Coefficient d'érouissage

Le coefficient d'érouissage est mesuré lors de l'essai de traction. La relation de **Holloman** a été proposée pour rendre compte de la forme de la courbe de traction, cette relation est valable uniquement pour les métaux doux, cette relation est donnée par l'équation

$$\sigma = K \cdot \epsilon^n$$

n : représente le coefficient d'érouissage, σ : représente la contrainte vraie et ϵ représente la déformation vraie, le coefficient d'érouissage est calculé à partir du tracé de courbe rationnelle en coordonnées logarithmique. Figure I.8

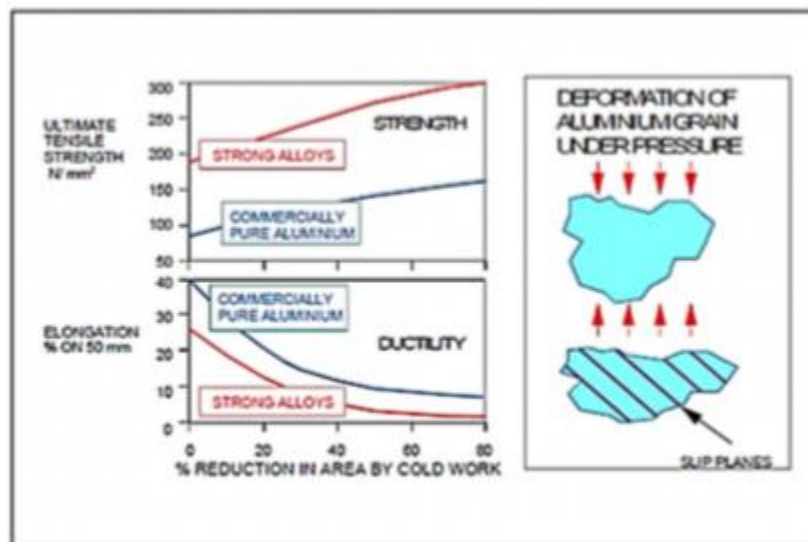


Figure I.8 : La coloration Erouissage et propriétés mécaniques des alliages 1000 et 3000.

3.2.2 Recristallisation par traitement thermique

Pour diminuer le nombre de défauts engendrés par l'érouissage (état métastable), un traitement thermique à température suffisante ($T < T_{\text{Fusion}}/3$) doit être appliqué. La structure érouie sera remplacée par une nouvelle structure à grains reformes, ce type de traitement ne se produit qu'après une déformation minimale, dite « érouissage critique », il est caractérisé par une résistance mécanique et dureté minimales et une plasticité maximale « état optimal pour réaliser des déformations ou mises en forme à froid importantes et difficiles ». Figure I.9.

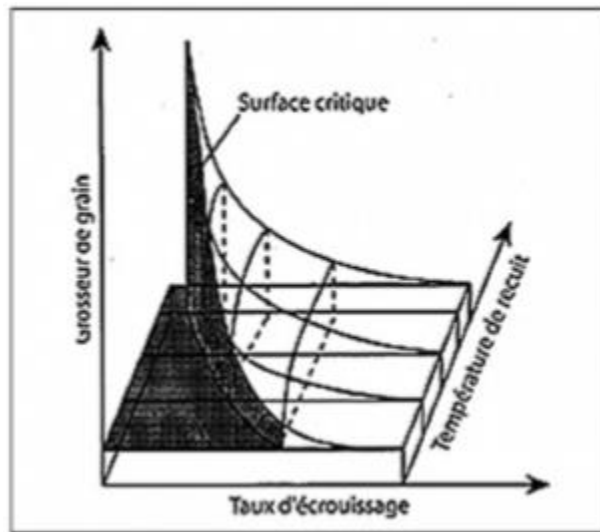


Figure I.9 : Diagramme de recristallisation.

Ces types de traitement concerne les alliages de :

- Série 1000 Aluminium pure
- Série 3000 : » Al-Mn »
- Série 4000 : » Al-Si »
- Série 5000 : » Al-Mg »

I.4.2 Mise en forme par fonderie

Ce mode a pour but l'obtention des produits semi fini et fini par fusion et moulage des lingots, avec une qualité différente de celle des produits corroyés, et l'absence des zones de déformations plastiques dans les pièces moulées, les qualités demandées pour le mode d'obtention par fonderie sont :

- Aptitude du métal liquide à bien remplir l'empreinte du moule est satisfaite par la coulabilité des alliages d'aluminium.
- Fissuration à chaud causée par le retrait du métal est évité par l'absence de formation de criques.
- Le peu de retrait qui accompagne la solidification engendrée par la bonne répartition de la porosité.
- L'emploi des moules métalliques convenant à la basse température de fusion des alliages d'aluminium.

- **Le système à quatre chiffres de désignation des alliages de fonderie.**

Selon la même normalisation de l'Aluminium Association INC ; les alliages d'aluminium de fonderie sont désignés par un nombre à quatre chiffres avec un point séparant les deux derniers.

- Le premier chiffre indique l'élément principal d'addition.
- Le 2^e et 3^e chiffre indique le pourcentage en aluminium au-delà de 99 %.
- La décimale représente la forme de l'alliage. Le « 0 » indique qu'il s'agit d'une pièce coulée ; le « 1 » qu'il s'agit d'un lingot, mais dont les limites de composition chimique se rapprochent de la pièce coulée, donc probablement de métal recyclé. Finalement, le « 2 » indique qu'il s'agit d'alliage sous forme de lingot d'aluminium primaire.

Certains alliages de fonderie sont aptes aux traitements thermiques et dites trempants, ce sont de série : **200.0**, **300.0**, **400.0** et **700.0**, l'écrouissage n'est généralement pas utilisé sur ces alliages.

Les alliages de fonderie sont obtenus de deux façons :

- Soit à partir d'aluminium provenant directement des cuves d'électrolyse auquel on ajoute les éléments d'addition de l'alliage (alliages dits de première fusion).
- Soit à partir de rebuts récupérés, assortis et purifiés. Ils sont dits de deuxième fusion et assurent pratiquement 50% de la production totale des pièces de fonderie.

Tableau I.5 : Les séries d'alliage de fonderie selon l'Aluminium Association.

CODE	Elément(s) d'addition
1xx.x	Moins de 1% (aluminium à 99.00% ou plus)
2xx.x	Cuivre
3xx.x	Silicium avec l'ajout de cuivre et/ ou de Magnésium
4xx.x	Silicium
5xx.x	Magnésium
6xx.x	Série non utilisé
7xx.x	Zinc
8xx.x	Etain
9xx.x	Autres éléments

1. Description des familles d'alliages.

Les différentes familles d'alliages ont des caractéristiques qui leur sont propres. Incidemment, elles sont destinées à des usages particuliers. De plus, la coulabilité varie d'une famille d'alliages à l'autre. Il en résulte des possibilités d'utilisation qui diffèrent. En effet, un procédé en particulier ne permet pas nécessairement d'utiliser tous les types d'alliages. La section suivante présente succinctement quelques particularités des séries d'alliages. [7]

- **Série 2xx.x - Alliages Al-Cu**

- Alliages traitables thermiquement/pour moulage au sable ou en coquille.
- Résistance élevée à température de la pièce et à température élevée ; quelques alliages avec une résistance à la fatigue élevée.
- Applications typiques pour des pièces aéronautiques et automobiles/moteurs.
- Alliages courants 201.0 - 203.0.
- Résistance à la rupture typique comprise entre 131 et 448 MPa.

Le plus résistant des alliages communs de fonderie est le 201.0 traité thermiquement. Son aptitude au moulage est limitée par sa tendance aux microporosités et à la déchirure à chaud, donc il doit être utilisé préférentiellement pour le moulage à la cire perdue.

En parallèle aux alliages standards, il existe une gamme d'alliages spécialisés pour des applications spécifiques comme, les têtes de pistons, les blocs-moteurs ou les roulements à billes. Pour ces applications, l'alliage choisi doit avoir une bonne résistance à l'usure, un faible coefficient de friction ainsi qu'une bonne résistance à une température élevée.

- **Série 3xx.x - Alliages Al-Si + Cu ou Mg**

- Alliages traitables thermiquement/pour moulage au sable, en coquille ou sous pression.

- Fluidité excellente, résistance élevée ; quelques alliages avec une résistance à la fatigue élevée.

- Applications typiques pour pièces d'automobiles (pistons, pompes) et pièces électriques.

- Alliages courants 356.0 - A356.0 - 359.0 - A360.0.

- Résistance à la rupture typique comprise entre 131 et 275 MPa.

Les alliages de la série 3xx.x sont les plus utilisés, car ils permettent beaucoup de flexibilité attribuable à leur haute teneur en silicium, qui confère aux alliages de cette série une bonne fluidité. De plus, ces alliages répondent bien aux traitements thermiques, ce qui offre plusieurs options au niveau des propriétés mécaniques. Par ailleurs, les alliages de la série 3xx.x peuvent aussi être coulés à l'aide de la majorité des techniques de fonderie, dont les nouvelles technologies de thixomoulage et de Squeeze Casting.

Parmi les alliages les plus utilisés de la série, on retrouve le 319.0 et les 356.0/A356.0 pour le moulage au sable et le moulage en coquille ; les 360.0, 380.0/A380.0 et 390.0 pour le moulage sous pression ; le 357.0/A357.0 pour plusieurs types de moulage, dont spécialement le moulage-forgeage et le Squeeze Casting. L'alliage 332.0 est également très employé compte tenu du fait qu'il peut être produit presque exclusivement à partir de rebuts recyclés.

- **Série 4xx.x - Alliages Al-Si**

- Alliages non traitables thermiquement/pour moulage au sable, en coquille ou sous pression.

- Fluidité excellente permettant la réalisation de pièces à configuration compliquée.

- Alliages courants 423.0 - 443.0.

- Résistance à la rupture typique comprise entre 117 et 172 MPa.

L'alliage B413.0 est reconnu pour sa très bonne coulabilité et son excellente soudabilité lequel provient de sa composition eutectique et à son point de fusion peu élevé (570 °C). Cet alliage combine une ténacité modérée, un bon coefficient d'allongement et une bonne résistance à la corrosion. Il est particulièrement recommandé pour des pièces moulées résistantes à la fatigue, aux formes compliquées, avec des surfaces minces et étanches.

- **Série 5xx.x - Alliages Al-Mg**

- Alliages non traitables thermiquement, difficiles à mouler, mais offrant de bons finis de surface.

- Tenue excellente face à la corrosion et à l'usinabilité.

- Applications typiques : ustensiles et équipements culinaires, pièces aéronautiques.

- Alliages représentatifs 512.0 - 514.0 - 518.0 - 535.0.

- Résistance à la rupture typique comprise entre 117 et 172 MPa

Les alliages 512.0 et 514.0 ont une résistance moyenne et un bon coefficient d'allongement. Ils sont adéquats pour des pièces exposées à l'eau de mer et à d'autres environnements corrosifs. Ces alliages sont couramment utilisés pour la fabrication de ferrures de portes et de fenêtres susceptibles d'être anodisées. Cependant, l'alliage 355.0 tend à remplacer les alliages de la série 5xx.x pour ces types de pièces, car il offre une coulabilité supérieure. Néanmoins, pour des pièces moulées sous pression, où l'anodisation décorative est particulièrement importante, l'alliage de choix est le 520.0

- **Série 7xx.x – Alliages Al-Zn**

- Alliages traitables thermiquement/pour le moulage au sable et en coquille (difficiles à couler).

- Usinabilité excellente.

- Finis de surface d'une qualité exceptionnelle.

- Tenue excellente face à la corrosion.

- Applications typiques : meubles, outils de jardinage, équipements de bureau et équipements miniers.

- Alliages courants 713.0 – 712.0.

- Résistance à la rupture typique comprise entre 205 et 380 MPa.

Les alliages de la série 7xx.x sont utilisés uniquement lorsque d'excellents états de surface ou une usinabilité hors pair sont nécessaires, car cette famille d'alliages est difficile à couler.

- **Série 8xx.x – Alliages Al-Sn**

- Alliages traitables thermiquement/pour le moulage au sable et en coquille (difficile à couler).

- Usinabilité excellente.

- Tenue excellente face à la corrosion et l'usinabilité.

- Applications typiques : roulements et raccords de tous genres.

- Alliages représentatifs : 850.0 – 851.0.

- Résistance à la rupture typique comprise entre 103 et 205 MPa

Tout comme les alliages de la série 7xx.x, ceux de la série 8xx.x sont difficiles à mouler. Ils sont utilisés seulement lorsque leur facilité d'usinage et leurs qualités, en tant que raccords, sont essentielles.

I.4.3 Codification des états métallurgique des alliages d'aluminium

La désignation de l'état métallurgique concerne les deux modes de mise en forme (fonderie et corroyage).

- États bruts de fabrication -Symbole F- état des produits n'ayant subi aucun contrôle spécial en ce qui concerne les conditions thermiques ou de durcissement.
- États recuits – Symbole O – avec, notamment, un recuit à haute température et refroidissement lent.
- États écrouis – Symbole H – avec, notamment H1 (état brut d'écrouissage) ou H2 (état écroui et partiellement restauré) suivi d'un chiffre (de 1 à 9) qui caractérise le niveau de durcissement dû à l'écrouissage (8 correspondants à l'état le plus dur normalement produit – 9 est utilisé pour un durcissement plus important encore – les chiffres de 1 à 7 sont employés pour des durcissements intermédiaires – ainsi 4 désigne un durcissement moitié de celui repéré 8). Ces symboles sont souvent suivis par des chiffres supplémentaires qui complètent la désignation et traduisent des différences sensibles au niveau des caractéristiques acquises (exemple : H111, état obtenu à la suite d'un léger écrouissage après recuit, écrouissage qui donne un durcissement suffisant pour que les propriétés du métal ne soient plus celles de l'état recuit sans que, toutefois, elles atteignent le niveau de celles correspondant à l'état H11). Tableau 1-6.

- États durcis après mises en solution –Symbole W- état instable qui n'est appliqué que sur les alliages qui vieillissent spontanément à température ambiante.
 - États obtenus par traitement thermique – Symbole T – avec de nombreuses variantes :
Tableau 1-7.
- ❖ T1 refroidi après mise en forme à chaud et mûri,
 - ❖ T2 refroidi après mise en forme à chaud, écroui et mûri,
 - ❖ T3 mis en solution, écroui et mûri,
 - ❖ T4 mis en solution et mûri,
 - ❖ T5 refroidi après mise en forme à chaud et revenu,
 - ❖ T6 mis en solution et revenu,
 - ❖ T7 mis en solution et surrevenu,
 - ❖ T8 mis en solution, écroui et revenu,
 - ❖ T9 mis en solution, revenu et écroui.
 - ❖ T10 écroui après refroidissement et transformation à chaud et mûri.

Ces symboles sont généralement suivis par des chiffres supplémentaires qui complètent la désignation et traduisent des différences sensibles au niveau des caractéristiques acquises (exemple ; T5511, état obtenu après mise en solution ou transformation à chaud, refroidissement, allongement par traction de 1 à 3 % pour les barres et profilés, et éventuellement dressage).

Tableau I.6 : Subdivision de H- Ecrouissage.

Le premier chiffre après H désigne le traitement de base	
H1- uniquement écroui	H3- écroui et stabilisé
H2- écroui et partiellement recuit	H4- écroui et revenu ou laqué
Le deuxième chiffre après H désigne le degré d'écrouissage	
Hx2- 1/4 dur	Hx8- 4/4 dur (pleinement écroui)
Hx4- 1/2 dur	Hx9- extra dur
Hx6- 3/4 dur	

Tableau I.7 : Subdivision de T- Traitement Thermique.

T1	Refroidi après transformation à chaud et muri	T2	Refroidi après transformation à chaud, écroui et muri
T3	Mis en solution, écroui et muri	T4	Mis en solution et muri
T5	Refroidi après transformation à chaud puis revenu	T6	Mis en solution puis revenu
T7	Mis en solution puis sur- revenu	T8	Mis en solution, écroui puis revenu
T9	Mis en solution, revenu puis écroui	T10	Ecroui après refroidissement à chaud et muri
Des chiffres complémentaires indiquent que des traitements ont été appliqués (diminution des tensions propres)			
Tx51 Ou Txx51	Diminution des tensions par détensionnement par traction	Tx52 Ou Txx52	Diminution des tensions par détensionnement par compression

I.5 Les impuretés et leur influence

Les impuretés contenues dans ces alliages sont importantes car elles modifient, volontairement ou non, les diverses propriétés du matériau. On trouve principalement comme impuretés :

Le fer : c'est une impureté naturelle du silicium et de l'aluminium. Il fragilise la pièce produite par formation de composés intermétalliques durs et fragiles qui peuvent faciliter l'amorçage d'une fissure par décohésion lors d'une sollicitation mécanique. De plus, il gêne l'alimentation en métal liquide des pièces dans le moule par formation de plaquettes d'éléments intermétalliques et diminue l'étanchéité de la culasse.

Pour avoir de bonnes propriétés mécaniques, sa teneur est limitée à moins de 0.14% dans les alliages de première fusion dits à haute pureté ; le chrome et le manganèse ont sensiblement les mêmes effets ;

Le nickel : améliore légèrement les propriétés à chaud mais coûte cher.

Le plomb : au-delà de 0.05% il neutralise la modification au strontium et diminue les propriétés mécaniques de l'alliage.

L'étain : abaisse les caractéristiques mécaniques, augmente la porosité, améliore très peu la coulabilité.

Le phosphore : est un poison pour les alliages hypo-eutectiques car il constitue un site de germination du silicium, par contre, ce sera un élément affinant pour les alliages hyper eutectiques (hyper-silices)

En effet dans ces alliages, ce sont les plaquettes de Si qui germent en premier et il n'y a donc pas de dendrites d'aluminium.

L'antimoine : permet de piéger le phosphore mais n'est pas compatible avec le Strontium

Le Lithium est très oxydable, regaze instantanément et considérablement l'alliage.

Les éléments que l'on ajoute volontairement pour leurs propriétés bénéfiques sont indiqués ci-dessous.

Le titane : c'est une impureté de l'aluminium, mais il permet d'affiner la dendrite de solution solide riche en aluminium : c'est un affinant. L'opération d'affinage consiste à ajouter dans l'alliage liquide des germes de cristallisation comme TiB₂ en grand nombre afin d'augmenter le nombre de grains de l'alliage pour diminuer la taille de dendrite et augmenter les caractéristiques mécaniques ainsi que la durée de vie en fatigue. Au-delà de 0.4%, il se forme TiAl₃ qui diminue l'usinabilité mais améliore encore l'affinage. Ainsi, dans [8], les auteurs rapportent que l'alliage Al-Ti (le titane étant souvent titré à 5%) gagne en efficacité d'affinage s'il est laminé et/ou traité thermiquement car le nombre de particules servant de site de germination se trouve décuplé.

Le sodium ou le strontium : modifient la structure de l'eutectique naturellement lamellaire en eutectique globulaire, ce qui permet de diminuer le risque de retassures, de faciliter l'usinage et d'augmenter les caractéristiques mécaniques,[9]. Cet effet est annulé par le Bore, [10];

Le calcium : prolonge le temps de modification par le sodium ;

Le scandium : [11], [12] et [13] décrivent l'effet de l'addition de scandium (et de zirconium) dans le cas d'alliages Al-Mg, il améliore les propriétés mécaniques et les aptitudes au soudage.

Industriellement, les alliages Al-Si sont les plus utilisés pour leurs propriétés de fonderie, leur aptitude au soudage, leur bonne stabilité dimensionnelle et leur faible température de fusion. Ils ont de plus une bonne résistance aux éraflures lors des périodes de faible lubrification du moteur (démarrage à froid par exemple).[14]

I.6 Structure de l'aluminium

La structure de l'aluminium émane de celle du CFC, c'est-à-dire Cubique à Faces Centrées (compact).

Le CFC correspond donc à la maille présentée en figure I.10 qui montre la structure en perspective :

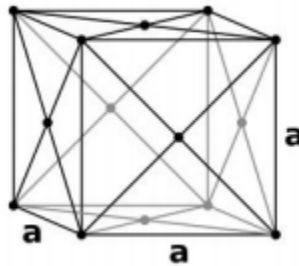


Figure I.10 : Structure en perspective

De plus, pour simplifier la schématisation, cette maille peut être réalisée en projection afin de faciliter la lecture, et donc se « dessine » sous la forme d'un cube, représenté en figure I.11.

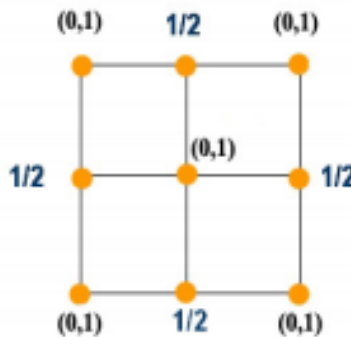


Figure I.11 : Schéma de la maille

Pour une structure de type cubique à faces centrées, les plans d'empilement sont de type ABC car le système cristallin est un cube posé sur un sommet.

On note « a » la valeur du côté du cube formé par chaque arête ($a = 400\text{pm}$), et « r » le rayon des particules considérées comme des sphères dures ($r = 140\text{pm}$). Ainsi pour une structure CFC, le lien entre le paramètre de maille et le rayon est : $a\sqrt{2} = 4r$. En effet, les sphères sont en contact selon les diagonales de face, ainsi il y a 3 sphères qui se touchent, et donc 4 rayons au total sur la diagonale.

Cependant, toutes les sphères ne sont pas entières dans la maille, elles sont toutes partagées entre plusieurs mailles. Les 8 particules aux sommets du cube sont partagées en 8 mailles et donc divisées par 8 et les 6 particules aux centres des faces appartiennent à 2 mailles, et sont donc divisées par 2.

Ainsi, soit « n » le nombre de motif : $n = 8 \cdot 1/8 + 6 \cdot 1/2 = 4$ sphères entières par maille.

La coordinence est le nombre de sphères proches d'une autre sphère dans l'édifice cristallin qui sont en contact. Ainsi, chaque particule d'aluminium dans la cubique à faces centrées est en contact avec 12 sphères voisines (issues des autres mailles).

En outre, la compacité, notée « C », correspond au taux d'occupation réel de l'espace dans la maille. Elle s'obtient en réalisant le rapport du volume occupé par les sphères et du volume total de la maille.

L'aluminium étant un cristal métallique, il obtient ainsi une grande compacité.

En effet, en utilisant le modèle des sphères dures pour représenter les particules, on obtient le calcul suivant :

$$C = n \times \frac{V_{\text{sphères}}}{V_{\text{total}}} = 4 \times \frac{\frac{4}{3} \pi r^3}{a^3} = 4 \times \frac{\frac{4}{3} \pi \times \left(\frac{a\sqrt{2}}{4}\right)^3}{a^3} = \frac{\pi\sqrt{2}}{6} = 0.74$$

Enfin, il est également possible d'obtenir la masse volumique par le rapport entre la masse des particules et le volume total du cube. Or, la masse molaire de l'aluminium étant de 27 g/mol et son paramètre de maille « a » étant de 400 pm, on en déduit la masse volumique par la relation suivante :

$$\rho = \frac{m_{\text{cristal}}}{V_{\text{total}}} = n \frac{M_{\text{atome}}}{V_{\text{total}} \times N_A} = 4 \frac{27}{(400 \cdot 10^{-12})^3 \cdot 6.02 \cdot 10^{23}} = 2803.1 \text{ kg/m}^3$$

L'aluminium a une électronégativité de 1.61 et ne possède pas d'électrons localisés, en effet les électrons sont libres de leurs mouvements. La mobilité de ces électrons est à l'origine des propriétés conductrices de ce matériau.

C'est pour cela que ce métal possède des liaisons (interaction stabilisante entre deux particules) fortes appelés « liaisons métalliques ». La particularité de cette liaison est qu'elle est l'interaction de groupe entre les cations et un nuage d'électron libre. Ainsi cette liaison est non dirigée (les électrons ne se déplacent pas suivant un axe).

De plus, la liaison métallique est caractérisée par une énergie de cohésion en moyenne plus faible que la liaison covalente ou ionique. Cette énergie vaut 311 kJ/mol ainsi qu'une longueur de liaison comprise entre 100 à 200 pm pour l'aluminium.

I.7 Les avantages et les inconvénients de l'aluminium

I.7.1 Les avantages de l'aluminium

Ultra léger et ultra résistant, l'aluminium ouvre le champ des possibles en terme architectural.

Facile à mettre en œuvre, il brave les intempéries sans rouiller ! Recyclable à 100 %, l'aluminium fait partie des métaux qui ne craignent pas la pénurie

- **Une esthétique indiscutable :**

En aspect brillant ou coloré, l'aluminium est disponible dans un grand nombre de finitions.

On le trouve principalement en deux versions : anodisé ou peint (thermolaqué).

L'anodisation est un traitement de surface spécifique à l'aluminium qui consiste à créer par électrolyse une couche uniforme très résistante d'oxyde d'aluminium incolore ou colorée. L'épaisseur de la couche varie selon l'utilisation du produit (de 5 microns pour les utilisations intérieures à 20 microns pour les utilisations en atmosphère corrosive de bord de mer). L'anodisation de l'aluminium en France est soumise à label (Qualanod).

Le thermolaquage est également un traitement de surface spécifique qui est réalisé principalement en trois phases : Un traitement de surface chimique pour garantir une bonne adhérence de la peinture, suivi d'un poudrage électrostatique et enfin une polymérisation dans un four. Le thermolaquage de l'aluminium en France est soumis à label (Qualicoat, Qualimarine, Qualideco).

Grâce à ces deux techniques, l'aluminium se pare de toutes les couleurs (brillantes ou mates) et de toutes les finitions (lisse, texturée, métallisée...).

- **Un poids plume :**

A masse égale, l'aluminium offre une plus grande résistance et une meilleure rigidité que les autres matériaux les plus courants en construction. L'aluminium est ainsi un métal dont la densité spécifique est de 2,7 g/cm³, soit environ un tiers de celle de l'acier (7-8 g/cm³) ou du cuivre (8,96 g/cm³).

- **Un matériau durable et facteur d'économie d'énergie :**

L'aluminium est un matériau durable. Recyclable à 100 % sans dégradation de ses propriétés, l'aluminium est aussi facteur d'économie d'énergie. En effet, la résistance mécanique de l'aluminium permet de créer des profilés fins associés à des fenêtres de grande dimension. La surface des vitrages augmente ainsi et maximise les apports de lumière et de chaleur. Si l'aluminium est un bon conducteur de chaleur, ce qui est un inconvénient dans les applications de fenêtre et de façade, cet inconvénient est maîtrisé par les nouveaux profilés dans lesquels sont serties des barrettes en matériau à faible conductivité thermique (ruptures de pont thermique).

A noter : Selon l'European Aluminium Association, pour les mêmes dimensions de fenêtre, de fins profilées d'aluminium à rupture de pont thermique peuvent augmenter le clair de vitrage de près de 20% par rapport aux fenêtres équipées de cadres fabriqués avec d'autres matériaux.

Utilisées en isolant intérieur, les feuilles d'aluminium renvoient la chaleur infrarouge à l'intérieur du bâtiment. De plus, même à très faible épaisseur, une feuille d'aluminium est totalement imperméable et ne laisse passer ni lumière, ni micro-organismes, ni odeurs.

- **Un matériau pérenne à l'entretien minime**

L'aluminium est un matériau qui traverse le temps sans prendre une ride. En effet, l'aluminium génère naturellement une couche d'oxyde qui le protège de la corrosion. En extérieur, de nombreux exemples architecturaux anciens démontrent que l'aluminium reste comme au premier jour même après 150 ans de bons et loyaux services. Cette pérennité dans le temps est encore améliorée par les traitements de surface (anodisation ou thermolaquage). D'entretien facile, les éléments en aluminium ne nécessitent qu'un lavage de temps à autre avec de l'eau additionnée d'un détergent doux. De plus, l'aluminium ne brûle pas. Le matériau est ainsi naturellement classé A1 selon la norme européenne.

- **Un matériau facile à mettre en œuvre**

L'aluminium a pour caractéristique d'être très malléable ce qui le rend facile à travailler à basse température. Il se déforme sans se rompre, et épouse ainsi toutes les formes souhaitées. Cette caractéristique est particulièrement importante en rénovation, puisqu'en effet, dans le cas de remplacement de fenêtres anciennes par exemple, le bâti peut être créé

à la demande selon des formes et dimensions très particulières (arc de cercle, ogive, biais, etc). Facile à former, l'aluminium est aussi facile à assembler par soudage, vissage, ou rivetage. Le poids plume du matériau permet aussi de simplifier la manipulation sur un chantier. [15]

I.7.2 Les inconvénients de l'aluminium

Les problèmes rencontrés par les alliages d'aluminiums lors du soudage par fusion sont :

- Apparition de soufflures,
- Apparition de fissures,
- Diminution des propriétés mécaniques du métal de base (zone affaiblie),
- Elimination de la couche d'oxyde.

1. Apparition de soufflures

L'un des problèmes rencontrés par les alliages d'aluminiums lors du soudage par fusion est l'apparition de soufflures (porosités à l'intérieur de la zone fondue). Celles-ci sont dues à la présence d'hydrogène dans le bain de fusion dont la solubilité dans l'aluminium est très différente entre l'état liquide et l'état solide. La conductivité thermique élevée de l'alliage d'aluminium entraîne une solidification tellement rapide qu'elle ne permet pas le dégazage du métal fondu. De l'hydrogène est alors emprisonné dans le cordon. L'hydrogène provient de l'humidité absorbée par la couche superficielle d'alumine qui se forme naturellement au contact de l'air (couche hygroscopique : qui absorbe et retient facilement l'humidité). Cette humidité se décompose dans l'arc en hydrogène et en oxygène. Pour éviter ce type de problème, il est nécessaire de décaper chimiquement ou mécaniquement les surfaces à souder.

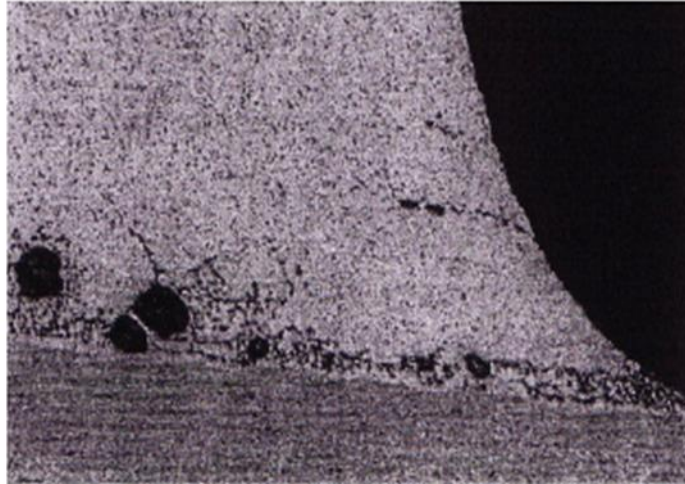


Figure I.12: Apparition de soufflures dues à l'alumine (soudage à la limite du collage).

Les soufflures affectent les propriétés mécaniques de l'assemblage soudé. Elles sont un environnement propice à la formation et à la propagation de fissures. Ceci réduit considérablement la tenue en fatigue et la résistance à la traction de l'assemblage. C'est pour cela, que lors du soudage par fusion, il est nécessaire de tout mettre en œuvre pour éviter la formation de soufflures.

2. La fissuration à chaud

La fissuration à chaud est liée à la composition des nuances utilisées (éléments d'alliage de cuivre ou de silicium ou de zinc) et à l'intensité des déformations locales de retrait. Ce problème se pose surtout pour les alliages trempant des séries 2000, 6000 et 7000

Lors de la solidification, on assiste à la concentration des éléments d'alliage dans certaines zones du cristal. Ce phénomène est appelé la ségrégation.

Des fissures se forment pendant le soudage lors du refroidissement à l'état solide ou pendant la phase de transition liquide/solide. La fissuration à chaud se produit dans le métal fondu dans les espaces inter dendritiques ou aux joints de grains de solidification où la ségrégation est particulièrement importante. Il en résulte des décohésions du matériau. Ceci imite fortement les caractéristiques mécaniques (tenue à la fatigue, résistance à la traction) du cordon de soudure.

La sensibilité à la fissuration de solidification dépend de la composition de l'alliage. Des essais ont été effectués pour déterminer la sensibilité de l'alliage en fonction de sa composition

chimique. Les échelles de sensibilité en fonction de la proportion des éléments d'addition sont représentées sur la figure 1.11. On peut remarquer que les alliages de la série 2000 (Al-Cu) présentent une sensibilité maximale pour 3,5% de cuivre. Pour la série 7000, la sensibilité est maximale pour 1 à 1,5% de magnésium. Ces alliages ne pourront être soudés de manière satisfaisante. C'est pourquoi certains alliages portent une étiquette « non soudable » par fusion telles que les alliages 2000 et 7000. Le non soudabilité des alliages à base de cuivre et de Zinc ont une sensibilité à la fissuration assez prononcée à faible teneur de cuivre et de zinc.

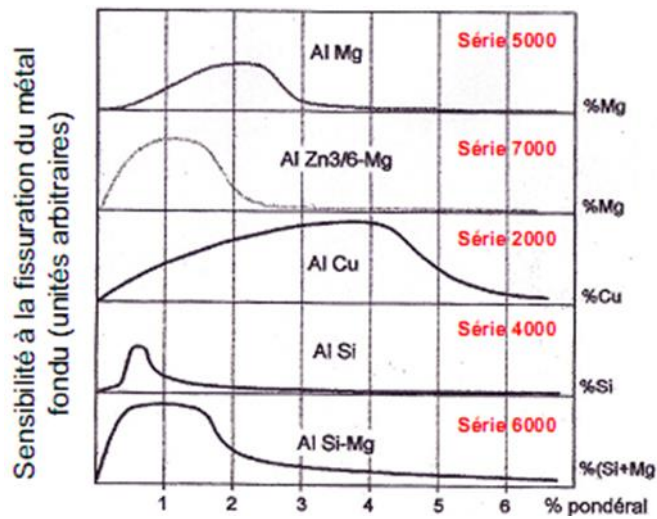


Figure I.13 : Sensibilité à la fissuration à chaud des alliages d'aluminium

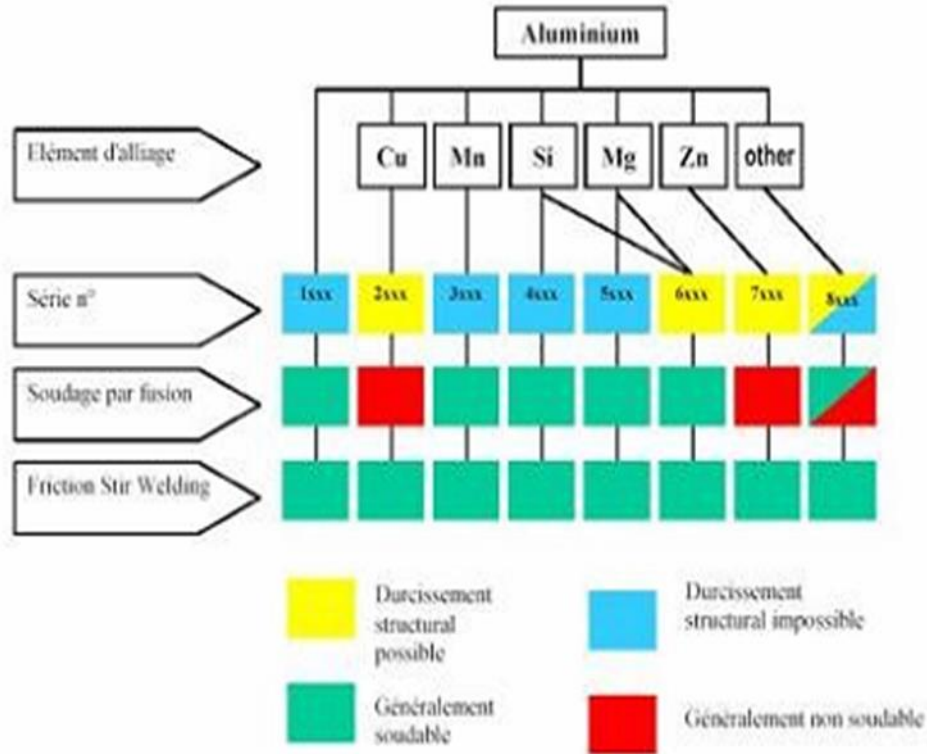


Figure I.14 : Soudabilité des alliages d'aluminium

3. La couche d'oxyde.

Quand l'aluminium est exposé à l'atmosphère, une couche d'oxyde qui consiste fondamentalement en Al_2O_3 en deux couches partielles l'une sur l'autre se forme immédiatement, à savoir

- Une couche de base ou de barrière, quasiment dénuée de porosité, d'oxyde d'aluminium amorphe
- Une couche de couverture poreuse et hydratée avec un bas contenu de cristallin d'hydroxydes d'aluminium et de bayerite.

L'épaisseur de la couche d'oxydes augmente avec le temps, la température et la disponibilité d'oxygène. Même une couche d'oxyde très mince qui présente une température de fusion de $2300^\circ C$ et protège la surface d'aluminium d'une corrosion continue peut-être poreuse et absorber de l'humidité.

En raison de l'épaisseur extrêmement fine, en nanomètres, de la couche d'oxyde, il est difficile de la mesurer dans la pratique.

Souvent, il ne reste que la possibilité d'éliminer entièrement la couche d'oxyde par des méthodes chimiques (décapage) et d'obtenir une épaisseur définie par un stockage à des conditions temporelles et d'environnements contrôlés.

Il faut d'ailleurs remarquer que la densité de l'oxyde d'aluminium par rapport au métal est plus élevée. En ce qui concerne l'acier, les oxydes ont un poids inférieur à celui du métal et pour cette raison ils flottent à la surface lors de la fonte. Les oxydes d'aluminium, par contre, descendent dans le bain et peuvent causer des inclusions d'oxydes.

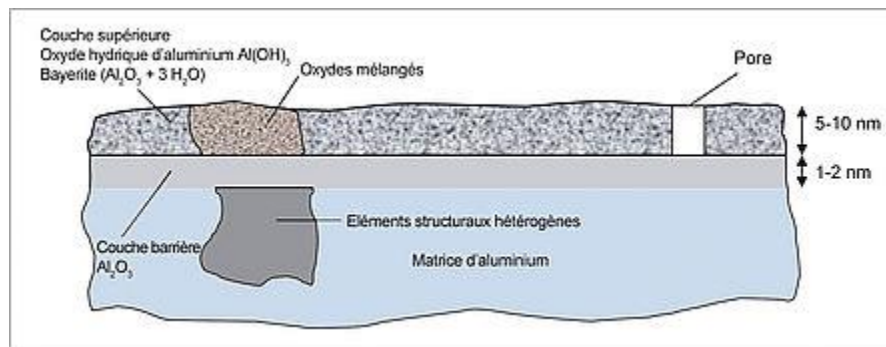


Figure I.15 : Composition schématique d'une couche d'oxydes naturelle.

I.8 Conclusion

Cette étude a été menée dans le but de détenir une vision la plus globale qui soit sur l'aluminium, nous avons aussi bien étudié la composition chimique qui donne un alliage, où d'autres éléments sont ajoutés à l'aluminium pur afin d'améliorer ses propriétés pour d'augmenter sa résistance mécanique, et faire par la suite une classification de ses alliages par les deux techniques de mise en forme : « par corroyage et par fonderie ».

Chapitre 2

Le procédé de soudage et le soudage
FSW

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous donnons une description plus ou moins détaillée sur le procédé récent de soudage par friction et malaxage (FSW), considéré en tant que nouvelle technique du 21^{ème} siècle, qui permet de souder des alliages difficilement soudables par des procédés de soudages classiques. Les différents paramètres, mis en jeu dans le procédé FSW, sont rappelés dans ce chapitre. Nous présentons également quelques travaux de recherche réalisés pour modéliser l'évolution thermique et mécanique de la matière lors du soudage et nous mettons en lumière les difficultés rencontrées par les auteurs de ces travaux.

II.2 Généralités sur le soudage

II.2.1 Historique du soudage

Pendant des millénaires, l'assemblage des métaux s'est fait par forgeage. La rupture est intervenue à la fin du XIX^e siècle, lorsqu'il est devenu possible d'obtenir des températures de flammes suffisantes en mélangeant des gaz comme l'oxygène et l'acétylène désormais stockables en toute sécurité et que sont apparus des procédés de soudage, comme le soudage par résistance (figure II.1) et le soudage à l'arc, utilisant l'électricité comme source d'énergie. Avec ces procédés, la montée en température provoquée par une source thermique intense était bien plus rapide que la dissipation à l'intérieur de la pièce à souder. Le bain de métal en fusion obtenu se solidifiait en refroidissant pour constituer le joint unissant les deux pièces à souder. Le soudage à l'arc, le soudage par résistance et le soudage sous protection gazeuse ont tous été inventés avant la Première Guerre mondiale.

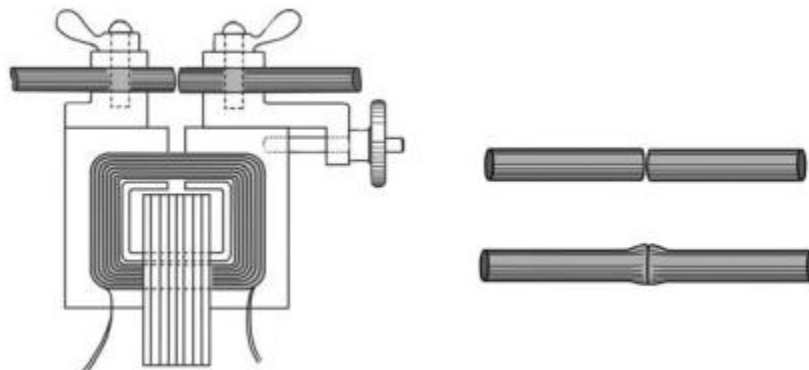


Figure II.1 : Transformateur de Thomson pour le soudage électrique par résistance.

II.2.2 Définitions de soudage

Le soudage consiste à réunir de façon permanente deux ou plusieurs éléments, en assurant la continuité de la matière des parties assemblées soit par chauffage, soit par pression, soit par combinaison de l'un et l'autre, avec ou sans emploi d'un matériau d'apport. L'utilisation d'un métal d'apport répond à deux besoins : il permet d'une part de combler le jeu entre les pièces assemblées, et d'autre part de changer la composition chimique et la structure cristalline de la zone fondue afin d'obtenir les performances recherchées. De manière générale, le terme « soudage » désigne l'ensemble des techniques mises en œuvre pour la réalisation d'un assemblage, et celui de « soudure » désigne le joint formé,

En ce qui concerne les métaux on distingue trois types de soudures :

- La soudure homogène, dans laquelle les métaux de base et le métal d'apport éventuel sont tous de même nature.
- La soudure hétérogène de type « A » qui associe des métaux de base de même nature avec un métal d'apport d'une autre nature.
- La soudure hétérogène de type « B » où les métaux de base et le métal d'apport sont tous trois de natures différentes. [16]

II.2.3 Procédés de soudage

Les procédés de soudage sont nombreux et peuvent être classés suivant la façon de transférer l'énergie [17].

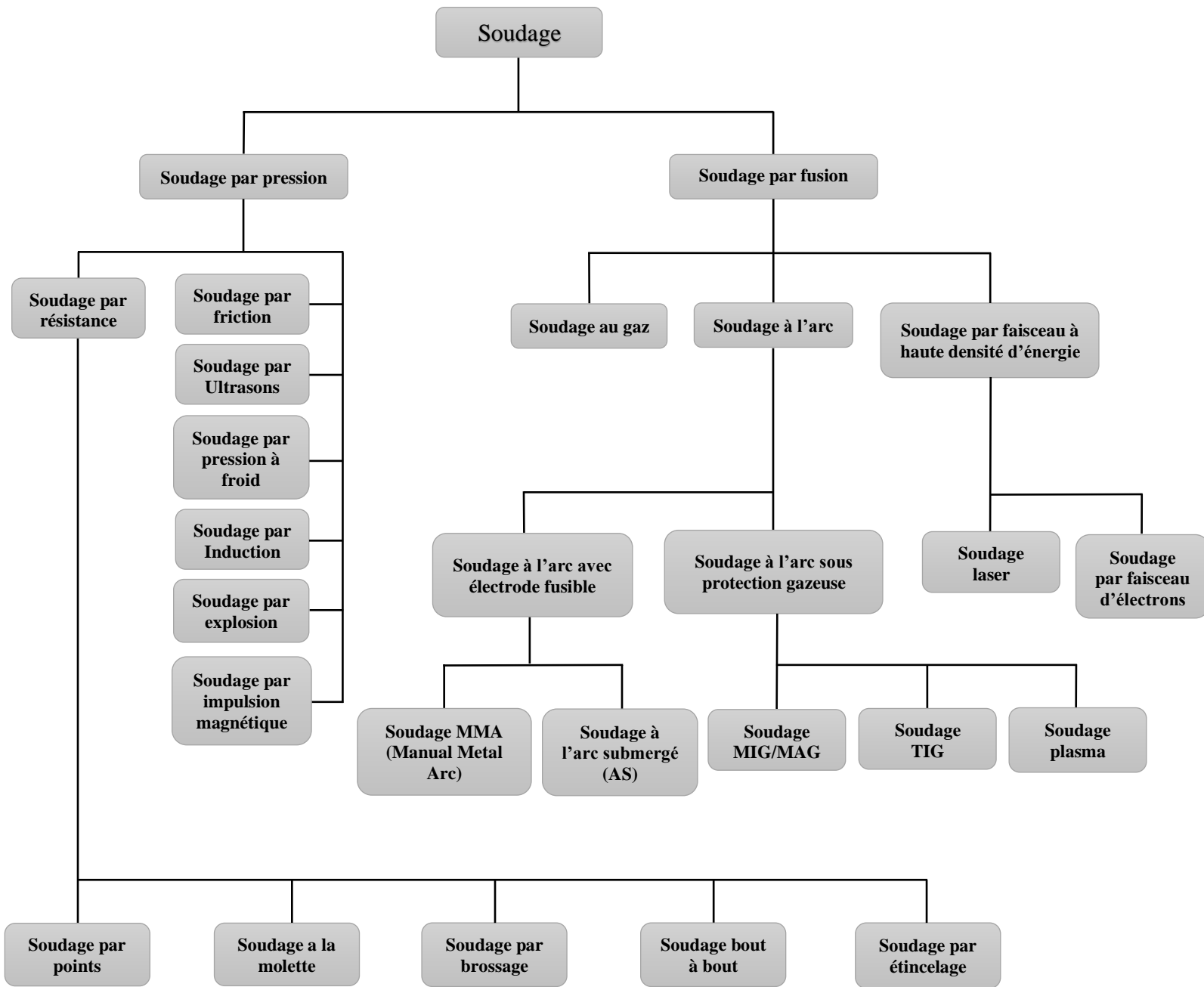


Figure II.2 : Organigramme des procédés de soudage les plus répandus.

II.3 Procédé de soudage par friction et malaxage (Friction Stir Welding FSW)

Le soudage FSW, qui peut se traduire par « friction-malaxage », est une technologie prometteuse pour l'assemblage de pièces d'aluminium puisqu'elle permet d'assembler des alliages d'aluminium à haute résistance, sans passer par la fusion (alliages d'aluminium des séries 2000, 6000 et 7000 par exemple) et sans apport de matière. Ce procédé est également utilisé et très apprécié pour l'assemblage de matériaux dissemblables. Ce procédé d'assemblage, qui est arrivé à maturité depuis quelques années, présente un intérêt certain car une fois les paramètres de soudage fixés, la répétabilité est excellente. De plus il permet une grande souplesse d'utilisation et très peu de risques puisque ce type de soudage ne nécessite pas de gaz de protection.

II.4 Le principe du soudage FSW

Le procédé de soudage par friction et malaxage utilise un outil à haute résistance mécanique et thermique qui est constitué d'un épaulement (shoulder) prolongé par un pion (pin) coaxial qui réalise le malaxage. Les tôles à souder sont fixées soigneusement sur un montage d'appui. La chaleur, générée par le frottement de l'épaulement et celle du pion, transforme la matière à l'état pâteux au voisinage de l'outil et facilite la pénétration et le déplacement de l'outil le long du joint à souder pour former la soudure après refroidissement. Les matériaux, utilisés pour les outils de soudage des tôles à base d'aluminium, sont, principalement, des aciers résistants aux hautes températures. La géométrie de l'outil est très importante dans le développement du procédé. Elle joue un rôle essentiel dans le malaxage de la matière et la génération de la chaleur. Le choix des dimensions et du profil du pion dépend de la nature des matériaux constituant les tôles à souder et de leur épaisseur.

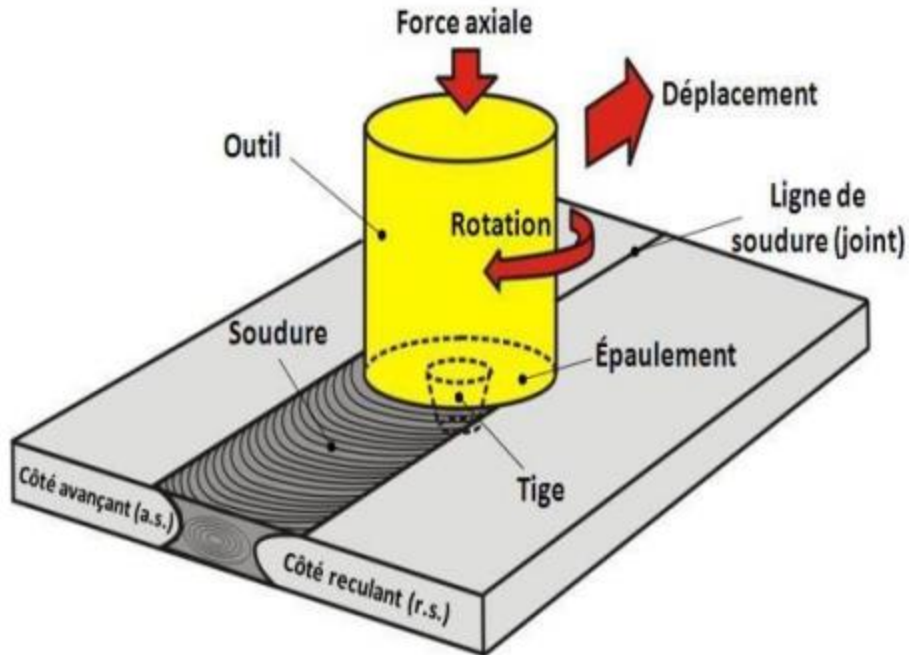


Figure II.3 : Illustration du procédé de soudage par friction et malaxage

II.4.1 Le pion

La forme du pion est généralement tronconique ou prismatique ou hélicoïdale et peut contenir des reliefs variés dans le but d'augmenter l'effet du malaxage du métal et par suite de rendre plus facile la formation de la soudure. Dans certaines applications, le pion est excentré par rapport à son axe de rotation dans le but d'amplifier le malaxage. Plusieurs recherches sont orientées vers l'optimisation de la géométrie du pion.

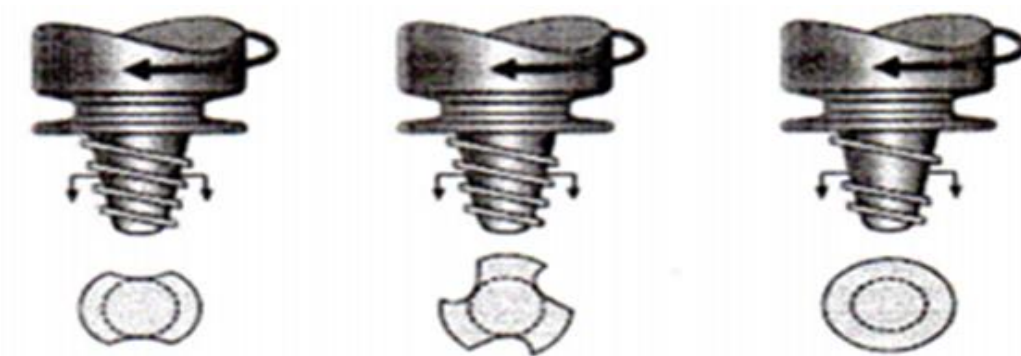


Figure II.4 : Exemple de géométrie de pion

II.4.2 L'épaulement

L'épaulement est globalement plan, ses dimensions transversales restent suffisamment grandes soit environ cinq fois le diamètre du pion afin de couvrir totalement la zone affectée par le soudage. Il joue ainsi deux rôles principaux ; d'une part, il empêche le métal malaxé de fluer vers le haut et, d'autre part, il chauffe la matière par frottement.

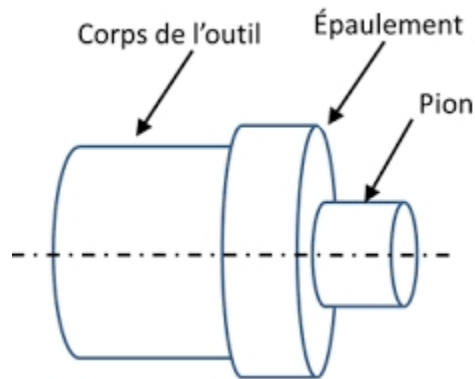


Figure II.5 : La géométrie de l'épaulement

II.5 Applications

Pour des exigences élevées en termes de qualité du joint de soudure, le FSW présente un recours efficace puisqu'il permet d'avoir des qualités de joints de soudures proche des caractéristiques mécaniques du métal de base dans certaines configurations, ce qui est difficile à atteindre avec des procédés de soudage traditionnels.

Le procédé de FSW trouve un domaine d'application plus vaste avec son potentiel pour souder des matériaux difficiles à réunir par fusion. Il permet des progrès pour le soudage des alliages d'aluminium. Pour ces nombreux avantages, l'industrie et la recherche s'investissent pour étendre son domaine d'application à des matériaux de résistance mécanique plus élevée ou pour l'assemblage des matériaux différents (exemple assemblage titane-acier).

Durant la dernière décennie, le soudage par friction malaxage a été exploré par plusieurs industries tel que l'aérospatial, l'automobile, la marine, l'armement.

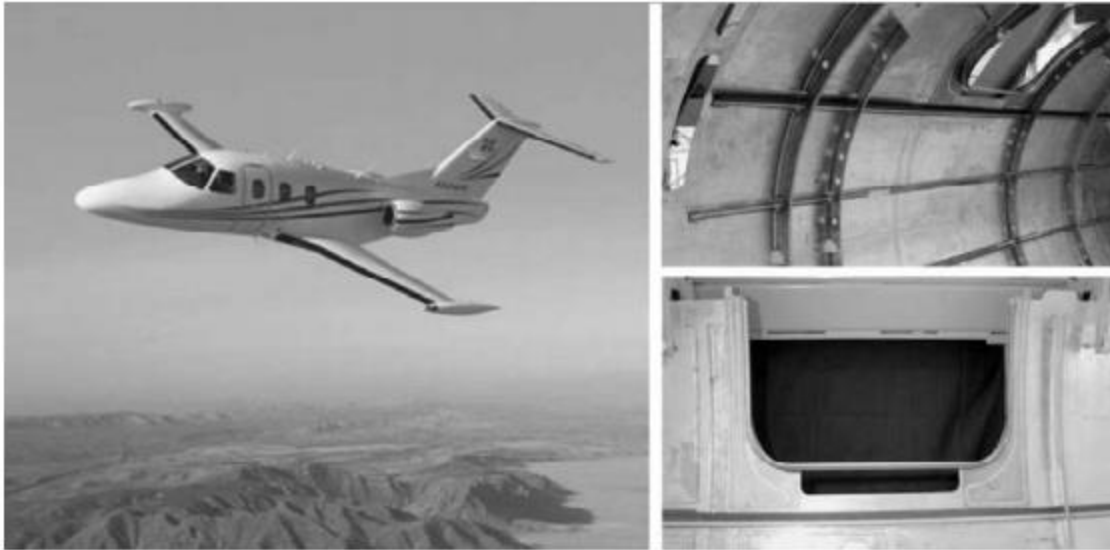


Figure II.6 : Assemblage de l'avion Eclipse 500 avec le procédé de FSW [18]

La société Norvégienne « Marine Aluminium » a été le premier fabricant à utiliser ce procédé. [19] Les constructeurs automobiles ont utilisé le FSW pour diverses applications surtout pour remplacer le rivetage. Par exemple, les portes arrière de la Mazda Mx-5. Le constructeur Ford utilise le FSW pour l'assemblage des éléments de suspension et des ouvrants comme le capot ou les portes.



Figure II.7 : Assemblage de voiture Mazda Mx-5 avec le procédé de FSW

Dans le domaine aérospatial, Boeing a trouvé une voie pour le FSW avec la construction des réservoirs de carburant des fusées Delta. L'ancien procédé (TIG) était très coûteux étant donné les défauts à diminuer et à réparer ainsi que la préparation des surfaces à souder. Boeing a réalisé une

réduction du coût de soudure. En utilisant le FSW pour le soudage du fuselage et des ailes de l'avion Eclipse 500, le nombre de rivets a diminué de 60 à 70 %.

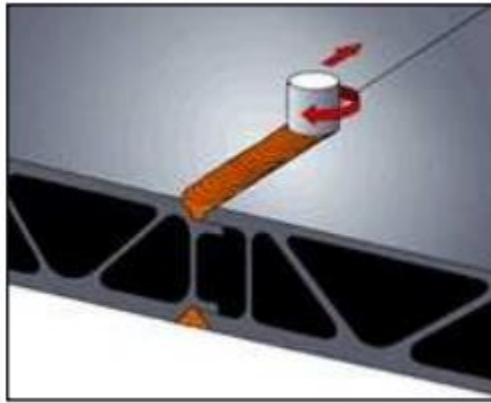


Figure II.8 : Technique de soudage des carrosseries des trains Hitachi

Au Japon, Le processus de FSW est utilisé dans la production de structures de trains en aluminium, ainsi que pour la construction de bateaux à structure aluminium (figures II.8, II.9).



Figure II.9 : Bateau en aluminium construit en utilisant FSW.

II.6 Équipements

Le soudage en friction malaxage peut être réalisé avec divers types d'équipement. On doit être en mesure de tenir l'outil dans un mandrin, d'assurer la rotation à la vitesse requise, de produire une force axiale de frottement et de confinement suffisante, de produire le mouvement de translation à la vitesse requise le long du joint, de supporter et fixer solidement les éléments à souder. [20]

La composante de base est la tête de soudage avec son mandrin pour tenir l'outil et assurer sa rotation dans la plage des vitesses d'opération. Elle peut être dotée de systèmes pour mieux contrôler le procédé (suivi, forces, couple, etc.). La tête de soudage peut être installée sur deux types d'équipement dédiés au soudage qui assurent les fonctions d'orientation de la tête et son déplacement, soit le portique de soudage et le robot de soudage.



Figure II.10 : équipement de type portique CSFM-UQAC pour le FSW

La figure II.11 montre un robot doté d'un système d'asservissement en position développé par le CNRC pour compenser le manque de rigidité d'un robot pour le soudage en friction malaxage, ce qui augmente la précision de positionnement et de trajectoire de l'outil. L'entreprise Soudure J.M. Tremblay de Saint-Anicet offre un service de soudage par friction malaxage avec ce type d'équipement.



Figure II.11 : Robot asservi pour le FSW doté de sa tête de soudage

Il est possible dans certains cas d'utiliser des fraiseuses universelles à commande numérique pour piloter l'outil de soudage. Si on dispose d'une fraiseuse et qu'on veut l'utiliser pour cet usage, il faut s'assurer que les forces de soudage ne dépassent pas la capacité de l'équipement qui n'est pas au départ conçu pour ce travail.

De nombreuses techniques de fixation peuvent être utilisées pour fixer les pièces. Les forces à contraindre vont dépendre en bonne partie des épaisseurs à souder et les systèmes de fixation doivent être le plus versatiles possible pour s'adapter aux dimensions des pièces et à la géométrie des soudures. Le système de bridage doit résister aux forces qui tendent à écarter et déplacer les pièces à assembler.



Figure II.12 : Bridage mécanique de base

II.7 Les différents types de soudage par friction malaxage

Depuis son invention, le processus de FSW ne cesse de s'améliorer afin de pouvoir prendre sa place dans le domaine de la soudure et être adapté à la productivité industrielle. Le FSW est utilisé dans la plupart des cas pour le soudage des alliages d'aluminium. Le processus de FSW peut être classifié en trois types : le soudage bout à bout, le soudage par recouvrement et le soudage par point.

II.7.1 Soudage bout à bout

Le soudage bout à bout consiste à assembler deux pièces mises en contact et généralement immobilisées par bridage pour éviter leurs écartements. Il permet de réaliser des codons de soudures linéaires. La soudure est effectuée principalement en trois étapes successives.

- Phase de pénétration,
- Phase de soudage,
- Phase de retrait.

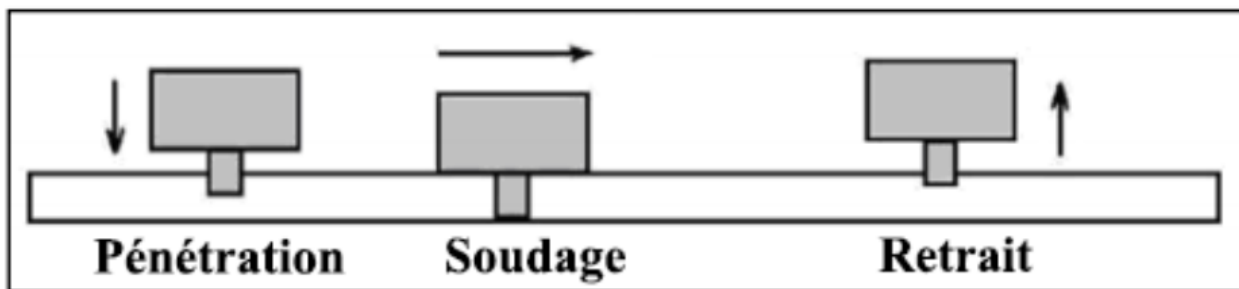


Figure II.13 : Etapes du Soudage bout à bout.

II.7.2 Soudage par recouvrement

La procédure du soudage FSW par recouvrement est semblable à celle d'une soudure bout à bout avec par seule différence la disposition des pièces à souder. Par conséquent, il y a une complexité additionnelle liée au transfert thermique réel entre les deux pièces. L'outil utilisé pour les joints de recouvrement est différent de celui utilisé pour le soudage bout à bout afin qu'il puisse malaxer les deux matériaux.

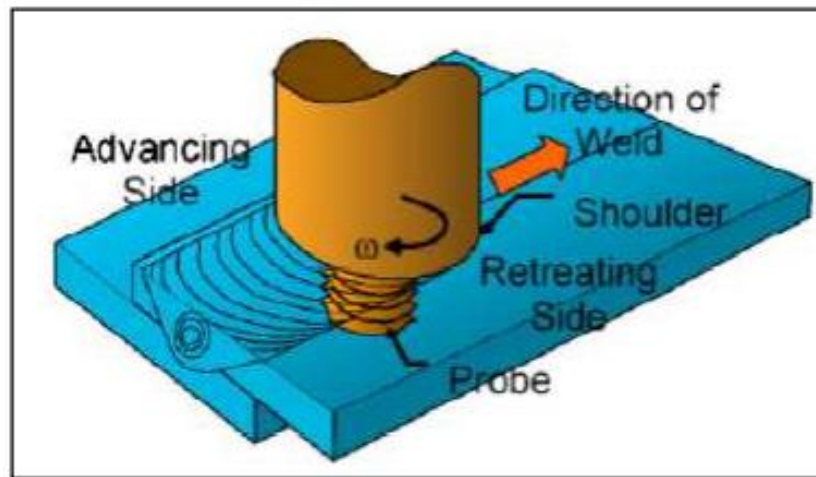


Figure II.14 : Principe du FSW par recouvrement [21]

Les paramètres de processus tels que la pression d'outil et sa géométrie ainsi que l'isostatisme des tôles jouent un rôle très important dans la qualité de la soudure. Plusieurs recherches sont effectuées pour qualifier ce type de soudage, dans le but remplacer le rivetage principalement dans le domaine aéronautique.

II.7.3 Soudage par points

Le soudage par points par friction malaxage est un processus relativement récent permettant un assemblage par point de différents alliages. Le malaxage de la matière de deux pièces généralement superposées crée un point de soudure.

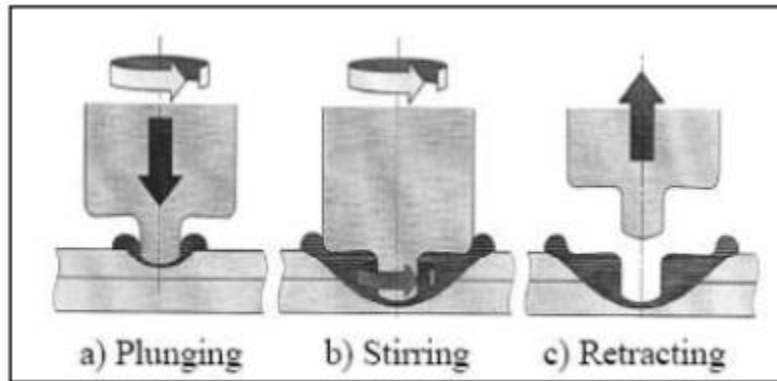


Figure II.15 : Principe du FSW par points

La figure II.15 montre les différentes étapes de ce type de soudage. L'outil tournant pénètre progressivement jusqu'à 80% environ de l'épaisseur des plaques à souder avec une force normale [6]. À la différence des autres types de soudage par friction malaxage, l'outil ne se déplace pas dans la direction transversale pour former un cordon continu. Une fois la phase de plongée finie, l'outil est maintenu dans sa position avec une force stable pendant un temps approprié pour produire la quantité de chaleur suffisante pour déformer et malaxer les deux matériaux. La phase finale est le retrait de l'outil. Le développement d'un outil escamotable a permis d'améliorer la qualité de ce type de soudage. En effet, lors de la phase de retrait seulement le pion est retiré de la matière. L'épaulement est maintenu pour emprisonner la matière dans le point de soudure.

Le soudage FSW par point est mis en œuvre par l'industrie de l'automobile vu ses aspects rentables et productifs. Ce procédé est semblable dans son concept et son aspect au soudage par points par résistance.

II.7.4 Outil à deux épaulements (bobbin tool)

L'outil à deux épaulements permet de pincer les deux pièces à souder, l'apport de chaleur s'effectue par frottement sur les deux faces des pièces. Le défaut dû à la pénétration de l'outil ordinaire est éliminé.

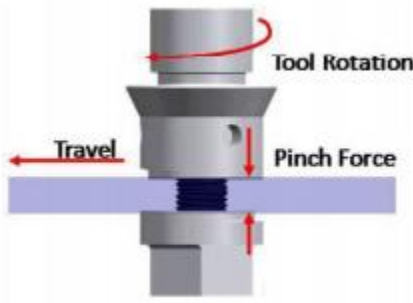


Figure II.16 : Configuration de l'outil à double épaulement

Pour plonger l'outil dans les pièces, il faut percer au préalable un trou pour insérer le pion. Une fois que le pion et l'épaulement supérieur sont en place, l'épaulement inférieur est vissé sur le pion.

Cette technologie permet de souder les pièces d'épaisseur importante. Elle donne un aspect symétrique de propagation de la température.

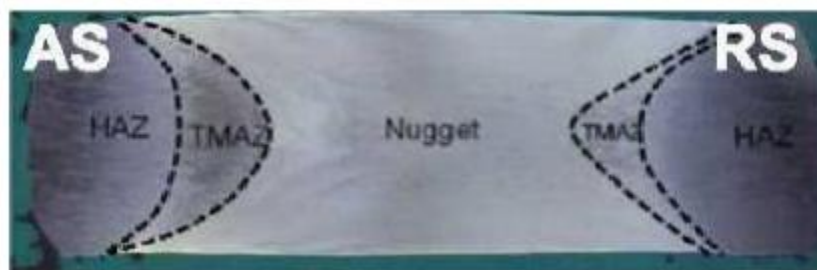


Figure II.17 : Symétrie du cordon FSW de 9mm d'épaisseur de nuance AA2195-T87 obtenu par un outil à double épaulement (bobbin tool)

II.8 Les phases de soudage

Le soudage s'effectue selon les étapes suivantes :

- **Phase de pénétration de l'outil**

Dans cette étape, on réalise la pénétration du pion sous l'effet d'un effort vertical variant de quelques KN jusqu'à une trentaine de KN. En effet, le pion pénètre progressivement à l'intérieur du joint, à l'aide de la vitesse de rotation, jusqu'à ce que l'épaulement soit en contact avec les plaques à souder.

- **Phase transitoire d'échauffement par frottement**

Cette étape transitoire consiste à entraîner localement l'épaulement dans un mouvement de rotation pour transformer la matière à l'état pâteux. Cette étape de pré-soudage dure une à trois secondes avant le passage à l'étape de soudage



(a)

(b)

Figure II.18 : – (a)- Fin de phase de pénétration / (b)- Phase de chauffage [22]

- **Phase de soudage**

Dans cette étape, l'outil est animé d'un mouvement de translation dans la direction du joint représentant l'interface des deux plaques à souder.

- **Phase de retrait de l'outil**

A la fin du soudage, l'outil est retiré des deux plaques à souder. Ce retrait laisse un trou difficile à remplir de façon simple. Ce problème peut être résolu dans le cas des soudures linéaires ouvertes par l'élimination des défauts au début et à la fin du joint soudé. Dans le cas des soudures circulaires fermées, la fin du joint soudé au niveau du recouvrement peut être résolue de façon particulière, par exemple par fusion. De plus, le trou peut être contourné par l'utilisation d'un outil à pion rétractable.

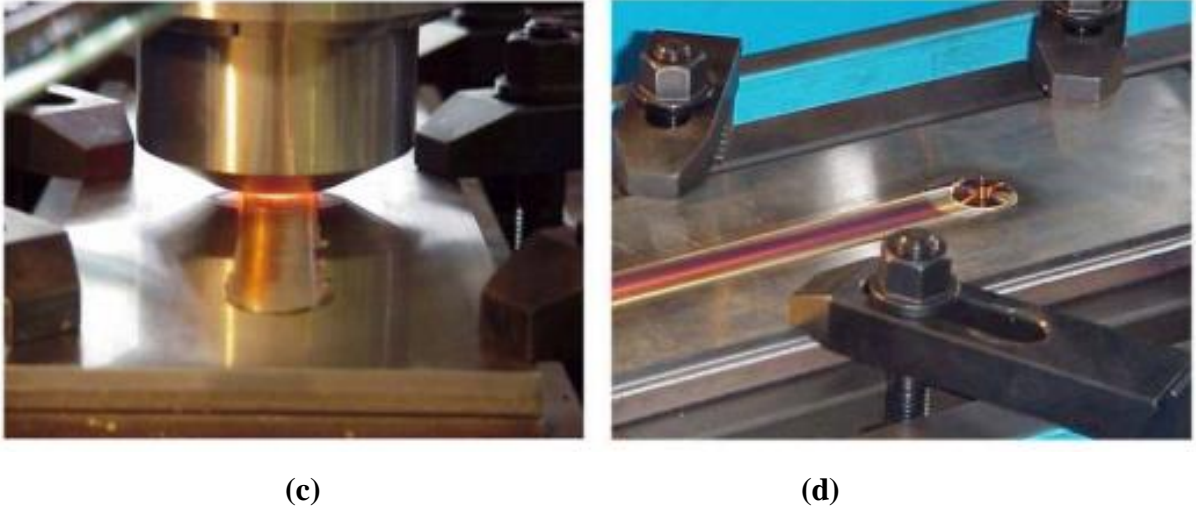


Figure II.19 : – (c)- Phase de translation / (d)- Trou à la fin de soudure [22]

II.9 Paramètres du soudage

Le FSW est un procédé complexe lié à des phénomènes thermiques, mécaniques, métallurgiques et à leur couplage lors du soudage. Cela rend la prévision de la qualité de la soudure en FSW très difficile. Ces phénomènes dépendent de plusieurs paramètres qui peuvent être classés en trois types les paramètres du procédé, de l'outil et des pièces à souder.

Les différents paramètres du soudage par FSW sont :

- **Paramètres procédés**
 - Vitesse de rotation.
 - Vitesse d'avance (pendant les 3 phases).
 - Effort sur l'outil dans le cas du soudage piloté en effort.
 - Pénétration dans le cas du soudage piloté en position.
 - Angle d'inclinaison de l'outil.
- **Paramètres outils**
 - Géométrie du pion.
 - Géométrie de l'épaulement.
 - Matériaux

- **Paramètres associés à l'environnement du procédé**
 - Épaisseurs des pièces.
 - Gradient de température.
 - Nuance des matériaux.
 - Nature de l'assemblage (même matériaux ou pas)
 - Caractéristique chimique et physique des matériaux tel que la conductivité thermique, la capacité thermique...

II.10 Phénomènes physiques observés dans le procédé

Les divers phénomènes physiques, mis en jeu pendant le soudage par FSW, sont de trois types :

II.10.1 Mécanique

En général, 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.

II.10.2 Thermique

Les deux phénomènes thermiques principaux au cours du procédé, FSW 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(ambiant).

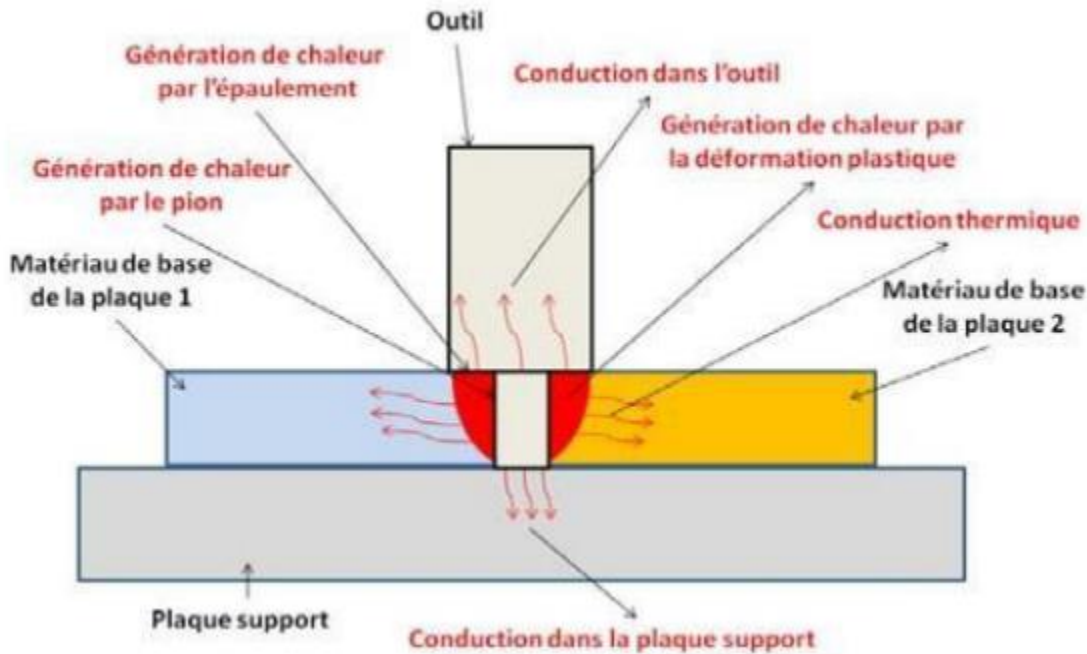


Figure II.20 : Transferts thermiques induits par le procédé FSW

II.10.3 Métallurgie

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. Le premier phénomène métallurgique est la modification de l'état de précipitation du matériau.

Le second est la recristallisation du matériau. Le procédé de soudage FSW permet au contraire d'obtenir des modifications métallurgiques moins importantes, par rapport aux autres procédés, causées par les différents changements de phase au cours de soudage.

Une coupe transversale du joint soudé permet d'obtenir les différentes zones dans lesquelles la matière est affectée thermiquement (HeatAffected Zone HAZ) ou thermo-mécaniquement (Thermo-MechanicalAffected Zone TMAZ). Chaque zone dépend de la température atteinte, des modifications métallurgiques et des déformations subies au cours du procédé de soudage.

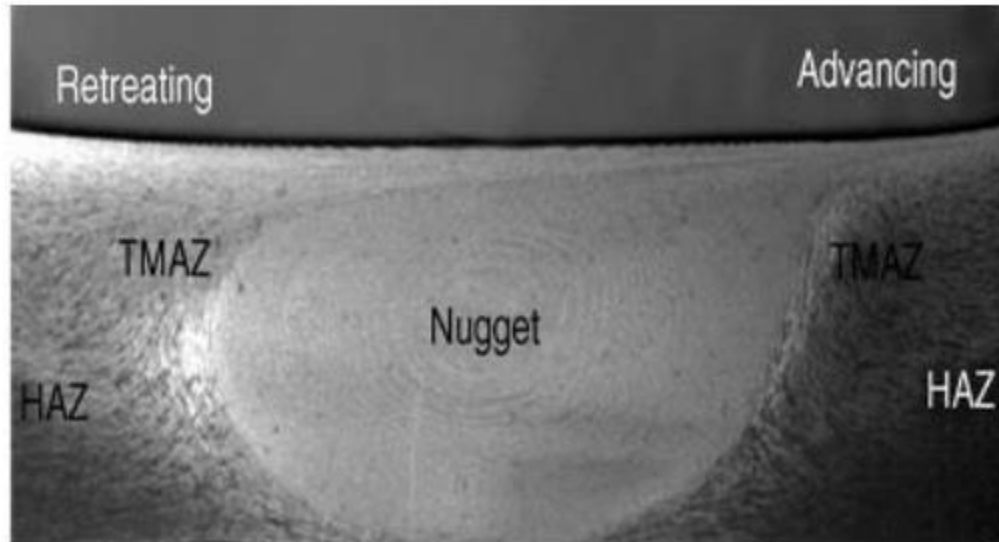


Figure II.21 : Coupe d'une soudure sur un alliage d'aluminium

II.11 Caractérisation métallurgique de la zone soudée par FSW

Les zones principales et une coupe transversale d'un cordon de soudure par FSW sont représentées dans les figures II.22 et II.23 suivantes :

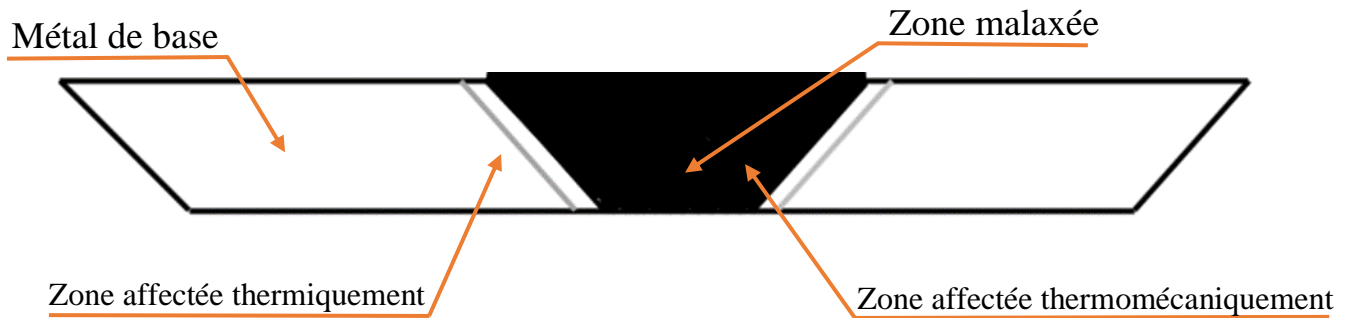


Figure II.22 : Zones principales d'un cordon de soudure par FSW



Figure II.23 : Coupe transversale d'un cordon de soudure par FSW

A/ Métal de base (MB) :

Ainsi, au loin du cordon, le métal de base (MB) ne subit ni déformation, ni d'échauffement suffisant pour modifier sa structure.

Il s'agit de la partie la plus éloignée du centre de la soudure. Dans cette zone, le matériau n'est pas déformé.

B/ Zone affectée thermiquement (ZAT) :

Dans cette zone plus proche du centre de la soudure, le métal a subi un cycle thermique, dont la température maximum dépasserait 250 °C, modifiant ainsi la microstructure ou les propriétés mécaniques. Cependant aucune déformation notable (observable à l'échelle de la microscopie optique notamment) n'a lieu dans cette région. La forme des grains est identique à celle rencontrée dans le métal de base.

C/ Zone affectée thermomécaniquement (ZATM) :

Cette zone, se trouvant autour du noyau, est propre au FSW. Elle est à la fois déformée plastiquement et affectée thermiquement. La frontière entre la zone centrale de la soudure et la ZATM est généralement très marquée, souvent plus du côté « advancing side ». Une recristallisation partielle est également observée le long de cette frontière. L'évolution de la précipitation se traduit dans la ZATM par une dissolution partielle des précipités durcissant et par une précipitation hétérogène des précipités non durcissant. Dans le cas des alliages d'aluminium, les températures atteintes dans cette région s'échelonnent entre 300 °C et 400 °C.

D/ Zone malaxée :

La zone au centre de la soudure est habituellement appelée zone fondue. Elle correspond aux maximums de déformation et de température. Les mesures de température dans cette région sont délicates et sont estimées à partir de la microstructure finale du joint. Dans le cas des alliages d'aluminium, la température maximum serait 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 présenter des formes en cuvette ou des formes ellipsoïdales comme le montre la figure II.24.

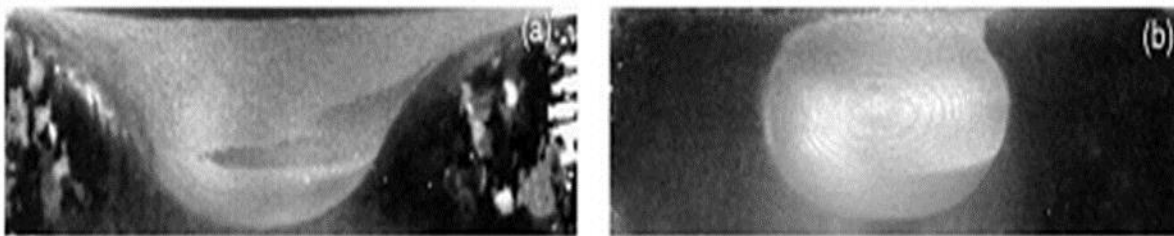


Figure II.24 : Formes de noyaux a) cuvette b) ellipsoïdale

Son diamètre est légèrement supérieur à celui du pion. La structure granulaire résulte du processus de recristallisation dynamique continue qui apparaît pendant le soudage. Dans le noyau, les précipités sont remis en solution et reprécipitent de façon hétérogène lors du refroidissement.

E/ Dureté en travers du joint :

L'allure du profil de dureté à travers les soudures FSW dépend de la nature du durcissement du matériau, selon qu'il soit par écrouissage ou par précipitation.

Durcissement par écrouissage :

Dans le noyau, le cycle thermique a pour effet de restaurer et surtout de recristalliser la microstructure. Si l'état de départ est recristallisé (état O), la dureté du joint soudé sera proche de celle de départ. Un durcissement est observable selon la taille des grains dans le noyau. Un matériau pris dans un état écroui (état H) présente une diminution substantielle de la dureté de la zone soudée suite à sa recristallisation.

Le traitement thermomécanique imposé dans le noyau efface donc toutes différences entre les deux états de départ.

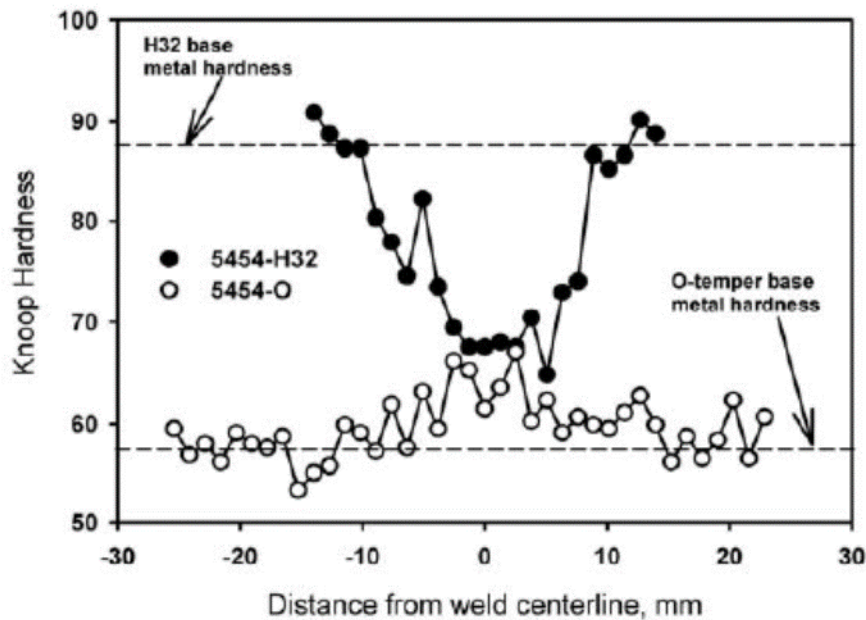


Figure II.25 : Durcissement par écrouissage

Durcissement par précipitation :

Les soudures par FSW de matériaux à durcissement structural présentent un profil caractérisé en « W ». Dans le noyau, il est admis que le cycle thermique remet en solution toute la précipitation durcissant, une fraction de celle-ci se reprécipite lors du refroidissement d'une manière hétérogène et le reste lors de la maturation à température ambiante. Ceci a pour effet d'effacer tous les traitements thermiques antérieurs.

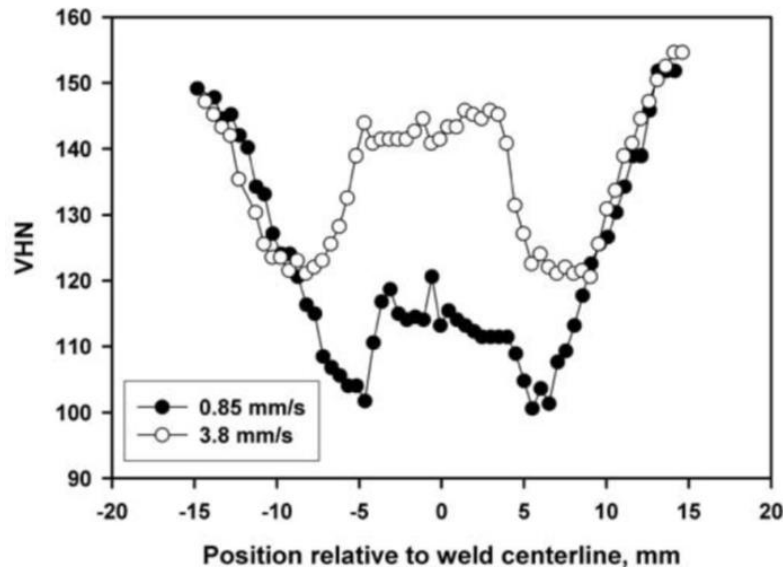


Figure II.26 : Durcissement par précipitation

II.12 Défauts rencontrés dans les soudures

On observe plusieurs types de défauts propres au soudage par friction malaxage. Ces défauts sont dimensionnels ou parfois internes dû à une mauvaise répartition du métal et des oxydes présents à la surface du joint. Le FSW engendre aussi des distorsions et des contraintes résiduelles, mais à un niveau nettement moindre que le soudage par fusion. [20]

Les défauts rencontrés ont des causes multiples essentiellement reliées à de mauvais paramètres de soudage tel que :

- Mauvaises vitesses d'avance et de rotation ;
- Mauvais choix d'outil ;
- Force axiale mal ajustée ou contrôlée ;
- Pièces mal retenues.

On peut voir à la Figure II.27 la microstructure d'un joint soudé où on distingue les différentes zones : Malaxée (ZM); Affectée thermo-mécaniquement (ZATM); Affectée thermiquement (ZAT); Métal de base (MB). C'est dans la ZM qu'on peut retrouver des alignements d'oxydes préjudiciables aux propriétés mécaniques. La figure II.28 montre la position des différents types de défauts en friction malaxage. Cependant lorsque les paramètres de soudage préalablement qualifiés sont bien contrôlés le procédé est très fiable et répétitif, ces défauts ne vont donc pas apparaître.

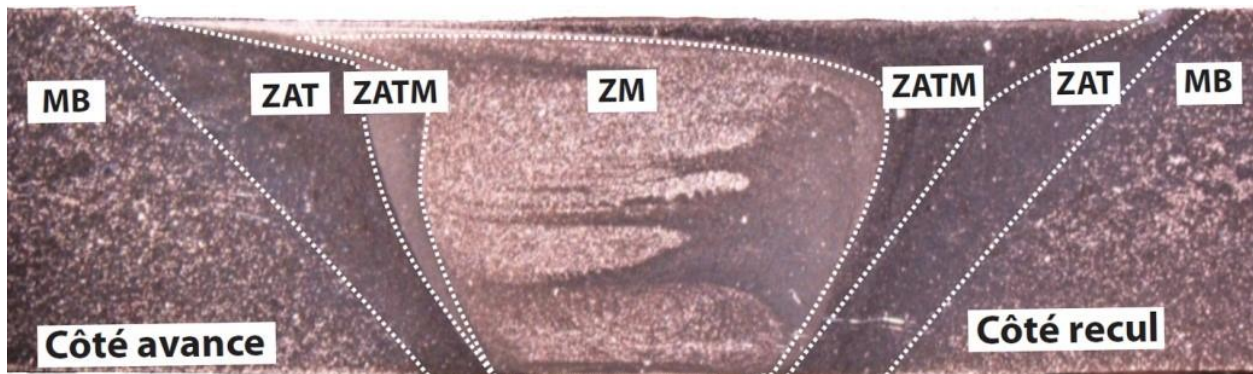


Figure II.27 : Vue en coupe de la microstructure d'un joint soudé[20]

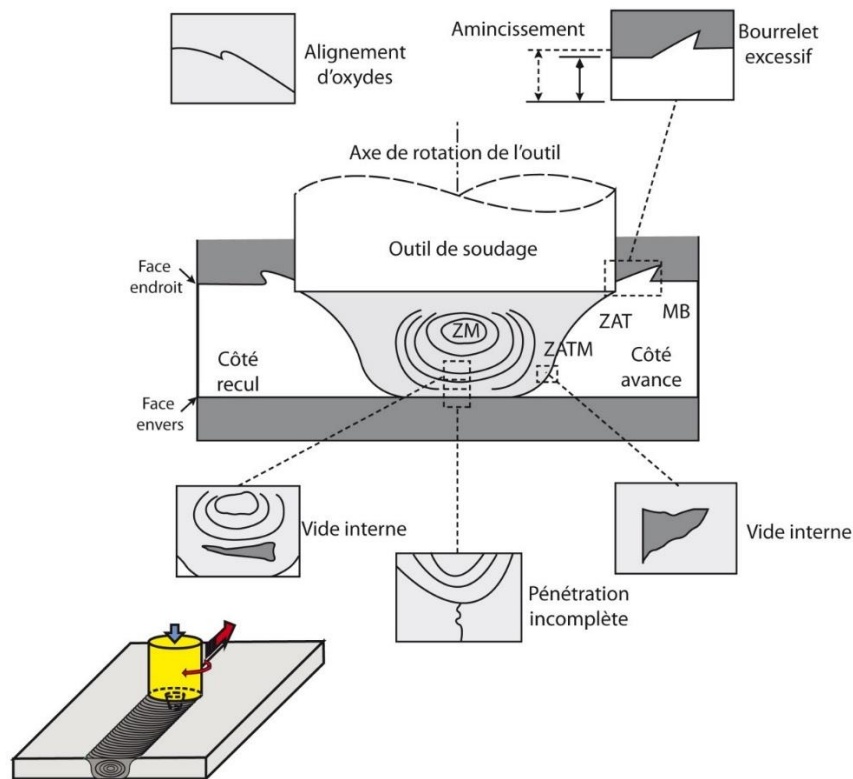


Figure II.28 : Schéma montrant la position des défauts en soudage FSW en soudure bout à bout.

Les normes ISO 25 239 et AWS D17.3/D17.3M (2010) définissent les directives et exigences en soudage par friction malaxage pour les alliages d'aluminium. La dernière concerne les applications aérospatiales. Les éléments clés à contrôler pour assurer la qualité d'un assemblage sont les dispositifs qui concernent la fixation de l'assemblage, la propreté du joint (pas de contaminant à part l'oxyde naturel), les outils de soudage et les paramètres de soudage (vitesse de rotation, force axiale, vitesse d'avance). [23]

Les méthodes d'inspection (visuelle, liquide pénétrant, ultrasons, rayons X, courant de Foucault) développées pour l'inspection des joints en soudage par fusion, sont adaptables pour le soudage en friction malaxage.

II.13 Avantage et inconvénients du procédé du FSW

Le procédé du FSW possède plusieurs avantages, on se contentera d'en citer quelques-uns :

- Excellente répétabilité, très bonne reproductibilité et possibilités d'automatisation.
- Aucun consommable, pas besoin de métal d'apport.
- Assemblages de haute qualité ayant une bonne structure métallurgique (le matériau n'atteint pas sa température de fusion).
- Des matériaux dissemblables peuvent être assemblés, comme l'aluminium avec le cuivre et de l'acier [24].
- Peu de déformations après soudage en raison des temps de soudage courts et des faibles températures atteintes.
- Elargissement de la gamme des matériaux soudables.
- Pas de préparation spéciale des pièces (attention toutefois aux oxydes) comme l'alumine pour le soudage des alliages d'aluminium.
- Nombre réduit des variables de soudage.
- Procédé de soudage plus rapide que les procédés de soudage conventionnels.
- Possibilité d'assembler des pièces de sections fortement différentes à condition de prendre certaines précautions. [25] [26].
- Économique : le soudage par friction permet de réaliser d'importantes économies sur le coût des pièces soudées (économie en temps, en matériau).
- Soucieux de l'environnement : pas de gaz de protection, pas de fumées de soudage ou rayonnement.

Bien que son utilisation demande une licence du TWI, les limitations du FSW sont en train de diminuer vu le développement rapide de ce procédé. Parmi les inconvénients on peut citer :

- Investissement important.
- Maintient rigide des pièces à souder contrairement à d'autres procédés de soudage (génération des contraintes).
- Besoin d'un dispositif d'appui (enclume ou support adapté).

II.14 Conclusion

Le procédé de soudage par frottement-malaxage a fait l'objet d'un nombre important d'études, ce qui a permis une évolution rapide des connaissances à son égard. En une quinzaine d'années, le procédé s'est imposé comme une alternative viable dans plusieurs applications, notamment pour l'assemblage des tôles minces d'aluminium. Une fois la faisabilité du procédé établie, on s'est attaqué à une compréhension plus fondamentale des phénomènes physiques qui se produisent lors du soudage.

Chapitre 3

Etat de l'art

III.1 Thèse 1

III.1.1 Présentation de la problématique

La compréhension du comportement mécanique ainsi que de l'évolution microstructurale du joint FSW nécessite une connaissance du champ de température du cordon FSW. Ce champ permet notamment d'identifier les zones affectées thermiquement.

La plupart des modèles thermiques présents dans la littérature considèrent une répartition des flux thermiques basée sur les transferts thermiques dans chaque zone de l'outil. Le terme source de ces flux est induit par frottement entre la matière et l'outil comme étant des flux thermiques surfaciques.

La plupart des modèles numériques simulant l'aspect thermique du FSW se basent sur l'introduction des équations analytiques de la quantité de chaleur dissipée par frottement. Ces dernières permettent de calculer la contribution énergétique de chaque partie de l'outil

Pour simuler le FSW, une connaissance des conditions aux limites est nécessaire. Dans la littérature concernant la modélisation analytique et expérimentale du FSW, les conditions aux limites sont largement discutées. Schmidt et al montrent que la génération de chaleur par l'épaulement est estimée à 86% de l'énergie totale. Seulement 3% et 11% de la quantité de chaleur par frottement est générée respectivement par le bout et la surface latérale du pion. Ce calcul a été fait pour un rayon de l'épaulement égal à 9mm et un pion de rayon 3mm et une hauteur de 4mm. La contribution de la quantité de chaleur par le pion est limitée à 2% dans le travail de Russell et Shercliff, D'autres travaux ne prennent pas en considération l'effet du pion pour simplifier le problème [27].

Nous pouvons donc attribuer à chaque partie de l'outil une densité de flux de chaleur moyenne appropriée. Cette modélisation permet dans la suite de calculer l'apport thermique de chaque partie dans les pièces à souder [27].

La condition de contact entre l'outil et la matière est peu évoquée dans la littérature du FSW. En conséquence, le frottement à l'interface est mal maîtrisé. Dans plusieurs cas, la loi de frottement est prise indépendamment de la température [27].

III.1.2 Mesure des températures dans l'outil

Il a réalisé des essais préliminaires sur la fraiseuse, avec le même outil sans instrumentation, pour déterminer des paramètres opératoires permettant d'obtenir un cordon sans défaut tunnel apparent.

Avec une vitesse de rotation égale à 800 (tr /min) et une vitesse de soudage égale à 50 mm/min il a obtenu un cordon acceptable, ces vitesses sont maintenues dans l'essai instrumenté avec les thermocouples [27].

Tableau III.1 : Les coordonnées des points de mesure

Coordonnés des points de mesure	X	Y	Z
C1	0	0	0,5
C2	0,919	-0,919	1,5
C3	-0,919	0,919	2,5
C4	1,944	-1,944	4,5
C5	-1,944	1,944	4,5
C6	-7	0	3,25
C7	0	-7	3,75
C8	7	0	4,25
C9	0	7	3,75

Les températures sont relevées dans les points de mesures représentés dans le tableau III.1. La figure suivante montre l'évolution de la température au cours des différentes phases de soudage FSW.

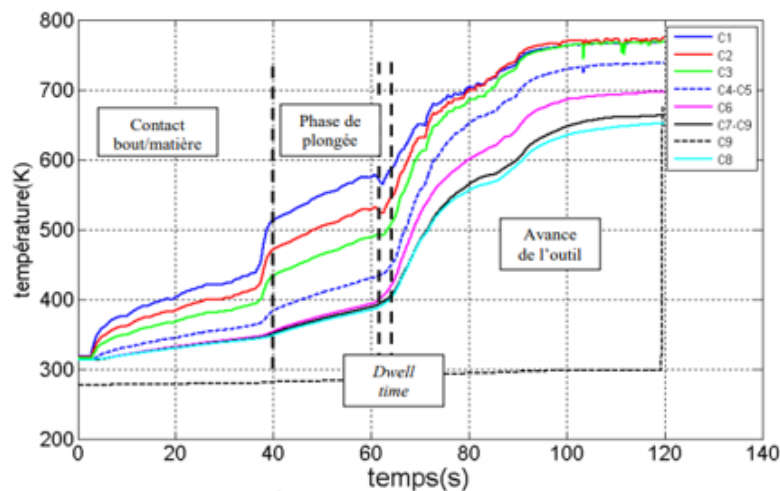


Figure III.1 : évolution de la température aux cours du FSW [27].

III.1.3 Implémentation du modèle éléments finis sous MATLAB

Pour chaque phase de soudage, il a cherché à identifier un seul flux thermique. Pour résoudre ce problème, il a intégré le modèle éléments finis dans un code MATLAB. Les flux thermiques sont appliqués pendant une durée bien déterminée correspondante à la durée de chaque phase.

Le flux à identifier est appliqué sur la partie de l'outil en tenant compte de la répartition spatiale (figure III.1). Le flux thermique inconnu est itéré jusqu'à l'obtention d'un flux thermique identifié donnant un écart faible entre la température expérimentale maximale et celle obtenue par la simulation du modèle éléments finis.

Pour trouver chaque fois le flux, il a conditionné la température maximale dans un point de mesure par la valeur correspondante aux mesures dans le même point.

Après quelques simulations, il a pu choisir une valeur de coefficient de relaxation permettant de converger rapidement vers la valeur de flux

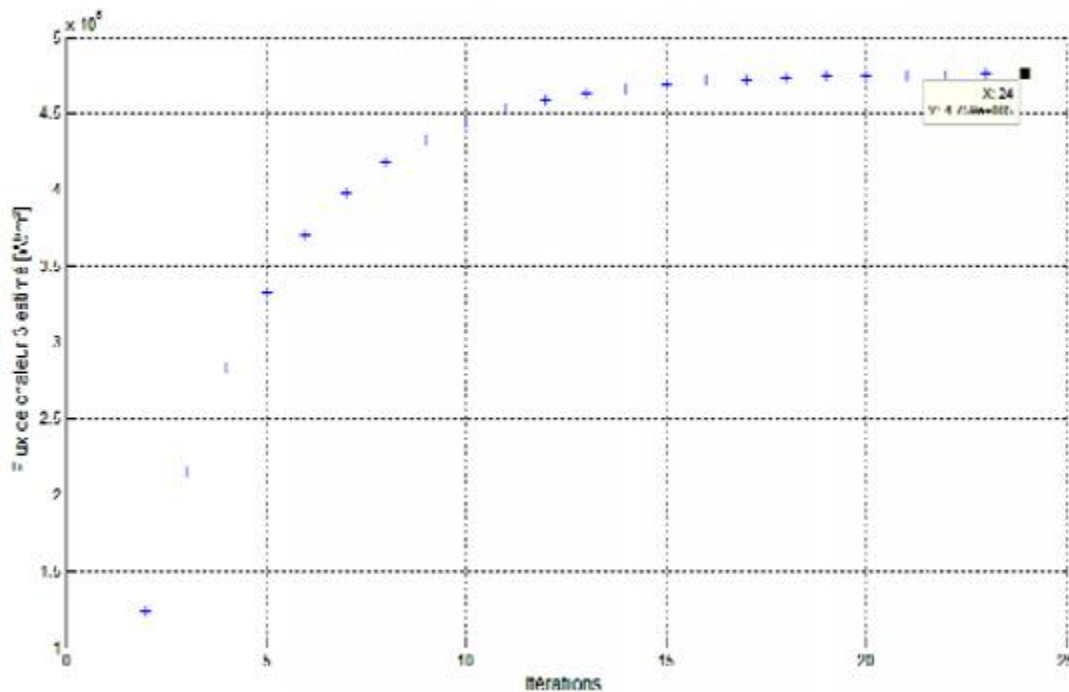


Figure III.2 : Identification des flux dans l'outil pendant la phase de soudage

L'algorithme présente une corrélation acceptable avec les essais expérimentaux

La figure suivante présente une simulation du modèle thermique de l'outil. Elle montre le champ de température dans chaque zone de l'outil. Il s'avère que les températures maximales sont atteintes dans le pion. Ce dernier est exposé à une fatigue thermique qui peut causer sa rupture.

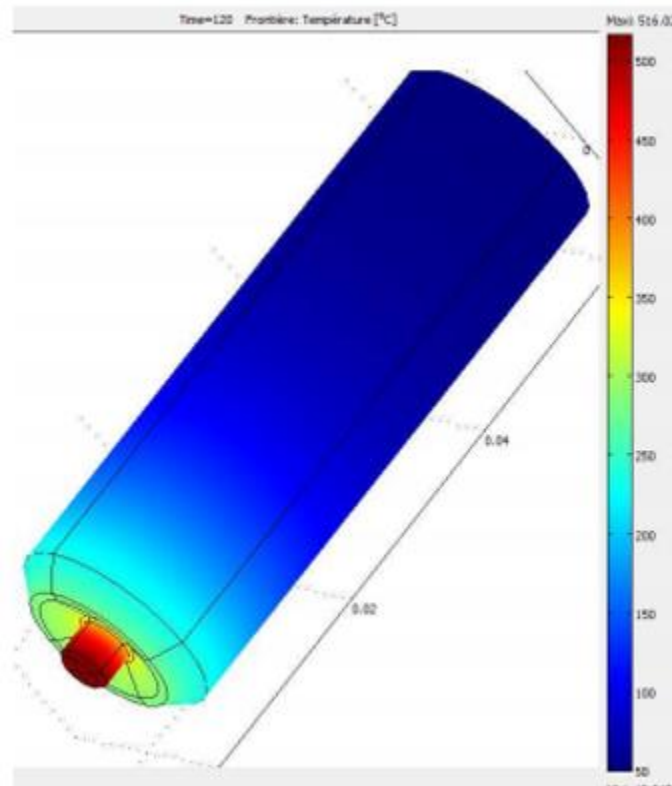


Figure III.3 : Champ de température dans l'outil FSW

III.1.4 Bilan énergétique

Il a fait un bilan énergétique pour mieux comprendre les processus mécaniques et thermiques qui permettant la formation du cordon, la figure ci-dessous présente un schéma simplifié de la répartition de l'énergie mécanique totale

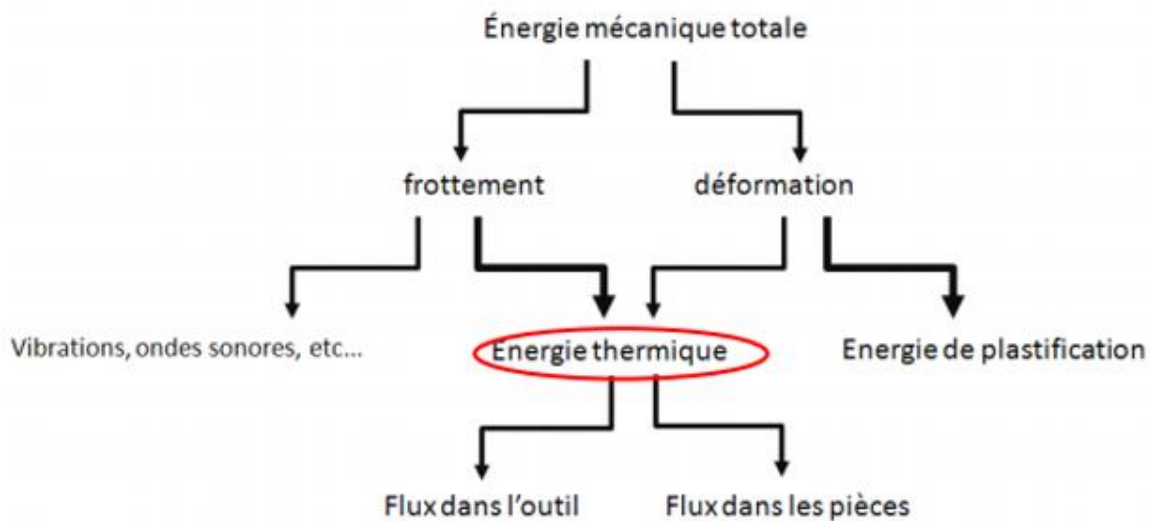


Figure III.4 : Présentation d'un bilan énergétique en FSW

III.1.5 Calcul des flux dans les pièces à souder

La modélisation des phénomènes thermiques au cours du soudage par friction malaxage nécessite une étude énergétique permettant de définir le contact outil/matière. L'énergie thermique ainsi que son partage entre deux solides en frottement a été largement étudiés dans la modélisation de la coupe orthogonale. Une telle identification permet d'évaluer les coefficients de partage.

Une telle modélisation doit permettre d'évaluer les niveaux des températures de contact et le coefficient de partage de flux généré entre les solides.

III.1.5.1 Calcul du coefficient de partage et des densités de flux

Dans son cas, il considère que la zone réelle de contact entre l'outil et la matière est égale à la totalité des surfaces de contact outil/matière sans prendre compte des aspérités. Cette hypothèse vient du fait que les différentes parties de l'outil en contact avec la matière sont plongées dans cette dernière.

En frottement sec, la chaleur produite par frottement entre deux corps est distribuée entre les deux corps avec des portions différentes. Ces portions sont exprimées par un facteur appelé coefficient de partage thermique α . On définit Le coefficient de partage du flux thermique entre deux solides comme suit :

$$\alpha = \frac{\lambda_1 \sqrt{\pi}}{\lambda_1 \sqrt{\pi} + \lambda_2 \sqrt{\frac{16}{P_e}}}$$

Avec

P_e : Est le nombre de Péclet qui caractérise la nature de contact, il définit la proportion entre la chaleur dissipée par convection et conduction

λ : Est coefficient d'effusivité thermique

Le coefficient de partage de flux entre l'outil et les pièces à souder est calculé à partir de leurs propriétés physiques. Pour calculer ce coefficient de partage on se base sur la formule utilisée par L. Fourmont. Nous supposons dans ce cas le partage de flux s'effectue selon une surface de frottement parfaite.

Les flux calculés seront exploités pour alimenter le modèle numérique de soudage FSW dans le but d'identifier la zone affectée thermiquement. Les coefficients de partage sont calculés à $T=500^\circ\text{C}$.

Tableau III.2 : Les coefficients de partage à T=500°C

	Conductivité thermique [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Densité [Kg.m ⁻³]	Capacité thermique [J.Kg.K ⁻¹]	Coefficient de Partage
Outil	28,5	7640	550	0,45
Pièces à souder	190	2770	1108	0,55

A partir des valeurs du coefficient de partage, nous calculons les densités de flux thermique entrants dans chaque zone des pièces à souder.

Tableau III.3 : Les densités de flux thermique dans les zones à souder

	Zone 1 (pièces/épaulement)	Zone 2 (pièce/surface latérale)	Zone 3 (pièces/bout de l'outil)
Densité de flux [W/m ²]	9,29. 10 ⁵	7,06. 10 ⁵	10,05. 10 ⁵

III.1.6 Simulation numérique du soudage

Dans ce cas de figure il a utilisé la méthode la plus simple, un système de coordonnées fixe est lié à l'axe de l'outil donc aux différents flux de chaleurs. La vitesse d'avance est ainsi attribuée aux plaques à souder en aluminium d'épaisseur 3 mm, où il a supposé que le contact entre les plaques à souder est parfait. Le problème de transfert de chaleur devient stationnaire de type conduction-convection gouverné par l'équation thermique d'un modèle stationnaire eulérien suivante

$$\nabla \cdot (-\nabla T) = Q - \rho C_p u \cdot \nabla T$$

Les essais expérimentaux montrent que la température autour de l'outil est asymétrique. La répartition des flux thermiques dans les pièces n'est pas symétrique. Cette asymétrie peut être observée entre le côté avance et le côté recul, elle est fonction principalement de vitesse de glissement outil/pièce et de la contrainte de cisaillement entre ces deux zones.

Condition initiale

A $t=0$ $T = T_0$:

Densité de flux thermique imposée φ_i :

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = \varphi_i$$

Le mode de transfert par convection est présenté par l'équation suivante

$$k = \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_{amb})$$

Les transferts thermiques à l'interface pièces /milieu ambiant sont modélisés par un coefficient d'échange global $h = 20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

Le transfert thermique à l'interface pièces/ enclume est modélisés par un coefficient

$$h = 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

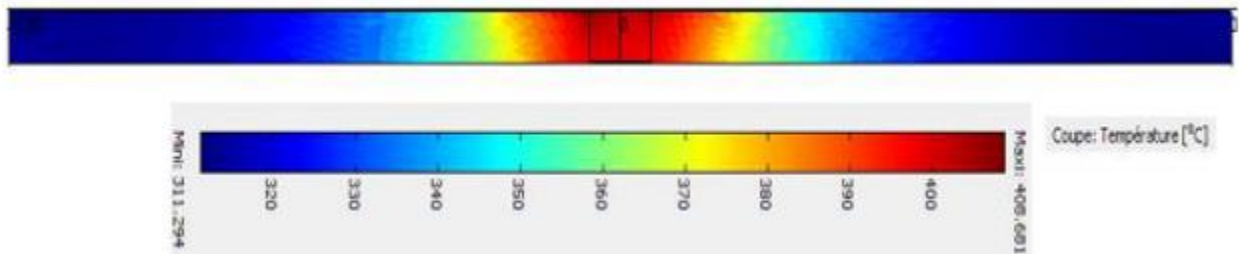


Figure III.5 : Champ de température dans les pièces à souder

La figure III.5 montre le champ de température dans les pièces à souder. Les températures maximales sont obtenues dans la zone malaxée. Un gradient de températures est observé dans la ZAT. Ce gradient à une influence sur les caractéristiques mécaniques et métallurgiques du cordon.

III.2 Thèse 2

III.2.1 Description du procédé

Cette section est consacrée à la description du procédé de soudage par frottement-malaxage. Le principe de la technologie sera d'abord présenté, puis les paramètres de soudage et leurs effets respectifs sur la qualité du soudage seront décrits. Enfin, les défauts qui peuvent se retrouver dans les joints soudés seront présentés.

III.2.2 Principe

Dans cette partie Frédéric Gemme a fait une explication détaillée sur la réalisation d'un soudage par frottement-malaxage à l'aide d'un outil cylindrique ou conique et dont l'extrémité est prolongée d'un pion, L'outil est mis en rotation par un moteur hydraulique ou électrique, il a évoqué les phases du soudage par la suite,

- **Phase de plongée :** Une translation verticale vers le bas est imposée à l'outil afin d'enfoncer le pion dans l'interface entre les pièces à assembler, jusqu'à ce que l'épaulement entre en contact avec la surface des pièces à assembler.
- **Phase d'attente :** L'outil en rotation est ensuite maintenu en place pendant quelques secondes afin d'augmenter la température du matériau environnant.
- **Phase d'avance :** Lorsque le matériau est suffisamment chaud, l'outil est soumis à un mouvement de translation horizontal dans le sens du joint.

III.2.3 Puissance et énergie de soudage

Pour calculer l'énergie de soudage il faut d'abord passer par la puissance $W_{mecanique}$ développée par la machine comme paramètre global de soudage. Cette puissance est donnée par la relation suivante :

$$W_{mecanique} = \eta M \omega$$

Avec : M est le couple exercé sur l'outil en rotation,

ω est la vitesse de rotation

η est le rendement.

Ce rendement est légèrement inférieur à 100% puisqu'une certaine quantité d'énergie est dissipée dans l'équipement sous forme de chaleur. Cela signifie que l'énergie transmise par l'outil ne va pas entièrement dans les pièces soudées.

L'énergie de soudage (H) est l'énergie fournie par unité de longueur. Elle est obtenue en divisant la puissance de soudage par la vitesse d'avance :

$$H = \frac{W_{mecanique}}{v} = \frac{\eta M \omega}{v} = \frac{\eta M}{k}$$

Où k est la distance parcourue par tour.

III.2.4 Stratégies de modélisation du soudage par frottement-malaxage

La stratégie qu'il a employé pour modéliser le procédé, dépend des résultats attendus.

Une première approche : Consiste à ne tenir compte que des aspects thermiques du problème. Ces modèles thermiques sont utilisés pour calculer la distribution de température dans le joint et son évolution au cours du soudage. Ce type de modèle permet également de prédire l'évolution de l'état de précipitation dans un alliage soumis au soudage et d'estimer les propriétés mécaniques résultantes.

Une seconde approche : Consiste à modéliser l'écoulement du matériau induit par le mouvement de l'outil. Ces modèles thermomécaniques permettent de calculer la vitesse et la puissance de déformation plastique générée par le soudage et de tenir compte du couplage thermomécanique entre les propriétés mécaniques du matériau déformé et la création de chaleur induite par la déformation plastique.

Le soudage par frottement malaxage est un procédé d'assemblage à l'état solide. Il consiste en une opération qui vise à déformer le matériau afin de produire un joint soudé. Pour cette raison, les sources de chaleur qui doivent être considérées dans la modélisation de ce procédé sont différentes de celles qu'on retrouve dans les autres procédés de soudage. En effet, la source de l'énergie de soudage n'est pas électrique comme dans le cas d'un arc électrique, mais mécanique.

III.2.5 Caractérisation mécanique

L'optimisation du procédé nécessite qu'une caractérisation mécanique des joints soit effectuée.

III.2.5.1 Microdureté

Un profil de microdureté a habituellement la forme caractéristique d'un « W » pour les alliages à durcissement structural, La (Figure III.6) présente le profil de microdureté pour 4 alliages différents

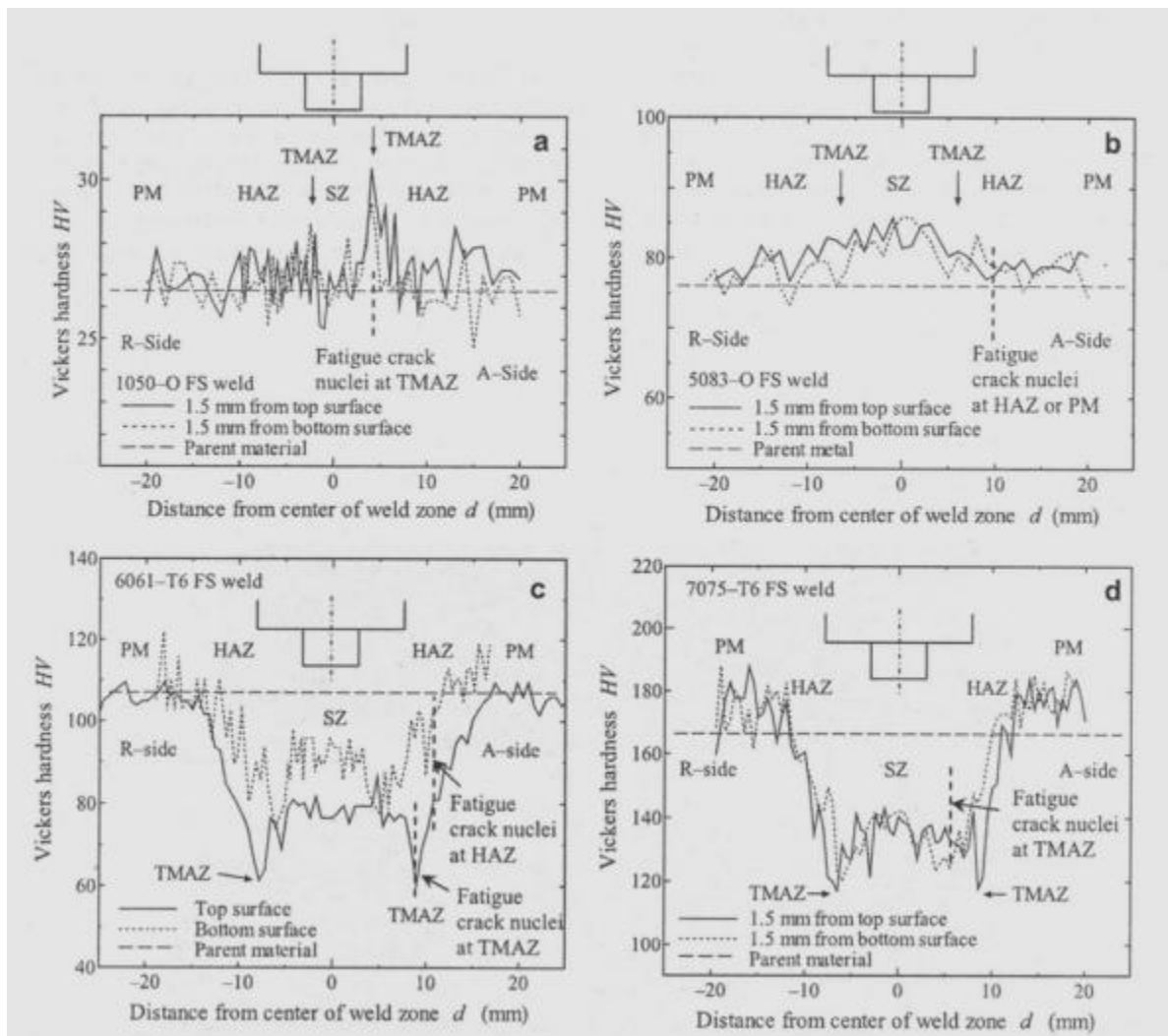


Figure III.6 : Profil de microdureté pour 4 alliages différents : a) 1050-O; b) 5083-O; c) 6061-T6; d) 7075-T6

De nombreuses mesures de microdureté ont été réalisées afin de comprendre l'effet des paramètres de soudage sur la résistance mécanique du joint. Les résultats obtenus sont souvent contradictoires. Par exemple, certains résultats montrent que la valeur de dureté dans la ZAT est relativement insensible à une variation des paramètres du procédé (Yan, Sutton et al., 2005) alors que d'autres suggèrent une dureté plus faible dans la ZAT pour une vitesse v inférieure (ω constante), mais aussi pour une vitesse de rotation inférieure (v constante) (Shuckla et Beaslack III, 2006).

La nature de l'alliage influence le résultat. Pour un alliage durci par précipitation, l'état de précipitation a une influence plus grande sur la dureté du noyau que la taille de grain (Shuckla et Beaslack III, 2006). Par contre, pour de l'aluminium commercialement pur, une baisse de la dureté est mesurée dans le noyau lorsque l'apport de chaleur augmente, puisque la taille des grains est alors plus grande (Kurt, Uygur et al., 2006).

III.2.5.2 Résistance à la traction

Le recours à l'essai de traction est courant pour caractériser mécaniquement les joints soudés ((Reynolds, Lockwood et al., 2000), (Dubourg, Gagnon et al., 2006)). De manière générale, les propriétés métallurgiques des différentes zones du joint varient en fonction de l'apport de chaleur déterminé par les paramètres de soudage. Dans ce qui suit on trouve les différentes observations qu'il a rapporté pour cette partie :

- **Pour les alliages durcis par précipitation :**

Lors de micro-essais de traction, Simar et al. (Simar, De Meester et al., 2006) ont démontré que la limite d'élasticité est la même pour le noyau et pour la ZAT, alors que la résistance à la traction est inférieure pour cette dernière. Cela serait dû à la capacité supérieure de consolidation des zones GP présentes dans le noyau, comparée à celle des précipités θ' de la ZAT. Cette différence expliquerait donc pourquoi la déformation se localise rapidement dans la ZAT lors d'essais de traction réalisés sur le joint dans son ensemble [28].

- **Pour les joints réalisés avec un faible apport de chaleur**

La rupture peut se produire dans le noyau ((Shuckla et Beaslack III, 2006), (Reynolds, Lockwood et al., 2000)). Cependant, une localisation de la déformation et de la rupture à l'interface entre le noyau et la ZATM a également été observée pour des échantillons en alliage AA2024, à l'état T6 et T351 (Genevois, Deschamps et al., 2005).

- **Pour les alliages qui ne sont pas traités thermiquement (série 5XXX)**

Pour l'alliage AA5083, une localisation de la déformation plastique dans le noyau a été observée (Peel, M., Steuwer et al., 2003). Il y a eu adoucissement du noyau durant le soudage, qui a eu pour effet d'enrayer l'écrouissage de l'alliage de base. Cela fait en sorte que la zone du noyau est plus facile à déformer plastiquement. La localisation de la déformation qui en résulte mène à la rupture.

III.2.5.3 Résistance en fatigue

La résistance en fatigue des joints bout à bout a été mesurée dans un nombre considérable d'études. Des travaux qui ont été réalisés jusqu'à maintenant, la moitié environ ont portés sur des alliages voués à un emploi en aéronautique (alliages des séries 2XXX et 7XXX), alors que l'autre moitié traite de la résistance d'alliages utilisés dans la fabrication navale, ferroviaire ou automobile (alliages des séries 5XXX et 6XXX). Dans ce qui suit, les caractéristiques des joints soudés qui influencent l'amorçage des fissures et leur propagation seront abordés.

1) Amorçage de fissures et courbes d'endurance

Plusieurs études ont été consacrées à l'alliage AA2024, qui est souvent utilisé pour fabriquer l'enveloppe du fuselage des avions. D'abord, lorsque la rupture a lieu dans la ZAT (soudure chaude), l'amorçage se produit à une interface matrice/précipité (Booth et Sinclair, 2002). L'amorçage est facilité car les précipités sont plus gros et plus incohérents dans la ZAT. Pour une soudure froide, l'amorçage des fissures se produit à la racine des rayures superficielles ou à un défaut interne et la propagation se produit le long d'une interface entre deux bandes de la structure en « pelures d'oignon ».

D'autres défauts à la surface du joint peuvent être déterminants pour la vie en fatigue de ce dernier. Par exemple, lors du soudage, le manque de pénétration (lack of penetration, LOP) peut résulter en la présence d'un défaut à la racine du joint à l'interface entre les deux pièces assemblées. La résistance en fatigue du joint peut être réduite jusqu'à 90% lorsque ce type de défaut est présent ((Dickerson et Przydatek, 2003), (Barnes, McMichael et al., 2006), (Zhou, Yang et al., 2006))

2) Vitesse de propagation

La propagation des fissures est différente lorsque la microstructure change. Les vitesses de propagation de fissures ont été mesurées dans les différentes zones d'un joint (Figure 1-18) constitué de l'alliage AA7050-T7451 (Jata, Sankaran et al., 2000). Les résultats montrent qu'une fissure se propage plus rapidement dans le noyau et que la rupture y est inter-granulaire. Dans la ZAT, la propagation de la fissure se fait plus lentement.

Une étude portant sur la vitesse de propagation de fissure dans les différentes zones d'un joint de AA2024-T351 a permis d'obtenir plus d'informations (Bussu et Irving, 2003).

D'abord, la vitesse de propagation d'une fissure dépend de son orientation par rapport au joint en plus de dépendre de la zone du joint où elle se trouve. Toutefois, cet écart diminue avec une augmentation de la contrainte moyenne (John, Jata et al., 2003).

Conclusion générale :

Ce mémoire avait pour ambition d'expliquer les alliages d'aluminium, nous avons bien étudié l'addition des éléments chimiques à l'aluminium afin d'améliorer ses propriétés mécaniques, la mise en forme de celui-ci (AL) peut être faite selon deux techniques : par corroyage ou par fonderie.

Aussi, le principe de soudage par friction malaxage, a tenu ses promesses en termes de réalisations d'assemblages. On a cité les différents types de soudage et leurs paramètres. Selon les documents qui nous ont été présentés suite à l'observation des phénomènes physiques : mécanique, thermique et métallurgique. Il y aurait des inconvénients et des avantages.

Pour terminer, en comparant notre recherche avec d'autres thèses, cela nous a confortés pour l'élaboration de notre mémoire.

Références

- [1] " L'aluminium et ses alliages " par M. Léon GUILLET directeur de L'Ecole Centrale, Membre de l'institut.
- [2] " Corrosion de l'Aluminium" par Christian VARGEL, Ingénieur conseil en corrosion de l'aluminium.
- [3] ASM Handbook Volume 9: Metallography and Microstructures 2004
- [4] Elleuch, K, fouvery, S. (2001) Wear analysis of a357 aluminium alloy under fretting, wear (soumise le 15 novembre 2001).
- [5] W.Chen, map for the magnesium alloy Mg-2Al-0.9 Zn (AZ91). P.246, 106-116
- [6] Blanchard, P. Colombie, c. pellerin, V. Fayelle, S, Vincent, (1991) material effects in fretting wear. Application to iron, titanium, and aluminium alloy. Metallurgical transaction A, 22A, 1535-1543
- [8] Venkateswarlu k., Das S.K., Chakraborty M., Murty B.S. (2003). Influence of thermomechanical treatment of al-5ti master alloy on its grain refining performance on aluminium. Mater. Sci. Eng. A, vol. 351, pp 237–243
- [9] Liao H., Sun Y., Sun G. (2002). Correlation between mechanical properties and amount of dendritic α -phase in as-cast near-eutectic al-11.6%si alloys modified with strontium. Mater. Sci. Eng. A, vol. 335, pp 62–66
- [10] Liao H., Sun G. (2003). Mutual poisoning effect between sr and b in al-si casting alloys. Scripta mater, vol. 48, pp 1035–1039.
- [11] Fuller C.B., Krause A.R., Dunand D.C., Seidman D.N. (2002). Microstructure and mechanical properties of a 5754-aluminum alloy modified by sc and zr additions. Mater. Sci. Eng. A, vol. 338, pp 8–16
- [12] Lathabai S., Lloyd P.G. (2002). The effect of scandium on the microstructure, mechanical properties and weldability of a cast al-mg alloy. Acta mater, vol. 50, pp 4275– 4292
- [13] Norman a.f., hyde k., costello f., thompson s., birley s., prangnell p.b. (2003). Examination of the effect of sc on 2000 and 7000 series aluminium alloy castings: for improvements in fusion welding. Mater. Sci. Eng. A, vol. 354, pp 188–198

- [14] Riahi a.r., perry t., alpas a.t. (2003). Scuffing of al-si alloys: effects of etching condition, surface roughness and particle morphology. Mater. Sci. Eng. A, vol. 343, pp 76–81
- [17] Souilah med cherif, Contribution à l'étude des déplacements résiduels générés par le soudage par friction malaxage de 2 plaques en alliages d'aluminium 2024 T3
- [18] J.C. McClure, E. Coronado, S. Aloor, B. Nowak, L.M. Murr, A.C. Nunes, Jr. Effect of Pin tool Shape on Metal Flow During Friction Stir Welding.
- [19] Mustafa Kemal Kulekci , Aydin Şik , Erdinç Kaluç. Effects of tool rotation and pin diameter on fatigue properties of friction stir welded lap joints. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Volume 36, Numbers 9-10 / avril 2008 pages 877-882.
- [20] <https://ceal-aluquebec.com/friction-malaxage-fsw/>
- [21] D. Fersini, A. Pirondi. Fatigue behaviour of Al2024-T3 friction stir welded lap joints. Engineering Fracture Mechanics 74 (2007) 468-480.
- [22] Hitachi America, Ltd.)
- [23] Le soudage par friction malaxage : principes et applications, Lyne St-Georges, éd. : Les Presses de l'aluminium, Chicoutimi, Québec (2015).
- [24] T. Watanabe, H. Takayama and A. Yanagisawa. Joining of aluminum alloy to steel by friction stir welding. J. Mater. Process. Technol. 178 (2006), pp. 342-349.
- [25] A. Sullivan and J.D. Robson. Microstructural properties of friction stir welded and post-weld heattreated 7449 aluminium alloy thick plate. Mater. Sci. Eng. 478A (2008), pp. 351-360.
- [26] J. Schneider, A. Nunes, M. Brendel. The Influence of Friction Stir Weld Tool Form and Welding Parameters on Weld Structure and Properties: Nugget Bulge in Self- Reacting Friction Stir Welds. 8th International Symposium on Friction Stir Welding, Germany.
- [27] Nejah Jamal. Qualification du domaine de soudabilité en soudage FSW. Ecole national supérieure d'arts et métiers. France 2011
- [28] Frédéric Gemme. Modélisation numérique des phénomènes du soudage FSW et comportement en fatigue de joint soudé en aluminium 7075-T6. Ecole polytechnique de Montréal Canada

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du Diplôme de Master en
GÉNIE MÉCANIQUE
SPÉCIALITÉ : INGÉNIERIE DES MATÉRIAUX ET DES SURFACES

SYNTHÈSE DE SOUDAGE DES ALLIAGES D'ALUMINIUM
PAR LE PROCÈDE DE SOUDAGE FRICTION
MALAXAGE (FSW)

Proposé et encadré par :
Pr. Mustapha Temmar

Réalisé par :
MERAGA MEHDI
MEZIANI ROMAÏSSA

Année universitaire 2019/2020