

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
RÉPUBLIQUE ALGERIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة سعد دحلب البليدة
UNIVERSITÉ SAAD DAHLAB DE BLIDA



FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE MÉCANIQUE

Projet de fin d'études

Pour l'obtention de diplôme de

Master en Génie Mécanique et Matériaux

Titre:

Détermination de la distribution de la température dans les
différentes zones obtenues lors du soudage des alliages d'aluminium
7075 T6 par le procédé de soudage FSW

Proposé et encadré par :
Dr M.Temmar
Melle N.Melzi

Etudié par:
L.Melikaoui
M.Bouchakour

Année universitaire 2015/2016

Remerciement

Au terme de ce travail, nous tenons à remercier tout d'abord **ALLAH** pour nous avoir éclairé notre vie, renforcé notre courage pour achever notre formation et atteindre nos objectifs dans les meilleures conditions.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre enseignant **Dr M.TEMMAR** et Melle **N.Melzi** pour nous avoir guidées lors de la réalisation de notre projet de fin d'études.

Nos sentiments de gratitude s'adressent également aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait à travers la soutenance.

Nos très cordiaux remerciements vont aussi à tous nos enseignants pour tous les efforts conjugués tout au long de notre formation, et surtout **Mr H.Aggoun**.

Dédicaces

Je rends grâce à dieu le miséricordieux, qui m'a permis d'arriver à ce but.

Je dédie à travers ce modeste travail

A ma Grande mère

Qui m'a encourager beaucoup

Et mes très chères parents, surtout à ma mère, pour son affection, et surtout son soutien morale, que dieu les gardes pour moi.

A mes deux frères

A mon binôme Leila

A mes amies et amis qui n'ont jamais cessés de m'encourager et d'être présents dans les pires moments

Et pour toute ma famille sans exception...

MERCI A TOUS

****MERIEM****

J'ai l'immense plaisir de dédier ce modeste travail :

A mes chers parents qui m'ont toujours soutenu, que dieu les protège.

A mes sœurs, et mes frères

*A mes amies et amis qui n'ont jamais cessé d'encourager et d'être
présents dans les pires moments*

Et pour toute ma famille sans exception...

A mon binôme Meriem.

MERCI A TOUS

****Leila****

Conclusion générale

Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes intéressés aux alliages d'aluminium 7075 T6. Ces alliages contiennent Zn, Mg et Cu comme principaux éléments d'addition.

La première partie de notre recherche bibliographique a montré qu'il est nécessaire de connaître l'évolution de leurs propriétés d'une manière intégrée tout au long du processus d'élaboration. Ces propriétés mécaniques sont en partie liées à la nature et à la proportion des éléments de ces alliages qui les composent.

La deuxième partie de notre recherche bibliographique a montré que ces alliages sont dans l'ensemble difficilement soudables car d'une part, ils sont sujets aux criques lors de la solidification de la soudure et d'autre part, leurs caractéristiques mécaniques après soudage sont fortement diminuées. Cependant, l'utilisation du procédé de soudage par friction malaxage FSW peut améliorer certains de ces résultats.

La dernière partie fut consacrée à la modélisation et à la simulation numérique d'un procédé de soudage utilisé récemment en industrie pour l'assemblage des tôles métalliques sans avoir recours à l'utilisation d'une source de chaleur extérieure contrairement aux techniques de soudage traditionnelles comme le soudage à l'arc et le soudage au laser. Il s'agit du procédé FSW. Ce procédé s'adapte aux alliages d'aluminium et à d'autres alliages métalliques sans atteindre leur température de fusion ce qui est difficilement réalisable avec les procédés de soudage habituels.

L'utilisation de plusieurs logiciels suivant la nature des résultats souhaités est actuellement incontournable pour traiter les différents phénomènes physiques engendrés par l'opération de soudage F.S.W. (champ de températures, déformations, contraintes résiduelles, flux de matière,...).

Au travers de différents résultats montrés, nous avons pu mettre en évidence la formulation de lagrangienne développée pour simulation numérique et cela s'avère tout à fait efficace pour modéliser le procédé FSW. Cette partie numérique a été réalisée à l'aide du code Ansys. Dans cette contribution, nous avons proposé un modèle basé sur la méthode des éléments finis pour modéliser le procédé. L'avantage de cette technique est la simulation de l'écoulement thermomécaniques lors du malaxage de la matière autour de l'outil et de prédire la température...

Les résultats obtenus sont acceptables du fait qu'ils ont été comparés à d'autres travaux.

Sommaire

Introduction Générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre 1: Aluminium et alliages d'aluminium

1.1. Introduction.....	4
1.2. Généralités.....	4
1.3. Principales caractéristiques de l'aluminium.....	6
1.3.1. Propriétés physiques.....	6
1.3.2. Propriétés chimiques.....	6
1.3.3. Propriétés électriques.....	7
1.3.4. Propriétés mécaniques.....	7
1.3.5. Propriétés de mise en forme.....	7
1.4. Dénomination des alliages d'aluminiums.....	8
1.5. Les alliages trempant.....	9
1.5.1. Description du traitement thermique des alliages d'aluminium trempant.....	9
1.6. Les alliages non-trempant (ou à durcissement par écrouissage).....	11
1.7. Les désignations des états métallurgiques.....	12
1.7.1. Subdivisions de l'état T.....	13
1.8. Comparaison des caractéristiques mécaniques des différents alliages d'aluminium.....	14
1.9. Soudabilité des alliages d'aluminium	15
1.9.1. Les problèmes de soufflures.....	15
1.9.2. La fissuration à chaud.....	16
1.10. Les alliages d'aluminium 7075 T6.....	17
1.10.1. La série 7000 (aluminium zinc).....	17

1.10.2. Les alliages 7000 avec cuivre.....	18
1.10.3. Les alliages 7000 sans cuivre.....	18
1.11. Domaine d'utilisation.....	18

Chapitre 2 : Le procédé de soudage

2.1. Introduction.....	21
2.2. Description du procédé de soudage.....	22
2.2.1. Définition	22
2.2.2. Le soudage en phase solide.....	23
2.2.3. Le soudage par friction.....	24
2.2.4. Soudage par friction malaxage (FSW).....	26
2.2.4.1 : Outil de soudage.....	29
2.2.4.2 : Paramètres du procédé.....	32
2.2.5 : Principe général du soudage par friction malaxage (FSW).....	33
2.2.6. Caractérisation métallurgique de la zone soudée par FSW.....	36
A/ Métal de base (MB).....	37
B/ Zone affectée thermiquement (ZAT).....	37
C/ Zone affectée thermomécaniquement (ZATM).....	37
D/ Noyau soudé.....	37
E/ Dureté en travers du joint.....	38
E/1. Durcissement par écrouissage.....	38
E/2. Durcissement par précipitation.....	39

Chapitre 3 :Matériaux et Procédures expérimentales

3.1. Présentation du matériau utilisé.....	41
3.2. Caractéristiques du matériau	41
3.2.1. Composition chimique.....	41
3.2.2. Propriétés mécaniques et physiques.....	42
3.3. Technique de soudage par friction malaxage FSW.....	43
3.3.1. Préparation des tôles à souder.....	44
3.3.2. Contrôle des soudures.....	47
3.3.2. A : Contrôle avant le soudage.....	47
3.3.2. B : Contrôle pendant le soudage.....	48
3.3.2. C : Contrôle après le soudage.....	48
3.3.3 : Technique de Soudage friction malaxage.....	48

Chapitre 4 :Présentation générale du modèle de simulation de la température dans les différentes zones obtenues lors du

Soudage FSW

4.1. Introduction 53.....	
4.2. Modèle analytique proposé.....	54
4.3. Modélisation numérique.....	55
4.4.Le maillage et la gestion de contact.....	57
4.5. Résultats obtenus.....	58
4.5.1. La distribution de la température en soudage FSW.....	58

Conclusion général.....62

Liste des figures

<u>Figure 1.1</u> : Principaux stades et flux dans la fabrication de l'aluminium.....	5
<u>Figure 1.2</u> : Désignation des alliages d'aluminium.....	8
<u>Figure 1.3</u> : Représentation schématique du traitement thermique de durcissement.....	9
<u>Figure 1.4</u> : Evolution de la dureté au cours des revenus après trempe pour un alliage.....	10
<u>Figure 1.5</u> : Cycle de température lors du soudage par FSW d'alliage.....	11
<u>Figure 1.6</u> : Exemple de dislocation dans la structure du matériau.....	12
<u>Figure 1.7</u> : Les différents états de durcissement par précipitation.....	13
<u>Figure 1.8</u> : Subdivisions de l'état T (Traité thermiquement avec mise en solution séparée)13..	
<u>Figure 1.9</u> : Subdivisions de l'état T (Traité thermiquement sans mise en solution séparée)14..	
<u>Figure 1.10</u> : Comparaison des caractéristiques mécaniques des différents alliages d'aluminium.....	15
<u>Figure 1.11</u> : Apparition de soufflures dues à l'alumine (soudage à la limite du collage).....	15
<u>Figure 1.12</u> : Sensibilité à la fissuration à chaud des alliages d'aluminium.....	17
<u>Figure 1.13</u> : Soudabilité des alliages d'aluminium.....	17
<u>Figure 1.14</u> : Exemple d'utilisation des alliages d'aluminium en aéronautique.....	18
<u>Figure 2.1</u> : Schéma simplifié du gain de masse Rivet et Soudure.....	21
<u>Figure 2.2</u> : Les différents procédés de soudage.....	22
<u>Figure 2.3</u> : Sources thermiques et densités d'énergie.....	23
<u>Figure 2.4</u> : Schéma de principe d'une variante du procédé de soudage par friction.....	25
<u>Figure 2.5</u> : Schéma du procédé de soudage par friction.....	25
<u>Figure 2.6</u> : Assemblage de l'avion Eclipse avec le procédé de FSW.....	27
<u>Figure 2.7</u> : Bateau en aluminium construit en utilisant le procédé FSW.....	27

<u>Figure 2.8</u> : Technique de soudage des carrosseries des trains Hitachi.....	28
<u>Figure 2.9</u> : Application du procédé de FSW par points dans l'industrie automobile.....	28
<u>Figure 2.10</u> : Opération de soudage FSW.....	29
<u>Figure 2.11</u> : Outil FSW.....	30
<u>Figure 2.12</u> : Principales composantes de l'outil de soudage.....	31
<u>Figure 2.13</u> : Type d'épaulement.....	31
<u>Figure 2.14</u> : Types classiques d'outils.....	31
<u>Figure 2.15</u> : Principe général du procédé de soudage par friction malaxage.....	33
<u>Figure 2.16</u> : Etapes du procédé de FSW.....	34
<u>Figure 2.17</u> : Phase de Pénétration de l'outil.....	34
<u>Figure 2.18</u> : Phase de Préchauffage.....	35
<u>Figure 2.19</u> : Phase de soudage.....	36
<u>Figure 2.20</u> : Phase de retrait de l'outil.....	36
<u>Figure 2.21</u> : Coupe macrographique d'un joint soudé par FSW sur un alliage d'aluminium.....	37
<u>Figure 2.22</u> : Formes de noyaux.....	38
<u>Figure 2.23</u> : Durcissement par écrouissage.....	39
<u>Figure 2.24</u> : Durcissement par précipitation.....	39
<u>Figure 3.1</u> : Plaque brute d'aluminium 7075 T6 (épaisseur = 3 mm).....	41
<u>Figure 3.2</u> : Outil FSW.....	43
<u>Figure 3.3</u> : Fraiseuse verticale.....	44
<u>Figure 3.4</u> : Bridage.....	45
<u>Figure 3.5</u> : Schéma du procédé de soudage.....	45
<u>Figure 3.6</u> : Etapes de soudage.....	46

<u>Figure 3.7</u> : Plaques soudées.....	46
<u>Figure 3.8</u> : Micrographie d'un échantillon soudé montrant les différentes zones de soudage.....	46
<u>Figure 3.9</u> : Cordon de soudure FSW de notre matériau.....	49
<u>Figure 3.10</u> : profils thermiques obtenus lors du soudage d'un alliage 7075 en fonction de la vitesse.....	50
<u>Figure 3.11</u> : Cartographie de la température lors du soudage par FSW de deux toles 7075-T6.....	51
<u>Figure 4.1</u> : configuration d'assemblage pion/pièce 54.....	
<u>Figure 4.2</u> : Dimensions du domaine d'étude et conditions aux limites.....	56
<u>Figure 4.3</u> : modélisation de pion/ pièce par Ansys.....	57
<u>Figure 4.4</u> : Méthode appliquée pour le contact pion / pièce.....	58
<u>Figure 4.5</u> : Profil initial de température à l'instant T1.....	59
<u>Figure 4.6</u> : Profil initial de température à l'instant T2.....	60
<u>Figure 4.7</u> : Influence de la fraction d'énergie transmise sur l'évolution de l'échauffement (°C) de la tôle dans le cas d'un contact nodal.....	60
<u>Figure 4.8</u> : Influence de la fraction d'énergie transmise sur l'évolution de l'échauffement (°C) de la tôle dans le cas d'un contact surfacique.....	61

Liste des tableaux

<u>Tableau 1.1</u> : Désignation des alliages d'aluminium.....	4
<u>Tableau 1.2</u> : Propriétés mécaniques typiques de quelques métaux.....	7
<u>Tableau 1.3</u> : Comparaison entre les alliages d'aluminium et d'autres matériaux subissant les mêmes sollicitations (flambage).....	19
<u>Tableau 3.1</u> : Composition chimique (% en poids) des échantillons d'alliage d'aluminium 7075 T641.....	
<u>Tableau 3.2</u> : caractéristique mécaniques et physiques de l'alliage 7075.....	42
<u>Tableau 4.1</u> : Caractéristiques mécaniques du matériau.....	56

Bibliographie

- [1.2] J.Lanthony, Aluminium et alliages légers, Ed. Presses universitaires de France, Paris, pp 55, 1984.
- [1.2] J.Barralis et G.Maeder, Métallurgie, élaboration, structures-propriétés, normalisation, Afnor, Edition Nathan, Septembre 2004
- [1.3] R.Develay, Propriétés de l'aluminium et des alliages d'aluminium corroyés, ENS d'électrochimie et d'électrometallurgie de Grenoble, 1996
- [1.4] M.Bernard, Cours de chimie minérale, 2ème édition, Ed Dunod, 1994
- [1.5] J.Embury and R.Nicholson, The nucleation of precipitates: The system Al-Zn-Mg, Acta Metallurgica, 13 (4), pp 403-417, April 1965
- [1.6] D.Dumont, thèse de doctorat, Relations Microstructure / Ténacité dans les alliages aéronautiques de la série 7000, 2001.
- [1.7] W.Richards, Aluminium, Its history, occurrence, properties, metallurgy and application, including its alloys, 2009
- [1.8] Introduction à la science des matériaux pour l'ingénieur, module A1, première année, E.N.S.E.E.G, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1998/1999
- [1.9] M.Temmar, Etude des effets des traitements thermiques sur les propriétés structurales et mécaniques de l'alliage d'aluminium 7075 T6 soudés par le procédé de soudage TIG, Thèse de Doctorat d'Etat, Université Saad Dahlab de Blida, Janvier 2012
- [1.10] B.Dubost et P.Sainfort, Durcissement par précipitation des alliages d'aluminium, Techniques de l'ingénieur, M240, 1985
- [1.11] J.D.Embury, and R.B.Nicholson, Acta Metall. 13, 403, 1965
- [1.12] Y.HUNSICKER, La métallurgie des traitements thermiques de l'Aluminium, vol 1, pp 109-61, 36 fig., bibl. 29 réf, 1967
- [1.13] K.Wilfried, Introduction à la science des matériaux, 2ème édition presses polytechniques et universitaires romandes, 1991
- [1.14] R.Develay, Traitement thermiques des alliages d'aluminium. Techniques de l'ingénieur. M1290, M1291, 1986
- [1.15] A.Deschamps, Thèse de doctorat, Influence de la prédéformation et des traitements thermiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques des alliages Al-Zn-Mg-Cu, 1997

- [1.16] D.Dumont, thèse de doctorat, Relations Microstructure / Ténacité dans les alliages aéronautiques de la série 7000, 2001.
- [1.17] R.Ayer, J.Y.Koo, J.X.Steeds and B.K.Park, Metallurgical transactions A16, 1925, 1985
- [1.18] J.K.Park and A.J.Ardell, Microstructures of the commercial 7075 Al alloy in the T651 and T7 tempers, Metallurgical transactions A, Vol. 14, page 1957-1965, Oct 1983
- [2.1] Bertaux, Les assemblages mécaniques structuraux en aéronautique civile, fixations et procédés d'assemblages, Compte rendu de conférence Mecamat, Aussois, 20-24 Janvier, 2003
- [2.2] P.F.Mendez and T.W. Eagar, Welding Processes in Aeronautics, Advanced Materials & Processes, pages 39-43, May, 2001
- [2.3] CETIM, Mécanosoudage, ISBN 2-85400-146-X, 1989.
- [2.4] R.Y.Hwang and C.P.Chou, The study on microstructural and mechanical properties of weld heat affected zone of 7075-T6 aluminum alloy. ScriptaMaterialia,
- [2.5] W.M.Thomas, E.D.Nicholas, E.R.Watts, Staines DG: Friction based welding technology for aluminium, Materials Science Forum, Vol. 396-402, 2002, p.1543-1548.
- [2.6] T.Ma and G.Ouden, Softening behaviour of Al-Zn-Mg alloys due to welding, materials science and engineering A, Vol. A266, pp.198-204, 1999
- [2.7] W.J.Arbegast, Chapitre 13, Application of FSW and related technologies, edited by R.S.Mishra et N.W.Mohoney, ASM International, 2007
- [2.8] C.E.D, Rowe, Wayne Thomas, Advances in tooling materials for FSW
- [2.9] R.Y.Hwang and C.P.Chou, The study on microstructural and mechanical properties of weld heat affected zone of 7075-T6 aluminum alloy. ScriptaMaterialia, Vol. 38, no. 2, p.215-221, 1998
- [2.10] M.Clyde and C.M.Adams, Cooling rates and peak temperatures in fusing welding, welding research Supplement, mai 1958
- [2.11]. Burford, D. A., Tweedy, B. M., & Widener, C. A. (2006). Influence of shoulder configuration and geometric features on FSW track properties. 6th International Symposium on Friction Stir Welding, St-Sauveur, Canada TWI.
- [2.12] Cécile GENEVOIS. Genèse des microstructures lors du soudage par friction malaxage d'alliages d'aluminium de la série 2000 & 5000 et comportement mécanique résultant. thèse de doctorat. 2004.
- [3.3] G. Bussuet P.E. Irving. Proceedings of 1st International on Friction Stir welding, Thousand Oaks, California, USA, June 1999.

[4.1] Thomas W. M., Nicholas E. D., Needham J. C., Church M. G., Templesmith, P., Dawes C., " Intl. Patent Application no. PCT/GB92/02203 and GB Patent Application no. 9125978.9, 1991.",

[4.2] Guerdoux S., Fourment L. , " A 3D numerical simulation of different phases of friction stir welding", Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, volume 17, issue 7, 2009

[4.3]]Guedoiri A., Moufki A., Favier V., Zahrouni H., " An analysis of boundary condition effects on the thermomechanical modeling of the FSW process", AIP Conference Proceedings, doi : 10.1063/1.3552568, volume 1315, pages 911-916, 2011

[4.4] Lorrain O., Serri J., Favier V., Zahrouni H., El Hadrouz M., " A contribution to a critical review of FSW numerical simulation", Journal of mechanics of materials and structures, volume 4, issue 2, pages 351-369, 2009

[4.5] Jacquin D., de Meester B., Simar A., Deloison D., Montheillet F., Desrayaud C., " A simple Eulerian thermomechanical modeling of friction stir welding", Journal of Materials Processing Technology, volume 211, pages 57-65, 2011

[4.6] Bastier A., Maitournam M. H., Van K. Dang, et al, " Steady state thermomechanical modelling of friction stir welding", Science and Technology of Welding and Joining, volume 11, pages 278-288, 2006

[4.7] Schmidt H., Hattel J., " A local model for the thermomechanical conditions in friction stir welding", Modelling And Simulation In Material Science And Engineering, volume 13, pages 77-93, 2004

[4.8] Feulvarch E., Gooroochur Y., Boitout F., Bergheau J.M., " 3D Modelling of Thermofluid Flow in Friction Stir Welding", Trends in Welding Research, Proceedings, pages 261-266, 2006

[4.9] Zhou J., Li L., Duszczyc J., " 3D FEM simulation of the whole cycle of aluminium extrusion throughout the transient state and the steady state using the updated Lagrangian approach", Journal of Materials Processing Technology, volume 134, pages 383-397, 2003

[4.10] Liu G.R., Liu M.B., "Smoothed Particle Hydrodynamics : a meshfree particle method", World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 5 Toh Tuck Link, Singapore 596224, 2003

Chapitre : 1

Aluminium et alliages d'aluminium

1.1. Introduction :

Afin d'améliorer les propriétés mécaniques de l'aluminium pur, des éléments d'alliages lui sont ajoutés au cours de son élaboration. Les éléments les plus couramment utilisés sont le cuivre, le manganèse, le silicium, le zinc, le magnésium et le lithium.

Les différents alliages obtenus peuvent être répertoriés en sept classes (plus communément appelées « séries ») répartissant les alliages selon l'élément principal d'addition.

Les alliages d'aluminium peuvent être répartis dans sept différentes séries:

Tableau 1.1 : Désignation des alliages d'aluminium

Série	Éléments d'alliage principal
1000	Aluminium pur
2000	Alliage aluminium – cuivre
3000	Alliage aluminium – manganèse
4000	Alliage aluminium – silicium
5000	Alliage aluminium – magnésium
6000	Alliage aluminium - magnésium et silicium
7000	Alliage aluminium – zinc

Les propriétés métallurgiques de l'alliage obtenues sont fonction de l'élément d'addition. On peut alors classer ces alliages dans deux différentes catégories, les alliages dits trempant (ou durci sable par précipitation) et non trempant (ou à durcissement par écrouissage).

1.2. Généralités :

L'aluminium se trouve à l'état naturel sous forme de minerai oxydé: la **bauxite**.

Celle-ci contient des oxydes d'aluminium, de fer, de silicium et de titane. L'aluminium en est extrait par deux étapes:

- Extraction de l'alumine à partir de la bauxite par des procédés chimiques et thermiques,
- Electrolyse de l'alumine en solution.

La production d'une tonne d'aluminium nécessite :

- 5 tonnes de bauxite pour extraire 2 tonnes d'alumine,
- 14 000 KWh (tension continue de 7 à 8 V). [1.1].

Les principaux stades et flux dans la fabrication de l'aluminium sont représentés dans la figure 1.1 :

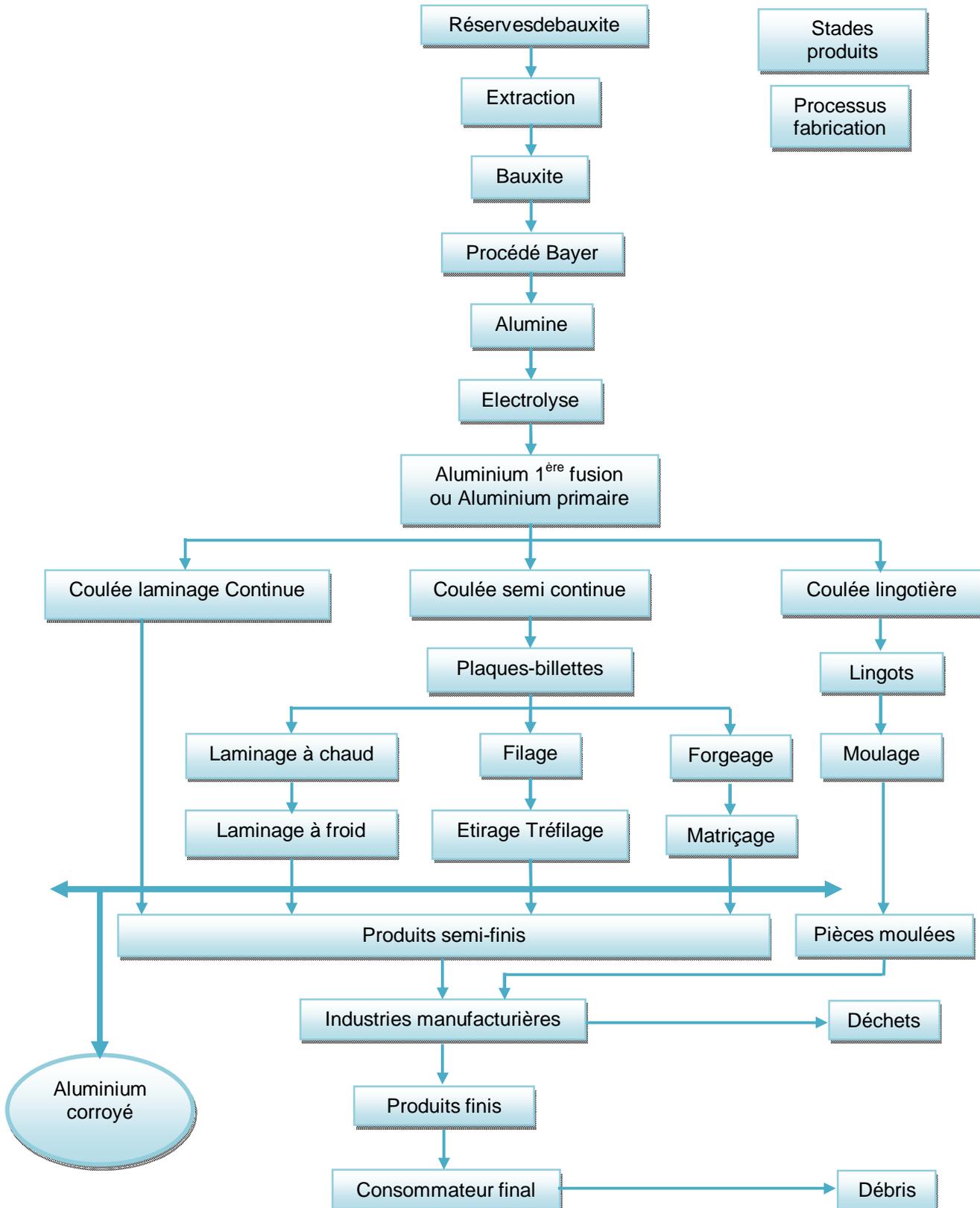


Figure 1.1 : Principaux stades et flux dans la fabrication de l'aluminium

L'aluminium représente le troisième élément de l'écorce terrestre en quantité, après l'oxygène et le silicium. Ce métal est connu depuis le début du 19^{ème} siècle, et fut longtemps considéré comme un métal précieux en raison de la difficulté de réduction de l'oxyde d'aluminium, forme sous laquelle il est présent dans la nature. C'est en 1886 que Héroult en France et Hall aux Etats-Unis découvrirent simultanément le procédé d'électrolyse de l'oxyde d'aluminium dissous dans un bain de cryolithe en fusion.

Cette découverte a permis le développement de l'aluminium, devenu aujourd'hui le principal métal non ferreux industriel. [1.2]

En tonnage, la production d'aluminium ne représente que 2% environ de celle des aciers. Cependant, ce métal et ses alliages occupent la seconde position dans l'utilisation des matériaux métalliques.[1.3]

L'aluminium doit cette place à un ensemble de propriétés qui en font un matériau remarquable.

1.3. Principales caractéristiques de l'aluminium :

1.3.1. Propriétés physiques :

Grâce à sa masse volumique qui est de 2700 Kg/m^3 , son utilisation s'impose dans les domaines de la construction aéronautique et du transport.

Sa conductivité thermique, λ , est égale à 222 W/m.K .

1.3.2. Propriétés chimiques :

Grâce à la couche d'oxyde qui se forme en surface, les alliages d'aluminium résistent à la corrosion. Cette couche protectrice d'oxyde est rendue plus épaisse par anodisation. Ainsi, les alliages d'aluminium peuvent alors être utilisés sans protection supplémentaire comme revêtements extérieurs de bâtiments.

Par contre, dans les milieux corrosifs, les alliages d'aluminium peuvent subir des effets négatifs. Des piqûres, de la corrosion sous contrainte, de la fatigue-corrosion, et même de la corrosion généralisée peuvent se développer. Pour des conditions données, la sévérité de l'attaque dépend de l'alliage utilisé et de son état.

1.3.3. Propriétés électriques :

L'aluminium possède une bonne conductivité.

Sa résistivité, ρ , est de l'ordre de $2,8 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ et son coefficient de température égal à $4,3 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

La conductibilité électrique de l'aluminium commercialement pur atteint 62% de celle du cuivre. Cependant, la masse volumique du cuivre est plus élevée que celle de l'aluminium.

Un conducteur en aluminium, dont la masse volumique est inférieure à celle d'un conducteur en cuivre, s'échauffe moins. [1.4].

1.3.4. Propriétés mécaniques :

L'aluminium, commercialement pur et ayant une faible résistance à la rupture, possède à l'état recuit des propriétés mécaniques faibles. On peut toutefois améliorer considérablement ces propriétés par l'écrouissage, l'addition d'éléments d'alliage ou les traitements thermiques, selon les cas.

L'aluminium et ses alliages ont une structure cristalline cubique à faces centrées. Ils font donc preuve, à l'état recuit, d'une excellente ductilité à toute température.

Tableau 1.2 : Propriétés mécaniques typiques de quelques métaux [1.6]

Alliage métallique	Limite conventionnelle d'élasticité(MPa)	Résistance à la traction (MPa)	Allongement à la Rupture (A%(
Acier (1020)	180	380	25
Aluminium	35	90	40
Cuivre	69	200	45

1.3.5. Propriétés de mise en forme :

L'aluminium a une température de fusion relativement basse, d'environ 660°C . Il en résulte une facilité de fusion qui représente un avantage certain pour les opérations de fonderie.

L'aluminium est très ductile, on peut aisément le mettre en forme à l'état solide, par déformation plastique.[1.7]

Ce matériau peut être mise en forme soit par corroyage, soit par fonderie.

On peut lui faire subir :

- A froid : laminage, filage, pliage,...
- A chaud : moulage, soudage,
- usinage,...

Les sept séries définies peuvent être réparties dans deux catégories :

- Les alliages trempant : Séries 2000, 6000, 7000,
- Les alliages non-trempant : Séries 1000, 3000, 4000, 5000.

Dans ces deux catégories, il est possible d'améliorer les propriétés mécaniques de l'alliage, mais la procédure opératoire n'est pas identique. Cette différence provient de l'élément d'alliage qui lui est incorporé, de sa solubilité dans l'aluminium à l'état solide et du pouvoir durcissant de ses précipités avec l'aluminium. Pour améliorer les propriétés mécaniques des alliages trempant, il est possible de provoquer un durcissement par précipitation et/ou par écrouissage alors que les alliages non trempant ne peuvent durcir que par écrouissage, c'est-à-dire par déformation plastique à froid. [1.8].

1.4. Dénomination des alliages d'aluminiums :

Les alliages de chaque série sont désignés par 4 chiffres. Voir la figure 1.2, dont le premier désigne l'élément d'alliage principal (exemple 2xxx, le 2 désignant un alliage aluminium - cuivre). Les deux derniers chiffres sont désignés arbitrairement afin d'identifier un alliage spécifique, sauf pour la série 1000 où ils désignent les décimales du pourcentage d'aluminium au-delà de 99%.

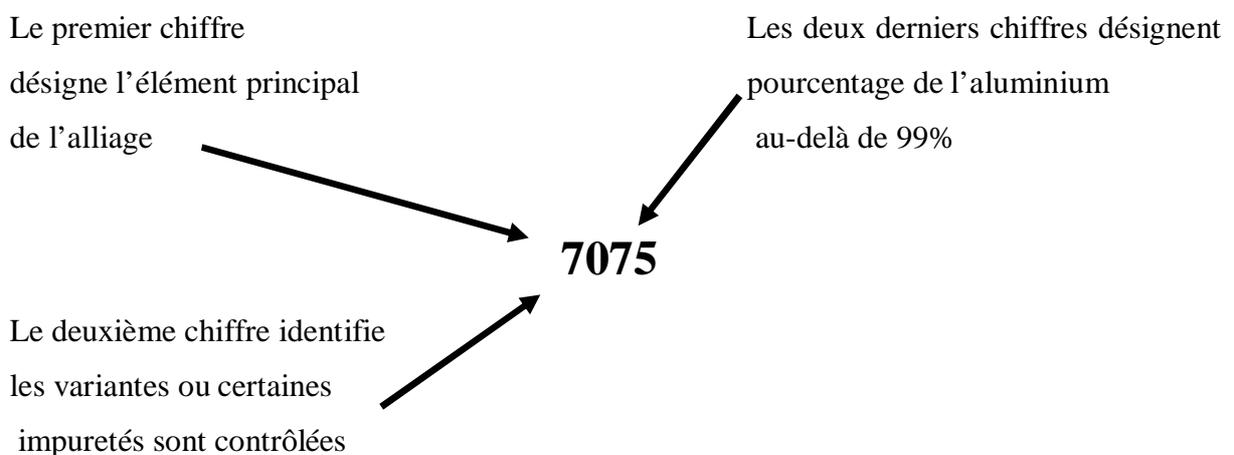


Figure 1.2 : Désignation des alliages d'aluminium

1.5. Les alliages trempant :

Les alliages dits trempant peuvent être traités thermiquement dans le but d'améliorer les propriétés mécaniques de l'alliage d'aluminium. Ces alliages se caractérisent par une solubilité très élevée à haute température des éléments d'alliages impliqués dans le durcissement et au contraire, très faible à basse température. [1.9]. Ces alliages peuvent alors être durcis par la présence de particules finement dispersées (les précipités) dans les grains. Le traitement thermique de durcissement des aluminiums trempant peut être décomposé en trois phases.

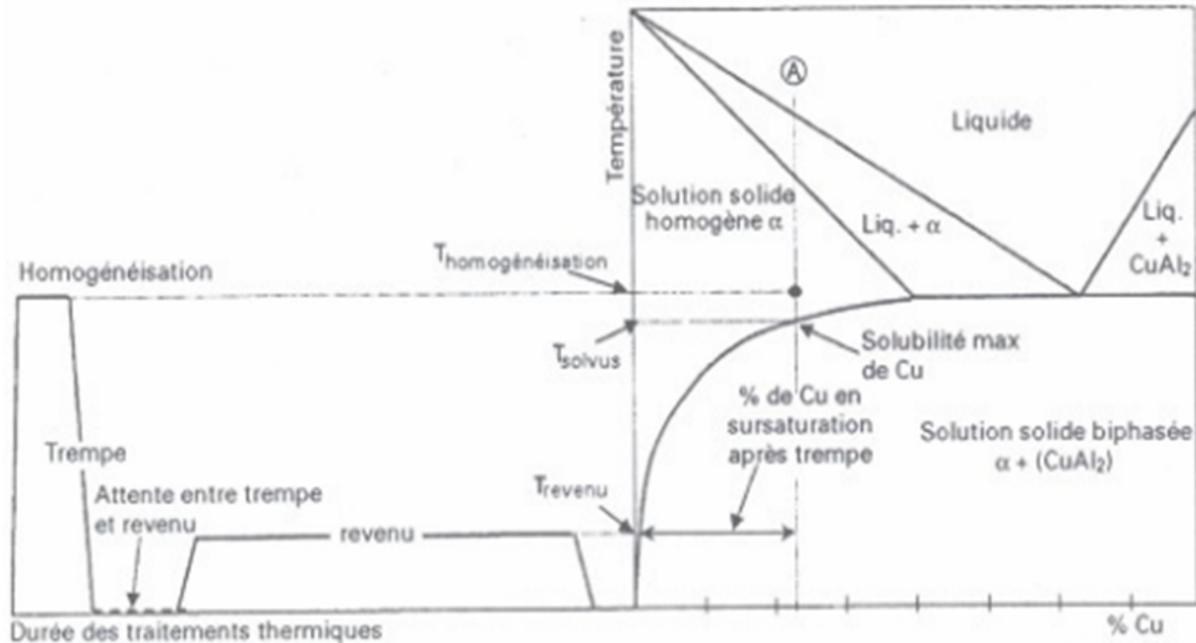


Figure 1.3: Représentation schématique du traitement thermique de durcissement [1.9]

1.5.1. Description du traitement thermique des alliages d'aluminium trempant :

Phase 1 : L'alliage est porté à une température à laquelle la solubilité des éléments d'alliage est maximale. Il est maintenu à cette température pendant la durée nécessaire à la mise en solution complète des éléments d'alliage. Cette phase s'appelle l'homogénéisation.

Phase 2 : Suit à cette phase, un refroidissement brutal de l'alliage est réalisé (une trempe) pour empêcher la précipitation des éléments d'alliages. On obtient une forte sursaturation des éléments d'alliage à température ambiante. Cette phase s'appelle la trempe.

Phase 3 : Il est possible d'avoir une phase d'attente afin d'amorcer la précipitation. Cette étape est facultative.

Phase 4 : Pour finir, une phase de maturation ou revenu, où l'on chauffe (maturation artificielle) d'une manière modérée l'alliage pendant une durée bien définie pour provoquer la précipitation fine de l'élément d'alliage avec l'aluminium. Un revenu à température ambiante est possible, on parle alors de maturation naturelle. Un revenu complet après trempe permet le retour aux conditions d'équilibre thermodynamique de l'alliage. Ceci se traduit par un rejet des éléments d'alliage en sursaturation. [1.9]. Lors de la maturation, on assiste à la formation de phases intermédiaires cohérentes avec la matrice d'aluminium provoquant un durcissement structural. La maturation n'est pas menée jusqu'à l'équilibre thermodynamique, la dureté obtenue en fin de cycle de traitement thermique dépend de la durée et de la température du revenu.

La figure 1.4 représente de façon schématique l'évolution de la dureté en fonction du temps pour deux températures de revenu. Pour chaque température de revenu, il existe un temps de maintien donnant un optimum de la dureté de l'alliage. [1.10]

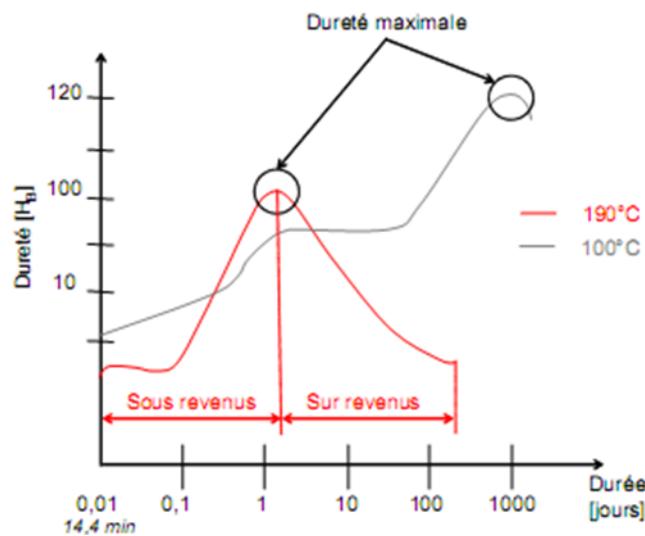


Figure 1.4 : Evolution de la dureté au cours des revenus après trempe pour un alliage [1.9]

Ainsi, en alliant l'aluminium à d'autres composés chimiques dits « trempant » comme le cuivre, le silicium/magnésium ou le zinc / magnésium, on forme un alliage avec une multitude de particules dispersées dans les grains. [1.9]. Ces particules sub-microscopiques gênent la déformation plastique de la matrice d'aluminium. Par conséquent, et pour obtenir une même déformation, il faudra appliquer une charge plus importante. Autrement dit, la dureté et la limite d'élasticité ont été augmentées.

La figure 1.5 présente un cycle de température subi par la matière en point donné (situé dans la ZAT, au plus proche de la ZATM), lors du soudage par Friction malaxage FSW. Ce cycle thermique est similaire à celui du soudage classique par fusion, avec des températures atteintes plus faibles. Ce cycle thermique peut être apparenté à un traitement thermique. La température atteinte est relativement élevée engendrant selon les alliages une remise en solution totale voir partielle des éléments d'alliages, et cela malgré un temps de maintien faible. Lors du refroidissement, la structure cristalline éléments d'alliage/métal de base est modifiée, entraînant une chute des caractéristiques mécaniques. L'optimum de la courbe de revenu est dépassé, on parle de sur-revenu.

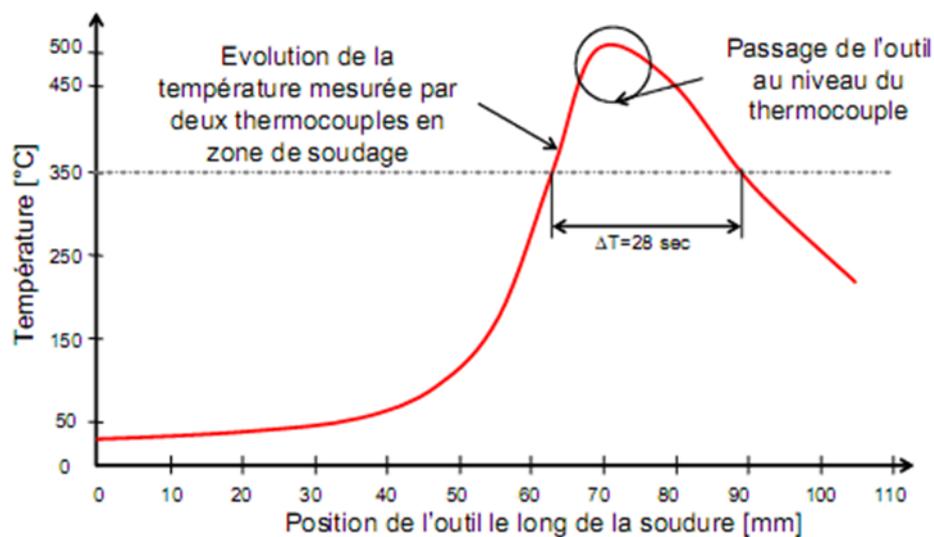


Figure 1.5 : Cycle de température lors du soudage par FSW d'alliage de la série 6000 [1.11]

1.6. Les alliages non-trempant (ou à durcissement par écrouissage) :

Les alliages non trempant ne sont pas sensibles aux traitements thermiques de trempé revenu. Ceci est dû à l'élément d'alliage qui ne précipite pas lors du revenu sous forme suffisamment dispersée pour gêner le déplacement des dislocations. On peut toutefois les durcir par écrouissage (laminage, étirage).

Le durcissement par écrouissage est obtenu par déformation plastique à froid (état H) de la matière. Ce mode de durcissement est applicable à tous les alliages d'aluminium. Cette opération engendre une augmentation de la limite d'élasticité et de la dureté et une diminution de la ductilité (allongement à rupture, coefficient de striction).

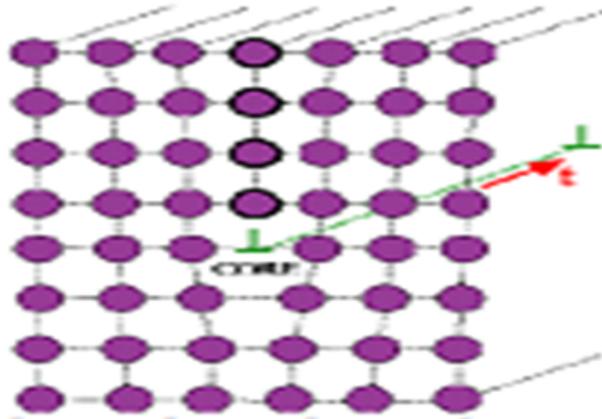


Figure 1.6 : Exemple de dislocation dans la structure du matériau [1.11]

Le durcissement par écrouissage est d'autant plus fort que le taux de déformation est plus élevé. [1.13]. On définit un taux d'écrouissage local θ , qui s'exprime comme le rapport entre la variation de contrainte sur la variation de la déformation : [1.14]

$$\theta = \delta\sigma / \delta\varepsilon$$

1.7. Les désignations des états métallurgiques : [1.10]

- Symbole F : brut de fabrication
- Symbole O : état recuit (état de résistance mécanique le plus faible)
- Symbole H : état écroui (déformation plastique à froid)
 - H1 : état brut d'écrouissage
 - H2 : état écroui et partiellement restauré

Le second chiffre (de 1 à 9) suivant la lettre H caractérise le niveau de durcissement dû à l'écrouissage. Plus le chiffre est élevé, plus l'écrouissage est important.

- Symbole T : état trempé (matériau traité thermiquement avec ou sans écrouissage)
 - 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 sur - revenu
 - T8 : mis en solution, écroui et revenu
 - T9 : mis en solution, revenu et écroui

La figure 1.7 représente un exemple de la signification des états de trempes.

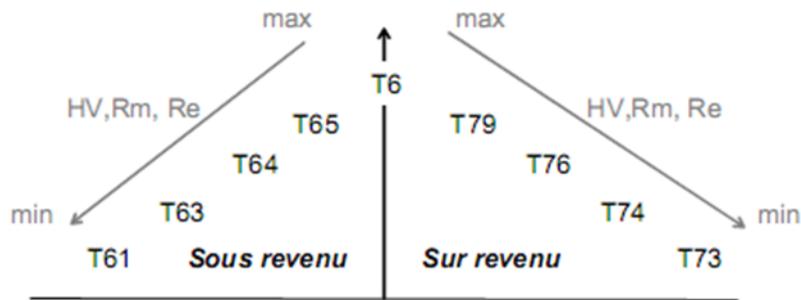


Figure 1.7: Les différents états de durcissement par précipitation [1.9]

1.7.1. Subdivisions de l'état T :

Les subdivisions de l'état T sont représentés dans les figures 1.8 et 1.9

Le symbole T est toujours suivi d'un ou de plusieurs chiffres.

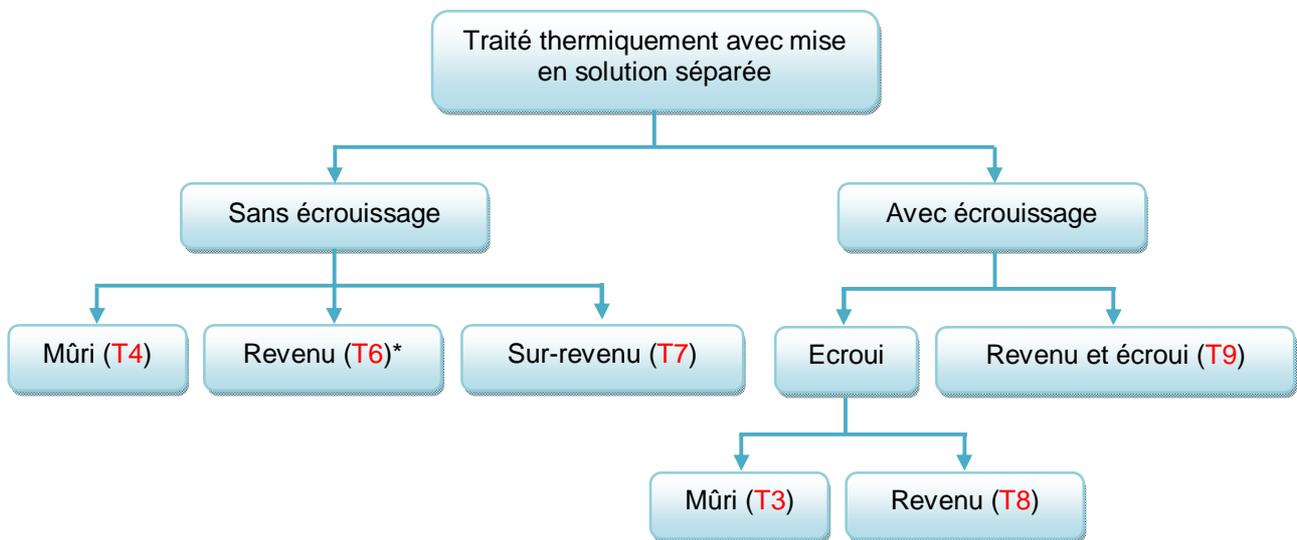


Figure 1.8 : Subdivisions de l'état T (Traité thermiquement avec mise en solution séparée)

Avec : * : Un second chiffre associé correspondant à des états déterminés;

T61 : Revenu peu poussé afin de conserver une ductilité plus grande que celle de l'état revenu normal: revenu doux ;

T66 : Revenu procurant une résistance mécanique plus élevée que celle de l'état revenu normal.

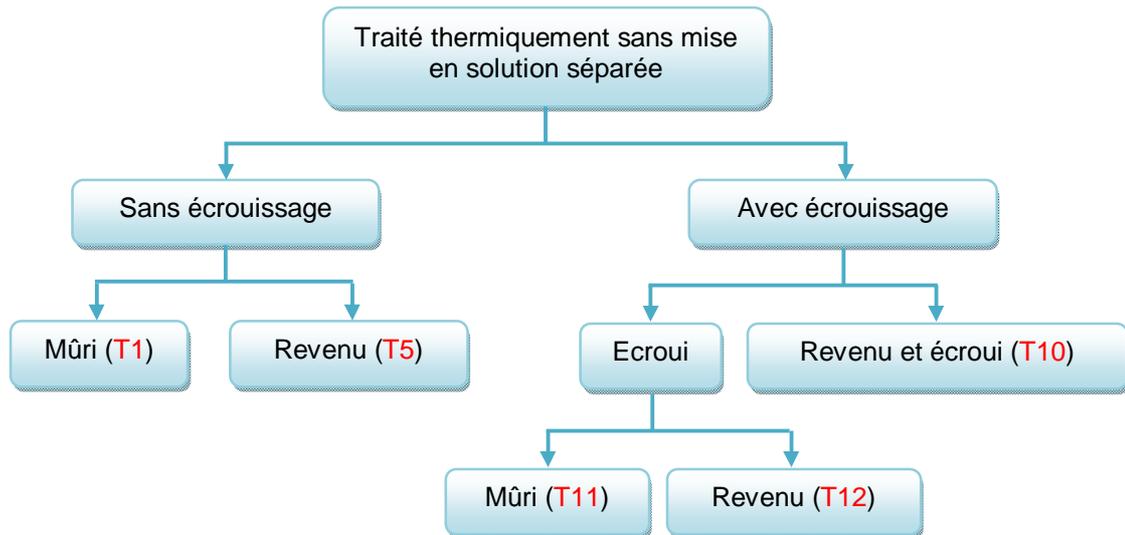


Figure 1.9: Subdivisions de l'état T (Traitement thermique sans mise en solution séparée)

1.8. Comparaison des caractéristiques mécaniques des différents alliages d'aluminium :

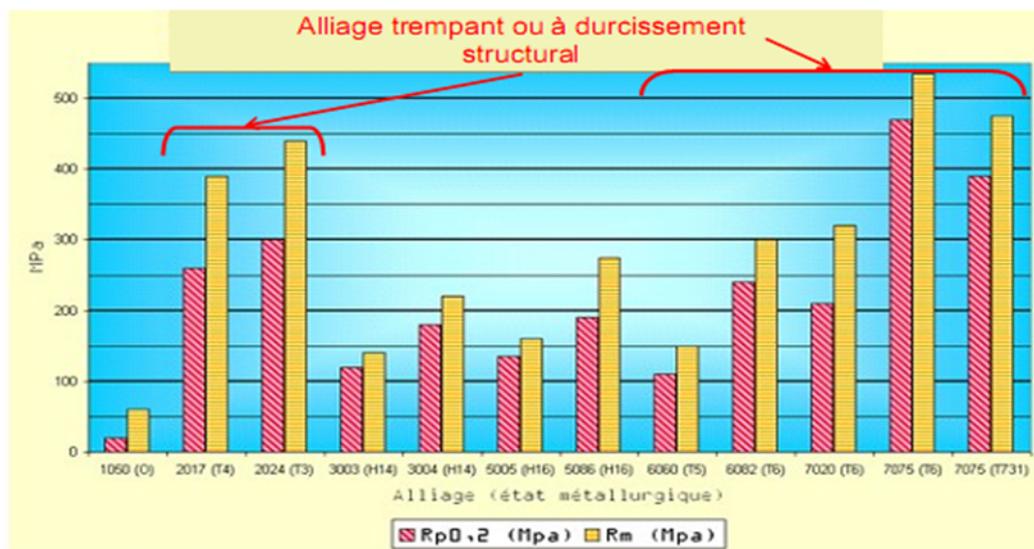


Figure 1.10: Comparaison des caractéristiques mécaniques des différents alliages d'aluminium [1.15]

Il est à noter que les alliages des séries 2000 et 7000 ont une résistance mécanique supérieure aux autres alliages. Ces deux types d'alliages sont principalement utilisés dans l'industrie aéronautique (comme par exemple la nuance 2024-T3) mais ils sont réputés pour être difficilement soudables. En soudage à l'arc classique, ils sont sensibles à la fissuration à chaud, nécessitant souvent l'apport d'un métal non trempant. De plus, ces alliages étant trempant, la

zone affectée par la chaleur sont remettre en solution où un sur-revenu entraîne une chute des propriétés mécaniques

1.9. Soudabilité des alliages d'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.

1.9.1. Les problèmes 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 [1.16]. Pour éviter ce type de problème, il est nécessaire de décaper chimiquement ou mécaniquement les surfaces à souder.

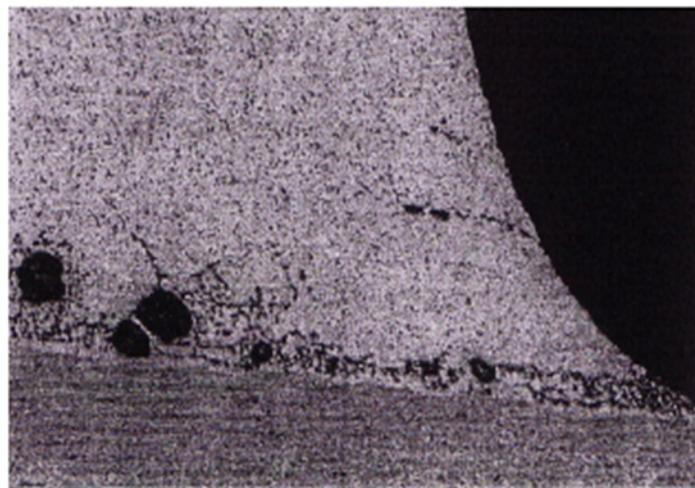


Figure 1.11: Apparition de soufflures dues à l'alumine (soudage à la limite du collage). [1.9]

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.

1.9.2. 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. [1.14]. La fissuration à chaud se produit dans le métal fondu dans les espaces interdendritiques ou aux joints de grains de solidification où la ségrégation est particulièrement importante. Il en résulte des décohésions du matériau. Ceci limite 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 1.12. 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.

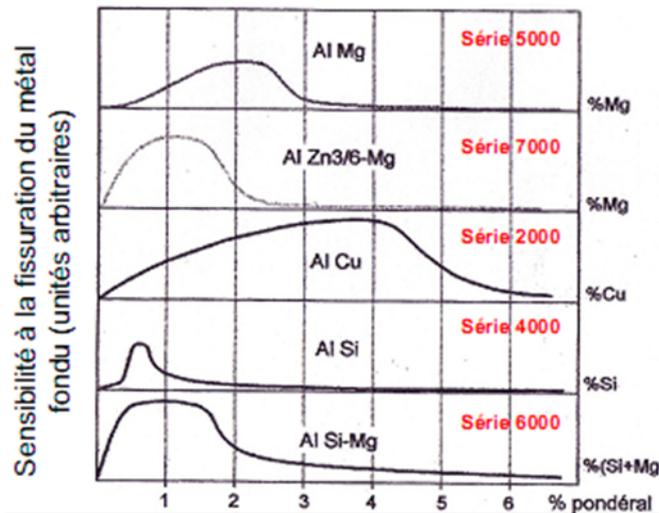


Figure 1.12 : Sensibilité à la fissuration à chaud des alliages d'aluminium [1.9]

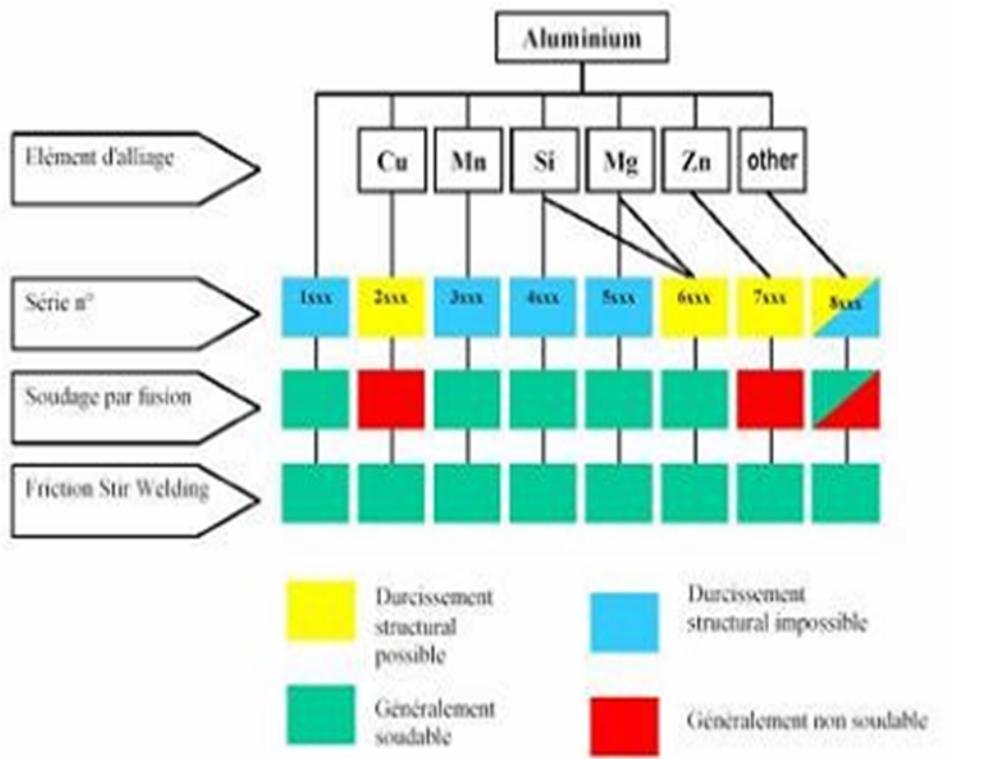


Figure 1.13: Soudabilité des alliages d'aluminium [1.17]

1.10. Les alliages d'aluminium 7075 T6 :

1.10.1. La série 7000 (aluminium zinc) :

L'élément d'alliage de cette série est le zinc (Zn). Globalement, ils ont de très bonnes caractéristiques mécaniques. Ils sont les alliages d'aluminium à haute résistance.

Malheureusement ces très bonnes caractéristiques mécaniques sont obtenues au détriment de la résistance à la corrosion.

Pour retrouver une bonne résistance à la corrosion, il faut effectuer un sur-revenu ou revenu à double palier (T7). Ce traitement se caractérise par une baisse des caractéristiques mécaniques.

Ces alliages se divisent en deux groupes : les 7000 avec addition de cuivre et les 7000 sans addition de cuivre.

1.10.2. Les alliages 7000 avec cuivre :

Ce sont eux qui ont les meilleures résistances mécaniques (à l'état T6). Le sur-revenu fait baisser les caractéristiques mécaniques d'environ 20 %. L'alliage le plus connu de ce groupe est le 7075 utilisé en : aéronautique, armements et sport.

1.10.3. Les alliages 7000 sans cuivre :

En les comparant avec les alliages avec cuivre, ils ont de moins bonnes caractéristiques mécaniques mais une meilleure résistance à la corrosion. Certains comme le 7020 présentent également de bonnes aptitudes à la soudure. [1.18].

1.11. Domaine d'utilisation:

L'aluminium et ses alliages sont utilisés dans tous les domaines de l'industrie et de la vie quotidienne : construction aéronautique, automobile, ferroviaire et navale (superstructures et équipements), bâtiment (toitures, façades, aménagement intérieur), industrie électrique (câbles et appareillages), boîtes de boissons, etc... L'aluminium pur n'est pas une très grande résistance mécanique mais ses alliages peuvent avoir des propriétés remarquables. [1.18].

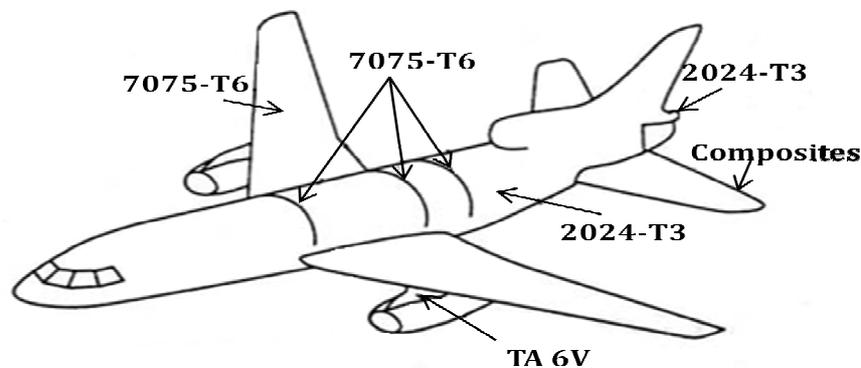


Figure 1.14 : Exemple d'utilisation des alliages d'aluminium en aéronautique[1.18]

Aussi, et étant donnée leur faible densité, ils sont aussi destinés aux applications nécessitant des propriétés mécaniques élevées pour un moindre poids.

Le tableau 1.1 représente une comparaison entre les alliages d'aluminium et d'autres matériaux subissant les mêmes sollicitations (flambage).[1.14]

Tableau 1.3: Comparaison entre les alliages d'aluminium et d'autres matériaux subissant les mêmes sollicitations (flambage)

	Limite d'élasticité (MPa)	Module de Young (GPa)	Densité	$E^{1/3/\rho}$ (Flambage)
Acier inoxydable FV 520	1080	215	7,83	0,765
Alliage de Titane TA6V	830	110	4,43	1,080
Alliage d'aluminium 7075 T6	470	72	2,80	1,480

Chapitre 2 :

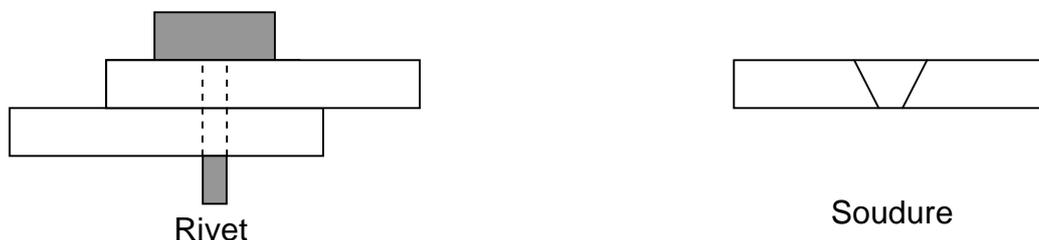
Le procédé de

soudage

2.1. Introduction :

Contrairement aux idées reçues, les techniques de soudage sont en pleine évolution, pour ne pas dire en révolution. Si les premières réalisations soudées ou brasées remontent à l'âge du bronze, ce n'est que depuis le début du 20ème siècle que la maîtrise d'un arc électrique permet de réaliser la fusion puis la solidification des matériaux pour constituer un assemblage dit par soudage. Il faut pourtant attendre la fin de la seconde guerre mondiale pour que des constructions soudées soient utilisées dans la réalisation de structures ou bâtis. On commence alors à parler de mécano-soudage. Or, les seuls procédés industrialisés de façon importante sont la soudure oxyacéthylinique et la soudure à l'arc à l'électrode enrobée. Au fur et à mesure de la maîtrise des sources thermiques (arc électrique, laser, plasma d'arc, faisceau d'électrons) et des systèmes automatisés, des différents procédés ont gagné en fiabilité et en qualité de réalisation. Les ensembles mécano-soudés sont maintenant devenus irremplaçables dans de nombreuses applications.

En fabrication mécanique et dans les différents domaines industriels comme le cas des assemblages aéronautiques, le rivetage et le boulonnage représentent les principaux systèmes d'assemblages. [2.1]. Lors de leur utilisation, ces procédés présentent des discontinuités physiques ou chimiques, et alors le procédé de soudage devient une technique d'assemblage concurrente. [2.2]. Ce changement de procédé constitue un enjeu financier important car en entraînant la réduction considérable de masse (figure 2.1), donc de consommation de carburant, il diminue le coût d'exploitation.



Avec:

■ = Masse supplémentaire

Figure 2.1: Schéma simplifié du gain de masse Rivet et Soudure

2.2. Description du procédé de soudage :

2.2.1. Définition :

Le soudage est une opération par laquelle on établit la continuité métallique entre les parties à assembler, par divers moyens. Cette définition est valable pour n'importe quel matériau, y compris les matières plastiques. Elle s'applique intégralement au cas des métaux et alliages dans la mesure où l'opération consiste à établir la continuité métallique entre les parties à assembler contrairement aux autres procédés d'assemblage tel que : rivetage, boulonnage, agrafage ou collage. A l'échelle macroscopique, la continuité métallique implique l'absence, une fois l'assemblage réalisé, de toute matière non métallique interposée entre les éléments réunis. Cette continuité est réalisée par les mécanismes d'attraction, de diffusion et de fusion.,

Les procédés de soudage, comme le montre la figure 2.2, sont nombreux et le plus souvent dépendant les uns des autres. La grande variété de ces procédés de soudage existants peut être classée en fonction de la nature des énergies mise en œuvre. [2.3].

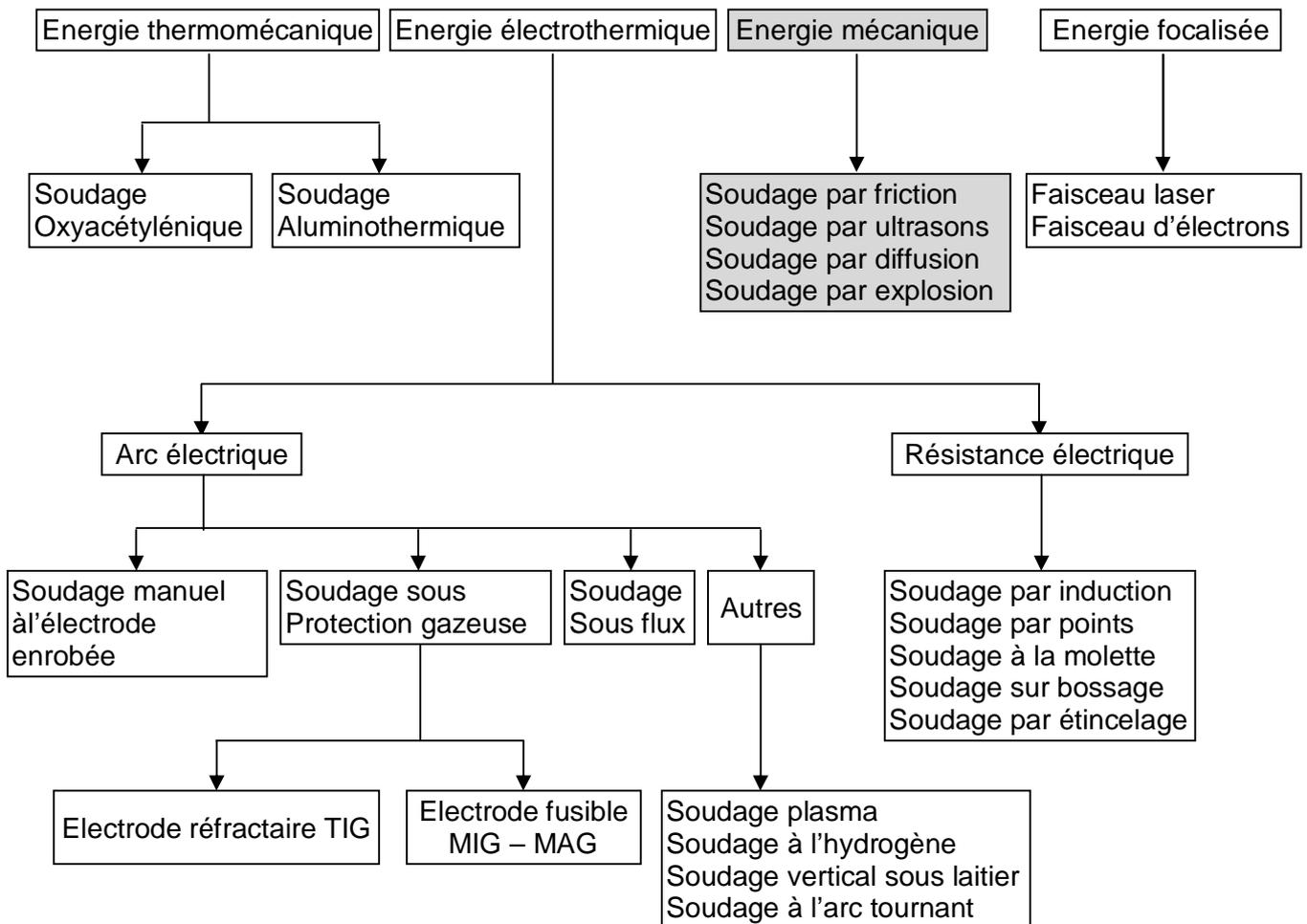


Figure 2.2 : Les différents procédés de soudage

Les procédés de soudage par fusion sont de plus en plus utilisés dans la construction des avions civils et militaires. Aussi, Ils peuvent être classés, comme le montre la figure 2.3, suivant l'intensité de la source d'énergie qui induit des différences de caractéristiques importantes sur les cordons de soudure. Cette énergie spécifique de chaque procédé agit sur la pénétration, qui représente le rapport de la profondeur de la soudure sur la largeur, et sur les caractéristiques mécaniques des cordons de soudure.

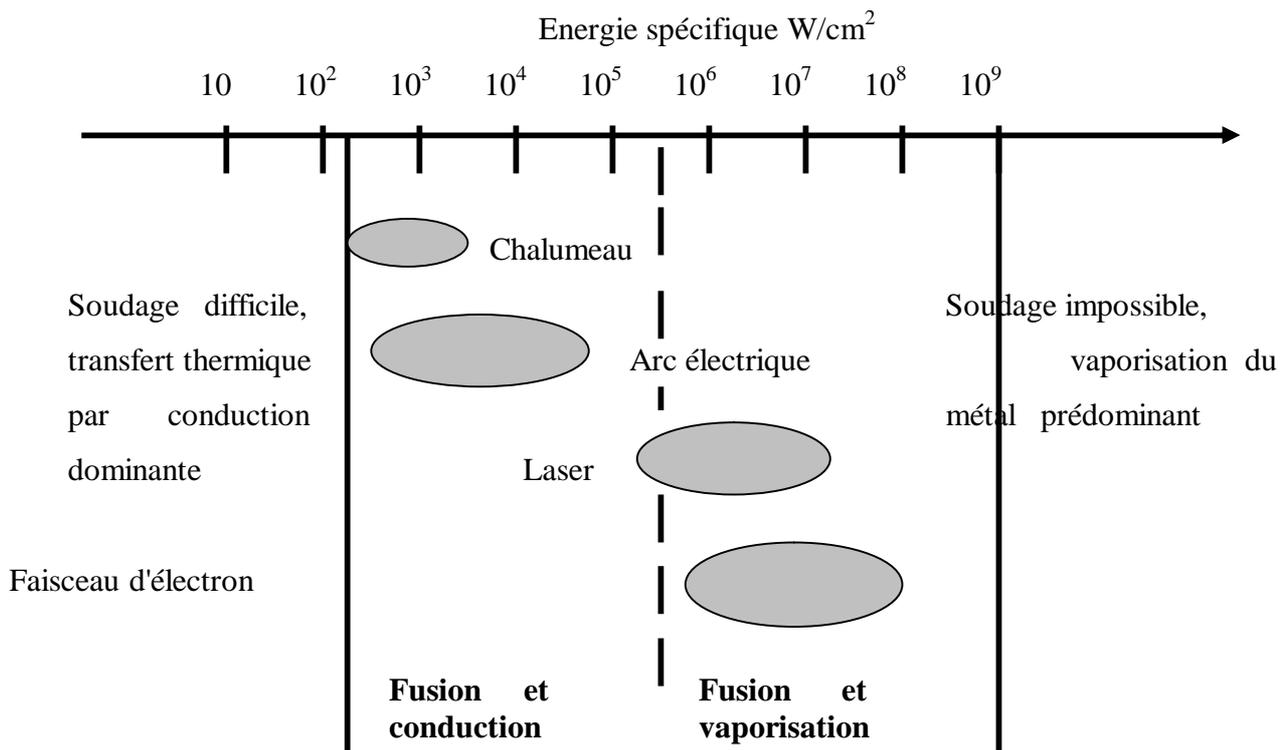


Figure 2.3 : Sources thermiques et densités d'énergie

2.2.2. Le soudage en phase solide :

Le soudage en phase solide est la classe des procédés qui ne nécessite pas un métal d'apport, et les deux surfaces sont jointes sans fondre le métal de base.

Les procédés de soudage en phase solide ont été développés avant ceux passant par une phase liquide à cause des exigences d'apport d'énergie moins sévères pour les premiers. Un exemple bien connu est le soudage par forgeage; déjà utilisé dans la fabrication des armes.

Dans ces procédés, les joints sont établis par au moins un des trois mécanismes suivants :

1. Un mouvement relatif des deux pièces à joindre donne lieu au cisaillement des points de contact, produisant des régions non-contaminées qui sous pression forment des joints métalliques entre les pièces. Ce mécanisme intervient dans les procédés de soudage par friction et le soudage par ultrason.
2. Une déformation coordonnée des deux pièces à joindre produit des régions non contaminées qui sous pression forment des joints métalliques entre les pièces. Cela est le cas pour le soudage par explosion et le soudage par pression à chaud et à froid.
3. La diffusion préférentielle suscitée par une force qui met l'interface sous pression permet de réduire le volume de pores entre les surfaces à joindre. Ceci est utilisé dans le soudage par diffusion.

Les procédés de soudage en phase solide sauf le soudage par diffusion nécessitent donc toujours une déformation très importante, ce qui limite ces procédés aux métaux ductiles et aux géométries simples. [2.4].

2.2.3. Le soudage par friction:

Le soudage par friction utilise la déformation relative des deux pièces à souder pour produire des interfaces non-contaminées. En même temps, l'énergie dissipée par frottement chauffe les interfaces pour faciliter leurs cisaillements. Pour des géométries cylindriques, le mouvement est en général fait par une rotation ce qui permet de garder pendant tout le cycle de soudage un alignement précis. Les deux pièces sont pressées l'une contre l'autre de manière que le mouvement relatif produise de la chaleur par frottement. Ensuite, la rotation est arrêtée et la pression est augmentée. Cela produit un joint forgé par déformation coordonnée.

Il existe plusieurs façons pour réaliser ce mouvement relatif :

- Une partie tourne, l'autre est fixée,
- Les deux pièces tournent en sens opposé,
- Les deux pièces tournent avec la même vitesse et une troisième pièce placée au centre reste immobile (sorte de métal d'apport).

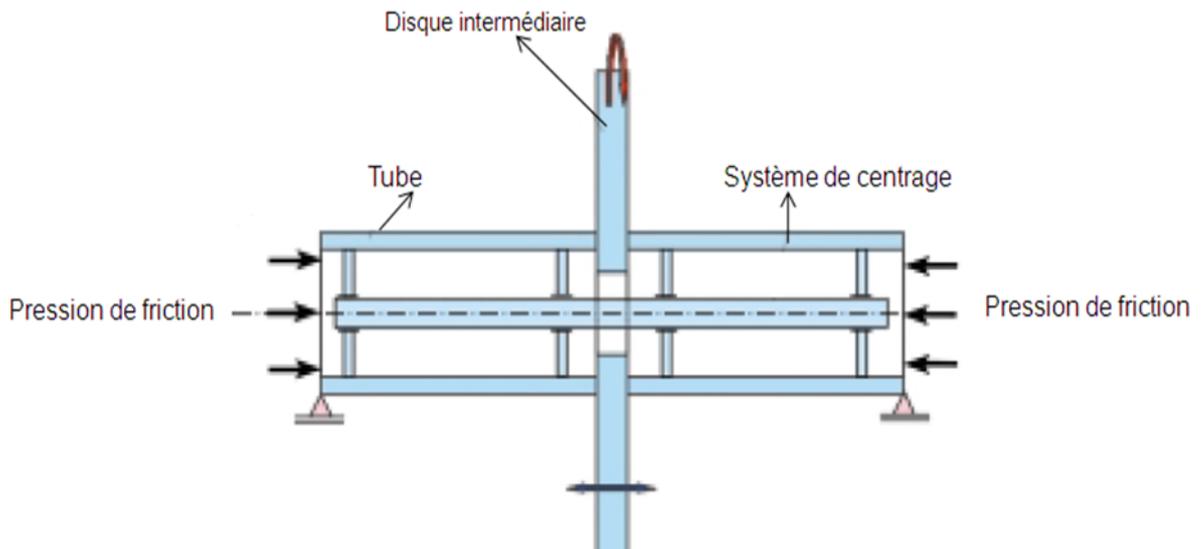


Figure 2.4: Schéma de principe d'une variante du procédé de soudage par friction

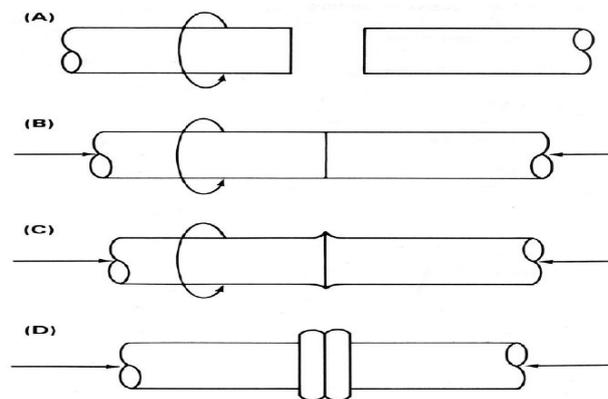


Figure 2.5 : Schéma du procédé de soudage par friction,
 a) phase d'accostage des pièces b) phase de frottement
 c) phase de pression élevée d) phase de joint forgé

Depuis sa création au début des années 1990, le soudage par frottement-malaxage est devenu attrayant pour plusieurs entreprises. En conséquence, il a été abondamment étudié dans plusieurs départements de sciences appliquées et d'ingénierie dans les universités du monde entier. Dans les années 1990, le cœur des travaux a porté sur la faisabilité du soudage à l'aide de ce procédé et l'exploration des possibilités de ce dernier: soudage de différentes configurations de joint, soudage de deux alliages différents, soudage de composites à matrice métallique, utilisation de différentes formes d'outils, etc. Ces travaux ont permis de connaître suffisamment le procédé pour qu'il soit utilisé industriellement, surtout pour le soudage des alliages d'aluminium dans les industries navales et ferroviaires. [2.5].

Ces recherches initiales ont permis de mettre en lumière un aspect fondamental dont il faut tenir compte dans l'étude du FSW. En effet, les corrélations entre paramètres de soudage et propriétés du joint sont difficilement généralisables, puisque cette corrélation passe par un troisième élément, la microstructure résultante du joint. Or, la réponse microstructurale d'un matériau soumis au FSW peut varier considérablement d'un alliage à l'autre, et ce même pour des alliages d'une même famille. De nombreux travaux ont ainsi été réalisés afin d'établir les liens entre les paramètres de soudage et les propriétés du joint. Cette approche permet d'optimiser une configuration géométrie-matériau donnée, mais a peu d'impact sur l'avancement de la connaissance fondamentale de ce procédé. Depuis quelques années toutefois, les phénomènes physiques entrant en jeu lors du FSW sont davantage étudiés. La microstructure des joints est souvent caractérisée et la modélisation numérique est utilisée pour réaliser des calculs qui permettent de mieux comprendre le procédé FSW.

2.2.4. Soudage par friction malaxage(FSW) :

Le soudage par friction malaxage, plus communément appelé Friction StirWelding (FSW), a été développé par Mr Thomas Wayne à l'institut de soudure britannique (The Welding Institute, TWI). Le premier brevet sur cette technologie a été déposé en décembre 1991 par TWI. Il permet un assemblage par voie solide, ce qui supprime les défauts liés à la solidification et conduit à des contraintes internes plus faibles que les procédés de soudage classiques. Ce procédé est adaptés à plusieurs matériaux : Acier, Titanium, le cuivre et plus particulièrement aux alliages d'aluminium a durcissement structural (série 2000, 6000, 7000), difficilement soudable par voie classique. [2.6].

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

- **Industrie Aéronautique:** soudage de tôles en remplacement du rivetage pour les ailes, le fuselage, soudage de réservoirs cryogéniques, réservoirs de kérosène, corps de missiles,



Figure 2.6 : Assemblage de l'avion Eclipse avec le procédé de FSW [2.7]

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



Figure 2.7 : Bateau en aluminium construit en utilisant le procédé FSW [1.8]

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

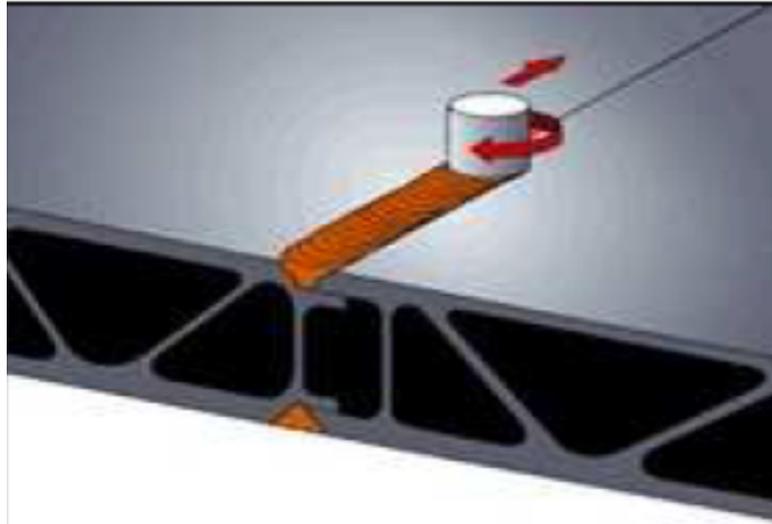


Figure 2.8 : Technique de soudage des carrosseries des trains Hitachi

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

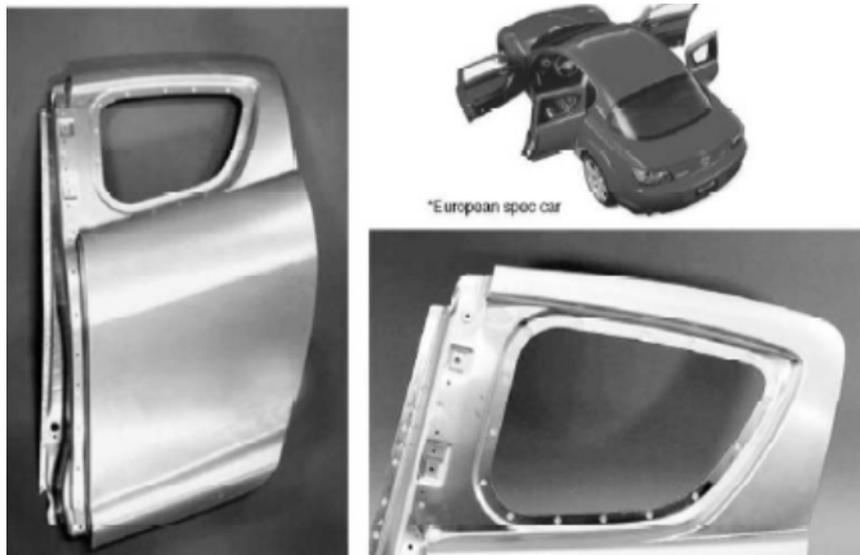


Figure 2.9 : Application du procédé de FSW par points dans l'industrie automobile

Parmi ses avantages, on peut citer :

- Pas de métal d'apport ni de gaz,
- Absence de discontinuité,
- Temps de cycle court,
- Reproductible,
- Automatisable,
- Absence de fumées et de projection,

- Absence de métal d'apport permet de réaliser des joints chimiquement homogènes,
- Défauts internes des procédés par fusion, tels le manque de compacité, les soufflures, les criques n'apparaissent pas, il ne génère pas de fissure à chaud. [2.9]. [2.10].
- Remplacement du rivetage par le soudage permet surtout une diminution du coût d'obtention de la structure, un gain de masse et l'élimination des phénomènes de corrosion et de fretting-fatigue autour des rivets,
- Permet de réaliser des soudures hétérogènes,
-



Figure2.10: Opération de soudage FSW

Parmi ses inconvénients, on peut citer :

- Ne convient pas aux matériaux à haute résistance,
- Nécessité d'avoir un appui (forces transversales par l'arrière),
- Présence de cratères en fin de soudure,
- Usure des outils suivant les matériaux à assembler,
- Difficilement robotisable dû aux efforts mécaniques,
- Trou à la fin de chaque soudure,
- Taquets de début et de fin de soudure.

2.2.4.1 :Outil de soudage :

La forme de l'outil de soudage constitue la base du procédé car il ouvre son potentiel d'applications en termes de matériaux, d'épaisseurs soudables et de performances techniques et économiques.

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.

La figure 2.11 représente un outil de soudage.



Figure 2.11: Outil FSW

A l'origine du procédé, il comporte essentiellement un épaulement associé à un pion coaxial l'un et l'autre de révolution. Il est apparu intéressant, sinon primordial, d'affecter le pion de reliefs sous forme de nervures circulaires ou hélicoïdales dans le but d'augmenter l'effet de malaxage du métal et, par suite, de rendre plus facile la formation de la soudure.

Les matériaux utilisés pour les outils sont principalement des aciers résistant à haute température et ayant un bon comportement à l'usure, car en fonctionnement, la température de l'outil s'élève à 300/400 ° C environ.

Les effets de l'outil sur la formation de la soudure combinent, la plupart du temps, celui de l'épaulement et celui du pion, indissociables dans le fonctionnement du système.

A/ Épaulement :

Le rôle de l'épaulement est de fournir une butée déterminant la pénétration du pion ainsi que de bloquer le reflux de la matière vers le haut. Sa forme est globalement plane et perpendiculaire à l'axe de rotation, ses dimensions transversales restant suffisamment grandes et de cinq fois environ le diamètre du pion afin de couvrir totalement la zone affectée.

L'épaulement joue un autre rôle : il sert au confinement du matériau. En effet, le matériau mou cherche à sortir de la zone du joint soudé s'il n'est pas retenu. Le choix de la géométrie de l'épaulement dépend de la configuration du joint à souder. Il peut être plat, convexe ou concave.

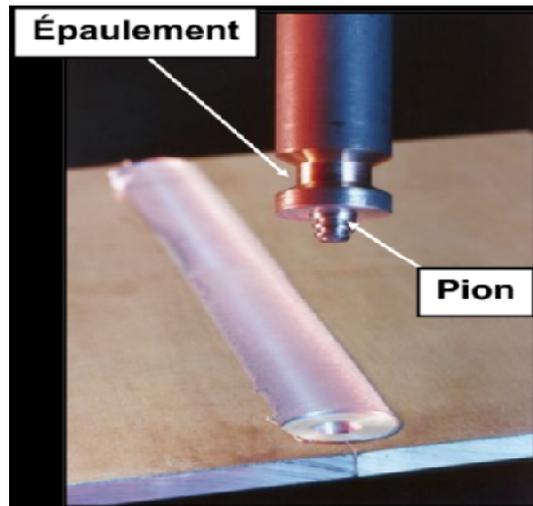


Figure 2.12 : Principales composantes de l'outil de soudage

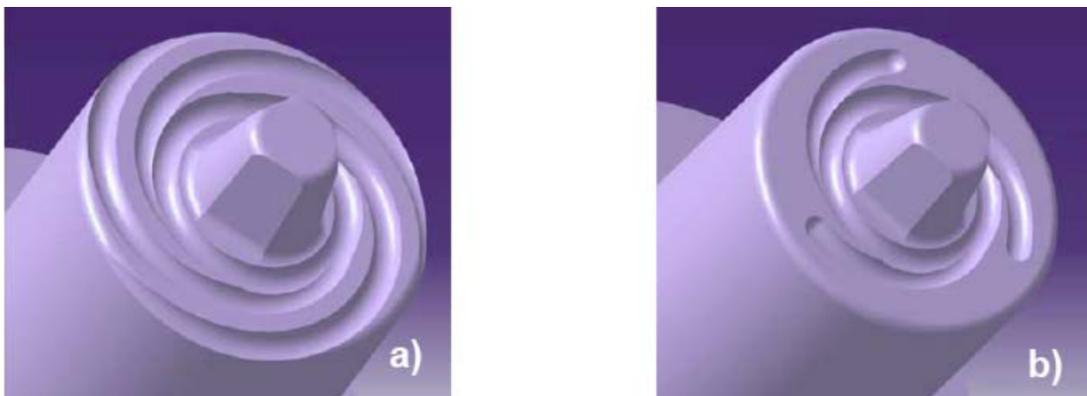


Figure 2.13: Type d'épaulement a) Rainures complètes; b) Rainures partielles [2.11]

B/ Pion:

Le pion a des dimensions appropriées à la nature des matériaux et à l'épaisseur à souder. Sa longueur est adaptée à la pénétration et ne doit pas excéder l'épaisseur des tôles à souder. Ainsi, et d'après la figure 2.14, le pion peut prendre diverses formes simples ou sophistiquées. Il est généralement tronconique et (ou) prismatique, avec évidement ou collets hélicoïdaux subtilement répartis. Certains profils intéressants ont fait l'objet de marques déposées.

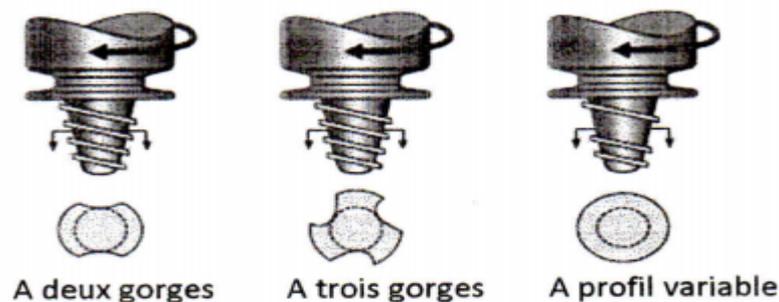


Figure 2.14 :Types classiques d'outils

2.2.4.2 : Paramètres du procédé :

De nombreux paramètres ont un rôle non négligeable sur la qualité d'un assemblage comme :

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

Ces paramètres sont à régler selon : les matériaux, l'épaisseur soudée et la géométrie de l'outil. L'ensemble conditionne l'apport d'énergie, le flux de matière, la formation du cordon, les propriétés mécaniques de l'assemblage et les efforts générés.

De ces paramètres, les plus influents sont : l'outil de soudage, le couple vitesse de rotation et d'avance.

- **Vitesse de rotation et vitesse d'avance :**

Les vitesses de rotation et vitesses d'avances de l'outil varient en fonction de la nature de l'alliage à assembler et les dimensions des pièces. Ces paramètres devront donc être adaptés afin que le réchauffement et le brassage de la matière soient optimaux tout en assurant une bonne cadence de soudage. La vitesse de rotation est généralement exprimée en tour par minute et la vitesse d'avance en mm par seconde. Le choix de la valeur de ces deux vitesses est lié. Il est d'usage d'introduire le rapport suivant pour qualifier le soudage:

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

Si ce rapport est très grand, on parlera de soudage froid car la chaleur dissipée par le frottement entre l'outil et les plaques ainsi que le malaxage de la matière n'introduiront pas des températures

très élevées dans les pièces; la température sera plus faible comparativement à un soudage optimal.

Au contraire, si ce rapport est faible, on parlera de soudage chaud car le malaxage et la chaleur dissipée par frottement seront élevée et engendreront de fortes températures.

2.2.5 : Principe général du soudage par friction malaxage (FSW):

Contrairement au procédé de soudage par friction « classique », les pièces à assembler n'ont pas de mouvement relatif l'une par rapport à l'autre. Ceci lui offre un plus large choix de configurations de joints soudables.

Ce procédé, innovant, permet de souder à l'état « solide », c'est-à-dire sans atteindre la température de fusion. Ceci lui permet, en théorie, de souder tous les métaux, même ceux réputés difficilement soudables par fusion à cause de problèmes de fissurations à chaud, de soufflures, ou d'abattement trop important des propriétés mécaniques.

Ses caractéristiques offrent à ce procédé de réels potentiels de développements industriels, surtout pour les métaux malléables à chauds et à bas point de fusion tels que l'aluminium ou le cuivre.

Le principe de soudage est simple : les deux tôles à souder sont mises en contact et solidement bridées. L'outil en rotation (400 à plusieurs trs/min) pénètre la matière puis se déplace le long du joint à souder (jusqu' a 1000mm/min).

Ce procédé est de réaliser une soudure de proche en proche en malaxant localement la matière des deux pièces à assembler. La liaison métallurgique est obtenue à chaud, mais en dessous de la température de fusion des matériaux.

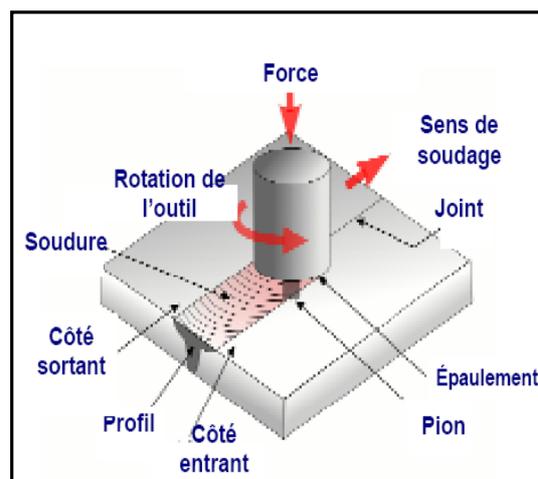
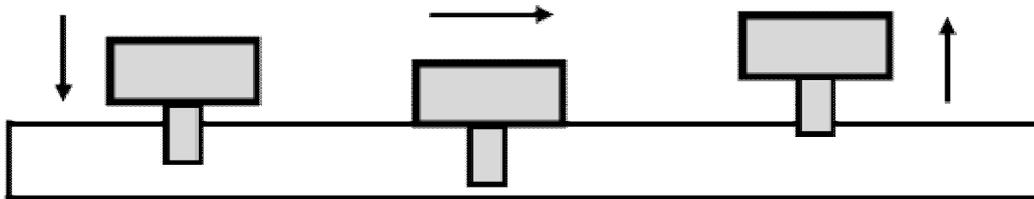


Figure2.15: Principe général du procédé de soudage par friction malaxage

Les alliages d'aluminium d'épaisseurs moyennes sont particulièrement bien soudés par le procédé FSW et de nombreux essais ont été conduits pour développer les conditions d'application du procédé à ces matériaux industriellement utilisés (séries 1000 à 8000) là où, dans certains cas, les procédés par fusion rencontrent des limites technologiques et, en tout cas, impliquent des mesures de mise en œuvre plus contraignantes. La simplicité de ce procédé de nature purement mécanique en fait l'un des principaux intérêts.

Le procédé de soudage par friction malaxage peut être décomposé en 4 étapes :



Pénétration Soudage Sortie

Figure 2.16: Etapes du procédé de FSW

- **1^{ère} étape : Pénétration de l'outil**

L'outil composé d'un pion de géométrie plus ou moins complexe et d'un épaulement de diamètre de 2 à 2.5 fois supérieur au pion est mis en rotation rapide (entre 100 tr/min). Sous un effort défini, le pion entre en contact avec la surface des tôles à assembler. La chaleur générée par le frottement pion-matière provoque un ramollissement local de la matière et permet la pénétration du pion jusqu'à ce que l'épaulement entre en contact avec la surface des pièces.

Cette phase de pénétration est représentée dans la figure suivante 2.17.

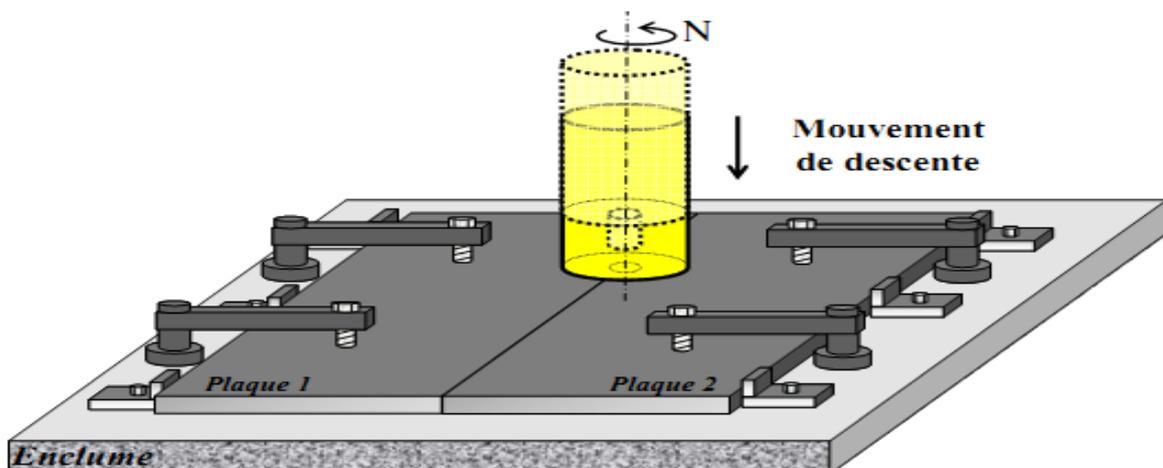


Figure 2.17: Phase de Pénétration de l'outil

- **2^{ème} étape : Temps de préchauffage**

Afin de générer l'apport de chaleur nécessaire pour obtenir un volume de matière à l'état pâteux suffisant au voisinage de l'outil, celui-ci est maintenu en rotation pendant un temps appelé Dwell-time ou temps de préchauffage (Dt).

Cet intervalle de temps dépend des matériaux à assembler (il faut au moins atteindre des températures de forgeabilité des matériaux de base), des épaisseurs et des configurations d'assemblage. L'échauffement est provoqué par le frottement de l'outil sur les pièces.

Cette phase de temps de préchauffage est représentée dans la figure suivante 2.18.

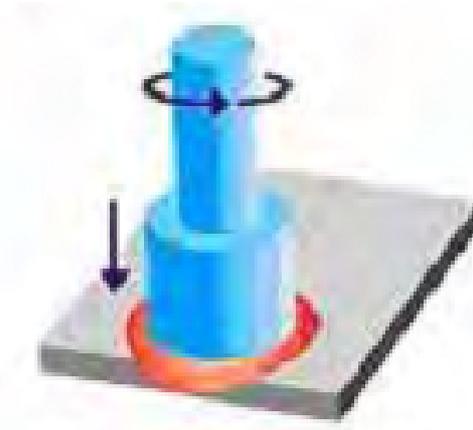


Figure 2.18: Phase de Préchauffage

- **3^{ème} étape : Soudage**

Après préchauffage, l'outil en rotation se déplace le long du joint à une vitesse définie (jusqu'à 2 m/min). Par un mécanisme combiné d'extrusion par le pion et de forgeage par l'épaulement, le cordon est réalisé de proche en proche. Une nouvelle structure métallurgique commune aux deux matériaux est formée grâce à des phénomènes de restauration-recristallisation. La liaison métallique est ainsi assurée sans atteindre la température de fusion des matériaux de base, ce qui permet de s'affranchir de problèmes liés à la solidification qui apparaissent en utilisant les procédés de soudage classiques (porosités, soufflures, fissuration à chaud,...).

Cette phase est représentée dans la figure suivante 2.19.

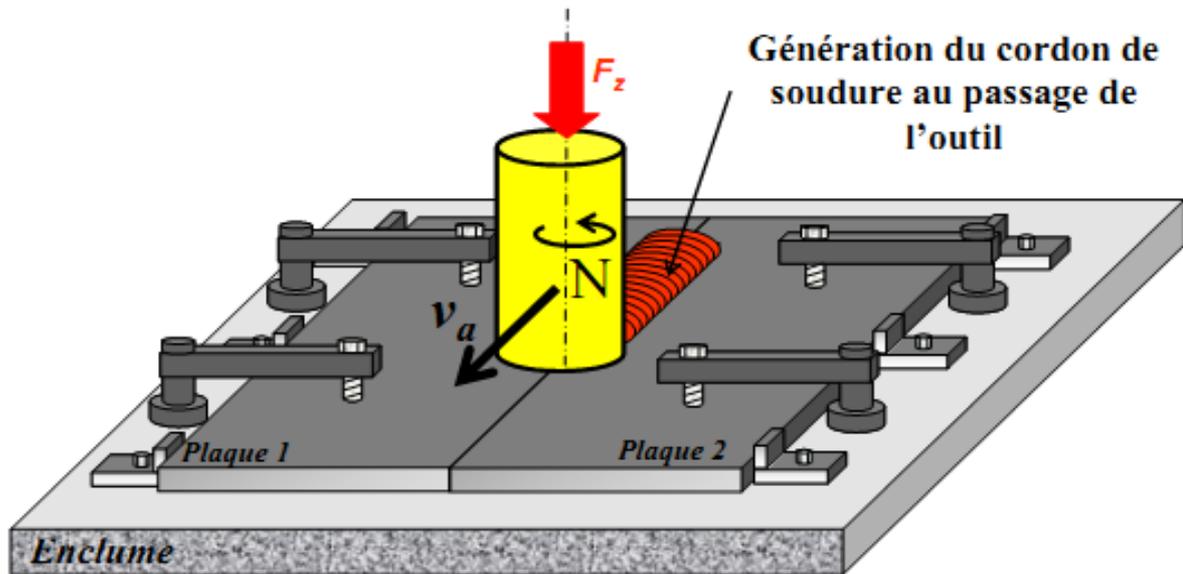


Figure 2.19: Phase de soudage

4^{ème} étape : Rétraction de l'outil

Lorsque la longueur soudée est réalisée, l'outil en rotation est retiré de la matière et laissant une empreinte.

Cette phase de retrait est représentée dans la figure suivante 2.20.

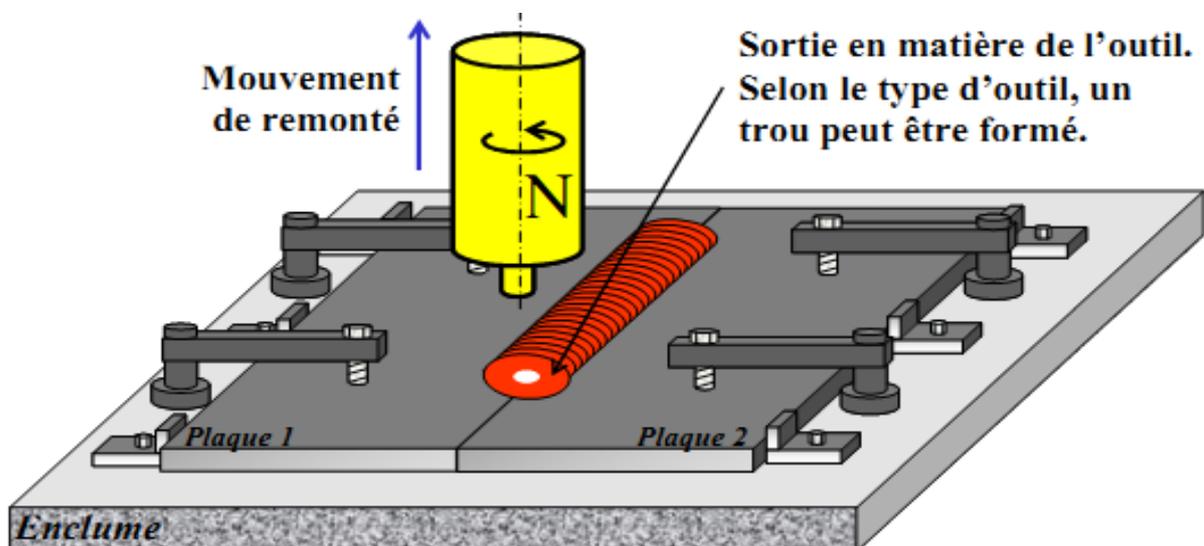


Figure 2.20 : Phase de retrait de l'outil

2.2.6. Caractérisation métallurgique de la zone soudée par FSW :

La microstructure des joints soudés de ce procédé est représentée dans la figure 2.21 suivante :

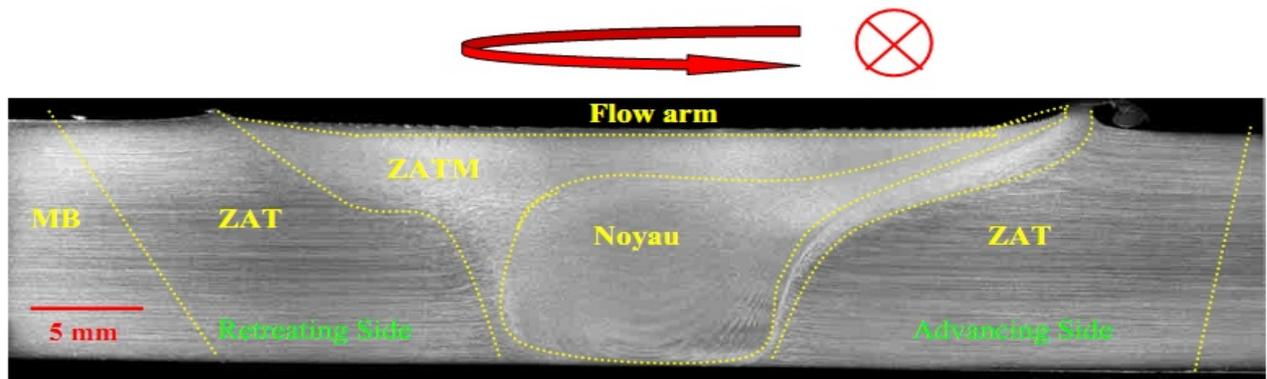


Figure 2.21: Coupe macrographique d'un joint soudé par FSW sur un alliage d'aluminium

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 durcissants et par une précipitation hétérogène des précipités non durcissants. Dans le cas des alliages d'aluminium, les températures atteintes dans cette région s'échelonnent entre 300 °C et 400°C.

D/ Noyau soudé :

La zone au centre de la soudure est habituellement appelée noyau soudé. Elle correspond aux maximums de déformation et de température. Les mesures de température dans cette région sont

déliçates 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 2.22.

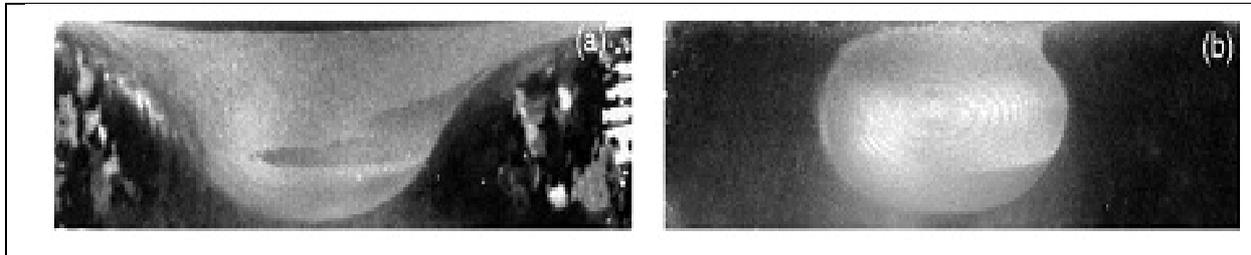


Figure 2.22: Formes de noyaux

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.[2.12].

E/1. 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. Cette possibilité est illustrée dans la figure 2.23.

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

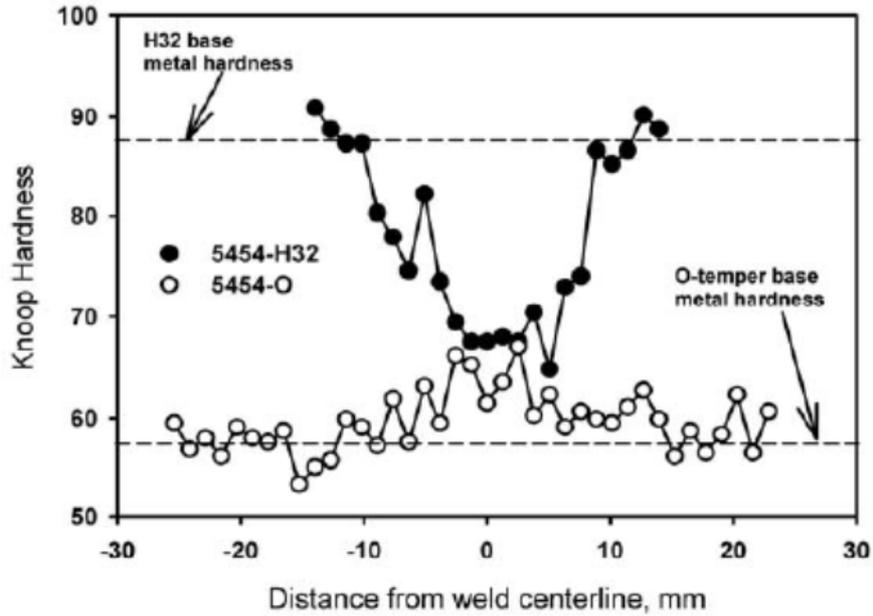


Figure 2.23 : Durcissement par écrouissage

E/2. Durcissement par précipitation :

Les soudures par FSW de matériaux à durcissement structural présentent un profil caractérisé en « W » comme le montre la figure 2.24. Dans le noyau, il est admis que le cycle thermique remet en solution toute la précipitation durcissante, 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.

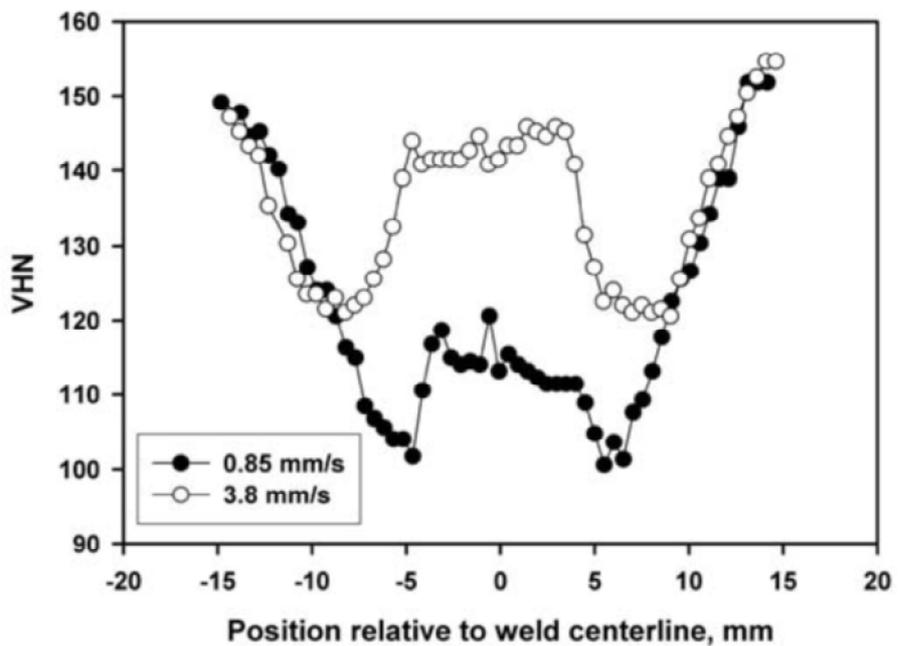


Figure 2.24 : Durcissement par précipitation

Chapitre 4 :

**PRESENTATION GENERALE
DU MODELE DE SIMULATION
DE LA TEMPERATURE DANS
LES DIFFERENTES ZONES
OBTENUES LORS DU
SOUDAGE FSW**

4.1.INTRODUCTION :

Conformément au chapitre 2, le procédé de soudage par friction malaxage (Friction Stir Welding FSW) a été inventé par l'institut de Soudure Britannique "The Welding Institute TWI" depuis les années 1990. Nous avons utilisé ce procédé pour souder les alliages d'aluminium.

Thomas et al. [4.1] ont montré que l'avantage principal de cette technique est sa capacité de souder à l'état solide les alliages des métaux généralement difficiles à souder par des procédés de soudage conventionnels. Ainsi, l'assemblage de deux pièces par le procédé FSW consiste à produire de la chaleur due, principalement, à l'épaulement et le malaxage de la matière grâce au pion. L'épaulement et le pion constituent les principaux éléments de l'outil de soudage.

Dans ce chapitre, on s'intéresse particulièrement au malaxage de la matière observé dans le procédé de soudage par friction malaxage (FSW). La simulation numérique de ce type de procédé est très difficile à réaliser pour plusieurs raisons comme les conditions thermo-mécaniques qui sont très difficiles à estimer expérimentalement. Aussi, la matière au voisinage de l'outil de soudage est soumise à de grandes déformations avec un écoulement complexe. Une des solutions est de faire appel à la méthode des éléments finis sous une formulation lagrangienne. Des chercheurs se sont intéressés aux différents aspects du procédé soit thermique ou thermomécanique. Les contraintes résiduelles et l'écoulement de la matière autour de l'outil ont également un grand intérêt dans le domaine scientifique. Différentes formulations ont été proposées dans la littérature. Des solutions semi-analytiques, formulations eulériennes, lagrangiennes ou ALE ont été proposées dans de nombreuses contributions pour modéliser l'écoulement de la matière [4.2]; [4.3]; [4.4]; [4.5]; [4.6]; [4.7]; [4.8].

On peut conclure que la précision de la modélisation du FSW dépend de nombreux paramètres tels que ceux de la loi de comportement du matériau ou de la loi de frottement à l'interface entre l'outil et les tôles, ou encore tels que les coefficients d'échange thermique entre les outils et le matériau ou les caractéristiques thermiques des matériaux.

De ce fait, l'objectif de ce chapitre est de modéliser et de simuler la température dans les différentes zones obtenues lors du soudage FSW. La configuration d'assemblage utilisée est présentée sur la figure 4.1. Nous considérons donc une configuration de soudage de deux plaques d'aluminium 7075 T6 de dimensions 290 * 100 * 4mm.

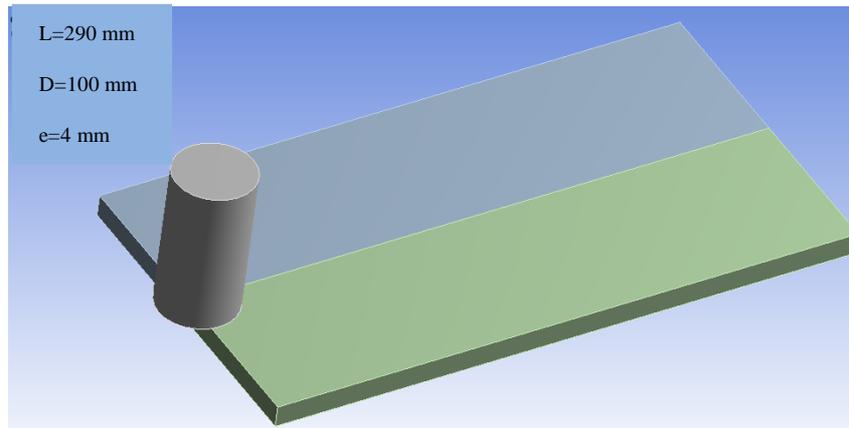


figure 4.1 : Configuration d'assemblage pion/pièce

4.2. Modèle analytique proposé :

Le soudage par friction malaxage est un procédé thermomécanique complexe qui nécessite une bonne connaissance sur les relations existantes entre les paramètres principaux du procédé tels que la profondeur de la pénétration de l'outil, la vitesse de soudage, la vitesse de rotation de l'outil, les propriétés thermomécaniques du matériau à souder. Dans d'autres cas, la déformation est modélisée en utilisant la mécanique des solides déformables et des méthodes numériques pour résoudre le problème non linéaire résultant pour calculer les différentes variables comme la vitesse, la pression, la température..etc.

Pour notre cas, nous utiliserons un couplage thermomécanique avec une loi de comportement qui dépend de la température. Les lois de la thermomécanique, utilisées dans notre modélisation, sont présentées comme suit :

- Equation de conservation de la masse :

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla \cdot V \quad (4.1)$$

- Equation de conservation de la quantité de mouvement :

$$\rho \frac{dV}{dt} = \nabla \sigma \quad (4.2)$$

- Equation de conservation de l'énergie :

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = \nabla \cdot (k \nabla T) + q_v \quad (4.3)$$

où V est le vecteur vitesse, ρ est la masse volumique, σ est le tenseur des contraintes de Cauchy, C_p est la chaleur spécifique, T est le champ de température, K est la conductivité thermique du matériau. La production volumique de la chaleur q_v est donnée par :

$$q_v = -\beta \tau : \nabla V \quad (4.4)$$

où β est la fraction de l'énergie mécanique transformée en chaleur supposée égale à 0,9 dans ce travail [4.9] et T est la partie déviatorique du tenseur des contraintes de Cauchy donnée par :

$$\tau = \mu \left[{}^t \nabla V + \nabla V - \frac{2}{3} (\nabla \cdot V) I \right] \quad (4.5)$$

avec T est la viscosité du fluide qui dépend de la température selon la loi puissance suivante :

$$\mu = A \left(1 - \left(\frac{T - T_{ref}}{T_{fusion} - T_{ref}} \right)^m \right) \quad (4.6)$$

avec A et m des paramètres caractérisant le matériau, T_{ref} est la température de référence et T_{fusion} est la température de fusion du matériau des plaques à souder. La pression p est obtenue en utilisant l'équation d'état suivante [4.10] :

$$p = c^2 \rho \quad (4.7)$$

avec C est la vitesse du son à travers le matériau.

Ces équations sont complétées par les conditions aux limites et les conditions initiales.

4.3. Modélisation numérique :

Nous utiliserons pour notre démarche de simulation, la version structure transitoire du logiciel ANSYS.

PRESENTATION GENERALE DU MODELE DE SIMULATION DE LA TEMPERATURE DANS LES DIFFERENTES ZONES OBTENUES LORS DU SOUDAGE FSW

Dans la présente étude, les deux pièces à souder, considérées dans cet exemple d'application, sont deux plaques en alliage d'aluminium 7075 T6 de même longueur $L = 290\text{mm}$ et de même largeur $D = 100\text{mm}$. Le matériau des deux pièces est supposé incompressible dont la viscosité μ est donnée :

$$\begin{cases} q_{v,i} = -\beta \sum_{j=1}^N \left(\frac{2m_j \mu_i \mu_j}{\rho_j (\mu_i + \mu_j)} \right) \left(\frac{[(V_i - V_j)(r_i - r_j)]^2 (r_i - r_j)}{(r_i - r_j)^2} \right) \nabla W_{ij} \\ \mu_i = A \left(1 - \left(\frac{T_i - T_{ref}}{T_{fusion} - T_{ref}} \right)^m \right) \\ p_i = c^2 \rho_i \end{cases} \quad (4.8)$$

Selon l'équation (4.8) avec les paramètres suivants : $A = 200\text{MPa}\cdot\text{s}^{-1}$, $m = 1$,

$T_{ref} = T_0 = 25^\circ\text{C}$, $T_{fusion} = 600^\circ\text{C}$.

La figure 4.2 illustre le domaine bidimensionnel occupé par le matériau étudié et le domaine circulaire occupé par l'outil ainsi que les conditions aux limites imposées sur les frontières interne et externe.

L'outil est supposé rigide.

Le rayon du pion de l'outil est égal à $r_p = 2.5\text{mm}$ et les propriétés thermomécaniques du matériau des deux plaques sont illustrées sur le tableau suivant :

Tableau 4.1: Caractéristiques mécaniques du matériau

ρ (kg/m^3)	C_p ($\text{J/C}^\circ\cdot\text{kg}$)	k ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)
2 800	875	130

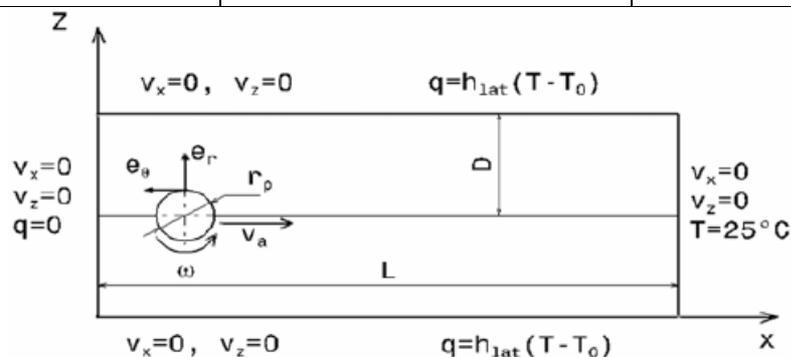


Figure 4.2 : Dimensions du domaine d'étude et conditions aux limites

PRESENTATION GENERALE DU MODELE DE SIMULATION DE LA TEMPERATURE DANS
LES DIFFERENTES ZONES OBTENUES LORS DU SOUDAGE FSW

Dans cette application, on a choisi un pas de temps $t = 10^{-8}$ s, un coefficient de transfert thermique $h_{lat} = 30W/m^2K$ et une température ambiante $T_0 = 25^{\circ}C$. selon la figure4.2, on considère les conditions aux limites et initiales suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{ll} u(x, z, t) = -r_p \omega \cos(\omega t) + V_a & \text{si } (x - x_c)^2 + (z - z_c)^2 = r_p^2 \quad \forall t \geq 0 \\ v(x, z, t) = -r_p \omega \sin(\omega t) & \text{si } (x - x_c)^2 + (z - z_c)^2 = r_p^2 \quad \forall t \geq 0 \\ u(x, z, t) = 0 & \text{si } x = 0 \text{ ou } x = L \text{ ou } z = 0 \text{ ou } z = 2D \quad \forall t \geq 0 \\ v(x, z, t) = 0 & \text{si } x = 0 \text{ ou } x = L \text{ ou } z = 0 \text{ ou } z = 2D \quad \forall t \geq 0 \\ u(x, z, t) = 0 & \text{si } x = 0 \text{ ou } x = L \text{ ou } z = 0 \text{ ou } z = 2D \text{ et } t = 0 \\ v(x, z, t) = 0 & \text{si } x = 0 \text{ ou } x = L \text{ ou } z = 0 \text{ ou } z = 2D \text{ et } t = 0 \end{array} \right. \quad (4.9)$$

Où $\{V\} = \langle u; v \rangle$. Les valeurs de la vitesse de soudage V_a et la vitesse angulaire W de l'outil utilisées ici sont : $V_a = 2mm/s$ et $W = 1400rad/s$.

Dans cette partie, l'ensemble pion/pièce est présent, pour l'obtention de résultats précis.

Pour ce cas là, la modélisation est une étape très importante.

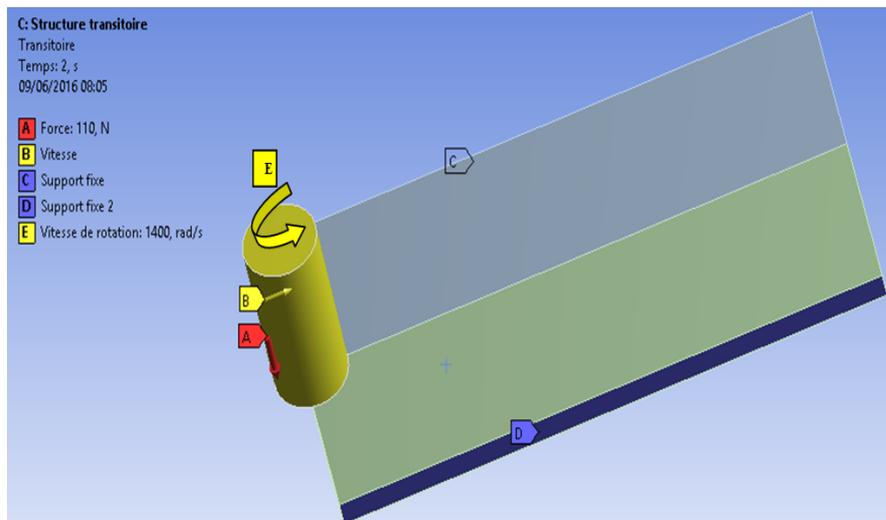


Figure4.3: modélisation de pion/pièce par Ansys

4.4. Le maillage et la gestion de contact :

La pièce à usiner et le pion sont maillés en un certain nombre d'éléments finis rectangulaires. Le nombre de nœuds est 67559 et le nombre des éléments est 13680. le couplage thermomécanique est introduit. La distribution des mailles est uniforme sur toute la

PRESENTATION GENERALE DU MODELE DE SIMULATION DE LA TEMPERATURE DANS LES DIFFERENTES ZONES OBTENUES LORS DU SOUDAGE FSW

surface de pièce .Le frottement de Coulomb est déterminé par le contact entre le pion et la pièce à souder.les propriétés de contact sont : coefficient de frottement est de 0.2,La température initiale de la pièce et de pion est de 25C ° (298K).

La gestion de contact est la partie la plus importante dans un code de calcul par éléments finis. Le contact en général est de type « maitre-esclave ».

Généralement, la surface esclave doit être associée au corps déformable et la surface maitre doit être rigide au maître comme elle montre la figure suivante :

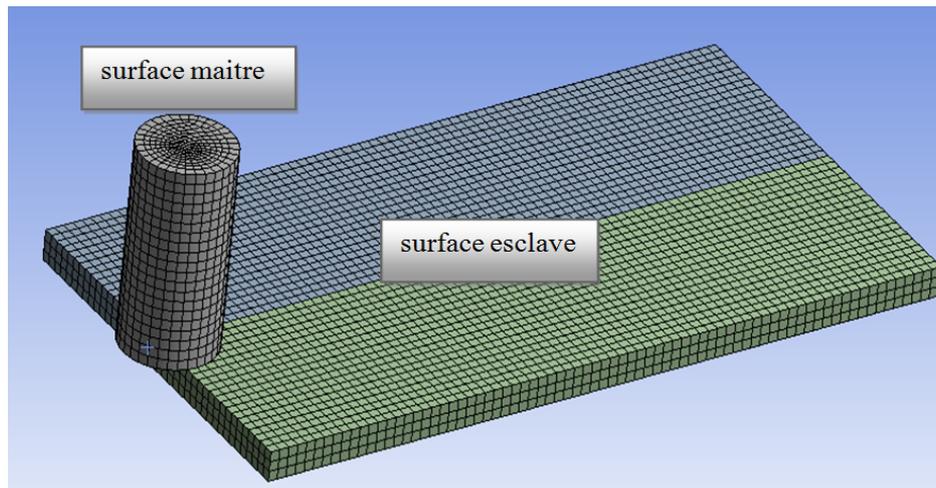


Figure4.4: Méthode appliquée pour le contact pion / pièce

4.5. Résultats obtenus :

4.5.1. La distribution de la température en soudage FSW :

Les résultats obtenus concernant la distribution de la température par le code ansys de modèle lagrangienne aux première instant T_1 sont représentés sur la figure4.5

PRESENTATION GENERALE DU MODELE DE SIMULATION DE LA TEMPERATURE DANS
LES DIFFERENTES ZONES OBTENUES LORS DU SOUDAGE FSW

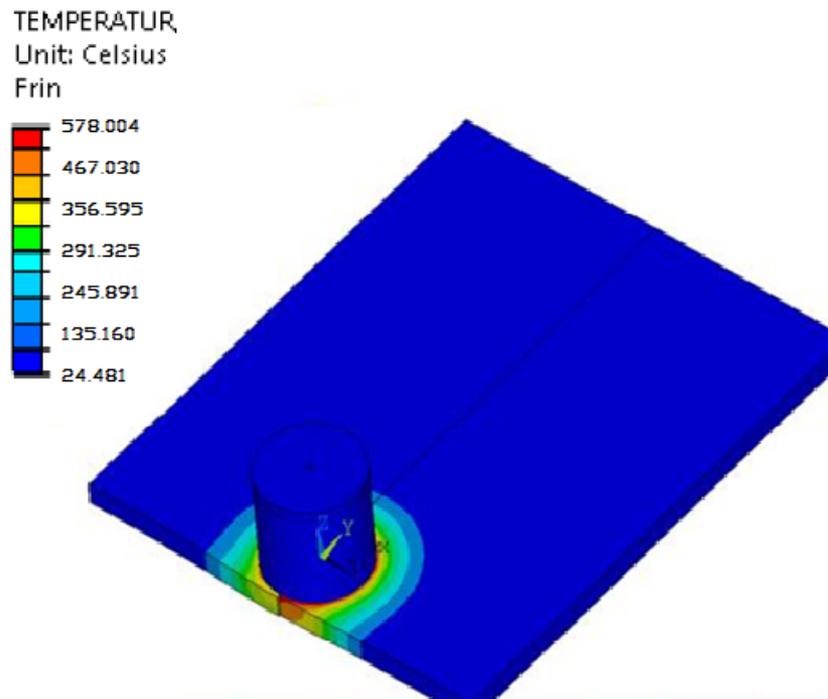


Figure 4.5: champ de température à l'instant T_1

On remarque que la température augmente de 25 °C jusqu'à une valeur maximale 600 °C au voisinage de l'outil. Ceci est dû à l'effet visqueux causé par le malaxage de la matière par le pion. La température de 25 °C représente l'état initial des plaques à souder (alliage d'aluminium).

La température de 600 °C représente la température maximale. On est passé de l'état initial ($T = 25$ °C) à une température représentant toutes les phases successives : initial et malaxage.

Aux instants suivants T_2 , le champ de température se diffuse dans les deux plaques balayées par le pion avec une valeur plus élevée jusqu'à obtention de la température de fusion.

PRESENTATION GENERALE DU MODELE DE SIMULATION DE LA TEMPERATURE DANS
LES DIFFERENTES ZONES OBTENUES LORS DU SOUDAGE FSW

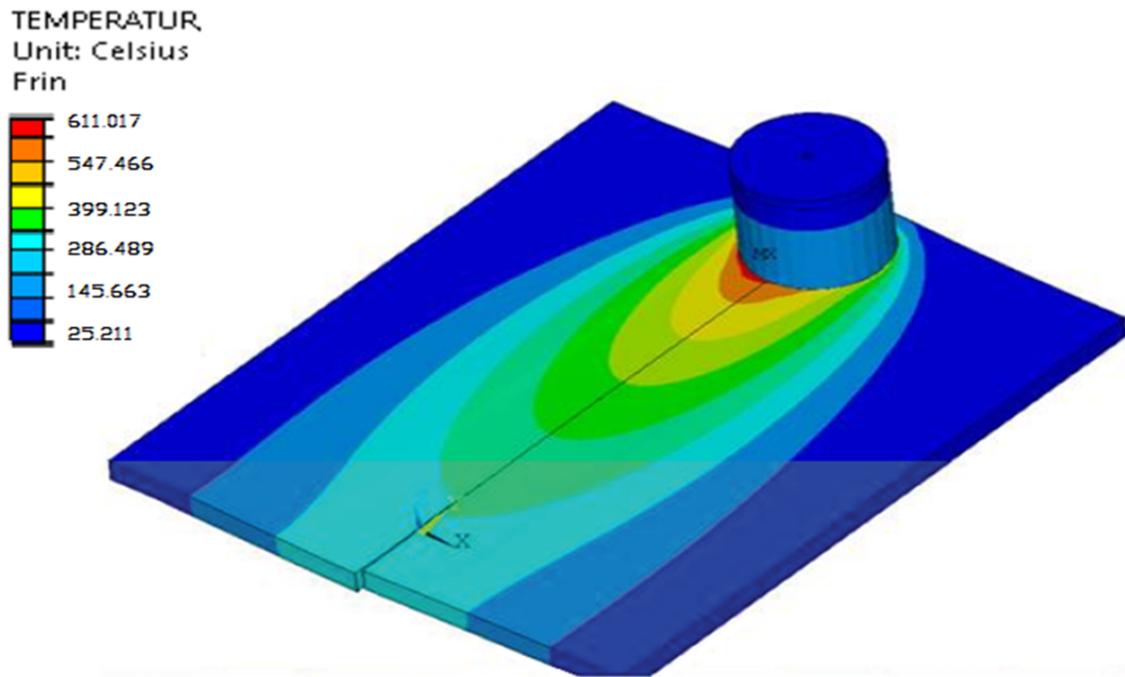


Figure 4.6: champ de température à l'instant T_2

Il est à signaler qu'une bonne gestion du contact est primordiale dans notre modélisation puisque celui-ci va générer aussi bien les efforts transmis à la tôle que la chaleur induite par le frottement de l'outil sur la tôle. Dans le cas d'un contact, la surface peut être définie de façon nodale ou surfacique.

Pour bien illustrer nos résultats, on a comparé notre travail à celui de Jérôme Serri et al intitulé : Etude numérique du procédé de soudage par friction malaxage. On constate dans la figure suivante, l'influence de la fraction d'énergie transmise sur l'évolution de l'échauffement ($^{\circ}\text{C}$) de la tôle dans le cas des différents contacts.

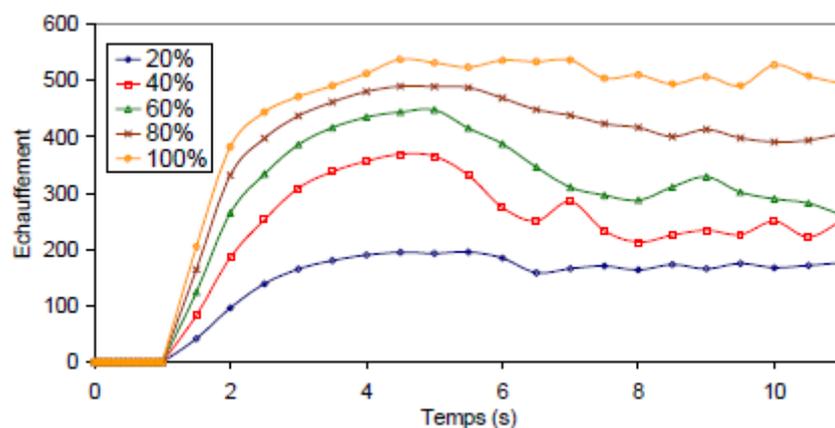


Figure 4.7: Influence de la fraction d'énergie transmise sur l'évolution de l'échauffement ($^{\circ}\text{C}$) de la tôle dans le cas d'un contact nodal

PRESENTATION GENERALE DU MODELE DE SIMULATION DE LA TEMPERATURE DANS
LES DIFFERENTES ZONES OBTENUES LORS DU SOUDAGE FSW

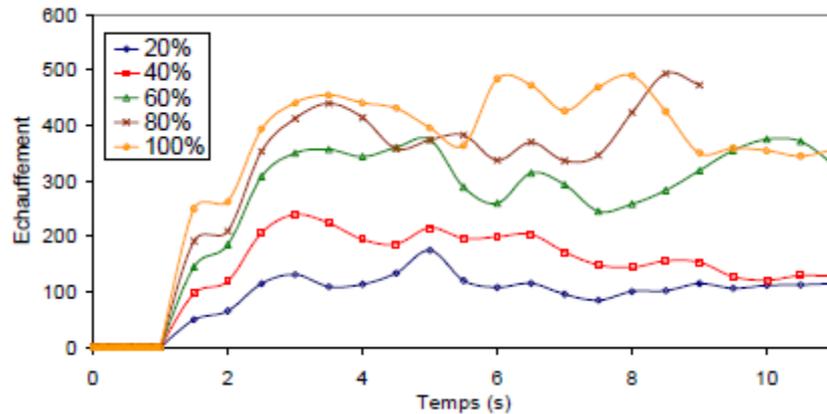


Figure 4.8:Influence de la fraction d'énergie transmise sur l'évolution de l'échauffement (°C)de la tôle dans le cas d'un contact surfacique

Les deux cas cités montre bien une similitude dans les températures obtenues.

Dans notre travail, différents types d'approches ont été mis en évidence, se différenciant par leur complexité et la prise en compte de plus ou moins de mesures de température comme données d'entrée. L'implantation dans le code d'éléments finis dans notre modèlethermo-mécaniquea priten compte les paramètres de soudage : géométrie de l'outil, épaisseur de la plaque, vitesse de rotation, vitesse d'avance, effort de plongée, type de matériau à souder,....

L'étude sur la gestion du contact a permis de mettre en évidence les difficultés quant au choix du type de contact. Cependant, il semblerait que pour l'échauffement, le contact nodal soit plus approprié que le contact surfacique. De plus,les simulations numériques permettent de prédire les champs de températures.

Introduction générale

Dans le cadre de notre étude, nous allons analyser les alliages d'aluminium 7075 T6 soudés par le procédé de soudage FSW.

Ces alliages, qui contiennent Zn, Mg et Cu comme principaux éléments d'addition, possèdent de bonnes caractéristiques mécaniques et bénéficient d'un bon durcissement structural. Leurs utilisations dans le domaine de l'industrie aéronautique (transport aérien, naval et terrestre...) sont de plus en plus fréquentes, car actuellement, les constructeurs apprécient ces alliages pour leur légèreté, leurs qualités mécaniques et leur caractère écologique.

A cet effet, nous nous sommes intéressés à utiliser le procédé de soudage par friction malaxage FSW sur les alliages d'aluminium 7075 T6. Le principe de FSW consiste à apporter une énergie d'origine mécanique par l'action d'un outil à l'interface entre les pièces souder. La liaison se crée de proche en proche à l'état solide.

Le but de notre étude est de bien comprendre cette soudure et une méthode numérique pour l'obtention de la distribution de la température dans les différentes zones obtenues lors du soudage des alliages d'aluminium 7075 T6 par le procédé de soudage FSW.

Notre travail se divise en quatre chapitres :

Le chapitre I : Consiste à étudier les notions nécessaires sur les alliages d'aluminium en général et sur les alliages d'aluminium 7075 T6 en particulier.

Le chapitre II : Consacré au procédé de soudage en général, le procédé de soudage par friction malaxage FSW en particulier.

Le chapitre III : Représentera les techniques et les paramètres de soudage utilisés dans ce travail.

Le chapitre IV : Consistera à développer un modèle de simulation de la température dans les différentes zones obtenues lors du soudage FSW.

ANNEXE



ANSYS, Inc. est un éditeur de logiciels spécialisé en simulation numérique. L'entreprise a son siège à Canonsburg en Pennsylvanie aux États-Unis. Ses produits majeurs sont des logiciels qui mettent en œuvre la méthode des éléments finis, afin de résoudre des modèles préalablement discrétisés. La société possède de nombreuses filiales¹ à travers le monde, notamment en Europe et en Asie.

Principaux produits

ANSYS Structural : Ce produit permet d'effectuer des simulations mécaniques en calcul de structures. Ses principales capacités sont :

- l'analyse statique
- l'analyse modale
- l'analyse harmonique (réponse forcée)
- l'analyse temporelle
- la gestion de différentes situations non-linéaires (contacts, plasticité matériaux, grands déplacements ou grandes déformations).

ANSYS Mechanical : Ce produit dispose des mêmes capacités qu'ANSYS structural, en y ajoutant notamment un solveur thermique, avec modélisation du rayonnement.

ANSYS CFX et Fluent : Ces deux logiciels permettent d'effectuer des simulations en matière de mécanique des fluides. Ils portent le nom des compagnies qui les ont développés, rachetées

par ANSYS.Inc respectivement en février 2003 et en février 2006. Fluent est un solveur : il ne comporte pas de maillages (le maillage doit être réalisé avec un logiciel de maillage, Gambit par exemple, qui est également édité par ANSYS). Fluent est un solveur très utilisé dans l'industrie et la R&D à travers le monde. Il est souvent considéré comme une référence dans le domaine de la modélisation fluide. Le paramétrage du modèle se fait par une interface graphique. Il dispose d'une interface de scripts pour automatiser les processus de calcul. L'un des intérêts de ce logiciel de simulation généraliste, est qu'il dispose d'un nombre relativement important de modèles, pouvant faire face à divers aspects de la mécanique des fluides : écoulements diphasiques (miscible, non miscible, cavitation, solidification), turbulence (LES, KE, Kw, SA, Reynolds stress...), combustion (pré-mélangé et non pré-mélangé), transport de particules, écoulements en milieux poreux, maillages mobiles et dynamiques avec reconstruction du maillage, entre autres. Les schémas numériques temporels et spatiaux peuvent être modifiés pour améliorer la convergence. Fluent est parallélisé et permet de tirer parti de systèmes multiprocesseurs aussi bien au sein d'une seule machine qu'en réseau (cluster, dualcore, plateforme multi-CPU).

Gambit : Un logiciel de maillage édité par la société ANSYS depuis 2006 (l'éditeur historique du logiciel était la société Fluent). Ce logiciel permet de créer sa propre géométrie avec un grand degré de liberté et une grande précision, ou d'importer celle-ci depuis un fichier CAO. Il assure également le maillage automatique de surfaces et de volumes en parallèle de l'introduction de conditions aux limites. Gambit est souvent considéré comme un logiciel de référence par les modélisateurs utilisant Fluent.

ANSYS AUTODYN et ANSYS LS-DYNA : Ces logiciels possèdent des solveurs utilisant les formulations explicites des équations à résoudre, contrairement aux produits précédemment cités. Leur domaine d'application est réservé aux modélisations mettant en jeu des situations mécaniques aux très larges déformations.

ANSYS Electromagnetics et Ansoft : Ce produit permet de résoudre des modélisations mettant en jeu des phénomènes électromagnétiques.

ANSYS Multiphysics : Ce produit rassemble l'ensemble des capacités d'ANSYS en matière de simulation numérique implicite.

Environnements logiciels

Deux environnements logiciels permettent de mettre en œuvre le code ANSYS :

ANSYS classique : Chronologiquement, c'est la première solution logicielle développée par le constructeur. Elle est destinée à la construction de modèles éléments finis à la géométrie simple, facilement constructible à l'aide d'opérations basiques. À partir de cet environnement, l'utilisateur construit directement un modèle éléments finis en utilisant le langage de script APDL (ANSYS Paramétriques Design Language). ANSYS classique est donc destiné à des utilisateurs compétents dans le domaine de la simulation numérique.

ANSYS Workbench : Cette plate-forme propose une approche différente dans la construction d'un modèle en ré-utilisant le code ANSYS initial. Elle est particulièrement adaptée au traitement de cas à la géométrie complexe (nombreux corps de pièces) et aux utilisateurs non confirmés dans le domaine du calcul. Dans cet environnement, l'utilisateur travaille essentiellement sur une géométrie et non plus sur le modèle lui-même. La plate forme est donc chargée de convertir les requêtes entrées par l'utilisateur en code ANSYS avant de lancer la résolution. Le modèle éléments finis généré reste néanmoins manipulable en insérant des commandes propres au code ANSYS.