

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMARI-TIZI-OUZOU**  
**FACULTÉ D'INGÉNIEUR DE LA CONSTRUCTION**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE**



## **MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES**

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER PROFESSIONNEL

EN GÉNIE MÉCANIQUE

OPTION : Fabrication Mécanique et Productique

## **THÈME**

**CONCEPTION ET RÉALISATION D'UN OUTIL DE  
SOUDAGE PAR FRICTION ET MALAXAGE FSW**

PRÉSENTÉ PAR :

BOUNDAOUI Zahir & BENFERHAT Nouara

Soutenu, le 4/11/2017, devant le Jury :

**Mr BOUAZOUNI Amar**  
**Mr SAAL Mohamed**  
**Mr FILALI Saïd**

**President**  
**Encadreur**  
**Examineur**

***Promotion 2016/2017***

## Remerciements

---

Après avoir rendu grâce à Dieu le Tout Puissant et le Miséricordieux qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail. Nous tenons à remercier vivement tous ceux qui, de près ou de loin, ont participé à la rédaction de ce document.

D'abord, nous tenons à remercier nos familles pour leur soutien inconditionnel et indéfectible durant toutes ces années. Nous voudrions les associer à cette réussite car c'est avant tout la leur.

Ensuite, nous voudrions présenter nos remerciements à notre encadreur Mr SAAL, nous lui témoignons notre gratitude pour sa patience et son soutien qui nous a été précieux afin de mener notre travail à bon port.

Aussi, nous tenons à remercier le responsable du Hall Technologique de Oued-Aïssi, et ses collègues qui nous ont chaleureusement accueillis dans leur groupe et pour leurs précieux conseils et leurs coordinations tout au long de la réalisation de ce travail et le développement de ce projet de façon relativement autonome.

Enfin, nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

---

---

## **DEDICACES**

**Ce travail est dédié à nos chers parents**

**A nos chers frères et sœurs et toute la famille**

**A nos chers amis et camarades**

---

## LISTE DES SYMBOLES

---

$T_0$  : est la température initiale

$K$  : la conductivité thermique (w/m.k)

$A$  : la diffusivité thermique ( $m^2/s$ )

$Y$  : la distance à la source (m)

$X$  : la coordonnée dans la direction de soudage.

$\delta$ : La distance de réglage de pion (mm)

$\alpha$  Ou  $\alpha$  : Angle d'inclinaison

$(V_i)$  : Volume du pion "immergé" dans la tôle ( $m^3$ )

$(V_s)$  : Volume "de stockage" disponible entre l'épaulement et la tôle ( $m^3$ )

$(Q_p)$  : Débit d'entraînement du pion ( $m^3/s$ )

$(Q_r)$  : Débit de refoulement ( $m^3/s$ )

$(Q_s)$  : Débit d'entraînement de l'épaulement ( $m^3/s$ )

$a_z$  : Engagement verticale dans la tôle

$I_f$  : Largeur de l'outil engagée dans la matière (mm)

$S_i$  : Section immergée ( $mm^2$ )

$S_e$  : Section du bourrelet ( $mm^2$ )

$T_{fusion}$  : Températures de fusion

$R_m$ : Résistance à la traction (N/mm<sup>2</sup>)

$R_e$  : Limite d'élasticité (N/mm<sup>2</sup>)

$A$  : Allongement à la rupture

$R$  : Epaisseur minimum des pièces autour de la zone malaxée (mm)

---

# LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

---

## Liste des figures

|   |    |
|---|----|
| Figure I. 1 : Principaux types d'assemblage.....  | 4  |
| Figure I. 2 : coupe transversale d'un assemblage.....   | 5  |
| Figure I. 3 : Organigramme des procédés de soudage les plus répandus.....   | 7  |
| Figure I. 4 : Procédé de soudage TIG (avec sa torche).....  | 9  |
| Figure I. 5 : Schéma du mécanisme de soudage à électrode enrobée.....   | 10 |
| Figure I. 6 : Procédés de soudage MIG/MAG.....  | 11 |
| Figure I. 7 : principe du soudage laser.....  | 12 |
| Figure I. 8 : Schéma de principe de fonctionnement du soudage laser.....  | 12 |
| Figure I. 9 : principe de soudage au gaz (oxyacétylénique).....   | 13 |
| Figure I. 10 : Les fissures dans le cordon.....   | 16 |
| Figure I. 11 : les soufflures.....  | 17 |
| Figure I. 12 : Types d'inclusions.....  | 17 |
| Figure I. 13 : Convexité et concavité.....  | 18 |
| Figure I. 14 : Surépaisseur.....  | 18 |
| Figure I. 15 : Principe du soudage par friction.....  | 19 |
| Figure I. 16 : Principe du soudage par friction.....  | 21 |
| Figure I. 17 : Soudage par friction linéaire.....   | 21 |
| Figure I. 18 : Aubes de turbine soudées par friction (source: TWI).....   | 22 |
| Figure I. 19 : Soudage par friction orbital.....  | 22 |
| Figure I. 20 : Schéma de principe du rechargement avec le procédé de soudage par friction.....  | 24 |
| Figure I. 21 : Soudures de réparation à l'aide du procédé "friction stitch".....  | 24 |
| Figure I. 22 : Production de boulons à crochet  | 25 |
| Figure I. 23 : Soudage de tiges de piston   |    |
| Figure I. 24 : Soudage d'une tige de piston à un connecteur avec filet de vis.....  | 25 |
| Figure I. 25 : Engrenage soudé par soudage par friction.....  | 26 |
| Figure I. 26 : a) Assemblage de l'aluminium à du cuivre, b) Assemblage de l'aluminium à de l'acier.....   | 26 |
| Figure II. 1: principe de procédé par friction et malaxage.....   | 29 |
| Figure II. 2 : Description schématique de l'outil ainsi que des étapes réalisées lors du FSW.....   | 30 |
| Figure II. 3 : Machine typique pour le soudage par friction malaxage.....   | 35 |
| Figure II. 4 : Différents types d'outils, leurs caractéristiques et leurs applications.....   | 38 |
| Figure II. 5 : Différentes formes d'épaulement disponibles.....   | 38 |
| Figure II. 6 : Configurations d'outils utilisés pour déterminer l'effet de la géométrie du pion sur la résistance en traction des joints SFM (Zhao, Lin et al. 2005)..... | 40 |
| Figure II. 7 : Angle d'inclinaison de l'outil (Khaled 2005).....  | 41 |
| Figure II. 8 : Structures du joint soudé.....   | 42 |
| Figure II. 9 : Microstructure du cordon.....  | 42 |

---

## LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

---

|  |    |
|--|----|
| Figure II. 10 : Défaut de surface « flash » .....  | 44 |
| Figure II. 11 : Défaut de surface « brûlure » .....  | 44 |
| Figure II. 12 : Défaut interne manque de pénétration en racine .....   | 45 |
| Figure II. 13 : Défaut interne de type tunnel.....   | 45 |
| Figure II. 14 : Défaut interne de type manque de liaison sur oxyde.....  | 46 |
| Figure II. 15 : Conditions de soudage en fonction de la vitesse d'avance et de la vitesse de rotation pour des plaques de 5 mm d'épaisseur en 6061 T6.....                       | 47 |
| Figure II. 16 : Règle des volumes .....  | 48 |
| Figure II. 17 : Ecoulements.....   | 48 |
| Figure II. 18 : Règle des surfaces .....   | 49 |
| Figure II. 19 : Comparaison de la distorsion causée par le soudage FSW à celle causée par le soudage à l'arc sur des plaques d'aluminium de 5 mm d'épaisseur (Cazes [2003])..... | 50 |
| Figure II. 20 : Types de soudages effectués par FSW (Cazes 2003).....  | 51 |
| Figure III. 1 : fraiseuse verticale semi-automatique.....  | 54 |
| Figure III. 2 : schéma général d'assemblage.....   | 57 |
| Figure III. 3 : porte-outil.....   | 58 |
| Figure III. 4 : corps d'outil.....   | 58 |
| Figure III. 5 : outil.....   | 59 |
| Figure III. 6: outil a pion rétractable.....   | 60 |
| Figure III. 7 : couvercle.....   | 60 |
| Figure III. 8 : outil de soudage FSW.....  | 61 |
| Figure III. 9 : montage des plaques à souder.....  | 63 |
| Figure III. 10 : la distance de sécurité entre les brides.....   | 64 |
| Figure III. 11: précaution avant le soudage par friction et malaxage.....  | 64 |
| Figure III. 12: présentation de l'avance de pion et la ligne de joint.....   | 65 |
| Figure III. 13: Angle d'inclinaison de l'outil.....  | 66 |
| Figure III. 14: cordon obtenu apes soudage :a) Face endroit, b) Face envers.....   | 67 |
| Figure III. 15: agrandissement de l'empreinte finale de l'outil.....   | 68 |
| Figure III. 16: Machine de traction.....   | 69 |
| Figure III. 17 : éprouvette de traction normalisée selon la norme AFNOR A03-151.....   | 69 |
| Figure III. 18: prélèvement des éprouvettes par découpage plasma.....  | 70 |
| Figure III. 19: Éprouvettes de traction non soudées :a)avant soudage, b) après soudage. ...  | 70 |
| Figure III. 20: Éprouvettes de traction soudées :a)avant soudage, b) après soudage.....  | 71 |

---

## LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

---

|   |    |
|---|----|
| Figure III. 21: Agrandissement du cordon de l'éprouvette rompue. ....                             | 71 |
| Figure III. 22: Exemple de courbe de traction pour deux éprouvettes (métal de base, soudée). .... | 73 |

### Liste des tableaux

|   |    |
|---|----|
| Tableau I. 1: classement des défauts de soudure.....  | 16 |
| Tableau II. 1 : Descriptions des outils présentés à la figure II -7 (Zhao, Lin et al. 2005).... | 40 |
| Tableau III. 1: composition chimique en % de l'acier E335. ....                                 | 55 |
| Tableau III. 2 : Caractéristiques mécaniques moyennes.....                                      | 55 |
| Tableau III. 3: composition chimique de l'acier X210Cr12. ....                                  | 55 |
| Tableau III. 4: Propriétés physiques de l'acier X210Cr12. ....                                  | 56 |
| Tableau III. 5: Composition chimique en % de l'alliage 1050 A. ....                             | 62 |
| Tableau III. 6: Paramètres de soudage par FSW. ....   | 67 |
| Tableau III. 7: Caractéristiques mécaniques des éprouvettes d'essais de traction. ....          | 72 |

---

# SOMMAIRE

---

|  |    |
|--|----|
| <b>Introduction générale</b> .....                               | 1  |
| <b>CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE SOUDAGE</b>                   |    |
| <b>1 Introduction</b> .....                                      | 3  |
| <b>2 Définition de l'opération de soudage</b> .....              | 3  |
| <b>3 Zones métallurgiques d'une soudure</b> .....                | 4  |
| <b>3.1 La zone fondue (nommée ZF)</b> .....                      | 5  |
| <b>3.2 La zone affectée thermiquement (nommée ZAT)</b> .....     | 5  |
| <b>3.3 Zone de Liaison (nommée ZL)</b> .....                     | 5  |
| <b>3.4 Métal de Base (nommée MB)</b> .....                       | 6  |
| <b>4 Aspect thermique du soudage</b> .....                       | 6  |
| <b>5 Classement des procédés de soudage</b> .....                | 6  |
| <b>5.1 Soudage par fusion</b> .....                              | 8  |
| <b>5.1.1 Principe de soudage par fusion</b> .....                | 8  |
| <b>5.1.2 Quelques procédés de soudage par fusion</b> .....       | 8  |
| 5.1.2.1 <i>Soudage à l'arc électrique</i> .....                  | 8  |
| 5.1.2.2 <i>Soudage au laser</i> .....                            | 11 |
| 5.1.2.3 <i>Soudage au gaz</i> .....                              | 13 |
| <b>5.1.3 Morphologie de la zone de fusion</b> .....              | 14 |
| <b>5.1.4 Processus de solidification des soudures</b> .....      | 14 |
| <b>5.1.5 Effet des paramètres de soudage</b> .....               | 15 |
| <b>5.1.6 Défauts de soudage</b> .....                            | 15 |
| <b>5.2 Soudage par pression</b> .....                            | 18 |
| <b>6 Soudage par friction</b> .....                              | 19 |
| <b>6.1 Principe de fonctionnement</b> .....                      | 19 |
| <b>6.2 Classement des procédés de soudage par friction</b> ..... | 20 |
| <b>6.2.1 Soudage par friction avec rotation</b> .....            | 20 |
| <b>6.2.2 Soudage par friction sans rotation</b> .....            | 21 |

---

## SOMMAIRE

---

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 6.2.2.1 | <i>Soudage par friction linéaire</i> .....         | 21 |
| 6.2.2.2 | <i>Soudage par friction orbital</i> .....          | 22 |
| 6.2.2.3 | <i>Soudage par friction-malaxage</i> .....         | 22 |
| 6.2.3   | <b>Autres procédés basés sur la friction</b> ..... | 23 |
| 6.3     | <b>Applications</b> .....                          | 24 |
| 7       | <b>Conclusion</b> .....                            | 27 |

## CHAPITRE II : PROCEDE DU SOUDAGE FSW

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 1       | <b>Introduction</b> .....   | 28 |
| 2       | <b>Historique</b> .....   | 28 |
| 3       | <b>Mise en ouvrage du procédé FSW</b> .....   | 29 |
| 3.1     | <b>Descriptions du procédé</b> .....  | 29 |
| 3.2     | <b>Principes</b> .....  | 29 |
| 3.3     | <b>Propriétés</b> .....   | 31 |
| 3.4     | <b>Applications</b> .....   | 33 |
| 3.4.1   | <b>Applications actuelles</b> .....   | 33 |
| 3.4.2   | <b>Domaines futurs</b> .....  | 34 |
| 4       | <b>Caractérisations du procédé</b> .....  | 35 |
| 4.1     | <b>Équipements</b> .....  | 35 |
| 4.2     | <b>Paramètres du soudage par friction malaxage</b> .....                              | 36 |
| 4.2.1   | <b>Paramètre géométrique</b> .....  | 37 |
| 4.2.1.1 | <i>Géométries de l'épaulement</i> .....   | 38 |
| 4.2.1.2 | <i>Géométries du pion</i> .....   | 39 |
| 4.2.2   | <b>Autres paramètres</b> .....  | 40 |
| 4.2.2.1 | <i>Vitesses de rotation et d'avance</i> .....   | 40 |
| 4.2.2.2 | <i>Forces verticales exercées par l'outil</i> .....                                   | 41 |
| 4.2.2.3 | <i>Angles d'inclinaison de l'outil</i> .....  | 41 |
| 5       | <b>Caractérisation de la microstructure et défaut des joints soudés par FSW</b> ..... | 41 |

---

## SOMMAIRE

---

|            |  |    |
|------------|--|----|
| <b>5.1</b> | <b>Structures du joint soudé</b> ..... | 41 |
| <b>5.2</b> | <b>Microstructure du cordon</b> .....  | 42 |
| <b>5.3</b> | <b>Les défauts</b> .....               | 43 |
| <b>6</b>   | <b>Modélisation</b> .....              | 46 |
| <b>6.1</b> | <b>Modèle thermique</b> .....          | 46 |
| <b>6.2</b> | <b>Modèle géométrique</b> .....        | 47 |
| <b>7</b>   | <b>Avantage et limite</b> .....        | 49 |
| <b>8</b>   | <b>Conclusion</b> .....                | 52 |

### CHAPITRE III : CONCEPTION ET REALISATION D'UN OUTIL FSW

|              |  |    |
|--------------|--|----|
| <b>1</b>     | <b>Introduction</b> .....  | 53 |
| <b>2</b>     | <b>Conception et réalisation</b> .....   | 53 |
| <b>2.1</b>   | <b>Stratégies de travail</b> .....   | 53 |
| <b>2.2</b>   | <b>Présentation de la machines utilisée</b> .....                                      | 53 |
| <b>2.3</b>   | <b>Matériaux utilisés pour l'outil et leurs propriétés</b> .....                       | 54 |
| <b>2.4</b>   | <b>Conception des pièces de l'outil</b> .....  | 56 |
| <b>2.4.1</b> | <b>Éléments composant notre outil FSW</b> .....  | 56 |
| <b>2.4.2</b> | <b>Définition et rôle de chaque élément</b> .....                                      | 57 |
| <b>2.5</b>   | <b>Repérage et Feuilles d'analyse des surfaces des pièces</b> .....                    | 61 |
| <b>3</b>     | <b>Mise en fonctionnement de l'outil</b> .....   | 62 |
| <b>3.1</b>   | <b>Réalisation du cordon de soudure</b> .....  | 62 |
| <b>3.1.1</b> | <b>Matériaux des plaques à souder et leur préparation</b> .....                        | 62 |
| <b>3.1.2</b> | <b>Montage des plaques</b> .....   | 63 |
| <b>3.1.3</b> | <b>Précaution avant soudage</b> .....  | 64 |
| <b>3.1.4</b> | <b>Procédure et paramètres pris en compte dans le cadre de l'expérimentation</b> ..... | 65 |
| <b>3.1.5</b> | <b>Résultat de la soudure et discussion</b> .....                                      | 67 |
| <b>3.2</b>   | <b>Essai de traction</b> .....   | 68 |

---

## SOMMAIRE

---

|                                     |  |        |
|-------------------------------------|--|--------|
| 3.2.1                               | Description de la machine de traction du laboratoire ..... | 68     |
| 3.2.2                               | L'éprouvette utilisée dans l'essai .....                   | 69     |
| 3.2.3                               | Résultat obtenu .....                                      | 70     |
| 3.2.4                               | Exemple de courbes de traction .....                       | 72     |
| 3.3                                 | Le coefficient d'efficacité du joint soudé .....           | 73     |
| <br><b>Conclusion général</b> ..... |  | <br>76 |
| <b>Bibliographie.</b>               |  |        |
| <b>Annexe.</b>                      |  |        |

---

# Introduction générale

---

Les alliages d'aluminium à durcissement structural sont utilisés pour l'allègement des structures des véhicules de transport aérien, naval et terrestre. Cependant, ces alliages sont difficilement soudables par voie classique et la principale méthode d'assemblage des pièces constituées avec ces alliages reste le rivetage. Ce processus présente néanmoins de nombreux désavantages notamment une jonction hétérogène entre les deux pièces, un surcroît de masse ainsi qu'une concentration de contraintes au niveau des alésages, particulièrement dommageable pour la tenue en fatigue.

Le soudage par friction malaxage (*friction stir welding* abrégé **FSW**) est un nouveau procédé d'assemblage mis au point par la société *The Welding Institute*. L'originalité de ce procédé consiste à souder les pièces à l'état solide, ce qui permet de supprimer les défauts liés à la solidification et conduit à des contraintes internes faibles par rapport au soudage classique. Il devient alors possible d'assembler des alliages généralement considérés comme difficilement soudables tels que ceux mentionnés précédemment. Ce procédé possède un potentiel industriel important car il permet de créer des structures légères à un coût de production inférieur à celui des technologies traditionnelles. Les principaux avantages de ce procédé sont :

- La robustesse opératoire,
- L'absence de fil d'apport et de préparation des bords avant soudage,
- Une grande résistance des joints soudés,
- Un faible niveau de contraintes résiduelles,
- Et enfin, la neutralité environnementale.

Le présent document découle des travaux réalisés dans le cadre d'un projet sur le soudage par friction malaxage compris entre mai et septembre 2017. De manière plus précise, ce mémoire vise à montrer, à travers des quatre chapitres, les diverses démarches de recherche qui ont permis d'atteindre les objectifs visés. Il est important de mentionner ici que le projet de recherche est composé de deux grandes sections : théorique et expérimentale qui sont présentées en parallèle puisqu'elles sont jumelées l'une à l'autre.

Le premier chapitre correspondant à une étude bibliographique et un rappel des définitions importantes liées au soudage et un état de l'art sur le développement et leurs applications mécaniques.

## **Introduction générale**

---

Le deuxième chapitre présente les principales notions et définitions liées au soudage par friction et malaxage et permet de passer en revue essentiel des travaux de recherche réalisés autour de ce procédé notamment pour mettre en lumière les études liées à la caractérisation du comportement mécanique, et la formation des joints de soudure, ainsi que les biens et les avantages du procédé.

Enfin, le dernier chapitre porte sur l'ensemble des travaux réalisés tout au long du projet ainsi regroupe nos propres résultats. Ce chapitre est devisé en deux parties :

La première partie est consacrée à la conception et la réalisation de l'outil, ou nous exposons la proposition retenue pour la conception et la représentation des éléments,

La deuxième partie dans lequel nous rapportons la procédure expérimentale de la mise en fonctionnement du dispositif conçu ainsi que les résultats obtenus et l'interprétation d'essais de traction réalisés pour conclure à la fin le coefficient d'efficacité de la soudure.

Nous terminons l'étude par une conclusion générale à travers laquelle un bilan global du travail fait sera dressé et des perspectives.

## **1 Introduction**

Le soudage est utilisé à travers le monde depuis des siècles. Auparavant les matériaux, les procédés utilisés et le degré de fiabilité des assemblages soudés étaient très éloignés des degrés de perfectionnement actuels. L'ère industrielle du soudage débute avec le 19ème siècle et cette méthode d'assemblage devient de plus en plus utilisée dans tous les domaines. L'assemblage par soudage s'est largement développé au fil du temps et a connu plusieurs types de procédés qui seront récapitulés par la suite.

Parmi les procédés de mise en œuvre des matériaux métalliques, le soudage se situe en première position. En effet, une grande partie des objets manufacturés qui nous entourent font appel à des technologies d'assemblage par soudage pour leur réalisation. La connaissance de ces technologies permet d'améliorer et/ou de diminuer les coûts de fabrication de ces objets.

Le développement actuel de soudage est axé vers le perfectionnement des techniques d'utilisation (procédures, métallurgie, et équipement), vers l'introduction des robots industriels et de la programmation, vers l'application des nouvelles sources d'énergie.

## **2 Définition de l'opération de soudage**

Le soudage des métaux est une technique d'assemblage permanent qui consiste à réunir deux ou plusieurs éléments métalliques de manière à assurer la continuité métallique (chimique, mécanique...etc.). Il peut être fait par chauffage (avec ou sans fusion du matériau), par pression, par l'un et l'autre, avec ou sans l'aide d'un produit d'apport permettant un meilleur lien entre les pièces.

Dans le cas de l'utilisation d'un métal d'apport, ce composé doit avoir des propriétés au moins égales et la température de fusion étant de même ordre de grandeur que celle du matériau de base.

Durant la phase de soudage, le métal d'apport ainsi que le métal de base (c'est-à-dire les éléments à assembler) sont portés à la température de fusion permettant ainsi un mélange des éléments. On obtient après solidification, un joint dont les caractéristiques sont très proches de celles d'un métal de base (homogène) ou un joint hétérogène dans le cas de métaux différents.

Beaucoup de métaux sont soudables moyennant des études préalables et la mise au point de modes opératoires spécifiques ; citons les aciers, le cuivre, l'aluminium, le nickel et leurs alliages. [1]

Différents types d'assemblage peuvent être rencontrés en fonction des contraintes appliquées à la structure réalisée, de la nature et des dimensions de l'élément à assembler (Figure I.1)

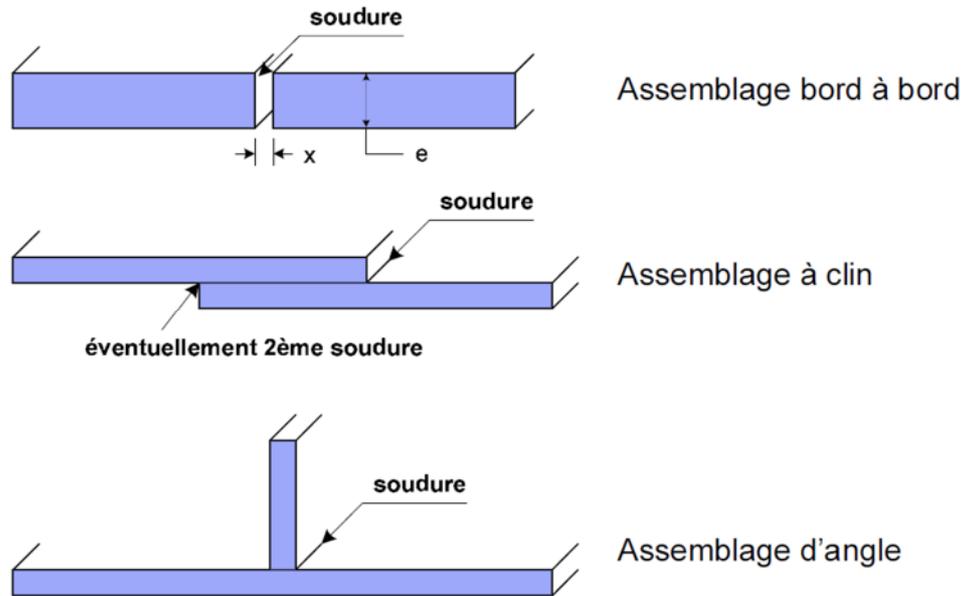


Figure I. 1 : Principaux types d'assemblage.

### 3 Zones métallurgiques d'une soudure

L'opération de soudage peut être assimilée à une opération locale d'élaboration métallurgique et à une opération locale de traitement thermique donnant une structure cristalline dépendant à la fois de la composition chimique élaborée et du traitement thermique. Ainsi réalisée, la soudure se décompose en plusieurs zones, elle est donnée sur la (Figure I.2). [2]

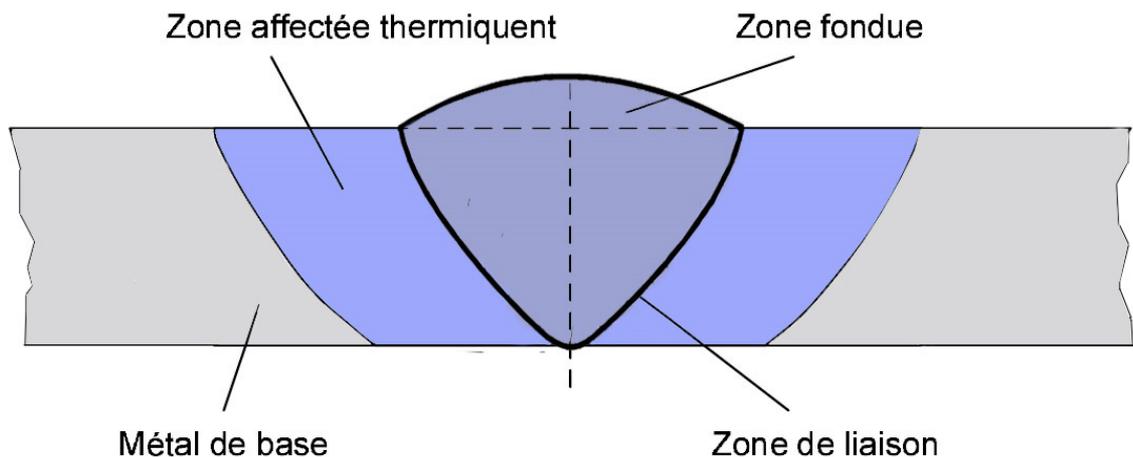


Figure I. 2 : coupe transversale d'un assemblage.

### 3.1 La zone fondue (nommée ZF)

C'est la zone où l'état liquide a été atteint et dans laquelle a été élaborée la composition chimique. La structure de métal de base initial est changée par les processus de fusion et solidification.

On distingue, au sein de cette zone, des gradients de concentration, de la partie la plus chaude vers la moins. Il est possible d'examiner la composition d'une soudure ainsi que les variations de dureté.

### 3.2 La zone affectée thermiquement (nommée ZAT)

C'est la zone qui se trouve à côté de la zone fondue sur une largeur plus ou moins grande, elle est soumise à l'élévation de température sans être portée à la fusion. Le chauffage, la vitesse de refroidissement et la composition chimique de cette zone génèrent des modifications plus ou moins importantes de la structure métallurgique.

### 3.3 Zone de Liaison (nommée ZL)

Cette zone est située à la frontière entre la zone fondue et le zone affectée thermiquement, correspond à la surface sur laquelle la solidification du métal fondu a commencé.

### 3.4 Métal de Base (nommée MB)

Au-delà de la zone affectée thermiquement, l'élévation de température est insuffisante pour engendrer une quelconque transformation structurale. Cette zone est aussi dite non affectée.

## 4 Aspect thermique du soudage

Au cours du soudage, l'effet thermique est caractérisé par :

- Élévation de température et refroidissement (Un changement rapide de température) ;
- Un faible temps de maintien de la température maximale
- Une importante énergie de soudage régissant le cycle thermique et induisant dans la structure une zone fondue et une zone affectée thermiquement ;
- Une localisation de points chauds entraînant un gradient de température important entre les parties chaudes et les parties froides. [3]

## 5 Classement des procédés de soudage

Il existe de nombreux procédés de soudage dont les principes et la mise en œuvre sont très différents, La (Figure I .3) présente un classement des procédés de soudage en fonction de la source d'énergie utilisée pour réaliser une soudure.

Les procédés de soudage se subdivisent en deux groupes, en l'occurrence les procédés de soudage par fusion et les procédés de soudage par pression.

Dans le cas de soudage par fusion, les matériaux à assembler sont portés à fusion, avec ou non un métal d'apport ou une atmosphère protectrice (un gaz ou un vide) et le deuxième groupe de procédés sont les procédés de soudage par pression, ou les matériaux à assembler sont pressés l'un contre l'autre, avec ou sans chauffage additionnel des surfaces à souder. [4]

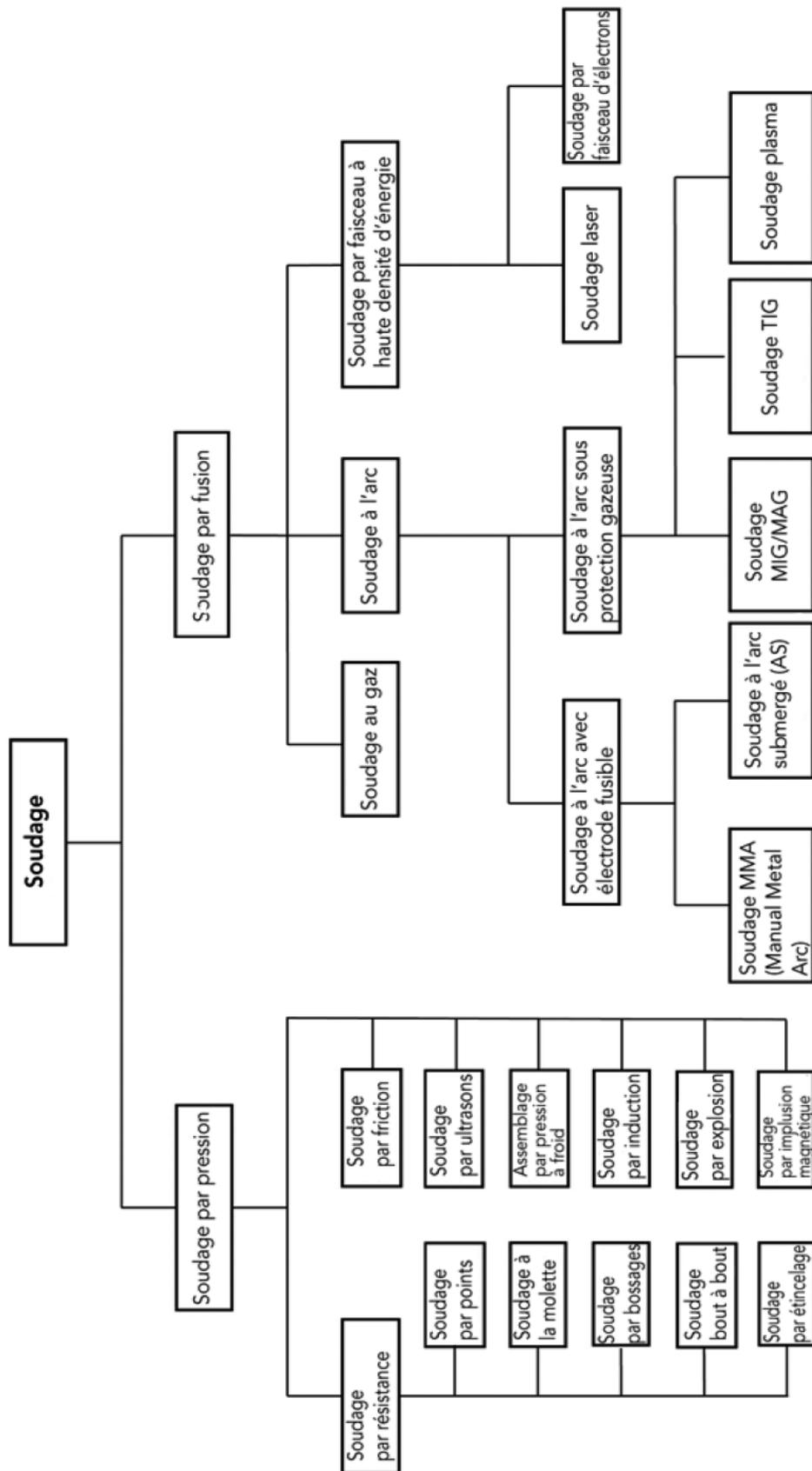


Figure I. 3 : Organigramme des procédés de soudage les plus répandus. [4]

## 5.1 Soudage par fusion

### 5.1.1 Principe de soudage par fusion

Le principe de soudage par fusion consiste à porter à fusion les bords des pièces à souder à l'aide d'une source calorifique puissante qui peut être : un arc électrique, une flamme de gaz, une réaction chimique, un laitier fondu, l'énergie d'un faisceau électronique, un jet de plasma, l'énergie des rayons laser.

Dans tous ces cas, le métal d'un bord fondu sous l'action de la chaleur établit une liaison intime avec le métal en phase liquide de l'autre bord formant ainsi une certaine quantité de métal à l'état liquide appelée (bain de fusion). Par suite de la solidification du métal contenu.

### 5.1.2 Quelques procédés de soudage par fusion

Le procédé le plus courant est le soudage à l'arc électrique tel que le soudage TIG, MIG/MAG et avec électrodes enrobées. D'autres procédés de soudage où les matériaux sont amenés à fusion sont par exemple : Le soudage au laser, le soudage aluminothermique, le soudage oxyacétylénique, etc.

#### 5.1.2.1 Soudage à l'arc électrique

Dans le soudage à l'arc, la chaleur est fournie par l'arc électrique qui se produit entre une baguette de métal d'apport appelée (électrode) et les pièces à assembler afin de porter leurs bords à la fusion, menant à la formation d'un bain de métal fondu qui se solidifie sans action extérieure. La protection de la soudure se fait soit par un gaz ou par l'enrobage de la baguette. Et dans ce procédé nous pouvons citer,

- Le Soudage à l'arc électrique (TIG) :

Le soudage TIG (Tungsten Inert Gas), utilise une électrode non fusible constituée d'une pointe de tungstène portée par une torche dotée d'une arrivée annulaire (buse) de gaz inerte couramment de l'argon ou de l'hélium, ce gaz protège l'arc électrique et le bain de fusion de l'atmosphère externe durant le soudage. Le plasma engendré par le passage de l'arc apporte la chaleur provoquant la fusion des pièces à assembler. (Figure I .4) [2]

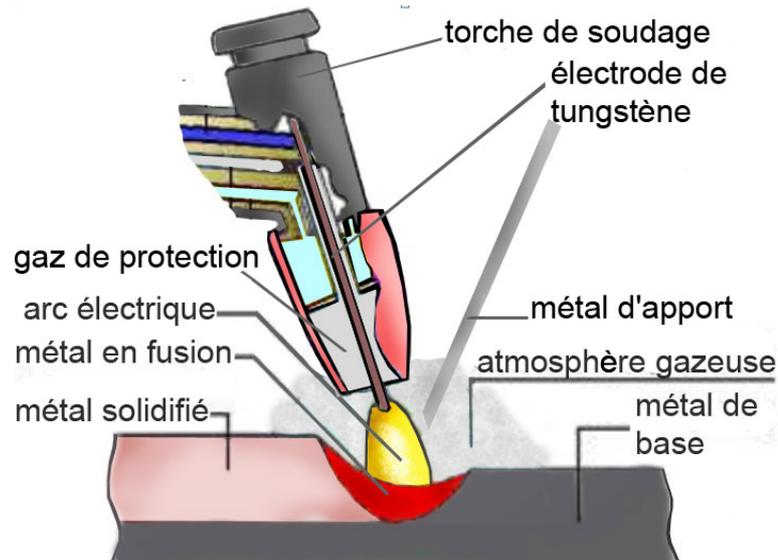


Figure I. 4 : Procédé de soudage TIG (avec sa torche)

▪ Le soudage à l'électrode enrobée (MMA) :

Le procédé de soudage à l'électrode enrobée utilise une source d'énergie extérieure, à savoir l'arc électrique. Cet arc apporte l'énergie nécessaire pour fondre le métal de base et le métal d'apport que constitue l'électrode.

L'électrode est formée d'une âme métallique et d'un enrobage. L'âme doit avoir au moins les mêmes caractéristiques mécaniques que le métal de base. Elle fond en gouttelettes qui sont projetées dans le bain de fusion. Après refroidissement et solidification, l'âme constitue le cordon de soudure. L'enrobage de l'électrode dépose sur le métal en fusion un laitier protecteur, et participe aussi à la formation d'un gaz. Le laitier protège le bain de fusion tandis que le gaz protège le bain et l'arc. Une fois la soudure solidifiée, on enlève le laitier à l'aide d'un petit marteau à piquer. [5]

La (Figure I .5) illustre le principe du soudage par électrode enrobée. [6]

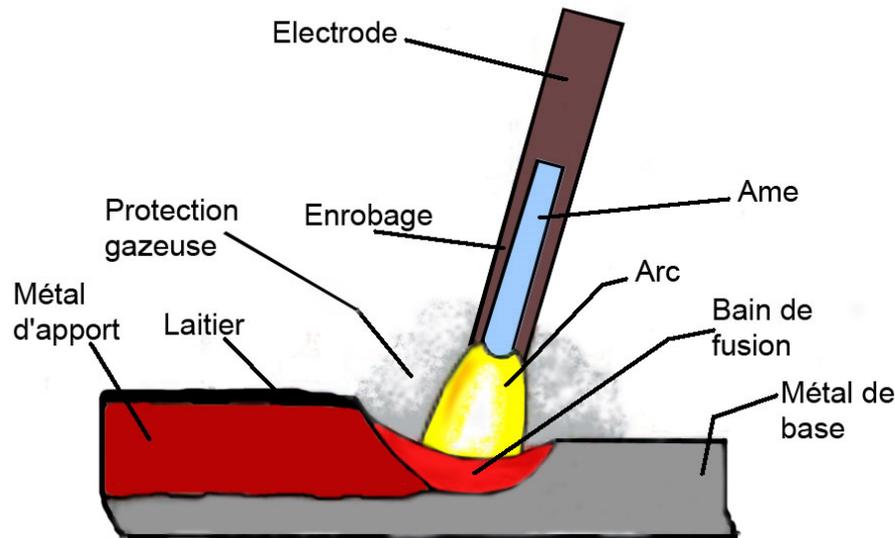


Figure I. 5 : Schéma du mécanisme de soudage à électrode enrobée

- Le soudage électrique (MIG-MAG) :

Le procédé (MIG-MAG) (nommé aussi Gaz Métal Arc Welding, GMAW), comparativement au procédé TIG, déjà employé à l'époque, s'est aussi révélé plus rapide. Aujourd'hui, ce procédé de soudage est indispensable dans l'industrie de la fabrication en général.

La fusion est obtenue par la création grâce à un générateur de courant d'une différence de potentiel entre le fil-électrode, continu et fusible, et le métal de base (Figure I .6), Un arc électrique est ainsi créé et il fournit toute l'énergie nécessaire pour faire fondre d'une part l'électrode qui constitue le métal d'apport et d'autre part localement le métal de base.

La puissance électrique est apportée au fil du soudage au niveau d'une pièce métallique cylindrique appelée tube-contact. La longueur de fil sortant du tube contact porte le nom de partie terminale et la hauteur de l'arc électrique porte le nom de longueur d'arc. Un gaz ou un mélange de gaz provenant d'une source externe assure la protection du bain de fusion contre la contamination atmosphérique durant le soudage.

Le procédé GMAW se divise en deux catégories Selon la nature du gaz de protection employé.

- ✓ **Le procédé MAG** (Métal Active Gas) qui utilise un gaz actif. Il peut s'agir de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>), d'un mélange d'argon et de gaz carbonique (Ar-CO<sub>2</sub>) ou d'un mélange d'argon et d'oxygène (Ar-O<sub>2</sub>).

- ✓ **Le procédé MIG** (Metal Inert Gas) qui emploie un gaz inerte, à savoir de l'argon (Ar), de l'hélium (He) ou un mélange d'argon et d'hélium (Ar-He).

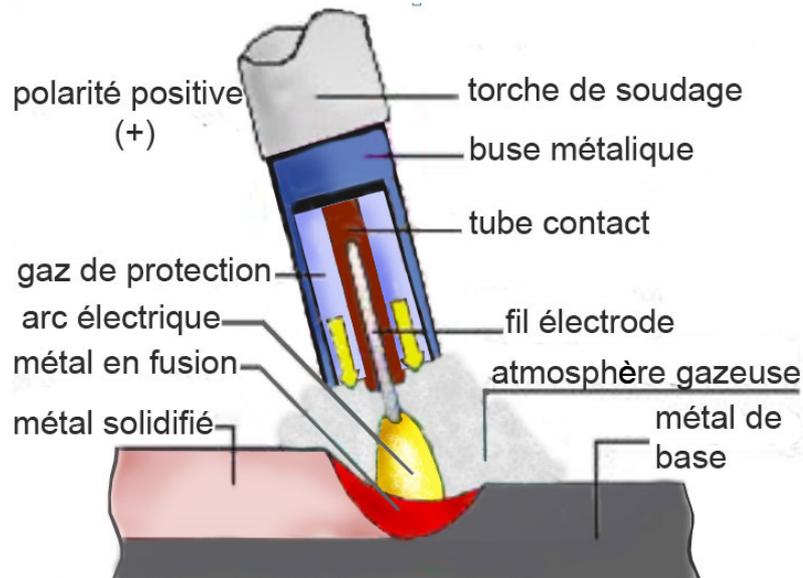


Figure I. 6 : Procédés de soudage MIG/MAG

Le soudage MIG/MAG est utilisé lorsque l'utilisateur recherche une productivité importante. Avec un taux de projection faible, il est possible de souder les fortes épaisseurs et de faire du remplissage de chanfreins par passes multiples. Ce procédé est utilisé en semi-automatique ainsi qu'en automatique pour un large éventail d'industrie (chaudronnerie, constructions navales...). [6] [7] [8]

#### 5.1.2.2 Soudage au laser

Au début des années 70, la technologie laser prend place dans le milieu industriel dans le domaine des traitements des matériaux. Des outils de découpage des tôles par faisceau laser ont été utilisés pour la première fois en 1975 et c'est en 1984 que la technologie laser a été développée pour le soudage des métaux dans les industries de production en série.

Le soudage laser est un procédé de soudage à haute densité d'énergie. Le faisceau laser est orienté par un jeu de miroirs ou par fibre optique de la source vers des lentilles ou il passe par un système de focalisation permettant de réduire son diamètre. Après focalisation, le faisceau est envoyé directement sur la surface des pièces à souder (Figure I.7).

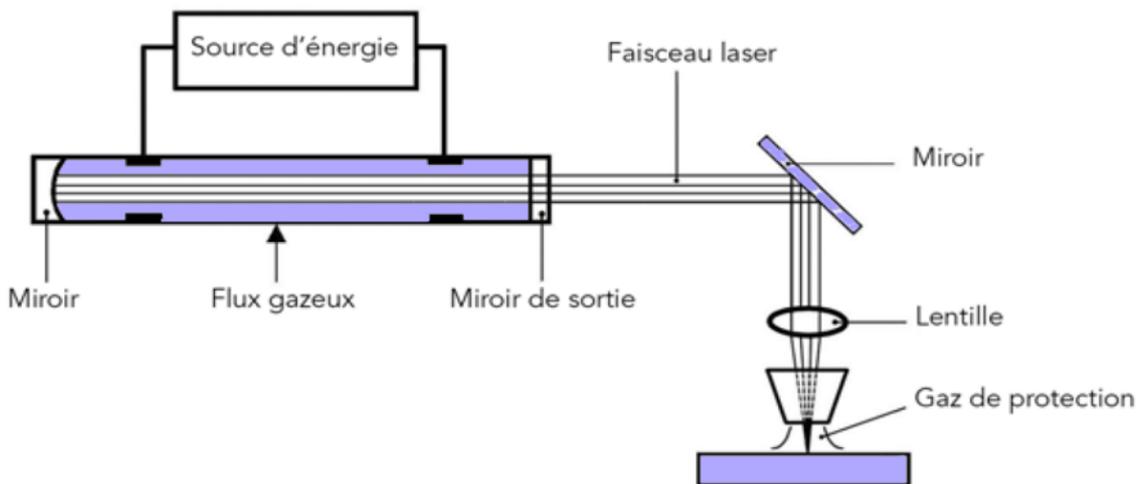


Figure I. 7 : principe du soudage laser

Un bain de métal fondu se développe tout autour de capillaire. Le déplacement relatif de celui-ci engendre la formation d'un joint soudé. L'énergie thermique est distribuée non plus en surface mais sur toute la profondeur de "trou" rempli de vapeurs métalliques autour duquel la matière est fusionnée. Cette caractéristique permet d'obtenir des cordons très étroits et fortement pénétrants (Figure I.8). [7] [4] [9]

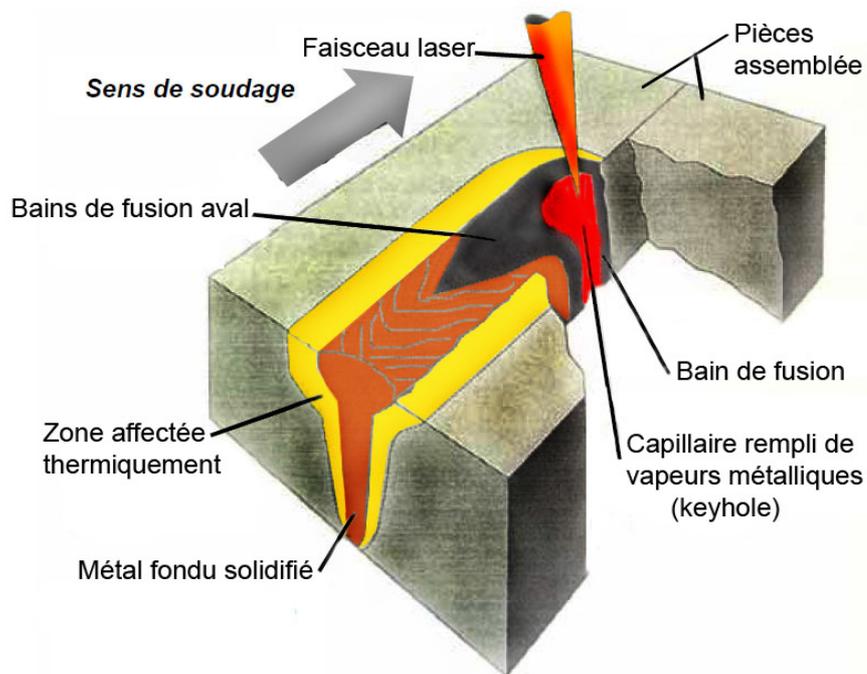


Figure I. 8 : Schéma de principe de fonctionnement du soudage laser.

### 5.1.2.3 Soudage au gaz

Le soudage au gaz (oxyacétylénique) consiste à assembler des pièces de métal à l'aide d'un métal d'apport amené à fusion par la chaleur de la flamme d'un chalumeau. L'apport de chaleur est fourni par la combustion d'un gaz combustible, généralement acétylène ou propane, mélangé dans certaines proportions à un gaz comburant (l'oxygène) dont la température de la flamme atteint environ 3 100 °C.

L'acétylène ( $C_2H_2$ ) est le principal gaz combustible utilisé pour le soudage au gaz. Il se compose de 92,3 % de carbone et de 7,7 % d'hydrogène. Sa combustion dans l'oxygène produit une température de combustion plus élevée que celle de tout autre hydrocarbure gazeux et sa flamme est bien plus concentrée que celle de tous les autres gaz.

La flamme est dirigée sur les surfaces du joint, qui fondent. Un métal d'apport peut être ajouté selon le besoin. Le bain de fusion est protégé de l'air par la zone réductrice et par la zone secondaire de la flamme. Il faut par conséquent retirer la flamme progressivement à la fin de l'opération de soudage (Figure I .9).

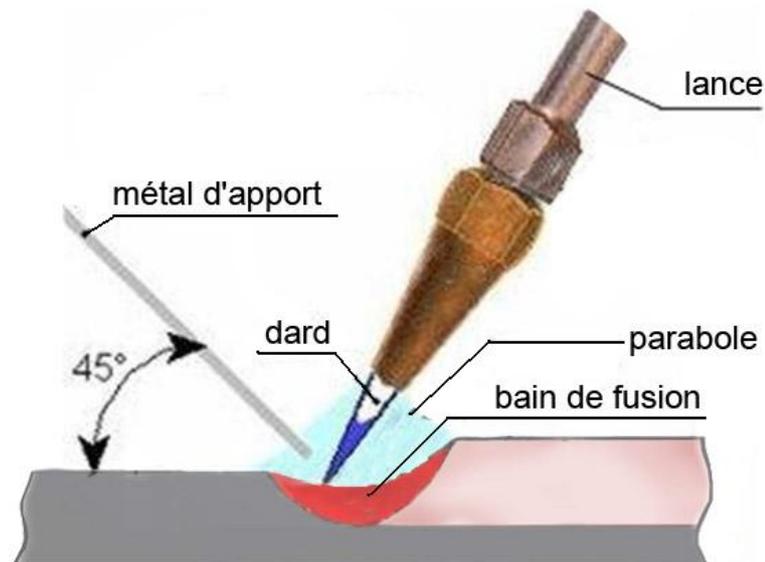


Figure I .9 : principe de soudage au gaz (oxyacétylénique)

Le soudage oxyacétylénique est caractérisé par des vitesses d'échauffement et de refroidissement du métal plus faibles en comparaison avec d'autres procédés de soudage telle que le soudage à l'arc électrique ce qui conduit à la formation d'une

structure a gros grains dans le métal adjacent au cordon de soudure, ce qui diminue la résistance du joint soudé et provoque des déformations importantes de la pièce soudée.

Le soudage au gaz (oxyacétylénique) est l'un des procédés de soudage les plus anciens et a longtemps été le plus répandu. Il convient parfaitement pour les travaux de réparation ou de construction ou encore pour le soudage de tubes et de structures faits de matériaux (comme la fonte) particulièrement sujets à la fissuration, avec des parois de 0,5 à 6 mm d'épaisseur. Il est également très utilisé pour la soudure de métaux non ferreux ainsi que pour le placage ou le rechargement dur, mais aussi pour le coupage, le chauffage et le redressage à la flamme. [4] [10]

### **5.1.3 Morphologie de la zone de fusion**

La forme et la constitution du bain de fusion dépendent de multiples facteurs tels que la nature du matériau à souder, les caractéristiques de l'arc ou du plasma permettant la fusion du métal qui sont liées aux paramètres technologiques du procédé, et les mouvements du bain de fusion.

Les bains de fusion créés lors des opérations de soudage sont le siège de processus thermo physiques très complexes qui met en jeu des phénomènes thermiques, convectifs, chimiques et électromagnétiques interdépendants selon la nature du procédé utilisé.

Ces mouvements de convection du métal liquide ou gazeux influencent de façon importante la forme du cordon et les transferts de chaleur pouvant induire des hétérogénéités (ségrégations) ou la présence de défauts tels que les inclusions ou porosités. [11]

### **5.1.4 Processus de solidification des soudures**

Bien que la plupart des théories sur les mécanismes de solidification développées pour les structures de fonderie aient été appliquées avec succès pour les structures de solidification au soudage, la formation des premiers cristaux solides se fait de manière très différente. Alors qu'en fonderie la solidification s'effectue par un procédé de germination hétérogène et croissance, la solidification des soudures s'effectue par croissance épi taxique à partir des grains non fusionnés de la zone affectée thermiquement adjacente (zone de fusion partielle) [66Sav].

La croissance des grains progresse parallèlement à la direction du gradient maximal de température produit par le mouvement de la source de chaleur, perpendiculairement au front de solidification. De plus, la distribution thermique dans le métal fondu dépend de la forme du bain de fusion [66Sav]. Notons que la croissance des grains se fait de manière compétitive dans des directions cristallographiques privilégiées et les grains favorablement orientés tendent à croître plus vite que leurs voisins qui seraient défavorablement orientés. Cette croissance épitaxiale et compétitive va donc être perturbée par les variations du gradient thermique et donc par la forme du bain de fusion. [2]

### **5.1.5 Effet des paramètres de soudage**

Les paramètres de soudage contrôlent la forme, les dimensions et les structures des régions chauffées du cordon de soudure. L'énergie nécessaire à la fusion du métal, qui dépend des paramètres puissance et vitesse de soudage, contrôle la vitesse de refroidissement. La vitesse de soudage régit directement la vitesse de croissance du front de solidification et donc également la forme du bain de fusion. La structure et le mode de croissance des grains dépendent de l'apport calorifique linéaire. La croissance des grains devient plus rapide et donne lieu à une structure grossière avec un apport calorifique croissant alors qu'une structure fine est obtenue avec une énergie linéaire modérée.

Ces paramètres affectent également les contraintes thermiques induites qui s'appliquent sur la soudure et qui entraînent la formation de contraintes résiduelles et des distorsions géométriques. [2]

### **5.1.6 Défauts de soudage**

Lors d'une opération de soudage, de nombreux paramètres tels que l'énergie de soudage, le gaz ou le fil utilisé, peuvent intervenir sur la qualité du cordon. Ainsi, de mauvais réglage ou un matériel inadapté conduisent généralement à des défauts de soudure ; Une nomenclature internationale des défauts a été établie. Elle est reprise dans la norme EN ISO 6520-1, qui distingue 6 groupes de défauts, indiqués dans le (Tableau I.1) [12]

| CLASSEMENT DES DÉFAUTS DE SOUDURE |   |
|-----------------------------------|---|
| Groupe                            | Type de défauts                         |
| 100                               | Les fissures                            |
| 200                               | Les cavités et les soufflures           |
| 300                               | Les inclusions solides                  |
| 400                               | Les manques de fusion et de pénétration |
| 500                               | Les défauts de forme                    |
| 600                               | Les défauts divers                      |

Tableau I. 1: classement des défauts de soudure.

Donnons rapidement quelques précisions sur les défauts les plus fréquents [13]

### Les fissures :

Les fissurations constituent l'un des défauts de soudure les plus fréquents. Elles sont causées par la présence de tensions internes trop importantes à l'intérieur du métal soudé. L'utilisation d'un métal d'apport incompatible avec le métal de base, un cordon trop petit ou des tensions internes créées par le retrait peuvent être à l'origine des fissures. Le bon choix du métal d'apport, un préchauffage approprié, une bonne préparation des joints et la formation d'un cordon respectant les dimensions exigées peuvent donc prévenir les fissures.

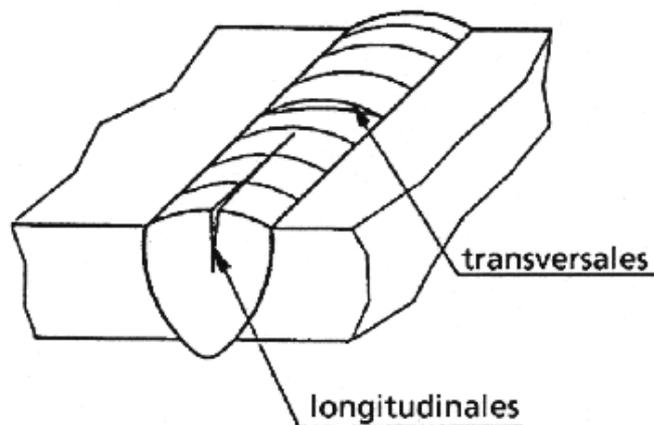


Figure I. 10 : Les fissures dans le cordon

**Les soufflures et les porosités :**

Les soufflures sont des défauts creux, généralement sphériques, internes se trouvant dans le cordon sans alignement spécifique. Leur présence peut avoir deux origines : d'une part la diminution brutale de la solubilité d'un élément gazeux tel que l'azote ou l'hydrogène lors du passage de l'état liquide à l'état solide, et d'autre part la formation d'oxyde de carbone par réaction chimique au sein du métal fondu. Ce type de défaut est inacceptable car source de fissuration ou de piqûres de corrosion. (Figure I .11).

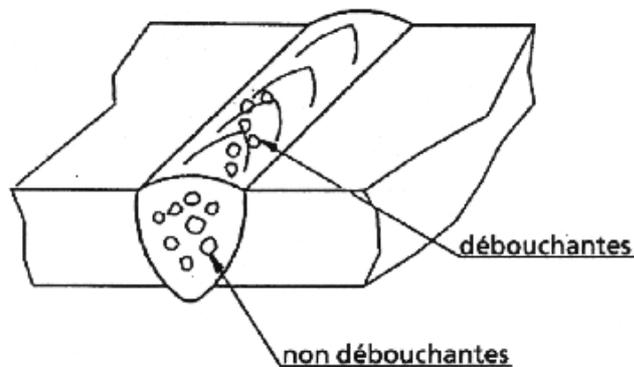


Figure I. 11 : les soufflures

**Inclusions :**

Les inclusions désignent l'incorporation, dans le cordon de soudure, d'un composé étranger. On distingue différents types d'inclusions à la (Figure I .12).

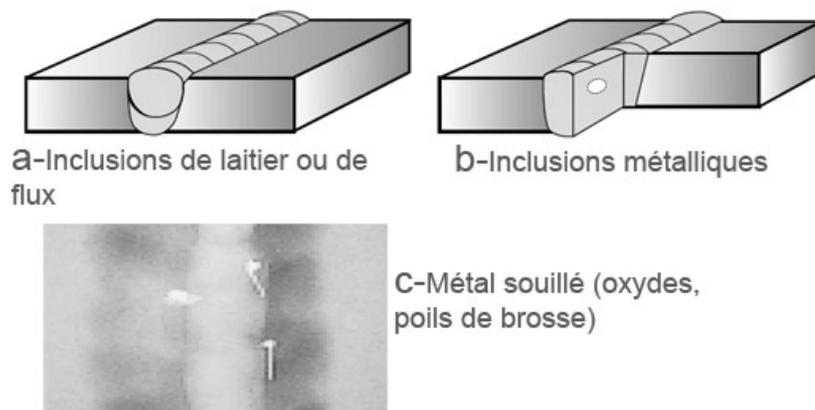


Figure I. 12 : Types d'inclusions

**Défauts géométriques du cordon :**

Ce sont des défauts associés à une mauvaise forme de la surface du cordon. Le cordon peut être trop convexe ou trop concave (Figure I .13).

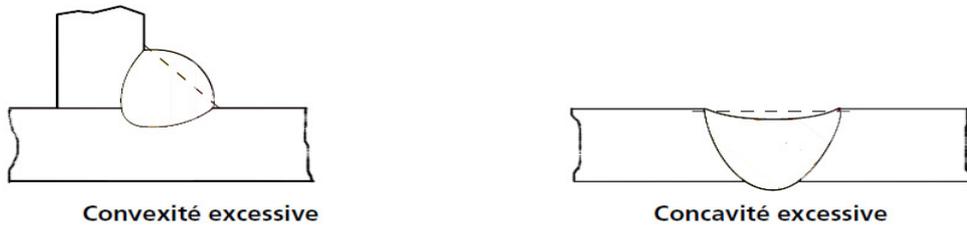


Figure I. 13 : Convexité et concavité

Aussi, une surépaisseur excessive du cordon survient lorsqu'il y a trop de métal déposé sur le cordon au cours des dernières passes et que l'épaisseur du cordon dépasse les normes tolérées (partie A de la Figure I .14). Dans d'autres cas, il manque de métal à la surface du cordon ; ce manque peut être localisé (partie B) ou continu.

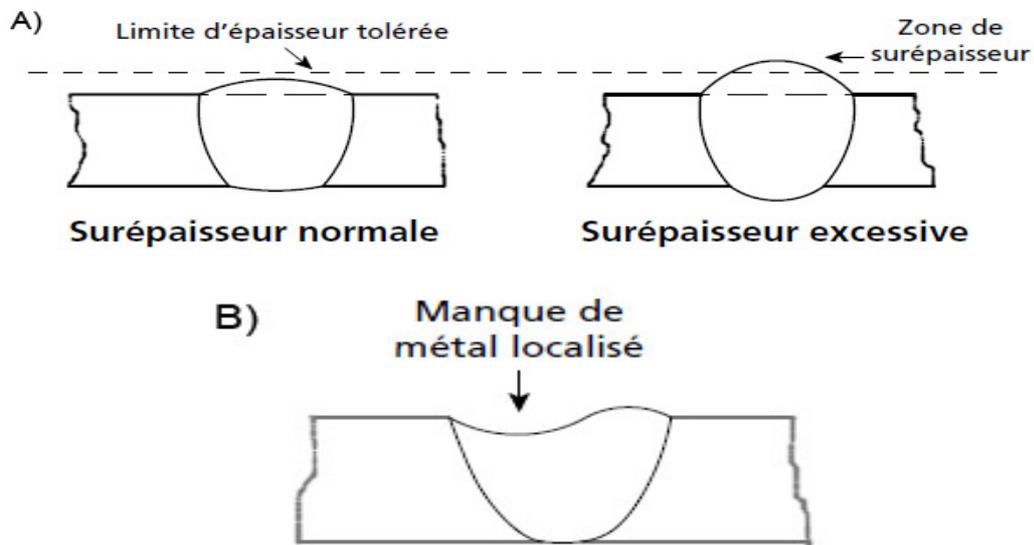


Figure I. 14 : Surépaisseur

**5.2 Soudage par pression**

Les procédés de soudage par pression peuvent à leur tour être subdivisés en deux sous-groupes : les procédés de soudage en phase solide et les procédés de soudage par pression où les matériaux sont amenés à la fusion. Dans ce dernier groupe, le chauffage

peut se faire via un arc électrique tel que le soudage des goujons et le soudage par percussion, ou via une résistance électrique comme le soudage par point et le soudage par bossage. Avec les procédés de soudage en phase solide, les matériaux ne sont pas portés à fusion. L'avantage le plus important du soudage à l'état solide est que les matériaux conservent leurs propriétés originelles. Ces procédés s'offrent la possibilité de réaliser des assemblages hétérogènes entre des métaux et des alliages très différents non soudables avec d'autres procédés. La zone affectée thermiquement est généralement réduite suite aux brefs temps de soudage et aux températures maximales relativement faibles. Le procédé de soudage par friction est un des procédés de soudage à l'état solide. [14]

## 6 Soudage par friction

### 6.1 Principe de fonctionnement

Le soudage par friction est un procédé de soudage dans lequel l'assemblage est réalisé en frottant l'une contre l'autre les surfaces à assembler et ce, sous une pression contrôlée. Le frottement entre les pièces à assembler crée de la chaleur (Figure I.15). La température dans la surface de contact augmente sans atteindre la température de fusion. Quand la température désirée est atteinte, le frottement est arrêté et les pièces devenues plastiques sont pressées l'une contre l'autre pour former l'assemblage. La friction fournit un chauffage de façon relativement simple et assure également que les surfaces de la soudure soient suffisamment nettoyées. Par le mouvement relatif, les impuretés ou les oxydes sont éliminés de la zone de la soudure. Les paramètres à contrôler pour tous les procédés basés sur le frottement sont la force de contact, la vitesse relative et la durée du frottement.

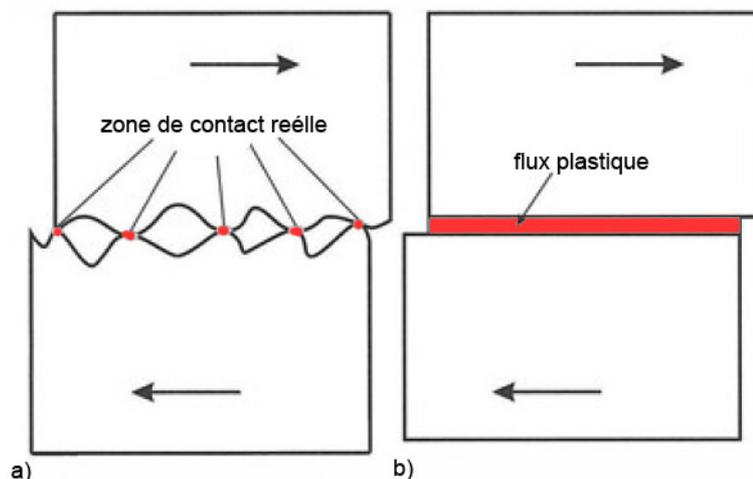


Figure I. 15 : Principe du soudage par friction.

## 6.2 Classement des procédés de soudage par friction

La variante la plus utilisée du procédé est le soudage par friction avec rotation. Il peut être utilisé pour l'assemblage de pièces symétriques par rapport à l'axe de rotation.

Les exécutions possibles sont le soudage par friction en continu, le soudage par friction via l'énergie emmagasinée dans un volant et le soudage par friction radiale. Dans le soudage par friction sans rotation, des pièces non symétriques par rapport à l'axe de rotation peuvent être assemblées l'une à l'autre. Les techniques les plus importantes sont : le soudage par friction-malaxage (friction-stir), le soudage par friction linéaire et le soudage par friction orbital.

### 6.2.1 Soudage par friction avec rotation

Supposons que deux axes ou tubes doivent être soudés bout à bout, on immobilise alors une partie tandis que l'autre est mise en rotation à une vitesse constante. Quand les deux parties serrées l'une contre l'autre entrent en contact, les forces de friction provoquent un couple de résistance. L'énergie mécanique créée est transformée en chaleur dans la surface de contact. La chaleur générée augmente la température en un temps relativement court jusqu'à la température de soudage (température de forgeage). Ensuite, la partie en rotation est détachée du moteur, freinée jusqu'à l'arrêt. Une force de forgeage axiale est alors exercée afin de réaliser une soudure entre les deux parties. Durant la phase d'échauffement et la phase de soudage, une quantité de matière plastique est poussée vers l'extérieur, sous l'influence de la force de pression axiale. Le principe du soudage par friction est présenté dans sa forme la plus simple à la (Figure I .16). [15]

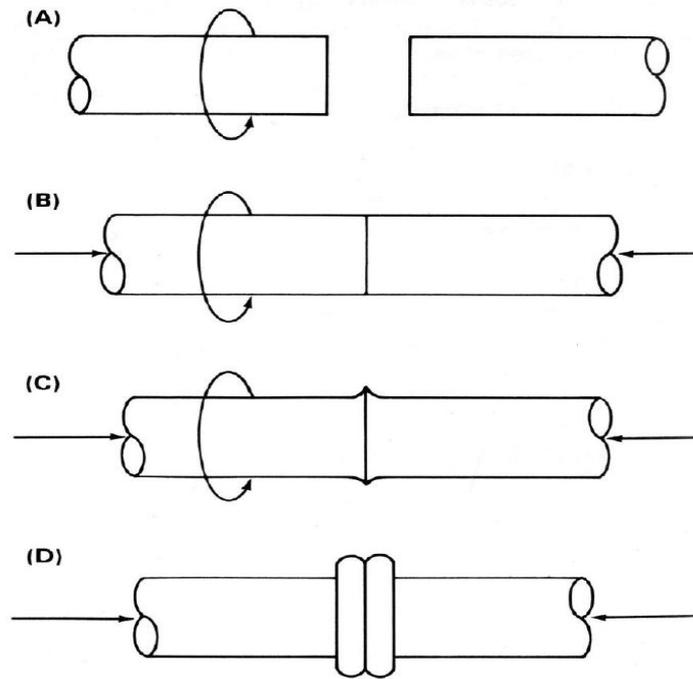


Figure I. 16 : Principe du soudage par friction

## 6.2.2 Soudage par friction sans rotation

### 6.2.2.1 Soudage par friction linéaire

Lors du soudage par friction linéaire, la chaleur nécessaire est créée par un mouvement de va-et-vient des pièces à souder. Ce procédé permet de souder des pièces symétriques non rotatives (Figure I.17).

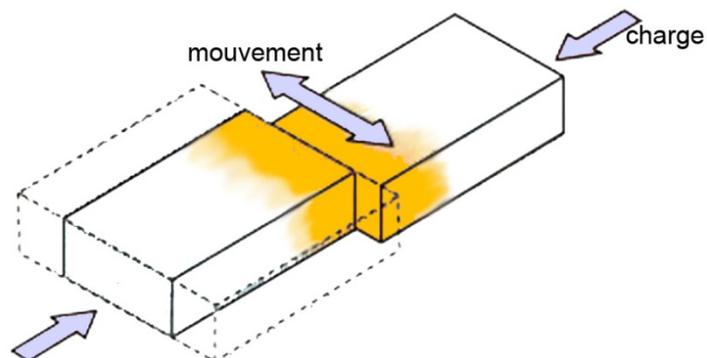


Figure I. 17 : Soudage par friction linéaire

L'application la plus importante du soudage par friction linéaire est la production d'aubes de turbine de moteurs d'avions et de turbines (Figure I.18). [14]



Figure I. 18 : Aubes de turbine soudées par friction (source: TWI)

#### 6.2.2.2 Soudage par friction orbital

Le soudage par friction orbital peut être utilisé pour souder des pièces ayant une intersection symétrique mais pas en rotation (Figure I .19). Deux pièces sont serrées l'une contre l'autre et une partie exécute un petit mouvement circulaire par rapport à l'autre. Ceci donne une vitesse tangentielle uniforme sur toute la surface. Quand le mouvement s'arrête, les deux parties sont rapidement alignées l'une par rapport à l'autre et la force de forgeage est appliquée afin de former la soudure.

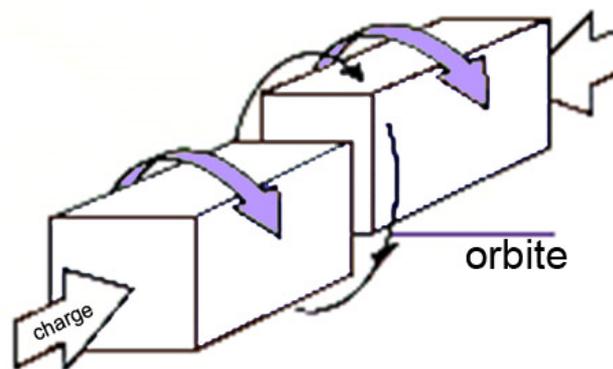


Figure I. 19 : Soudage par friction orbital.

#### 6.2.2.3 Soudage par friction-malaxage

Lors du soudage par friction malaxage (friction stir welding), un outil rotatif constitué d'un pion profilé et d'un épaulement est enfoncé dans la matière jusqu'à ce que l'épaulement touche la surface du matériau à souder. La matière est donc chauffée par friction à des températures où elle est facilement déformable. Lorsque

l'outil avance, la matière s'écoule de l'avant vers l'arrière du pion pour former le joint soudé.

### 6.2.3 Autres procédés basés sur la friction

Il existe également certaines variantes moins connues, mais néanmoins intéressantes comme le soudage par friction par points (friction spot) ou le soudage de goujons.

- Soudage par friction par points :

Lors du soudage friction spot, on utilise, comme pour le soudage par friction-malaxage, un pion profilé pour l'assemblage de tôles en configuration à recouvrement. L'outil est pressé dans la tôle supérieure, tandis que la tôle inférieure est soutenue. Le matériau chauffé sous l'outil se déforme plastiquement si bien que les couches d'oxydes sont éliminées. Le soudage friction spot fait l'objet de recherches comme alternative au soudage électrique par points. Un grand intérêt existe dans l'industrie automobile pour le soudage des alliages d'aluminium.

- Soudage par friction des goujons :

Le soudage par friction des goujons est un soudage à l'état solide où une barre ou un goujon est mis en rotation à vitesse élevée et est pressé contre une autre surface. Le matériau devient plastique par friction et les impuretés sont éliminées. La température reste toujours inférieure à la température de fusion des matériaux. Ce procédé est une alternative au soudage électrique des goujons et a surtout des avantages lors du soudage dans des conditions difficiles (comme sous eau).

Le procédé par friction peut également être utilisé pour déposer des couches de rechargement « cladding" (Figure I .20).

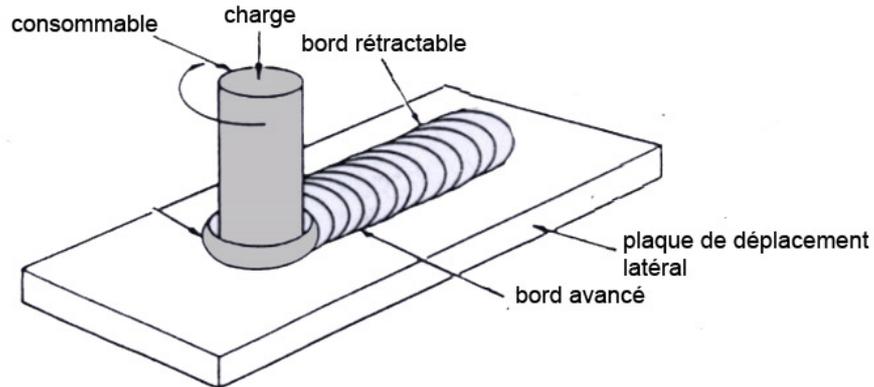


Figure I. 20 : Schéma de principe du rechargement avec le procédé de soudage par friction.

Ou pour réaliser des réparations à l'aide du procédé de soudage "friction stitch"(Figure I .21).

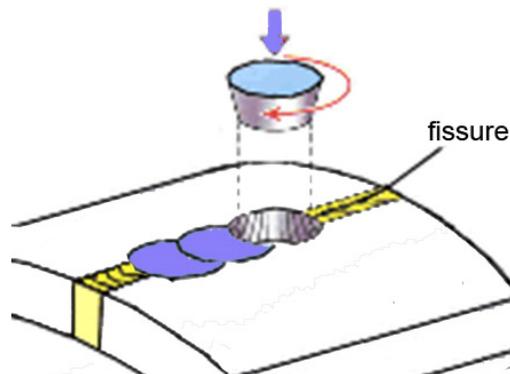


Figure I. 21 : Soudures de réparation à l'aide du procédé "friction stitch".

### 6.3 Applications

En raison de ses larges possibilités d'applications, il n'est pas étonnant que le soudage par friction soit souvent utilisé dans des secteurs divergents.

Le procédé de soudage par friction peut être utilisé pour de nombreuses applications. Il est ainsi utilisé, par exemple, dans l'aviation et la navigation spatiale pour le soudage de boulons à crochet (Figure I .22), pour la fabrication de tiges de piston légères (Figure I .23).



Figure I. 22 : Production de boulons à crochet.

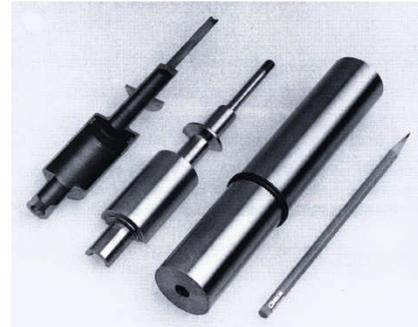


Figure I. 23 : Soudage de tiges de piston.

On utilise le soudage par friction dans la pétrochimie, par ex. pour le soudage de brides à des valves hydrauliques ou pour le soudage de tiges de forage (Figure I .24).

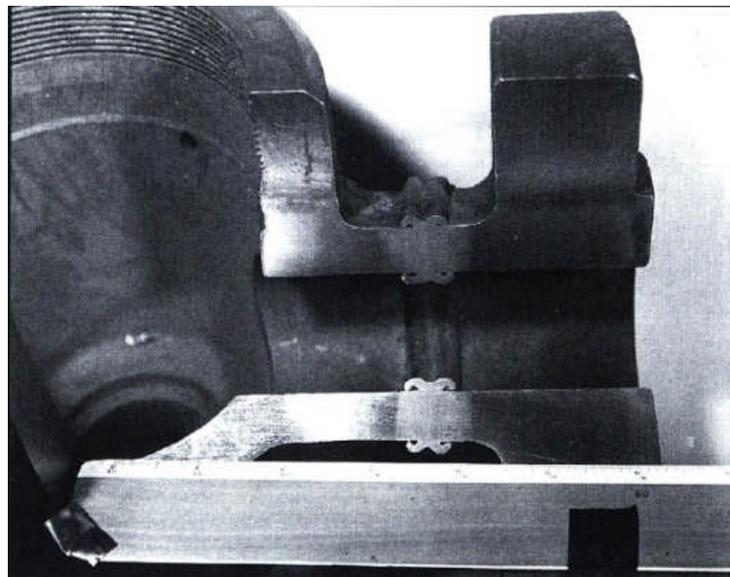


Figure I. 24 : Soudage d'une tige de piston à un connecteur avec filet de vis

Le soudage par friction est également utilisé pour la production de pièces dans l'industrie automobile comme des stabilisateurs, des engrenages (Figure I .25), des soupapes, des arbres de transmission.



Figure I. 25 : Engrenage soudé par soudage par friction

De plus, Le grand avantage de cette technique de soudage réside dans le fait que certaines combinaisons de matériaux peuvent être soudées, alors qu'elles ne le sont pas avec des techniques de soudage traditionnelles. On peut voir un exemple d'assemblage d'aluminium avec l'acier et le cuivre dans la (Figure I .26). [16]

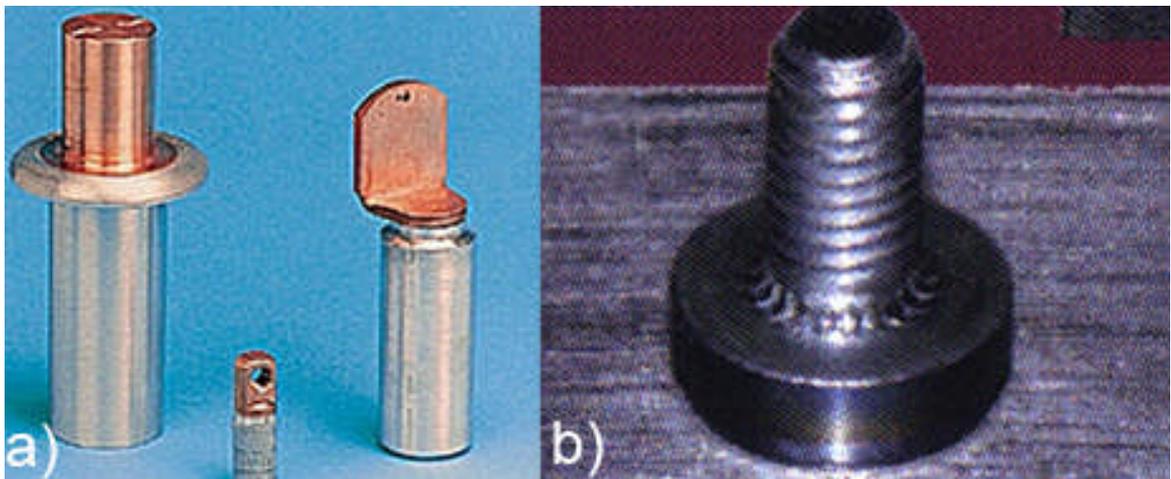


Figure I. 26 : a) Assemblage de l'aluminium à du cuivre, b) Assemblage de l'aluminium à de l'acier.

## **7 Conclusion**

Les procédés de soudage sont en constante évolution que ce soit du point de vue de la technologie des procédés ou de celui des domaines d'applications. En effet, principalement en vue de la réduction des coûts de production mais aussi en raison des demandes de qualité toujours plus grande, les concepteurs de matériels de soudage proposent des équipements de plus en plus performants. L'automatisation des procédés de soudage (mécanisation ou robotisation) est un domaine qui est actuellement source d'innovation au sein du domaine de l'assemblage par soudage.

## 1 Introduction

Le soudage par friction malaxage (FSW) est une nouvelle technique d'assemblage à l'état solide breveté depuis 1991 par Thomas et al [17]. Il est de plus en plus utilisé dans les grandes industries du monde.

Cette nouvelle technique d'assemblage est en phase de développement et trouve son application progressive dans les structures aéronautiques et automobile et aussi bien dans les domaines de la construction navale et ferroviaire.

Par rapport aux procédés de soudage conventionnels (par fusion), le procédé FSW présente de nombreux avantages qui en font une technologie potentiellement intéressante. Il permet d'obtenir des propriétés mécaniques améliorées des assemblages soudés.

## 2 Historique

L'expression soudage par friction-malaxage est généralement admise en France de *friction stir welding*, en abrégé FSW, nom donné en Grande-Bretagne au procédé de soudage continu par friction. Le premier brevet sur cette technologie a été déposé en décembre 1991 par Thomas Wayne à l'institut britannique « the welding Institute » mieux connu sous le sigle TWI. Ce procédé, qui n'est à son origine que simple « perfectionnements relatifs au soudage par friction », n'a cessé de se développer au point que dix années plus tard :

- Plus de 400 brevets ont été déposés en Grande-Bretagne, en Europe, aux USA et dans le monde (dont plus de 200 au Japon, aucun en France), démontrant l'activité née de l'intérêt qu'il suscite.
- Quelques 60 organisations diverses (constructeurs, institut, utilisateurs) en ont acquis la licence.
- Une dizaine de constructeurs proposent des équipements appropriés. [18]

Plusieurs applications industrielles sont aujourd'hui engagées parmi lesquelles le soudage spectaculaire de réservoirs de fusées.

Selon la base de données, cette technologie de soudage n'existe pas encore dans l'industrie de notre pays d'où l'idée d'une conception et une réalisation de cet outil est survenue. Le 5 décembre 2007, l'outil réalisé a été breveté au niveau de l'institut nationale de la propriété industrielle (INAPI).

### 3 Mise en ouvrage du procédé FSW

#### 3.1 Descriptions du procédé

Soudage FSW, qui peut se traduire par « friction-malaxage » ou « soudage thixotropique » est une technologie prometteuse pour l'assemblage des pièces d'aluminium puisqu'elle permet de souder des alliages d'aluminium à haute résistance, sans passer par la fusion. Certains alliages étaient jusqu'à présent difficilement soudables par les procédés de soudage traditionnels.

Ce procédé est également utilisé et très apprécié pour l'assemblage de matériaux dissemblables. [30]

#### 3.2 Principes

Les deux pièces à souder sont mises en contact et solidement bridées. Puis, l'outil constitué principalement d'un épaulement et d'un pion (Figure II-1) pénètre dans la matière.

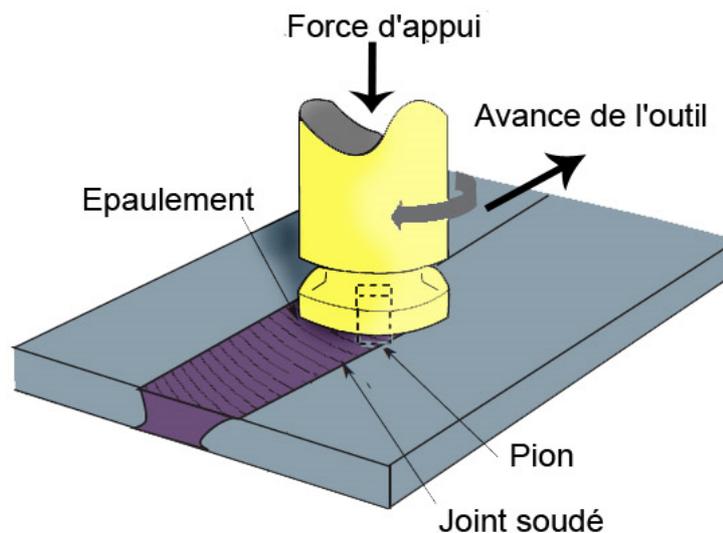


Figure II. 1: principe de procédé par friction et malaxage

- **EPAULEMENT :**

- Rôle :

- Confiner la matière autour du pion
- Contribuer à l'échauffement et au malaxage de la matière
- Forgeage de la matière

➤ Contact : Au niveau de la surface des pièces à assembler

• **PION :**

➤ Rôle :

- Malaxer,
- Permettre une déformation plastique par rotation et par l'avance
- Extrusion de la matière

➤ Contact : Au niveau de l'interface, pénètre dans la matière.

Cette assemblage permet d'insérer le pion à l'interface entre les pièces à assembler jusqu'à amener l'épaulement au contact de ces dernières. L'outil se déplace le long du joint à souder à des vitesses de l'ordre de 400 à 1400 mm/min.

Le mouvement de rotation et de translation de l'outil provoque l'échauffement du matériau. Cet échauffement n'est pas uniquement dû à la friction entre l'outil et la matière mais aussi à la déformation plastique de cette dernière. Cette montée locale de température rend en état « pâteux » le matériau autour de l'outil et cela facilite son malaxage. [19] [20]

Le procédé de soudage FSW peut être décomposé en 4 étapes (Figure II-2) :

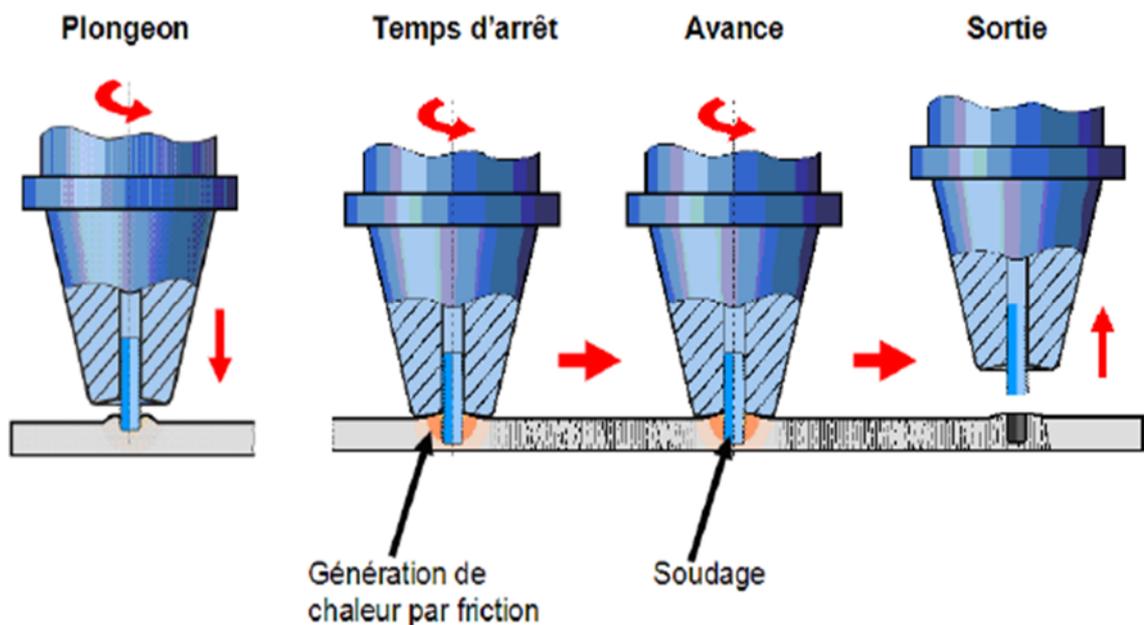


Figure II. 2 : Description schématique de l'outil ainsi que des étapes réalisées lors du FSW.

- **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 3 fois supérieur au pion est mis en rotation (entre 400 et 1400 tr/min). Sous un effort défini, le pion entre en contact avec la surface des pièces 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.

- **Préchauffage**

Afin de générer l'apport de chaleur nécessaire pour obtenir un volume de matière malléable au voisinage de l'outil, celui-ci est maintenu en rotation pendant un temps appelé Dwell-time ou temps de préchauffage (Dt). Sa durée dépend des matériaux à assembler (il faut au moins atteindre la température de forgeabilité des matériaux de base), des épaisseurs et des configurations d'assemblage.

- **Soudage**

A l'issue de la phase de préchauffage, l'outil en rotation se déplace le long du joint à une vitesse définie (typiquement inférieure 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 cristalline commune aux deux pièces 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 du joint qui apparaissent en utilisant les procédés de soudage conventionnels (porosités, fissures à chaud...).

- **Rétraction de l'outil**

Lorsque le joint soudé est réalisé, l'outil encore en rotation est retiré des pièces. Suivant la technologie de soudage utilisée, il reste ou non en fin de soudage une empreinte laissée par le pion. [21] [22]

### 3.3 Propriétés

- **Procédé**

- Large gamme d'épaisseurs soudables de quelques millimètres à 100 mm.
- Tôles mises bout à bout sans chanfrein.

- Pas de décapage chimique avant soudure pour alliages légers.
- Possibilité de souder des matériaux différents.
- Soudure en une seule passe sur toute l'épaisseur, ou en deux passes opposées sur épaisseurs fortes.
- Pas de consommable, métal d'apport ou protection gazeuse.
- Soudages d'angle et en (T).
- Soudages par superposition et à clin.
- Soudage en toutes positions.
- Réalisation simplifiée d'assemblages difficiles par d'autres méthodes de soudage.
- Pas de finition après soudage.

- **Soudures**

- Gamme de matériaux très étendue.
- Soudage d'alliages difficiles par procédés conventionnels.
- Absence de structure métallique fondue.
- Propriétés mécanique excellentes.
- Effets inexistantes ou limites des tensions résiduelles.
- Faible distorsion
- Faibles de contraintes de retrait.

- **Environnement**

- Pas de protection gazeuse.
- Pas de consommables.
- Pas de projections.
- Pas de circulation d'eau de refroidissement.
- Pas de finition après soudage (sauf pour les soudures circulaires).

- **Equipement**

- Mécanisation.
- Automaticité aisée du procédé ; contrôle par commande numérique.
- Equipement électromécanique de conception simple de type machine-outil.
- Pas de projections ni d'émanation de fumées.
- Pas de protection thermique ou oculaire.
- Consommables limités à l'outil et à l'énergie.

- Possibilité d'un contrôle en ligne des paramètres.
- Pas de qualification des opérateurs.

- **Limitations**

- Vitesses de soudage plutôt faibles.
- Maintien des pièces très rigide.
- Trou à la fin de chaque soudure.
- Taquets de début et de fin de soudure.

### **3.4 Applications [23] [24] [30]**

#### **3.4.1 Applications actuelles**

- Construction navale :

À ce jour, plusieurs applications en sont au stade de la production industrielle. La toute première application concerne des panneaux en alliages légers, pour des installations de réfrigération sur bateaux de pêche, réalisés par la juxtaposition et le soudage par FSW de profilés extrudés.

Une application similaire a débuté au Japon pour des panneaux de construction navale de  $1\,250 \times 5\,000$  mm ; Plus de 1 700 panneaux formant 160 km de long ont été produits en Norvège.

Dans ces fabrications de grandes dimensions, ce sont les faibles distorsions résultantes qui en sont le principal intérêt, ce qui, associé à la productivité, a forcé la décision.

Certains panneaux destinés à former des coques de navires sont soudés puis formés par explosion.

- Construction aéronautique :

La principale application concerne les soudages de réservoirs cryogéniques de fusées en alliages légers. C'est une application en cours aux USA pour un module de la fusée delta ii. Dans un premier temps, ce sont les soudures circulaires de dômes sur le cylindre qui ont été réalisées. La dernière soudure, qui exclut toute mise en œuvre d'appui en alliage identique qui reste ensuite lui-même soude au réservoir. La soudure concerne alors trois pièces : le cylindre, le dôme et l'appui.

- Construction ferroviaire :

Des panneaux pour trains à grande vitesse sont réalisés à partir de profils soudés ensuite par FSW. Ainsi, au Japon, Hitachi, Kawasaki, Sumitomo, Nippon Light Metal, exploitent le procédé de façon industrielle pour la construction des trains à grande vitesse Shinkansen (planchers, cotes de caisse, Ets.)

- Construction automobile :

Une application intéressante, développée en Suède, concerne la fabrication de pièces creuses en alliage d'aluminium, soudées par deux simultanément. L'installation est spécifique et comporte un plateau tournant. Elle est disposée directement après les presses d'extrusion.

La fabrication soudée de roues en aluminium retient l'attention des constructeurs. Diverses dispositions sont envisagées, parmi lesquelles le soudage longitudinal de cylindre découpés ensuite en viroles élémentaires pour former les jantes ou, le soudage des flans et des jantes.

Plusieurs constructeurs envisagent d'appliquer le soudage FSW à la réalisation de flans composites à épaisseur variable pour carrosseries en alliage d'aluminium (tailored blanks). Le soudage par friction présenterait des avantages dans la qualité et la fiabilité des soudures par rapport au soudage par laser aujourd'hui utilisé.

### **3.4.2 Domaines futurs**

- Marine :
  - Panneaux et plates-formes en alliages légers
  - Assemblages de profils juxtaposés
  - Coques et superstructures
  - Mâts et bras de grues
- Aéronautique :

De nombreux sont en cours pour confirmer la validité du procédé. Les applications visées concernent le soudage de raidisseurs de coques en remplacement du rivetage :

- Fuselages, ailes.
- Réservoirs cytogénétique.
- Réservoirs de l'avion et réservoirs largables.
- Rockets.
- Chemins de fer :
  - Trains à grande vitesse.
  - Wagons citernes.

- Containers.
- Automobile :
  - Moteurs.
  - Roues en aluminium.
  - Flans composites (tailored blanks).
  - Châssis de camions.
  - Véhicules blindés, Ets.

## 4 Caractérisations du procédé

### 4.1 Équipements

Tous les appareils dotés d'un mandrin rotatif pourraient servir à faire du soudage par friction malaxage. Il requiert toutefois que celui-ci puisse fournir une force axiale assez importante pour réussir les soudures. Même si ce paramètre est rarement contrôlé, l'appareil doit être en mesure d'insérer l'outil dans le métal et de maintenir sa position. Ainsi, les machines d'usinage à commande numérique et les robots industriels sont aussi efficaces que les véritables machines conçues strictement pour ce procédé tel que le « *ESAB Super Stir machine* » utilisé par « *The Welding Institute* » (TWI) illustré à la (Figure II.3). [25]

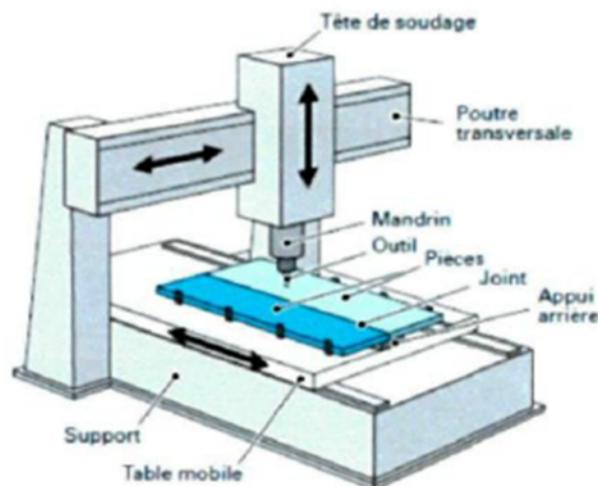


Figure II. 3 : Machine typique pour le soudage par friction malaxage.

Cependant, peu importe le type d'appareil utilisé, il est primordial que les pièces à souder soient fixées solidement afin d'éviter les déplacements et de minimiser les déformations de celles-ci causées par les forces importantes du mandrin et des réactions aux appuis.

La Plupart des machines utilisent un système mécanique ou hydraulique

Une machine de soudage « FSW » est composée essentiellement (Figure II.3) :

- D'un portique qui assure les mobilités en translation de la tête par rapport au bât.
- D'une tête de soudage qui assure les mobilités complémentaires nécessaires à l'outil de soudage. La mise en rotation de l'outil est assurée par cette tête.
- D'un outil, souvent composé d'un pion et d'un épaulement. Le frottement généré par le pion et l'épaulement permet le dégagement de chaleur. Sa mise en rotation permet un malaxage des deux matériaux et donc la création d'une zone soudée.
- D'une plateforme de soudage sur laquelle sont mises en position les pièces à assembler grâce à un montage.
- La tête de soudage comporte essentiellement le mandrin tournant, qui reçoit l'outil en principe monobloc, ainsi que la commande d'approche qui permet de l'accoster et de fournir ensuite l'effort de pénétration et de pression axiale de l'épaulement sur la surface supérieure des tôles.

Dans certaines dispositions, l'outil est composite et la tige peut coulisser et tourner par rapport à l'épaulement. La tête est alors conçue pour contrôler séparément l'un et l'autre et contrôler, en particulier, la pression de l'épaulement alors que la tige tourne et se règle en position par rapport à lui.

Dans d'autres dispositions, la tête est associée avec l'appui arrière pour former un ensemble compact regroupant les fonctions actives et réaction arrière.

On laisse imaginer les dispositions qui purent faire l'objet d'essais et d'applications.

## **4.2 Paramètres du soudage par friction malaxage**

La qualité d'un joint FSW dépend grandement de l'outil et des paramètres de soudage. La géométrie de l'outil est un facteur déterminant dans la distribution de la chaleur et la quantité de métal entraîné par l'outil.

Cependant, la vitesse d'avance, la vitesse de rotation de l'outil, la distance entre le pion et la racine du joint, la force verticale exercée par l'outil et l'inclinaison de l'épaulement par rapport à la surface du joint sont des paramètres du procédé qui influencent la qualité du joint. Ces paramètres varient en fonction du métal à souder, de la configuration du joint et de la géométrie de l'outil utilisé. Ils sont normalement déterminés expérimentalement après le choix de l'outil.

Les quatre principaux paramètres de soudage sont :

- La géométrie de l'outil.
- La vitesse de rotation de l'outil.
- La vitesse d'avance de l'outil.
- La position de l'outil.

Évidemment, ces paramètres varient selon plusieurs facteurs. Il est donc nécessaire de bien comprendre leurs effets pour obtenir une soudure de qualité. [23] [25] [17]

#### **4.2.1 Paramètre géométrique**

Le choix de l'outil dépend de l'application. La géométrie de l'outil influence la quantité de chaleur générée, l'écoulement du métal et l'énergie requise pour souder. L'épaulement et le pion de l'outil ont chacun une fonction différente. L'épaulement génère la majeure partie de la chaleur lors de soudure de joints minces et empêche le métal ramolli de s'échapper. L'épaulement et le pion conjointement contrôlent l'écoulement du métal. Le pion génère la majorité de la chaleur lors du soudage de joints épais. La forme du pion influence la quantité et l'écoulement du métal déplacé ainsi que le taux du mélange dans les deux directions horizontales et verticale du joint.

La première génération d'outil avait une forme cylindrique simple. La quantité de métal déplacée par ce type d'outil était très limitée et la vitesse de soudage devait être faible. Depuis, plusieurs formes d'outils ont émergé. L'évolution de l'outil a porté simultanément sur l'épaulement et le pion. (Figure II -4) présentent une variété d'outils disponibles sur le marché.

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

Figure II. 4 : Différents types d'outils, leurs caractéristiques et leurs applications

4.2.1.1 Géométries de l'épaulement :

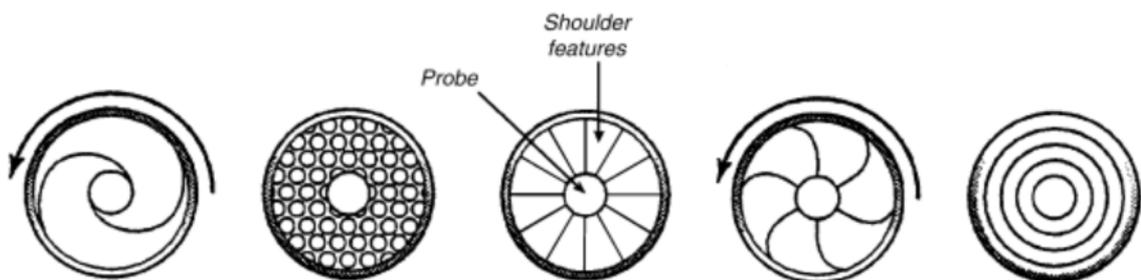


Figure II. 5 : Différentes formes d'épaulement disponibles

Le frottement entre l'épaulement et la pièce génère une grande partie de la chaleur et contrôle le cycle thermique, ce qui influence directement et indirectement les propriétés du joint soudé. Lors du soudage, la température maximale se trouve au centre du joint et diminue graduellement en s'éloignant du centre pour atteindre la température ambiante. Il existe toujours une zone où la température se situe entre 360 °C et 370 °C).

La présence d'une zone à dureté réduite est pratiquement inévitable et ne dépend pas du diamètre de l'épaulement. L'effet du diamètre se limite à la distance entre le centre du joint et la zone à dureté réduite.

Les dommages sur la surface du joint sont influencés par l'écoulement généré par l'outil et la force exercée par l'épaulement. L'épaulement concave est la forme la plus utilisée. Lors de la pénétration du pion, la cavité de l'épaulement agit comme un réservoir pour

contenir le métal déplacé. Le déplacement subséquent de l'outil apporte du nouveau métal dans la cavité de l'épaulement, poussant le métal existant dans le joint. L'efficacité de l'épaulement peut être déterminée par la quantité de bavures, le fini de surface et l'uniformité du joint.

D'autres détails comme des cavités (poches), des rainures ou des spirales sont ajoutées à l'épaulement pour augmenter la quantité du métal déplacé par ce dernier (Figure II-5). Les spirales dirigent le métal déplacé de l'extrémité de l'outil vers le centre, ce qui minimise la nécessité d'incliner l'outil par rapport à la surface du joint.

#### 4.2.1.2 Géométries du pion :

Le pourcentage de la chaleur générée par le pion augmente avec l'augmentation de l'épaisseur du joint. Cependant, le rôle principal du pion est d'assurer le mélange en profondeur du métal provenant des régions adjacentes au joint dans les deux pièces à souder. La distance entre le bout du pion et l'endos du joint est un paramètre très important. [29]

La longueur du pion doit être déterminée en fonction des paramètres de soudage. Il faut éviter tout contact entre le pion et la plaque de support, mais un dégagement trop large risque de causer un manque de liaison à la racine du joint.

Durant le soudage, le profil de l'outil est le paramètre principal qui influence le taux de mélange, la recombinaison du métal plastifié et le taux du métal déplacé. Une étude faite par Elangovan et Balasubramanian (2007) montre que volume du métal plastifié déplacé de l'avant à l'arrière de l'outil est égal à 1, 1,09, 1,01, 1,56, et 2,3 fois le volume d'un pion cylindrique, conique, cylindrique fileté, rectangulaire et triangulaire respectivement (Figure II-6).

Dans les études effectuées par Elangovan et Balasubramanian (2007) et Zhao, Lin et al. (2005) (Tableau II -1), le diamètre du pion est équivalent à l'épaisseur des plaques soudées tandis que le diamètre de l'épaulement est de trois fois l'épaisseur. Après une revue de la littérature, ont établi une relation entre l'épaisseur du joint, le diamètre de l'épaulement et le diamètre du pion. Le résultat est une équation linéaire où le diamètre de l'épaulement égal 2,2 fois l'épaisseur + 7,3 mm et le diamètre du pion égal 0,8 fois l'épaisseur + 2,2 mm. La durabilité de l'outil dépend de son matériau. Il est important d'utiliser des matériaux qui possèdent des propriétés mécaniques élevées à haute température.

Différentes configurations de pions filetés ont été étudiées par Hattingh, Blignault et al. (2008). L'étude a consisté à varier la géométrie du pion et à mesurer la température de l'outil et la force latérale exercée par la machine pour maintenir une vitesse d'avance déterminée.

| No | Description du pion | Grand diamètre du pion | Petit diamètre du pion | Pas du filetage |
|----|---------------------|------------------------|------------------------|-----------------|
| 1  | Conique fileté      | 8 mm                   | 6 mm                   | 1 mm            |
| 2  | Cylindrique         | 8 mm                   | 8 mm                   | -               |
| 3  | Cylindrique fileté  | 8 mm                   | 8 mm                   | 1 mm            |
| 4  | Conique             | 8 mm                   | 6 mm                   | -               |

Tableau II. 1 : Descriptions des outils présentés à la figure II -7 (Zhao, Lin et al. 2005).



Figure II. 6 : Configurations d'outils utilisés pour déterminer l'effet de la géométrie du pion sur la résistance en traction des joints SFM (Zhao, Lin et al. 2005)

Le pion de l'outil contrôle l'écoulement de la partie inférieure du joint. Toutes les recherches menées sur l'influence de la géométrie du pion convergent vers l'importance d'augmenter la quantité du métal remué par le pion, de réduire les gradients de déformation entre le noyau et la ZATM et de disperser le plus de particules d'oxyde possible. [17]

#### 4.2.2 Autres paramètres

##### 4.2.2.1 Vitesses de rotation et d'avance :

La vitesse d'avance et la vitesse de rotation de l'outil sont des paramètres très importants qui influencent la qualité des joints SFM. L'augmentation de la vitesse de rotation augmente la quantité de chaleur générée. La réduction de la vitesse de rotation réduit la quantité de chaleur générée et la quantité du métal remué. L'outil en rotation remue et mélange le matériau tandis que la translation de l'outil déplace le métal remué de l'avant à l'arrière de l'outil. La quantité du métal remué augmente avec l'augmentation de la chaleur. L'augmentation de la quantité du métal remué augmente la dispersion des particules d'oxydes diminuant ainsi la présence de défauts à la racine de la soudure.

#### 4.2.2.2 Forces verticales exercées par l'outil :

Lors du soudage par friction-malaxage, la rotation de l'outil force le déplacement du métal plastifié vers la surface du joint. Le métal ainsi poussé sous l'épaule de l'outil exerce une pression qui cherche à éloigner l'outil du joint. Il est par conséquent nécessaire d'appliquer une force verticale sur l'outil pour maintenir le contact entre l'outil et les pièces à souder. Cette force est aussi nécessaire pour assurer la force de forgeage qui permet de consolider le joint. Liaison entre les deux parties du joint.

#### 4.2.2.3 Angles d'inclinaison de l'outil :

La rotation de l'outil pousse le métal vers la surface du joint. Une inclinaison de l'outil entre 2 et 4 degrés est nécessaire pour maintenir une quantité de métal suffisante dans la cavité de l'épaule et pour permettre à l'arrière de l'outil de maintenir la compression nécessaire pour assurer la consolidation du joint (Figure II-7). [17]

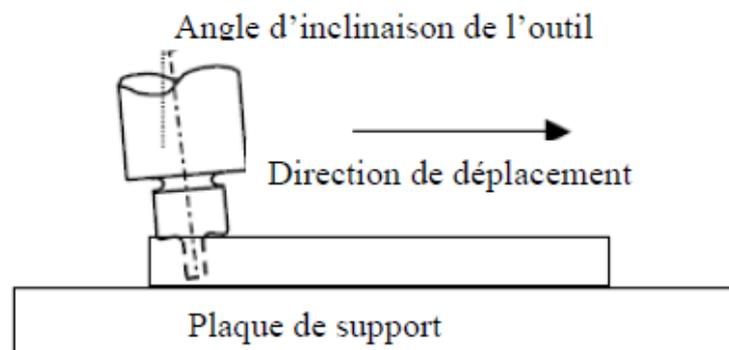


Figure II. 7 : Angle d'inclinaison de l'outil (Khaled 2005)

## 5 Caractérisation de la microstructure et défaut des joints soudés par FSW

### 5.1 Structures du joint soudé

Le frottement généré par la rotation d'un outil sur les pièces à souder dégage de la chaleur. Les matériaux à souder deviennent alors semi-solides (point d'équilibre entre le solidus et le liquidus), mais n'entrent pas dans le domaine liquide, avantage de cette technologie. L'outil possède un épaule pour augmenter la surface de frottement (le déplacement du pion dans les matériaux à l'état semi-solide) crée alors un cordon de soudure (Figure II-8)

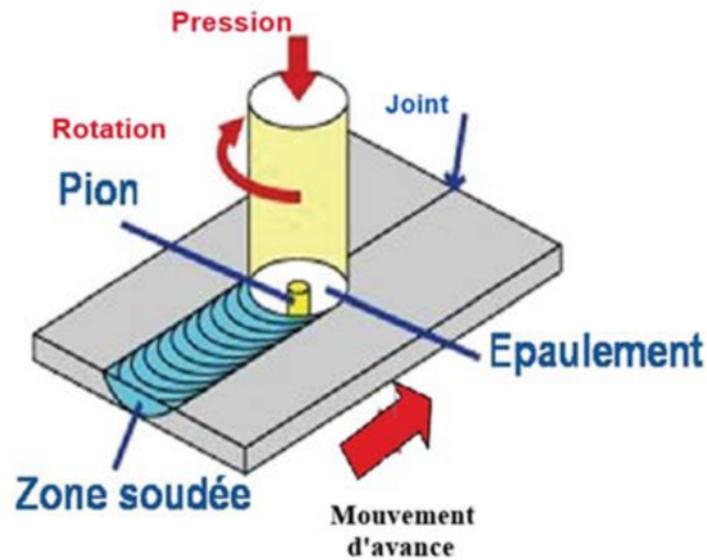


Figure II. 8 : Structures du joint soudé

## 5.2 Microstructure du cordon

Les propriétés spécifiques du joint soudé FSW s'expliquent par sa microstructure très différente de celle d'une soudure à l'arc (MIG ou TIG), du seul fait qu'il n'y a pas de phénomènes de fusion-solidification. La (Figure II-9) illustre une coupe d'un joint soudé par FSW en L'analyse de la microstructure en termes de taille et d'orientation des grains permettent de distinguer différentes zones le long du joint soudé. [12] [20] [28]

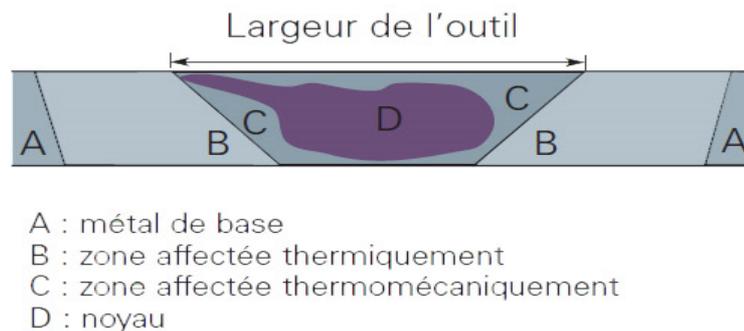


Figure II. 9 : Microstructure du cordon

La communauté FSW est unanimement d'accord sur le nombre et la dénomination des zones macroscopiques constituant le joint soudé par FSW néanmoins, il y a des auteurs qui considèrent les gradients des tailles de grains et de l'état de précipitation présent à

l'intérieur même de chaque zone pour en distinguer des sous-zones à microstructure plus homogène. En général, on distingue quatre zones différentes le long d'une soudure FSW :

- **Zone A : Métal de base**

À l'extérieur du joint soudé, Matériau de base non affecté par la soudure ne subit ni déformation, ni d'échauffement suffisant pour modifier. Ses propriétés mécaniques globales ainsi que sa microstructure sont restées inchangées au cours du procédé.

- **Zone B : la zone affectée thermiquement (ZAT)**

Dans cette zone, le métal a subi une élévation de température affectant la microstructure et les propriétés mécaniques, mais de façon relativement modérée. Les déformations y sont par contre quasi-inexistantes. Proche de la zone soudée, l'échauffement produit par le frottement outil-pièces génère une zone affectée thermiquement (ZAT), comme en soudage par fusion.

- **Zone C : la zone thermo mécaniquement affectée**

Le matériau dans cette zone subit des déformations mécaniques en plus d'une élévation de température, autour du noyau soudé ; subi un cycle thermique et des déformations mécaniques. La température y a été suffisamment élevée pour entraîner des modifications microstructurales significatives. Dans la zone affectée thermo-mécaniquement (ZATM), il se produit une rotation des grains pouvant conduire à des phénomènes de restauration voire de recristallisation.

- **Zone D : le noyau**

Zone déformée et dynamiquement recristallisée, communément appelée par son nom anglais « nugget ». Dans cette zone, la matière est déplacée par le passage de l'outil et sévèrement déformée à haute température. Cette zone ayant subi une recristallisation dynamique, les grains sont beaucoup plus fins que dans le métal de base. Il apparaît dans cette zone malaxée des structures allongées en bandes concentriques (onion ring), dont l'origine reste à confirmer.

### **5.3 Les défauts**

Le procédé FSW étant un procédé de soudage à l'état solide, il permet de s'affranchir des certains défauts liés à la fusion des matériaux de base (fissuration, porosités...). Toutefois, ce procédé génère d'autres défauts qui lui sont propres. [22]

Les défauts les plus couramment rencontrés sont :

Défauts surfaciques : flash et brûlure,

Défauts internes :

Manque de liaison en racine (« kissing bond »),

- Manque de pénétration,
- Manque de liaison sur oxyde,
- Tunnel ou cavités.

Le défaut de surface le plus couramment rencontré est le flash, (Figure II.10). Ce phénomène est observé lorsque la soudure est trop chaude, car la matière fuit sur les bords de l'outil.

Ce défaut résulte d'une vitesse d'avance trop faible, d'une vitesse de rotation trop élevée, le tout cumulé à un effort trop important.



Figure II. 10 : Défaut de surface « flash ».

Lorsque la vitesse de rotation de l'outil est trop importante, il peut apparaître à la surface du cordon la formation de « pailles ». Celles-ci sont dues à un frottement excessif entre l'épaulement et la surface conduisant à la formation d'oxydes de même nature que ceux formés en cours d'une opération de laminage. La (Figure II.11) illustre ce type de défaut qui n'affecte cependant pas de façon significative la tenue mécanique du joint soudé. Par contre, ce défaut peut réduire la tenue à la corrosion de la surface du joint soudé.

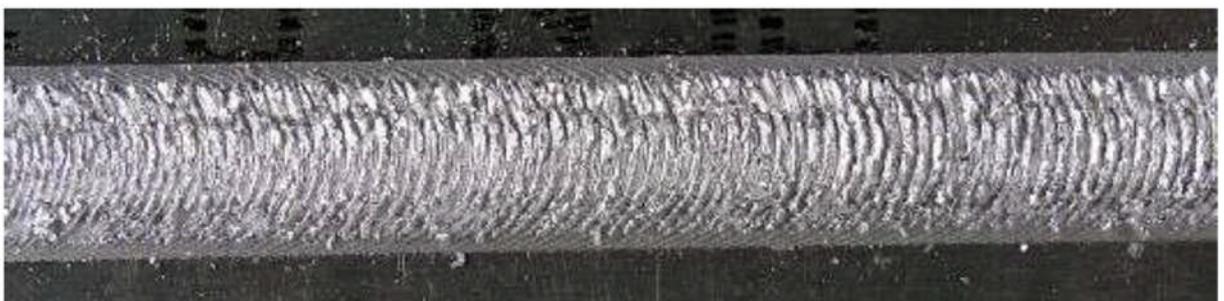


Figure II. 11 : Défaut de surface « brûlure ».

Le manque de pénétration en racine. La (Figure II.12) est un défaut débouchant qui résulte d'une longueur de pion insuffisante et qui apparaît principalement lorsque la machine de soudage est asservie en position ou lorsque le pion est usé ou endommagé

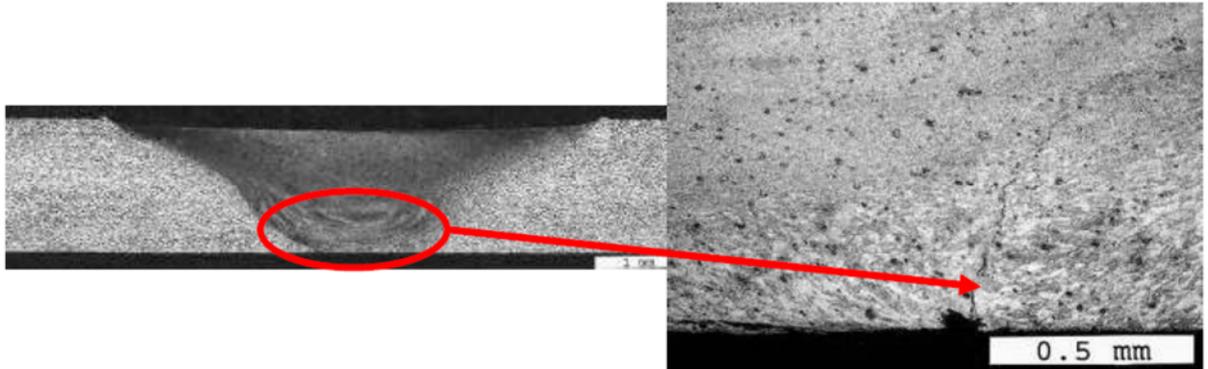


Figure II. 12 : Défaut interne manque de pénétration en racine.

D'autre part, si la matière est malaxée dans un état qui n'est pas suffisamment plastique (soudure froide), ou si l'effort exercé par l'épaulement ne permet pas un bon forgeage, ou encore si le jeu entre les tôles est trop important, il se forme un défaut de compacité du type cavité ou tunnel ( Figure II.13).

Ce défaut apparaît en général du côté avançant et est aligné avec la direction de soudage. Il est à noter que le défaut tunnel peut apparaitre de manière discontinue dans la soudure.



Figure II. 13 : Défaut interne de type tunnel

Enfin, sur certains alliages d'aluminium, après soudage, il subsiste un défaut dans toute l'épaisseur du cordon qui correspond à un oxyde ramené des chants ou de la surface des pièces (Figure II.14). Des essais mécaniques montrent que ce défaut n'affecte généralement pas la tenue mécanique statique du joint (défaut discontinu sur la longueur du cordon).

Cependant lorsque cet oxyde devient problématique, il suffit de décaper chimiquement et/ou mécaniquement le chant des tôles à assembler pour retirer la couche d'alumine présente.

L'opération de soudage doit être réalisée rapidement après cette opération, une nouvelle couche d'alumine se reformant très rapidement au contact de l'air.

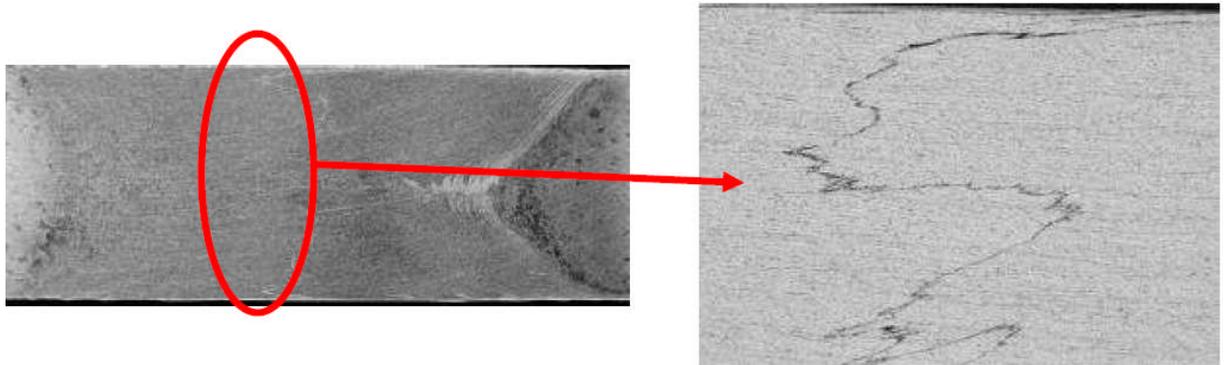


Figure II. 14 : Défaut interne de type manque de liaison sur oxyde.

## 6 Modélisation

### 6.1 Modèle thermique

En utilisant un modèle simplifié Gratecap *et al.* (2005) (source mobile ponctuelle + modèle de chaleur + influence de la température sur les propriétés matériau), la température de soudage diminue lorsque l'on augmente la vitesse d'avance (pour une vitesse de rotation donnée) et la température augmente lorsque l'on augmente la vitesse de rotation (pour une vitesse d'avance donnée) :

$$T - T_0 = \frac{Q_s}{2\pi K} \exp\left(\frac{-V_f \varepsilon}{2a}\right) \exp\left(\frac{-V_f \varphi}{2a}\right) \frac{1}{\varphi} \quad (1)$$

Où  $T_0$  est la température initiale,  $k$  la conductivité thermique,  $a$  la diffusivité thermique,  $Y$  la distance à la source et  $x$  la coordonnée dans la direction de soudage. En effectuant de nombreuses expériences, Okamura (2000) a défini une zone de soudabilité (en grisé sur la (Figure II.15)). Cette zone se situe approximativement entre les isothermes à 500°C et à 550°C ce qui paraît tout à fait raisonnable par rapport aux températures généralement mesurées. Dans le cas de plaques minces, il est possible d'évaluer très simplement un ordre de grandeur raisonnable des vitesses de rotation et d'avance de l'outil pour un matériau donné en fonction de la température de soudage souhaitée. Ce résultat peut être généralisé au cas des plaques épaisses par une simulation par éléments finis.

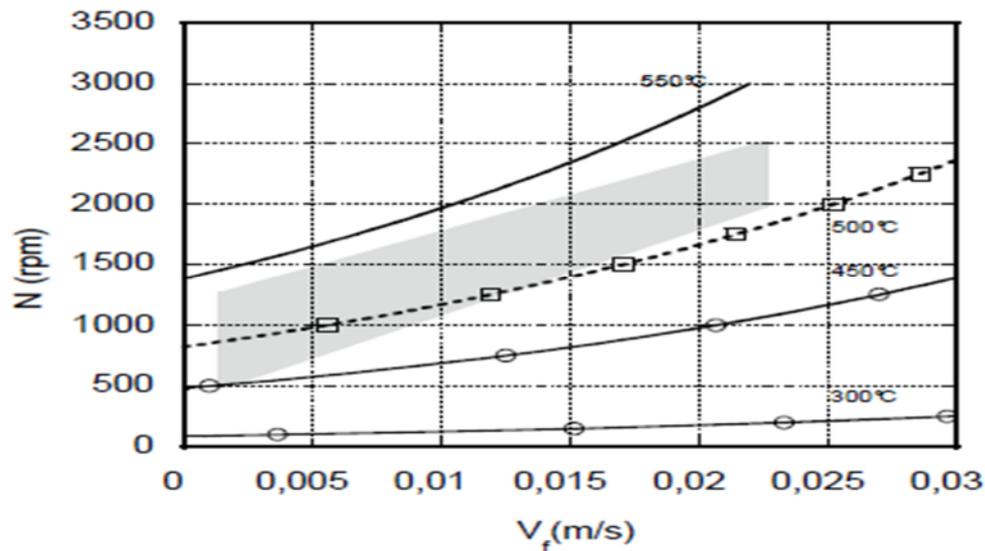


Figure II. 15 : Conditions de soudage en fonction de la vitesse d'avance et de la vitesse de rotation pour des plaques de 5 mm d'épaisseur en 6061 T6.

## 6.2 Modèle géométrique

Le FSW est un procédé de soudage sans apport extérieur de matière, ce qui signifie qu'il faut, autant que possible, limiter la perte de matière lors du pointage (par expulsion hors de l'épaulement), et pendant le soudage (par formation de bavures). D'autre part, pour que l'apport de chaleur par cisaillement soit optimal, il faut que l'espace compris entre l'épaulement et les tôles soit plein. Pour cela nous montrons qu'il faut vérifier trois règles que nous appellerons : la règle des volumes, la règle des surfaces et la règle des débits.

(i) *Règle des volumes* - Dans la phase de pointage, l'outil descend progressivement dans la tôle jusqu'à ce que le pion atteigne la distance de réglage  $\delta$ . Les paramètres géométriques et de réglages ( $a$ ,  $\delta$ ) de l'outil doivent permettre de conserver, entre l'épaulement et la tôle, le volume de matière refoulé par le pion. Par ailleurs, il ne faut pas surdimensionner cet espace pour assurer un cisaillement sur la totalité de l'épaulement. Finalement il faut que le volume du pion "immergé" dans la tôle ( $V_i$ ) soit égal au volume "de stockage" disponible entre l'épaulement et la tôle ( $V_s$ ) voir (Figure II.16)

$$V_i = V_s$$

(2)

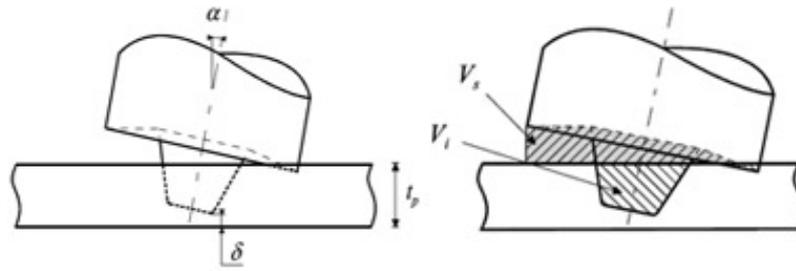


Figure II. 16 : Règle des volumes.

(ii) Règle des débits - Dans la phase de soudage, le pion entraîne de la matière par cisaillement en amont et la refoule (respectivement  $Q_p$  et  $Q_r$  sur la (Figure II.17)). Il faut ensuite la replacer dans la tranchée ouverte en aval. La rotation de l'outil permet de reboucher cette tranchée. Si l'on néglige le débit d'entraînement du pion ( $Q_p$ ) par rapport au débit de refoulement ( $Q_r$ ) alors, l'essentiel de la matière déplacée par le pion passe entre l'épaulement et la tôle. Dans ces conditions, il faut, à la fois, que l'espace libre entre l'épaulement et la tôle et la vitesse de rotation de l'outil, soit suffisants pour que le débit de matière refoulé ( $Q_r$ ) par le déplacement du pion à la vitesse d'avance  $V_f$  soit compensé par le débit d'entraiment de l'épaulement ( $Q_s$ ).

Suivant ce raisonnement nous définissons la règle des débits :

$$Q_s \geq Q_p \quad (3)$$

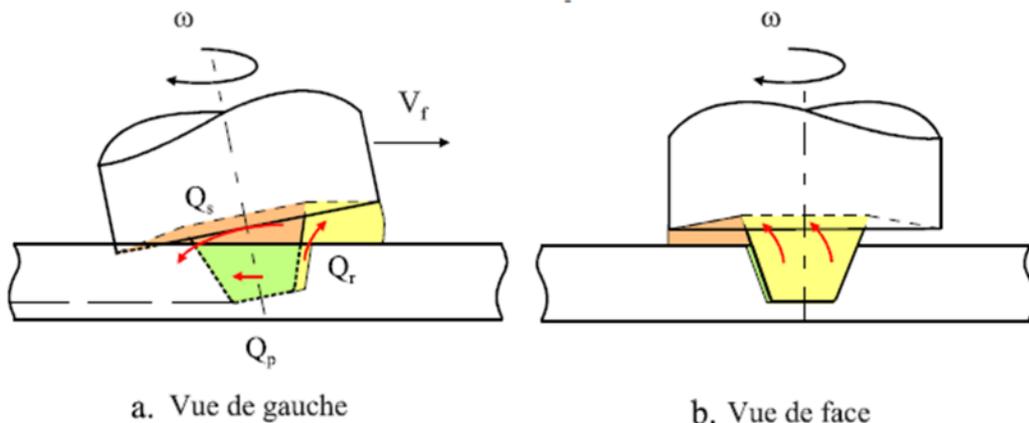


Figure II. 17 : Ecoulements.

(iii) *Règle des surfaces* - Pour consolider la matière après le passage du pion, il est nécessaire d'appliquer un effort de forgeage  $F$  (Figure II.18). Pour cela, l'outil doit être incliné d'un angle  $\alpha$  et avoir un engagement verticale  $a_z$  dans la tôle. Afin de ne pas trop diminuer l'épaisseur de la soudure par rapport à l'épaisseur initiale des tôles, seule une largeur  $l_f$  de l'outil est engagée dans la matière. Dans ces conditions, il demeure nécessairement un bourrelet sur les bords du cordon de soudure. Si l'on ne veut pas vider le volume de matière stocké entre l'épaulement et la tôle, la perte de matière due à la formation de ces bourrelets doit être compensé par l'apport de matière provoqué par l'engagement vertical de l'outil  $a_z$ . Cette condition est vérifiée si et seulement :

$$S_i = S_e \quad (4)$$

Où  $S_i$  est la section immergée et  $S_e$  la section du bourrelet. Nous appellerons, règle des surfaces, cette condition. [27]

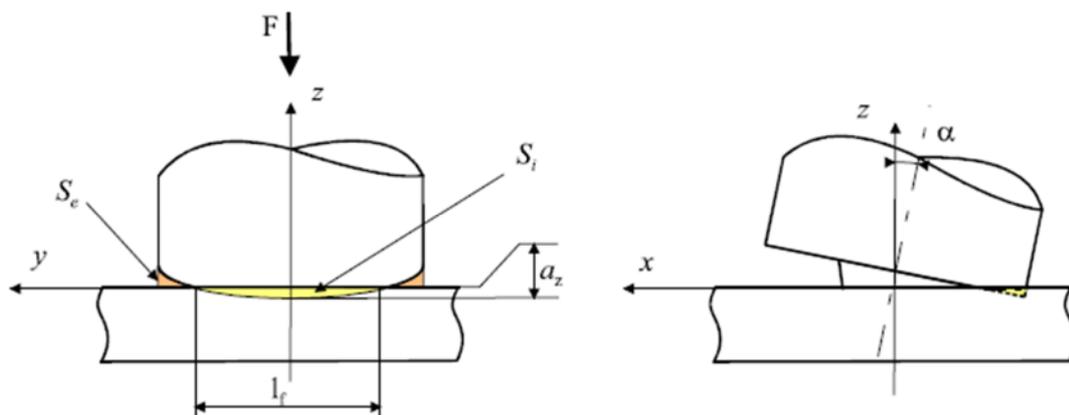


Figure II. 18 : Règle des surfaces.

## 7 Avantage et limite

Le soudage par friction malaxage est une technique de soudage innovante. Tout comme les autres techniques de soudage en phase solide, il permet d'éviter les défauts observés lors de la solidification des joints de soudure réalisés par les techniques de soudage en phase liquide.

Il s'agit notamment des défauts de porosité et de fissure voire de brûlure locale : liquation au joints de grains. De même, Les assemblages réalisés en soudage FSW ont une très bonne résistance mécanique s'élevant en moyenne à 80% de celle du matériau de base.

Les soudures FSW ont une résistance en fatigue nettement supérieure aux autres techniques de soudage. De plus, la microstructure des alliages reste peu changée comparativement aux techniques de soudage en phase liquide. Ce qui d'ailleurs permet son application sur des alliages réputés difficilement soudables (Les alliages d'aluminium dernières générations utilisés dans l'aéronautique) par les autres techniques de soudage traditionnelles. En raison du temps de soudage et des températures atteintes qui sont inférieures à la température de fusion du matériau à souder, la déformation des pièces après soudage est limitée voir (Figure II.19). [25]

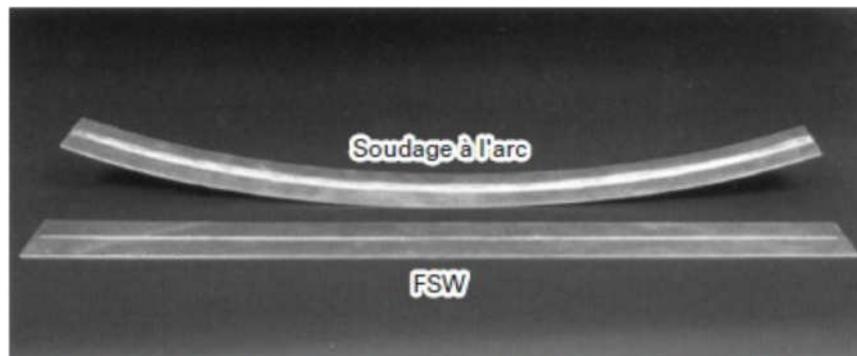


Figure II. 19 : Comparaison de la distorsion causée par le soudage FSW à celle causée par le soudage à l'arc sur des plaques d'aluminium de 5 mm d'épaisseur (Cazes [2003]).

Le soudage FSW est facile à automatiser puisque c'est un procédé mécanique. Il ne nécessite pas des consommables tels que le métal d'apport et les éléments (gaz) protecteurs des cordons de soudure. De nombreuses études ont permis son application à un coût réduit dans beaucoup de secteurs d'activités et sur des matériaux autres que les alliages d'aluminium. Il offre aussi la possibilité de réaliser des soudures hétérogènes.

Malgré tout, le coût de l'installation d'une machine de soudage FSW est onéreux. De ce fait, les PME adaptent les machines traditionnelles au procédé mais les limites de ces machines sont rapidement atteintes pour les applications sur des grandes structures. La nécessité d'utiliser une enclume limite les géométries des pièces aux formes plates voir (Figure II.20) mais l'outil bobbin-tool, couplé avec une tête robot peut être utilisé pour les géométries complexes. Des enclumes spéciales sont même réalisées pour les pièces de géométrie complexe. Les paramètres de soudage (vitesses, géométrie d'outil, efforts de soudage) étant très sensibles, une étude scrupuleuse pour chaque nouvelle application est nécessaire d'où l'intérêt des modèles de soudage FSW.

Les défauts de racine dus à une insuffisance de pénétration de l'outil sont également un grand inconvénient d'autant plus que leur détection n'est possible qu'aux moyens de contrôles destructifs. L'application du soudage FSW est souvent limitée aux métaux doux (les alliages d'aluminium, de cuivre, de magnésium). Des études se font pour son application sur les aciers et le titane mais l'usure prématurée des outils et leur coût sont de véritables limitations. [23]

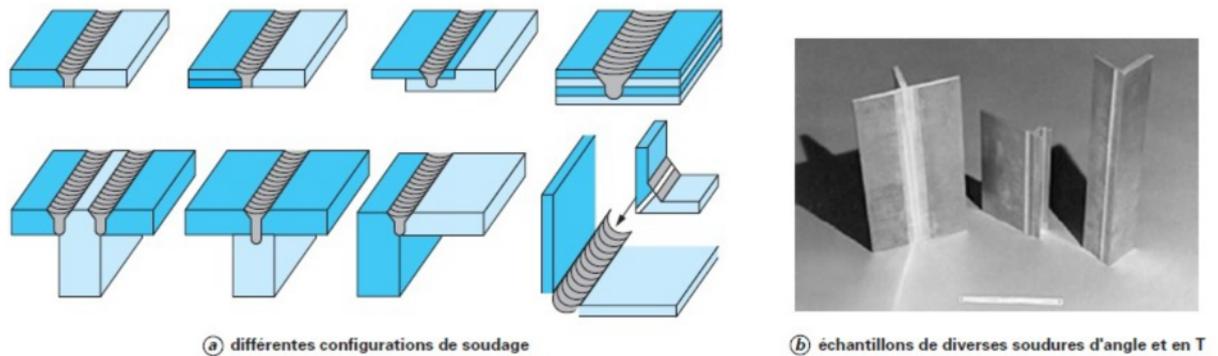


Figure II. 20 : Types de soudages effectués par FSW (Cazes 2003).

Mishra et al. Classent les avantages du procédé FSW en trois groupes [MM05] : [28]

#### Avantages métallurgiques

- Procédé en phase solide.
- Faible distorsion de la pièce.
- Stabilité dimensionnelle.
- Éléments d'alliage conservés.
- Bonnes propriétés métallurgiques dans le joint soudé.
- Faible taille de grain.
- Faible fissuration.

#### Avantages environnementaux

- Élimination des gaz.
- Élimination du besoin de nettoyer les surfaces.
- Élimination des dissolvants.
- Élimination des matières ajoutées.

#### Avantages énergétiques

- Réduction de la quantité de matière utilisée.

- Consommation réduite d'énergie : 97,5% de réduction par rapport au soudage laser.
- Diminution de la consommation de carburant des véhicules à cause de sa réduction de poids.

## **8 Conclusion**

Le procédé de soudage par friction malaxage (FSW) est considéré aujourd'hui comme l'alternative la plus prometteuse aux méthodes traditionnelles d'assemblage (soudure à l'arc, rivetage. . .). Il est défini comme un procédé de soudage de matériaux à l'état solide et sans apport de matière ; ainsi, les défauts liés au processus de solidification et à l'apport de matière sont éliminés. Le soudage par FSW est particulièrement intéressant pour l'assemblage des alliages d'aluminium utilisés dans l'industrie.

Dans les chapitres qui vont suivre, nous essayerons de répondre à ces besoins pour apporter un progrès à l'optimisation du procédé de soudage FSW et ainsi contribuer à son élargissement sur d'autres secteurs et applications.

## 1 Introduction

Le troisième et dernier chapitre est organisé en deux parties. Dans la première, On y présente les étapes de conception et de réalisation de l'outil FSW. La deuxième partie est consacrée à la mise en fonctionnement de l'outil ainsi des tests de traction ont été réalisés.

## 2 Conception et réalisation

### 2.1 Stratèges de travail

La démarche retenue s'articule autour de plusieurs étapes selon une méthodologie conditionnée par différents paramètres ; notamment les étapes suivantes montrent la méthode de réalisation de cet outil

Premièrement la conception et la réalisation des croquis et schémas des pièces en se basant sur des études antérieures même si ces dernières nous informe sur la forme générale mais non sur les dimensions réelles, pour cela on se base :

D'abord sur le porte outil de notre machine (fraise) a portée de main car notre pièce doit s'emboîter parfaitement (minimiser le jeu au maximum)

Ensuite vient la concrétisation et réalisabilité de notre outil qui dépend des différentes machines disponibles dans l'atelier afin de réaliser les différents processus de fabrication de la pièce et bien sûr la géométrie simple des éléments qui composent l'outil reste une solution réalisable par rapport à ces moyens, aussi la disponibilité de la matière première.

Finalement le réajustement de la pièce après plusieurs essais pour avoir un résultat satisfaisant.

### 2.2 Présentation de la machine utilisée

Actuellement, deux types d'installations permettent de réaliser des assemblages avec ce procédé : les robots industriels et les bancs de soudage. Ils sont adaptés aux grandes séries et aux pièces longues. La manière la plus simple et bien souvent la moins chère d'implanter le soudage par friction malaxage est la modification d'une machine-outil ou d'un centre d'usinage conventionnel. Le procédé étant relativement semblable à une opération d'usinage classique, c'est-à-dire un

## CHAPITRE III CONCEPTION ET RÉALISATION D'UN OUTIL FSW

outil rotatif se déplaçant sur la pièce, il est très facile d'adapter de telles machines pour cet usage. Dans notre cas, les soudures ont été faites en utilisant une fraiseuse universelle (Almo) qui est une machine-outil utilisée pour usiner tout type de pièces mécaniques, à l'unité ou en série, par enlèvement de matière à partir de blocs ou parfois d'ébauches estampées ou moulées, à l'aide d'un outil coupant nommé fraise. Dont vitesse de rotation peut atteindre 2000 tr/min, et la vitesse d'avance 630 mm/min. Le principal avantage de la machine utilisée est qu'on ne lui a fait subir aucune modification (Figure III. 1).



Figure III. 1 : fraiseuse verticale semi-automatique.

### 2.3 Matériaux utilisés pour l'outil et leurs propriétés

Selon les données bibliographiques, les éléments essentiels de l'outil sont fabriqués en acier de différentes nuances, les métaux à assembler étant en général des alliages ayant des températures de fusion modérées ( $T_{fusion} < 1000^{\circ}C$ ). Dans notre cas, l'outil servira au soudage des alliages d'aluminium dont les températures de fusion  $T_{fusion}$  avoisinent  $640^{\circ}C - 660^{\circ}C$ .

Le corps de l'outil et le couvercle sont constitués d'acier E335 A 60-2 selon la norme française (AFNOR), Acier de construction non allié à usage courant en mécanique générale. Non traité, il offre une bonne résistance mécanique.

## CHAPITRE III CONCEPTION ET RÉALISATION D'UN OUTIL FSW

- **Composition chimique en % :**

| Éléments      | % maxi   |
|---------------|----------|
| Phosphore (P) | 0.055    |
| Soufre (S)    | 0.055    |
| Azote (N)     | 0.014    |
| Fer (Fe)      | Le reste |

Tableau III. 1: composition chimique en % de l'acier E335.

- **Caractéristiques mécaniques moyennes :**

| $R_m$ (N/mm <sup>2</sup> ) | $R_e$ (N/mm <sup>2</sup> ) | A (%)  |
|----------------------------|----------------------------|--------|
| 590 / 770                  | 305 / 335                  | 6 / 16 |

Tableau III. 2 : Caractéristiques mécaniques moyennes.

La partie essentielle (épaulement et le pion) est fabriquée en acier X210Cr12 qui présente de meilleures propriétés mécaniques.

L'acier est un acier de travail à froid avec une grande résistance à l'usure (teneur élevée en carbures de chrome) et une remarquable capacité de coupe (pour les feuilles de tôle jusqu'à 4 mm d'épaisseur). Haute acceptation de trempe, faible variation dimensionnelle des pièces, ténacité moyenne. Cette nuance est un grand classique parmi les aciers au chrome lédéburitiques à 12 %.

Ces applications sont :

- Outils de découpage, emboutissage (poinçons, matrices).
  - Outils d'usinage (outils pour le travail du bois).
  - Outils de formage (outils pour l'extrusion des alliages légers et des matières plastiques, outils pour compression des matières abrasives).
  - Instruments de mesure (calibres, tampons, jauges).
- **Composition chimique, AFNOR, Z200C12 (valeur indicative en % du poids) :**

| C       | Si      | Mn      | P      | S      | Cr        |
|---------|---------|---------|--------|--------|-----------|
| 1.9-2.2 | 0.1-0.6 | 0.2-0.6 | 0-0.03 | 0-0.03 | 11.0-13.0 |

Tableau III. 3: composition chimique de l'acier X210Cr12.

- **Propriétés physiques :**

| Résistance à la traction (MPa) | Dureté d'utilisation (HRC) | Module d'élasticité (MPa) | Densité    | Conductibilité thermique (W/m/°C) |
|--------------------------------|----------------------------|---------------------------|------------|-----------------------------------|
| env. 850                       | max. 62                    | <b>210 000</b>            | <b>7,7</b> | <b>20</b>                         |

Tableau III. 4: Propriétés physiques de l'acier X210Cr12.

### 2.4 Conception des pièces de l'outil

La conception assistée par ordinateur (CAO) comprend l'ensemble des logiciels et des techniques de modélisation géométrique permettant de concevoir, et de tester virtuellement des produits.

La CAO permet de concevoir des systèmes dont la complexité dépasse la capacité de l'être humain, et d'apprécier globalement le comportement de l'objet créé avant même que celui-ci n'existe. En CAO, on ne dessine pas, on construit virtuellement un objet capable de réagir dans son espace réel selon des lois régies par le logiciel. Le résultat, appelé maquette numérique qui constitue un véritable prototype évolutif. Durant notre conception nous avons utilisé le logiciel de conception appelé (SolidWorks).

En premier lieu nous avons utilisé les commandes du logiciel SolidWorks tel que : Esquisses, fonctions pour concevoir les différentes pièces de l'outil. L'utilisation de la commande assemblages nous a permis d'effectuer le montage des pièces en formant l'outil complet.

#### 2.4.1 Éléments composant notre outil FSW

Notre outil de soudage de forme cylindrique est composé essentiellement des éléments suivants : **1** le porte-outil, **2** arbre, **3** outil, **4** couvercle.

Les dessins de définitions (planche) de chaque pièce sont représentés dans l'annexe, partie dessins de conception.

La (Figure III.1) montre l'ensemble de ces différents composants et leur schéma général d'assemblage.

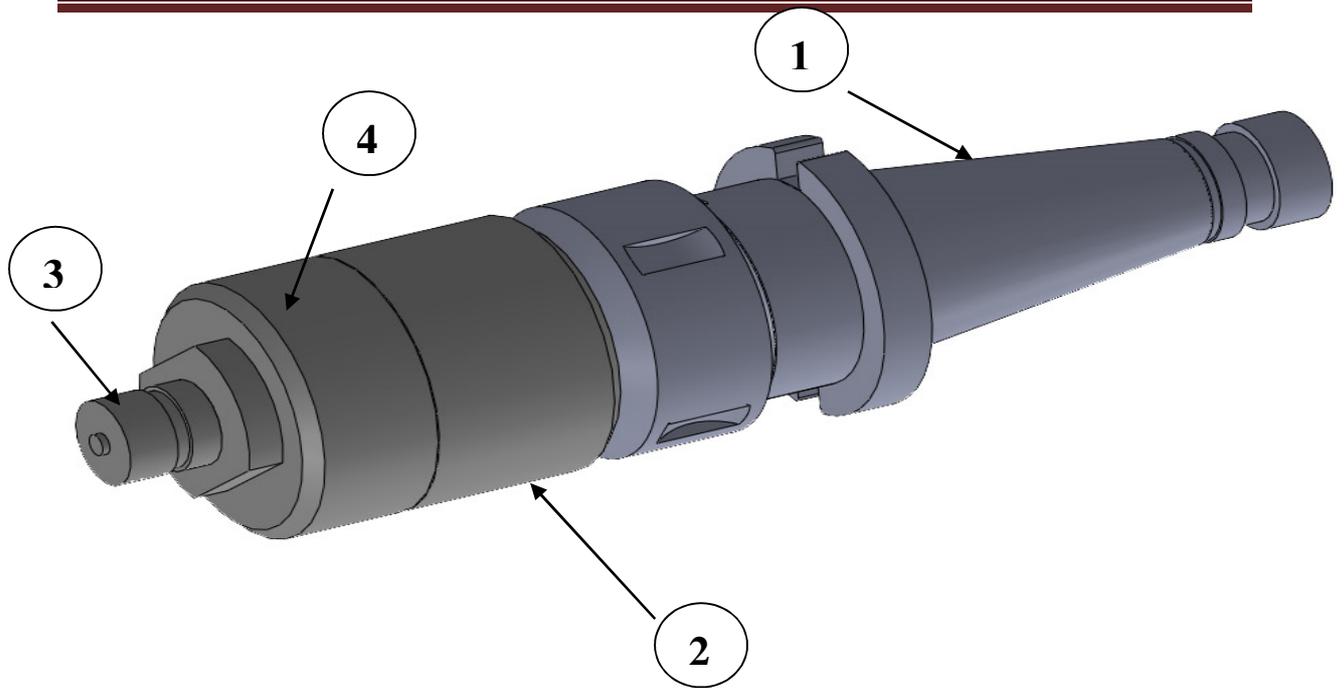


Figure III. 2 : schéma général d'assemblage.

### 2.4.2 Définition et rôle de chaque élément

- **Le porte-outil :**

la (figure III.3) qui suit illustre un porte-outil **1** d'une fraiseuse. la partie conique est joint au mandrin de la machine alors que la partie cylindrique a pour rôle de réunir l'ensemble des éléments constituant l'outil et de transmettre l'énergie cinétique de rotation au couple pion/épaulement, à l'aide d'une pince **2** et un couvercle **3** pour tenir bien le corps de l'outil. (Planche N° 1, 2, 3)

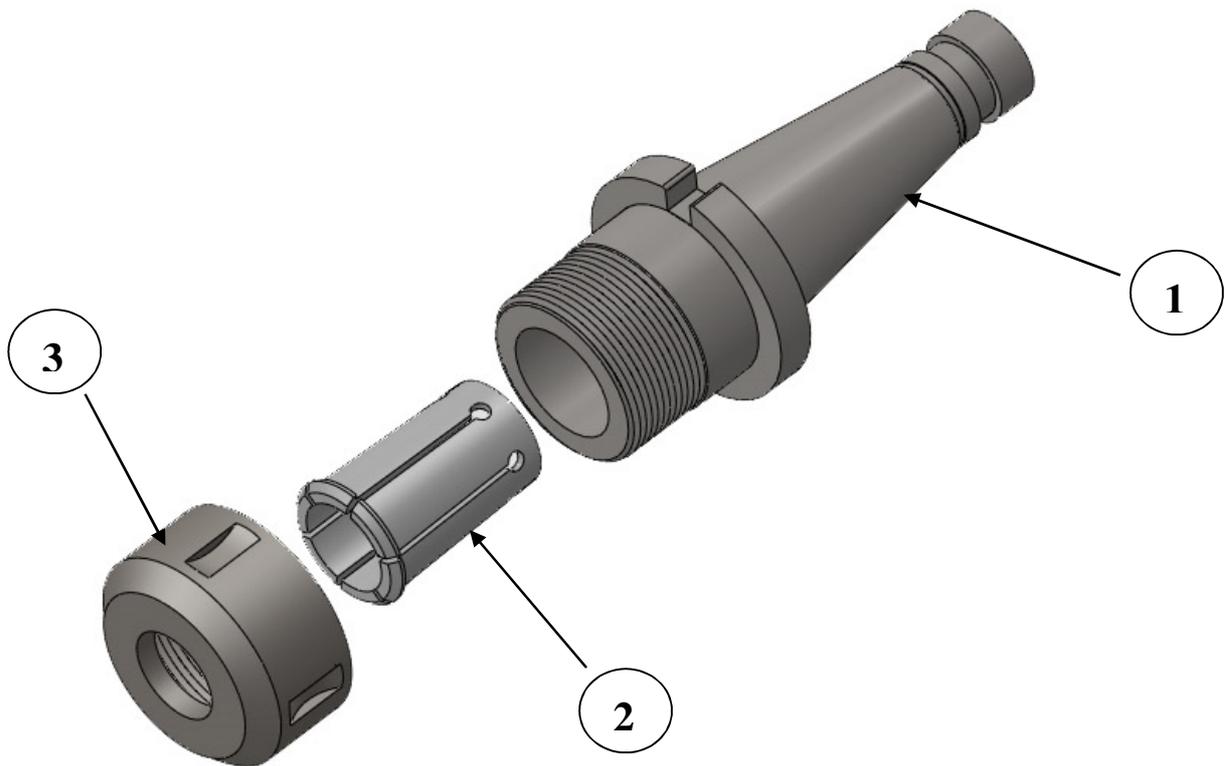


Figure III. 3 : porte-outil.

- **Le corps de l'outil :**

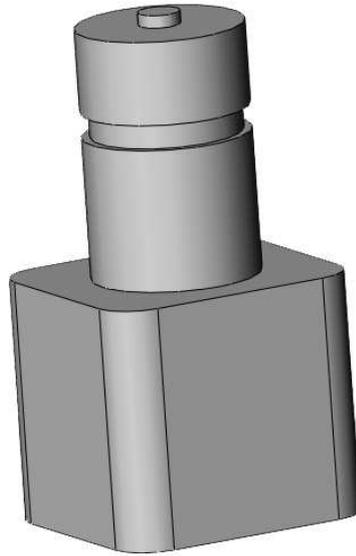
C'est l'élément où s'emboîte l'outil dans son trou rectangulaire, d'une profondeur de 29 mm et un rayon de 5 mm, et la partie cylindrique de diamètre 25 mm entre dans le porte outil (Planche N° 4).



Figure III. 4 : corps d'outil.

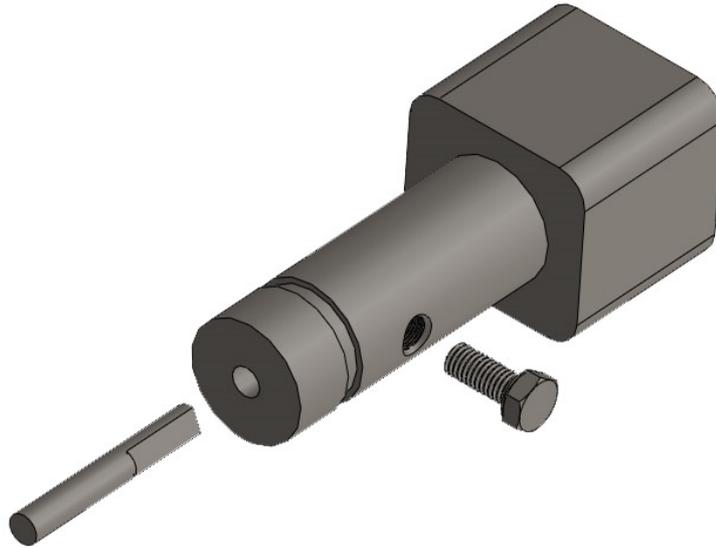
- **Outil :**

C'est l'élément essentiel de dispositif, il a pour rôle de souder les pièces, le pion et l'épaulement sont solidaire. sa partie prismatique entre dans le corps et cela va éliminer tout mouvement (figure III. 5) (Planche N° 5).



*Figure III.5: outil.*

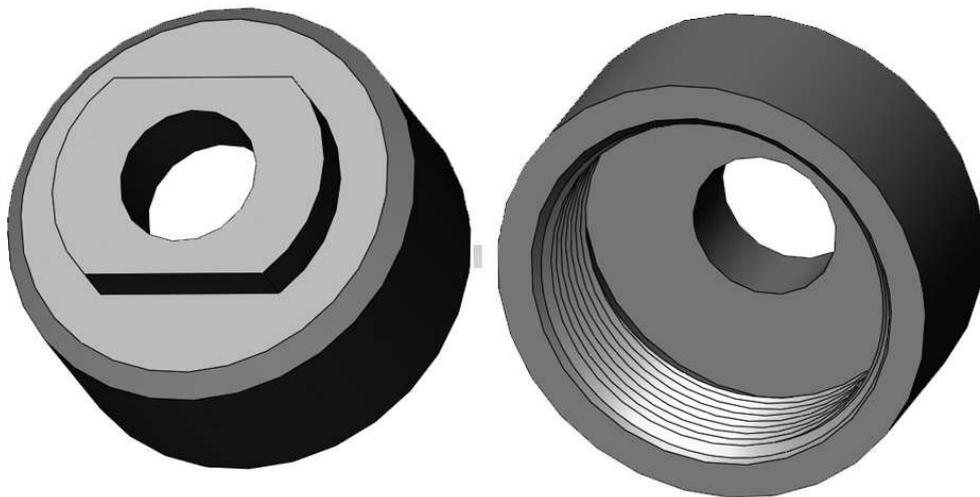
Les apports thermiques par friction nécessaires au soudage des tôles sont fonction de leur épaisseur, d'où un dimensionnement et une réalisation en deuxième étape d'épaulements de différents diamètres peut se faire comme présenté dans la (figure III. 6), on a donc proposé un outil à pion rétractable qui possède un pion cylindrique avec un méplat de longueur ajustable. Son intérêt est de pouvoir faire sortir et rentrer le pion progressivement à travers l'épaulement pour souder des pièces avec des profondeurs de pénétration différentes. La fixation de l'épaulement et le pion se fait progressivement à l'aide d'une vis.



*Figure III.6 : outil à pion rétractable.*

- **Couvercle :**

Il sert à maintenir l'outil en position en bloquant son mouvement vers le bas lors du soudage. Le méplat de diamètre 30 sert au serrage de couvercle avec une plate de 30 (Figure III.7) (Planche N° 6).



*Figure III.7: couvercle.*

## CHAPITRE III CONCEPTION ET RÉALISATION D'UN OUTIL FSW

---

La (figure III.8) montre une photographie de l'outil de soudage par friction et malaxage réalisé.



*Figure III. 8 : outil de soudage FSW.*

### 2.5 Repérage et Feuilles d'analyse des surfaces des pièces

Le passage de l'idée à la réalisation effective d'une pièce mécanique (ou d'un produit quelconque de manière générale) fait intervenir trois fonctions principales :

- La conception – construction.
- L'étude et la préparation de la fabrication.
- La fabrication.

Le temps et les moyens consacrés à la réalisation de chaque fonction dépendent du type de produit fabriqué et de son nombre d'exemplaires. Selon le type d'entreprise la réalisation des fonctions peut être assurée par une seule personne (fabrication artisanale) ou par des services très spécialisés (fabrications sérielles de produits de moyenne ou grande complexité technique).

Toute pièce mécanique évolue d'un état initial, correspondant à la pièce brute, vers un état final, représentatif du contrat de départ qu'est le dessin de définition. La valeur ajoutée représente l'ensemble des opérations (usinages, traitement, etc.) à effectuer.

- La gamme de fabrication est un document d'archive dans lequel sont consignées, de manière chronologique et globale, les différentes phases de la transformation d'un produit.

## CHAPITRE III CONCEPTION ET RÉALISATION D'UN OUTIL FSW

---

- Une phase représente l'ensemble des opérations effectuées à un même poste de travail.
- Une opération met en œuvre un seul des moyens dont est doté ce poste de travail.

Les dessins de repérage des surfaces des pièces ainsi que les feuilles d'analyses de chaque pièce, sont représenté dans la deuxième partie de l'annexe.

### 3 Mise en fonctionnement de l'outil

#### 3.1 Réalisation du cordon de soudure

##### 3.1.1 Matériaux des plaques à souder et leur préparation

Des plaques de 15 cm de largeur et 20 cm de longueur ont été découpées par un ciseau industriel d'une tôle en alliage d'aluminium (1050 A) de 2 mm d'épaisseur. La largeur de plaque a été orientée dans la direction du laminage afin que le joint soudé soit aussi dans la direction du laminage. Pour éliminer les déformations induites par le ciseau, les plaques ont dans une deuxième étape été usinées sur une fraiseuse sur les deux côtés selon la largeur à une dimension finale de 19.5 cm de longueur et 15 cm de largeur. Ces étapes ont permis d'avoir des plaques exemptes de déformations aux extrémités ce qui permet d'obtenir des joints uniformes.

L'alliage d'aluminium A-A 1050 est un alliage à 99.5% d'aluminium, Faible résistance mécanique, haute résistance à la corrosion, haute conductivité thermique et électrique, formage facile.

- **Composition chimique en % :**

| <i>Al</i> | <i>Si</i>   | <i>Fe</i>   | <i>Cu</i>     | <i>Mn</i>    | <i>Mg</i>    | <i>Zn</i>   | <i>Ti</i>    |
|-----------|-------------|-------------|---------------|--------------|--------------|-------------|--------------|
| 99.5      | <b>0.13</b> | <b>0.32</b> | <b>0.0005</b> | <b>0.002</b> | <b>0.002</b> | <b>0.04</b> | <b>0.005</b> |

Tableau III. 5: Composition chimique en % de l'alliage 1050 A.

## CHAPITRE III CONCEPTION ET RÉALISATION D'UN OUTIL FSW

- **Propriétés physiques :**

Masse volumique 20° C 2.71 Kg/dm<sup>3</sup>

Point de fusion 640-660 °C

Module d'élasticité longitudinal 69 Gpa/mm<sup>2</sup>

Conductivité thermique 210-230 W/M.K

Conductivité électrique  $\geq 34$  M/ $\Omega$ .mm<sup>2</sup>

Résistivité électrique  $\leq 0.029$   $\Omega$ .mm<sup>2</sup>/M

- **Applications :**

Matériel pour industrie chimique ou alimentaire, décoration, matériel électroménager, emboutissage, chaudronnerie, emballage, (tubes, boîtes, capsules)

### 3.1.2 Montage des plaques

Pour l'opération de soudage FSW, il est nécessaire d'utiliser un montage de soudage assurant à la fois la reprise de l'effort à l'envers de la soudure (enclume) et assurant la mise en position des deux pièces l'une par rapport à l'autre et le tout dans l'espace de la machine de soudage. On a installé les pièces sur une plaque de support en acier de 15 cm d'épaisseur déposée sur la table de la machine. Les pièces étant fixées par bridage, ce dernier est constitué de 4 brides plaquant les pièces sur l'enclume, permettant également un accostage quasi-parfait des bords à souder pour éviter tout déplacement (Figure III.9). La distance entre les brides et le milieu du joint est la même des deux côtés du joint. Cette distance est établie afin d'éviter une collision entre les deux (Figure III.10).

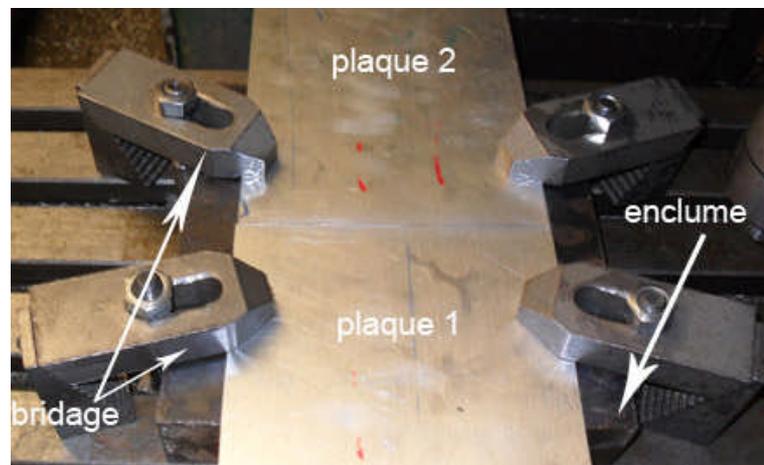


Figure III.9 : montage des plaques à souder.



Figure III. 60 : la distance de sécurité entre les brides.

### 3.1.3 Précaution avant soudage

Avant de souder, il est à noter qu'il faut :

- Ajuster la longueur du pion de manière qu'elle mesure environ  $\delta = 0,5$  mm de moins que l'épaisseur des plaques (Genevois 2004), pour que le pion n'entre pas en collision avec l'enclume (Figure III.11).

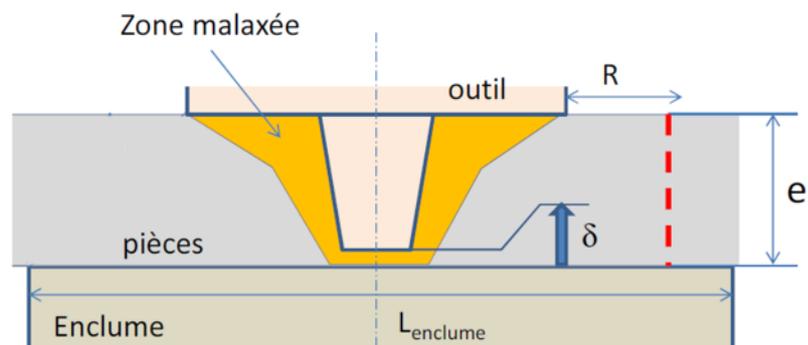


Figure III.11: précaution avant le soudage par friction et malaxage.

- D'après Sandra Zimmer 2012,  $R \geq 2 * e$  (7)  
Où : R est l'épaisseur minimum des pièces autour de la zone malaxée, voir la (Figure III.11).
- Vérifier la planéité tout le long du joint à souder.
- Que la ligne du joint soit parallèle à la ligne d'avance du pion (Figure III.12).

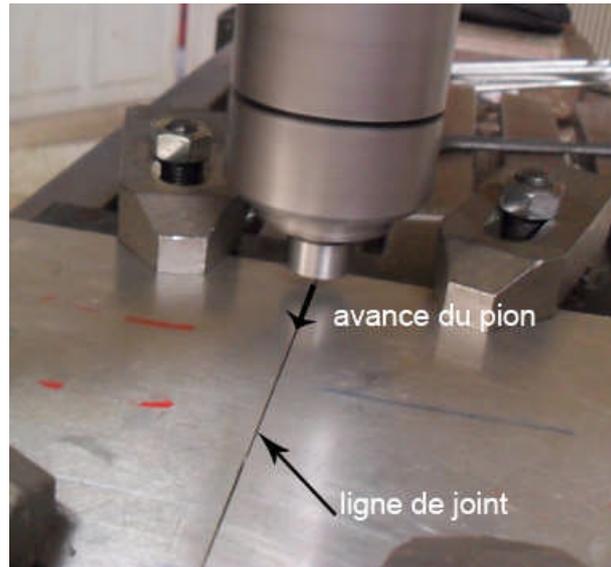


Figure III.12: présentation de l'avance de pion et la ligne de joint.

### 3.1.4 Procédure et paramètres pris en compte dans le cadre de l'expérimentation

Dans la pratique, il existe deux types de soudures ; les soudures froides dont le rapport de vitesse de rotation sur vitesse d'avance est inférieur à **1** et les soudures chaudes pour lesquelles ce rapport est supérieur à **1** (Genevois 2004). Dans notre cas, le rapport est supérieur à 80, on parle donc de soudures chaudes. Le cordon, une fois réalisé, présente une surface avec des stries arquées dues à l'épaulement, la distance entre les stries dépend de ce rapport. La profondeur entre les stries dépend de l'inclinaison de l'outil et de la pression exercée sur les tôles.

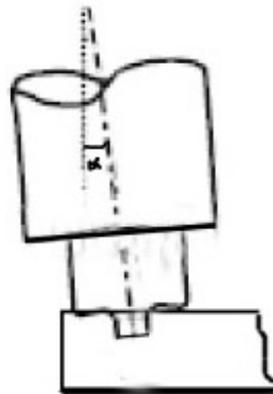
Les trois facteurs principaux influant sur la qualité de la soudure sont la vitesse de rotation de l'outil, la vitesse d'avance et la profondeur de l'outil dans le joint. Ces paramètres ont un effet sur la température du joint, le couple requis, les forces transversales et la force axiale nécessaire pour maintenir l'outil dans le joint. Il est préférable d'avoir une vitesse de rotation élevée pour assurer le bon « malaxage » du matériau. Des vitesses trop basses génèrent moins de chaleur, donc de plus faibles températures sont atteintes au niveau de l'outil, ce qui ne favorise pas le malaxage du matériau. D'autre part, des vitesses trop élevées amènent le matériau à des températures avoisinant le point de fusion de ce dernier. Il est donc probable que ces chaleurs aient créé un film de liquide au pourtour de l'outil abaissant ainsi les propriétés du matériau soudé. D'autre part, une augmentation de

### CHAPITRE III CONCEPTION ET RÉALISATION D'UN OUTIL FSW

---

la vitesse d'avance produira les effets inverses à ceux générés par la vitesse de rotation. Une pénétration trop profonde crée une bavure sur le côté reculant de la soudure et provoque une concentration de contrainte au niveau de la bavure. D'ailleurs, la majorité des soudures possédant une bavure peuvent fissurer à cet endroit lors des essais de traction. À l'opposé, une pénétration trop faible a souvent provoqué des trous et des fissures qui occasionnent des soudures peu efficaces.

L'angle d'inclinaison ( $\alpha$ ) de la tête de la machine portant l'outil, lui aussi, servi de paramètre. La rotation de l'outil pousse le métal vers la surface du joint. Une inclinaison de l'outil est nécessaire pour maintenir une quantité de métal suffisante et pour permettre à l'arrière de l'outil de maintenir la compression pour assurer une bonne construction du joint (figure III.13). L'effet de la variation de l'angle d'inclinaison de l'outil a été étudié par Chen, Yan et al en 2006. L'étude montre que si l'inclinaison de l'outil est inférieure à  $1^\circ$ , une rainure apparaît sur la surface du côté entrant du joint. Lorsque l'inclinaison est de  $1^\circ$  à  $3^\circ$ , la rainure disparaît et le joint prendra une belle apparence. Au-delà de  $3^\circ$ , des bavures vont être visibles à la surface du joint et des cavitations vont apparaître du côté sortant du joint.



*Figure III.13: Angle d'inclinaison de l'outil.*

D'après ces informations et quelques essais, on a eu les paramètres pour la réalisation de soudage, le tableau ci-après résume les valeurs des différents paramètres utilisés.

## CHAPITRE III CONCEPTION ET RÉALISATION D'UN OUTIL FSW

| Épaisseur de la tôle [mm] | Diamètre du pion [mm] | Géométrie du pion | Inclinaison de l'outil ( $\alpha^\circ$ ) | Diamètre de l'épaulement [mm] | V de rotation [tr/min] | V d'avance [mm/min] |
|---------------------------|-----------------------|-------------------|---|-------------------------------|------------------------|---------------------|
| 2                         | 5                     | Cylindrique       | 1.5°                                      | 20                            | 1400                   | 16                  |

Tableau III. 6: Paramètres de soudage par FSW.

### 3.1.5 Résultat de la soudure et discussion

La (figure III.14) montre les deux faces du cordon, endroit et envers, avec un agrandissement de l'empreinte finale de l'outil dans la (figure III.15).

On constate une surface de cordon lisse, ayant une largeur égale au diamètre de l'épaulement, avec seulement quelques stries, ceci est dû à l'angle d'inclinaison de l'outil et aux paramètres du soudage considéré qui génèrent une quantité de chaleur importante permettant d'améliorer le malaxage de la matière. On obtient une qualité de joint acceptable de visuel.

Aucun défaut majeur n'apparaît dans le cordon par le fait que :

- Le pion assure un flux de matière suffisant autour de lui-même.
- L'inclinaison de l'outil réduit le rejet de bavures.
- L'effort de forgeage est bien convenable à l'épaisseur des plaques soudées.

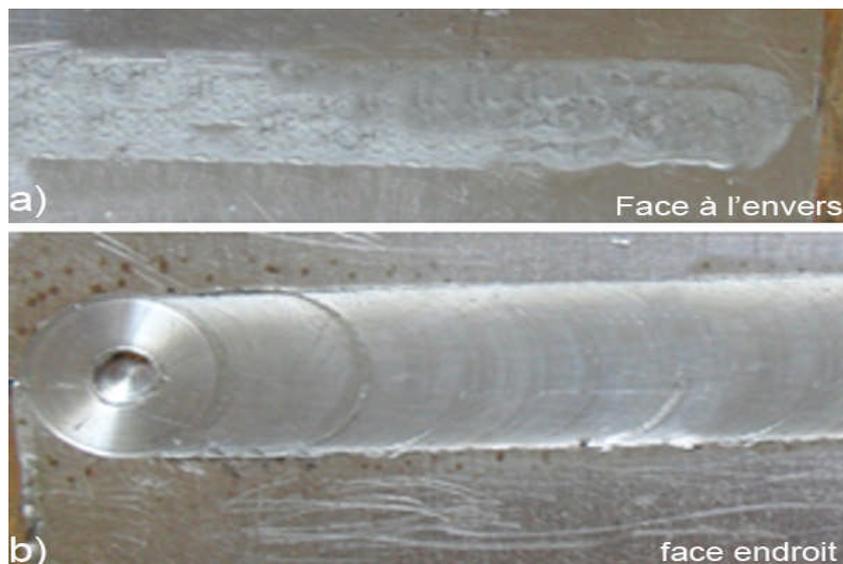


Figure III.14: cordon obtenu apres soudage : a) Face endroit, b) Face envers.

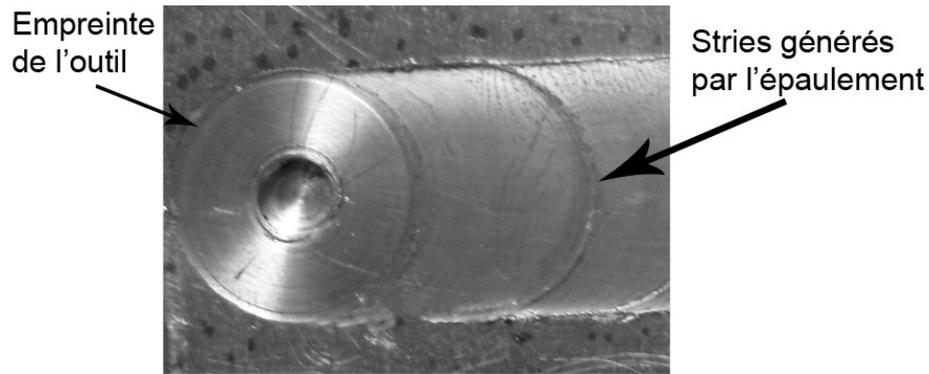


Figure III.15: agrandissement de l'empreinte finale de l'outil.

### 3.2 Essai de traction

#### 3.2.1 Description de la machine de traction du laboratoire

Les essais de traction sont réalisés sur une machine universelle de marque (Ibertest) de capacité de 100 KN, qui peut effectuer sans encombre la traction, la compression et la flexion, Elle est constituée essentiellement d'une traverse inférieure fixe et d'une traverse supérieure mobile entraînée par deux vis sans fin, misent en rotation par un moteur électrique situé dans le compartiment supérieur sur laquelle se trouvent les capteurs servant à mesurer la force appliquée sur l'éprouvette ainsi que le déplacement au cours de l'essai. La gamme vitesse de déplacement de la traverse mobile varie de 0.5 à 50 mm/min, et celle utilisée pour nos essais est de 2 mm/min. Les résultats sont recueillis par des capteurs et grâce à un logiciel, les données sont traitées puis affichées sur l'écran d'un ordinateur lié à cette machine (Figure III.16).



Figure III.16: Machine de traction.

### 3.2.2 L'éprouvette utilisée dans l'essai

Conformément à la norme AFNOR A 03-151, les éprouvettes normalisées sont prélevées perpendiculairement à la ligne de jonction de l'assemblage soudé. D'autres éprouvettes proviennent des tôles seines dans le même sens que les éprouvettes soudées (Figure III.17).

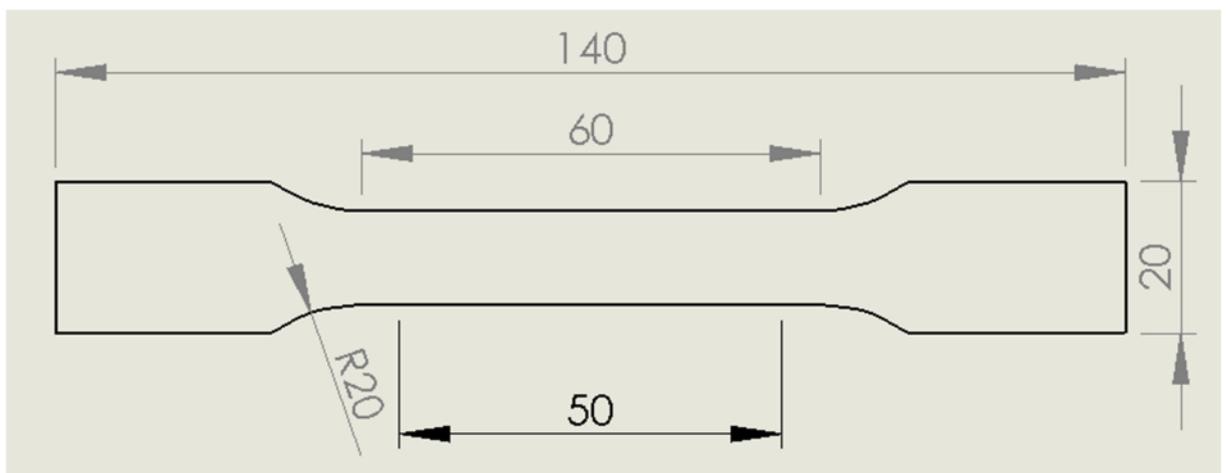


Figure III.17 : éprouvette de traction normalisée selon la norme AFNOR A03-151.

## CHAPITRE III CONCEPTION ET RÉALISATION D'UN OUTIL FSW

Les éprouvettes en forme d'haltère et de section rectangulaire ont été découpées par une machine de découpage plasma (Figure III.18).

Lors du prélèvement des éprouvettes, des précautions ont été prises pour éviter toutes modifications de la structure du métal, résultant soit à un réchauffement, soit une déformation du métal, pour éviter toute forme d'écaillage.

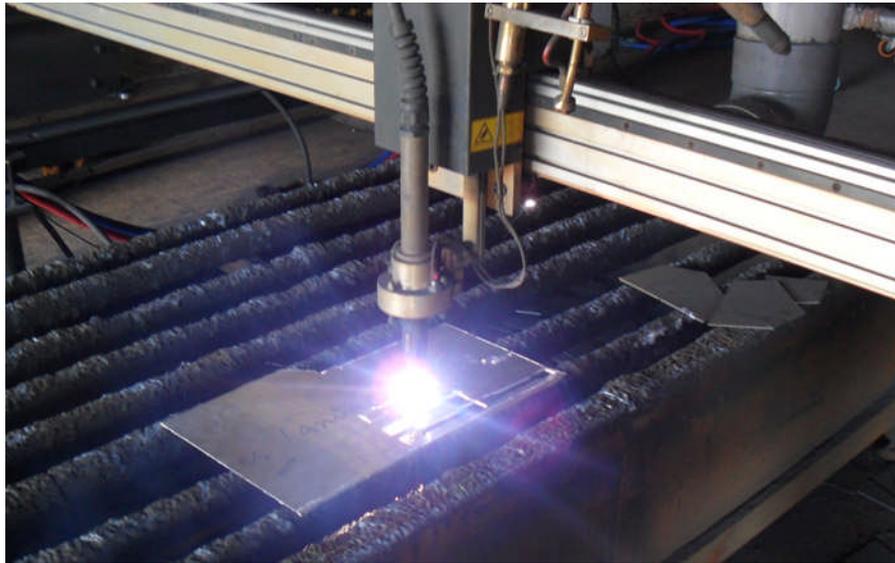


Figure III.18: prélèvement des éprouvettes par découpage plasma.

### 3.2.3 Résultat obtenu

La (figure III.19) et la (figure III. 20), présente quelques éprouvettes soudées et non soudées, avant et après essai. La (figure III .21) montre un agrandissement de la face du cordon qui a subi la rupture.



Figure III.19: Éprouvettes de traction non soudées : a) avant soudage, b) après soudage.

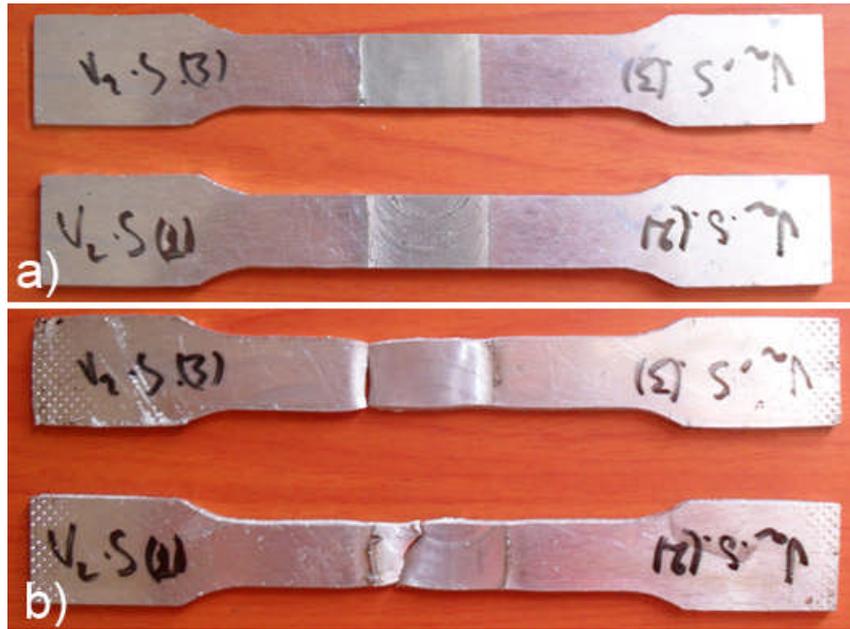


Figure III.20: Éprouvettes de traction soudées : a) avant soudage, b) après soudage.



Figure III.21: Agrandissement du cordon de l'éprouvette rompue.

On remarque que les ruptures s'effectuent au bord du cordon dans la zone de transition (ou liaison), entre la zone affectée thermo-mécaniquement (ZATM) et la zone affectée thermiquement (ZAT), affaiblie par la présence des précipités. Ce procédé affaiblit en général les caractéristiques mécaniques des métaux à souder (Mishra2005). L'absence de rupture mi-cordon montre la bonne qualité du malaxage.

Les résultats des essais de traction sont récapitulés (valeurs moyennes sur plusieurs éprouvettes) sur le tableau suivant :

## CHAPITRE III CONCEPTION ET RÉALISATION D'UN OUTIL FSW

---

| Éprouvette                 | Limite d'élasticité<br>[MPa] |         | Résistance<br>à la traction<br>[MPa] |         | Allongement<br>à la rupture [%] |         |
|----------------------------|------------------------------|---------|--------------------------------------|---------|---------------------------------|---------|
|                            | valeur                       | moyenne | valeur                               | moyenne | valeur                          | moyenne |
| Métal de base              | 103.01                       | 103.82  | 105.4                                | 106.3   | 4.72                            | 4.73    |
|                            | 103.48                       |         | 107                                  |         | 5.02                            |         |
|                            | 104.99                       |         | 106.5                                |         | 4.46                            |         |
| Soudée                     | 67.91                        | 77.24   | 86.8                                 | 88.57   | 5.12                            | 4.31    |
|                            | 72.90                        |         | 87.3                                 |         | 4.70                            |         |
|                            | 90.90                        |         | 91.6                                 |         | 3.12                            |         |
| Efficacité du joint<br>(%) |                              | 74.40   |                                      | 83.32   |                                 | 91.12   |

*Tableau III. 7: Caractéristiques mécaniques des éprouvettes d'essais de traction.*

### 3.2.4 Exemple de courbes de traction

La (figure III.22) donne, pour exemple, les courbes de traction du métal de base et d'une éprouvette soudée. On constate que les propriétés sont affaiblies après le soudage où la limite élastique est proche de la résistance à la traction après l'essai. Donc la zone plastique est assez fine où on a une rupture approximativement fragile. La cause de cette fragilisation est la présence de quelques porosités dans les cordons de soudure.

Il est intéressant de déterminer le coefficient d'efficacité des joints soudés.

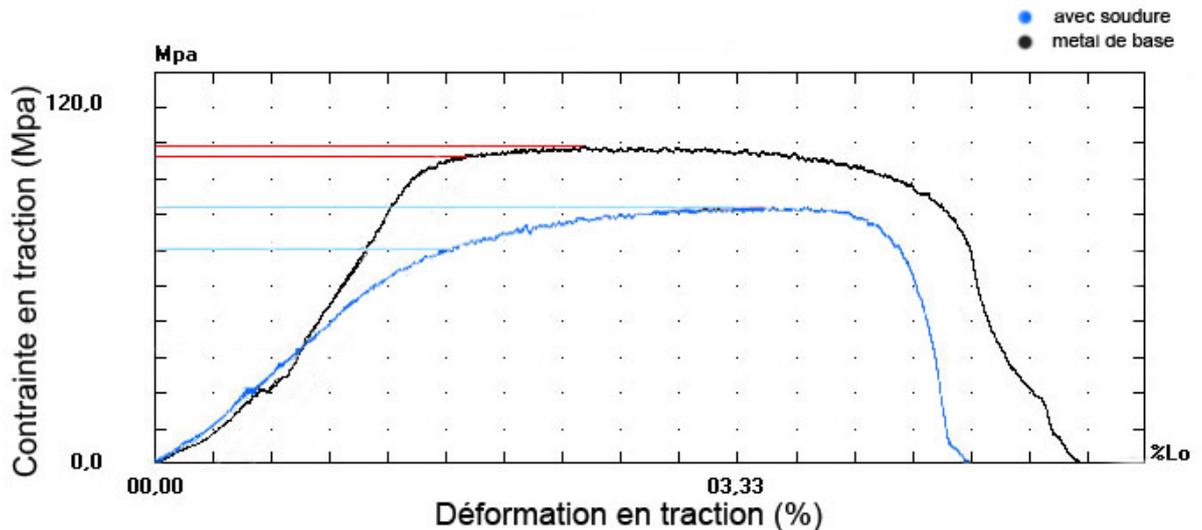


Figure III.22 : Exemple de courbe de traction pour deux éprouvettes (métal de base, soudée).

### 3.3 Le coefficient d'efficacité du joint soudé

Ce coefficient est défini comme le rapport entre la résistance à la traction de l'assemblage soudé et la résistance à la traction du métal de base (Develay1990b, Zimmer 2009) : **[3]**

$$\text{Coefficient de joint} = \frac{R_m \text{ du joint soudé}}{R_m \text{ du métal de base}} [\%]$$

D'après la littérature, la soudure est de qualité acceptable pour un coefficient compris entre 0.6 et 1.0. Le coefficient d'efficacité obtenu pour notre soudure est de l'ordre de **0.83** qui représente une qualité de soudure satisfaisante. Pour ce matériau, l'assemblage soudé par FSW permet de garder de bonnes caractéristiques mécaniques après soudage.

## CONCLUSION GENERALE

---

L'objectif assigné au présent travail consiste en la conception et la réalisation d'un outil de soudage par friction et malaxage adaptée pour une fraiseuse. Pour mener à bien l'étude de ce projet, nous avons opté pour une réalisation de notre projet de fin d'étude au hall de technologie qui a été pour nous d'une importance capitale, tant sur le plan pratique que théorique, cela nous a permis d'élargir nos connaissances dans le domaine de l'usinage (tournage, fraisage, perçage,...).

De plus, nous tenons à noter que cette étude nous a permis de nous familiariser et de nous initier à certains modules d'un logiciel de conception assistée par ordinateur (SolidWorks), qui nous a aidé à concevoir l'outil de manière à être fiable, précis et rentable.

En fin, ce travail était, pour nous, une occasion de faire nos premiers pas dans le vaste terrain de conception et la fabrication de produit dans le domaine industriel, dans le sens où nous étions amenés à concevoir et mettre en œuvre notre outil de soudage FSW. Nous avons effectué des recherches sur le principe de fonctionnement pour nous permettre d'imaginer des solutions adéquates, simples et réalisables dans les limites du cahier des charges.

Nous souhaitons que ce modeste travail serve comme un guide aux étudiants (es) de notre département et servira aussi à d'autres travaux.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [1] Thèse De Mr **François Pichot** : Développement D'une Méthode Numérique Pour La Prédiction Des Dimensions D'un Cordon De Soudure TIG : Application Aux Superaliages Bases Cobalt Et Nickel, École Doctorale Des Sciences Physiques Pour L'ingénieur, 17 Février 2012.
- [2] Thèse De Mm Cyrille Ferdinand : Mise En Œuvre Et Caractérisation D'assemblages Soudés Par Procédés TIG Et Laser De Tôles D'alliages De Titane Réfractaires, L'institut National Polytechnique De Toulouse, 9 Novembre 2005.
- [3] Thèse De Mr Mouloud Aissani : Étude Du Comportement Thermique Et Mécanique Des Matériaux Aéronautiques Par Des Méthodes Numériques : *Application Au Soudage De Structures Métalliques*, Université Saad Dahlab De Blida, 15/09/2013.
- [4] Livre De Klas Weman : Procédés De Soudage, Dunod, Paris, 2012.
- [5] Cours De LP Léon De LEPERVANCHE : Le Soudage.
- [6] Thèse De Mr Adnen Kechaou : Etude Du Soufflage Magnétique De L'arc Electrique De Soudage, Université De Liège, 2013.
- [7] Thèse De Mmemilie LE GUEN : Etude Du Procédé De Soudage Hybride Laser/MAG : Caractérisation De La Géométrie Et De L'hydrodynamique Du Bain De Fusion Et Développement D'un Modèle 3D Thermique, Université De Bretagne-Sud, 4 Novembre 2010.
- [8] Thèse De Mr Jean-Pierre Planckaert : Modélisation Du Soudage MIG/MAG En Mode Short-Arc, l'Université Henri Poincaré, Nancy 1 (Spécialité Automatique, Traitement Du Signal Et Génie Informatique) ,1er Juillet 2008.
- [9] Thèse De Mr massaud MOSTAFA : Etude Du Perçage Et Du Soudage Laser : Dynamique Du Capillaire, Université De Bourgogne, 2011.
- [10] [www.ep-c.fr/services-industriel/le-soudage/soudage-au-gaz](http://www.ep-c.fr/services-industriel/le-soudage/soudage-au-gaz).
- [11] R. BLONDEAU, *Métallurgie Et Mécanique Du Soudage*, Hermès Science Publication, Paris 2001.
- [12] Cours D'alcan Marine : Chapitre 6 (Le Soudage).
- [13] Cours De Manuel Nemoz, D.E.S.S Ingénierie Des Matériaux De Poitiers.
- [14] Revue De Dr. Ir. Koen Faes, IBS (Traduction: M.C. Ritzen), Institut Belge De La Soudure.
-

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [15] Soudage Par Friction Par Roland Cazes, Techniques De L'ingénieur (docBM 7745)
- [16] [www.ep-c.fr/services-industriel/le-soudage/138-le-soudage-par-friction](http://www.ep-c.fr/services-industriel/le-soudage/138-le-soudage-par-friction).
- [17] Thèse De Assaf Farah : Comportement En Fatigue De Joints D'aluminium 7075-T6 Soudés Par Friction-Malaxage Et Parachevés, Université De Montréal, Octobre 2013
- [18] [www.csc.dz](http://www.csc.dz) Brevets D'invention De Mouloud Aissani Et Saliha Gachi Outil De Soudage Par Friction Malaxage (FSW).
- [19] Thèse De Olivier Lorrain : Analyses Expérimentale Et Numérique Du Procédé De Soudage Par Friction Malaxage FSW, Paristech École Doctorale N° 432 11 Juin 2010.
- [20] Thèse De Younes DEMMOUCHE : Etude Du Comportement En Fatigue D'assemblages Soudés Par FSW Pour Applications Aéronautiques, 17 Décembre 2012.
- [21] Université De Montréal École Polytechnique De Montréal Diplôme De Maîtrise Es Sciences Appliquées De Brès Antoine : Modélisation Et Simulation Du Soudage Par Friction Malaxage Utilisant Des Robots Industriels, Octobre 2008.
- [22] [Dainelli@institutesoudure.com](mailto:Dainelli@institutesoudure.com), Evaluation Des Possibilités De Contrôle Qualité En Ligne Des Soudures Fsw.
- [23] Thèse D'Amèvi Tongne : Étude Expérimentale Et Numérique Du Soudage Fsw (Friction Stir Welding) : Analyse Microstructurale Et Modélisation Thermomécanique Des Conditions De Contact Outil/Matière Transitoires, A Saint-Etienne, 03 Décembre 2014.
- [24] Soudage par friction Technique de l'ingénierie (doc,BM 7746).
- [25] MÉMOIRE De Frédéric Thibeault : Étude Numérique Et Expérimentale Du Soudage Par Friction Malaxage, Université Du Québec A Chicoutimi Septembre 2012.
- [26] Thèse De Thomas Heuze : Modélisation Des Couplages Fluide/Solide Dans Les Procédés D'assemblage A Haute Température, Université Pierre Et Marie Curie École Doctorale Smae, 20 Mai 2011.
- [27] Institut De Recherche En Génie Civil Et Mécanique (Gem) UMR CNRS 6183, Centrale Nantes, Université De Nantes Par François GRATECAP, Guillaume Racineux, Arnaud POITOU, Choix Et Optimisation De L'outil Et Des Paramètres De Soudage En Friction Stir Welding Grenoble, 27-31 Août 2007
-

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

**[28]** Thèse D'Iñigo Terreros : Modélisation DEM Thermomécanique D'un Milieu Continu : Vers La Simulation Du Procédé FSW, Paristech l'École Nationale Supérieure d'Arts Et Métiers, 15 Novembre 2013.

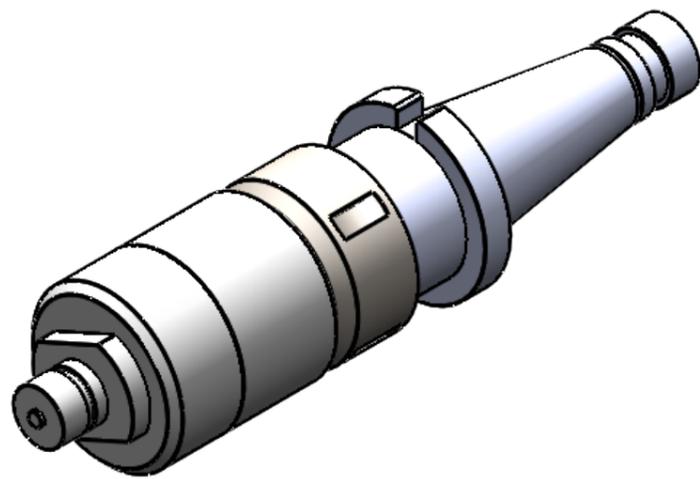
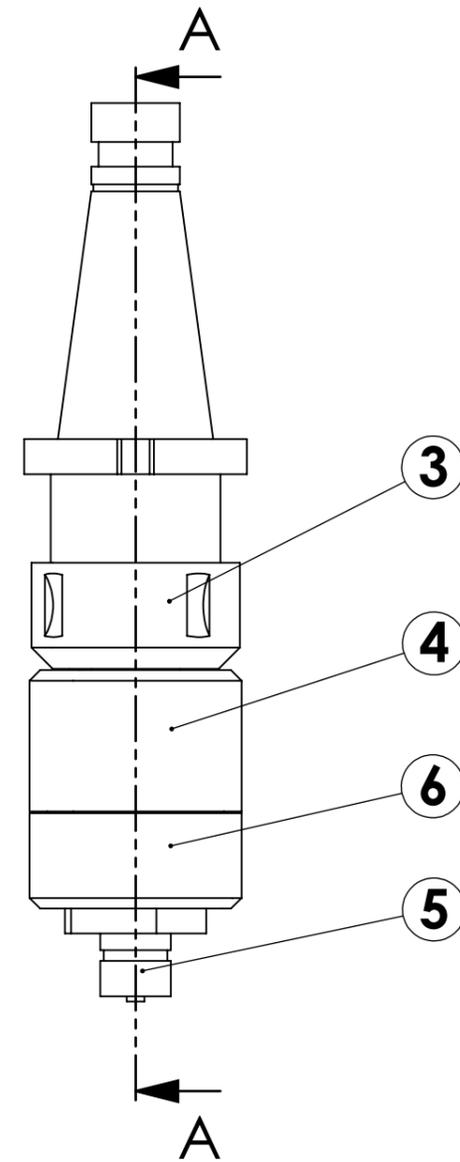
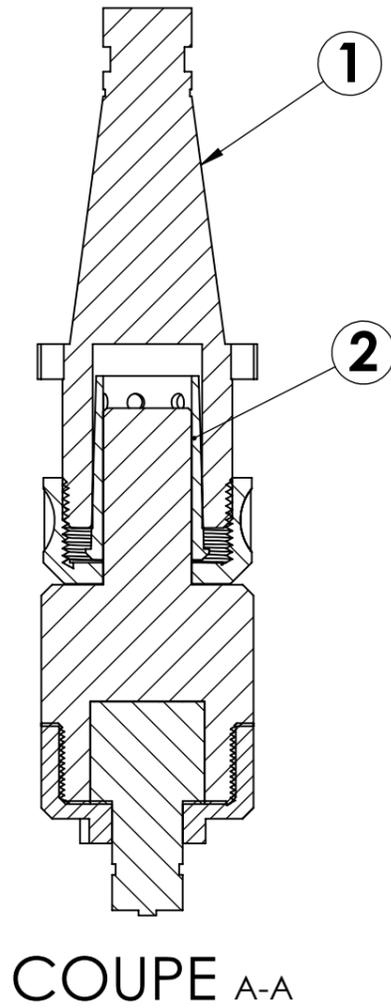
**[29]** Thèse De Thomas Le Jolu : Étude De L'influence Des Défauts De Soudage Sur Le Comportement Plastique Et La Durée De Vie En Fatigue De Soudures Par Friction-Malaxage D'un Alliage Al-Cu-Li, Paristech Université Pierre Et Marie Curie École Doctorale Smae 08 Décembre 2011.

**[30]** Institut De Recherche Appliquée En Productique, Contour Antoine De St Exupery Campus De Ker Lann 35170 Bruz (Bulletin Technique N°8 Octobre 2007)

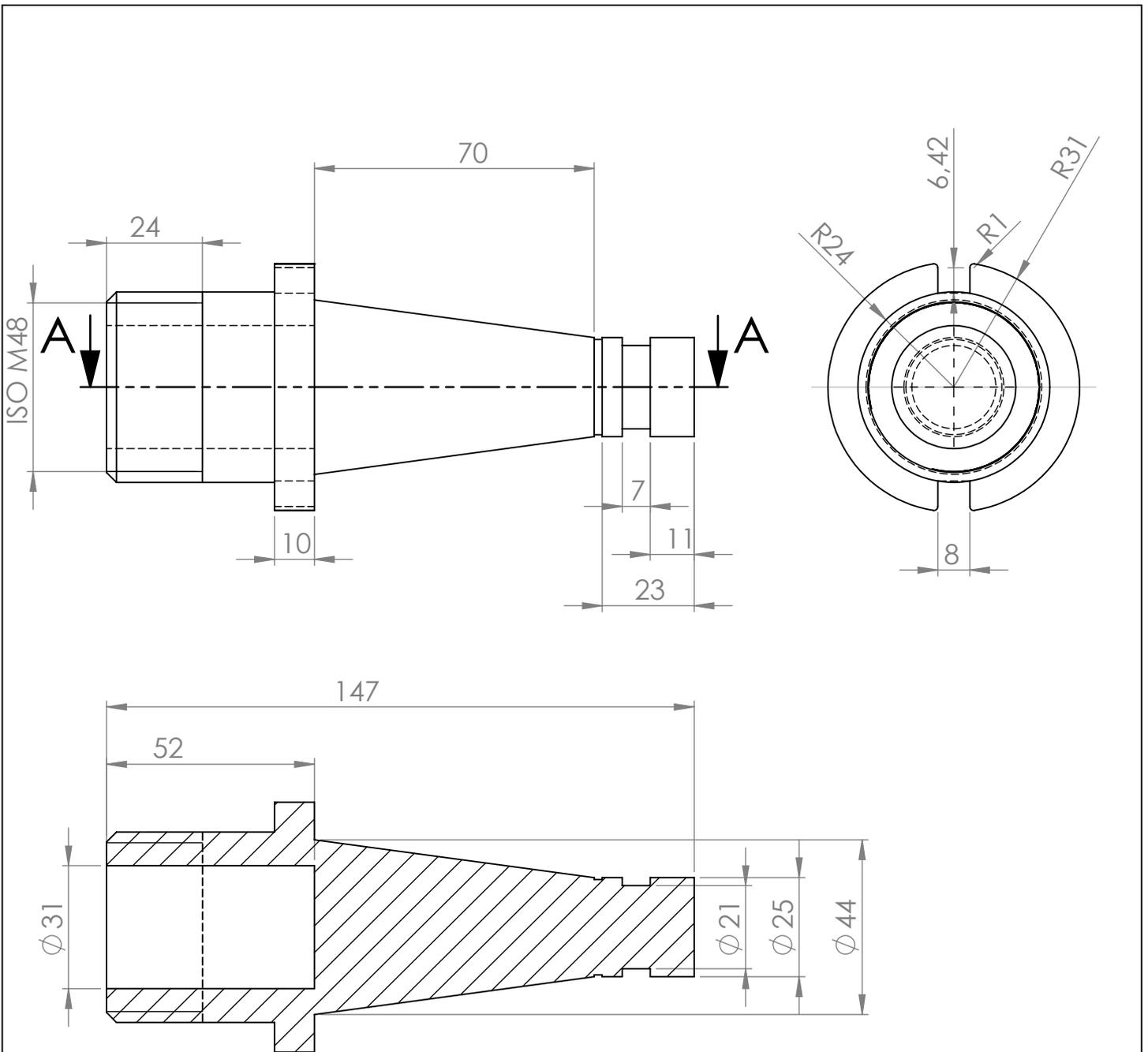
---

# ANNEXE

# Dessins de conception



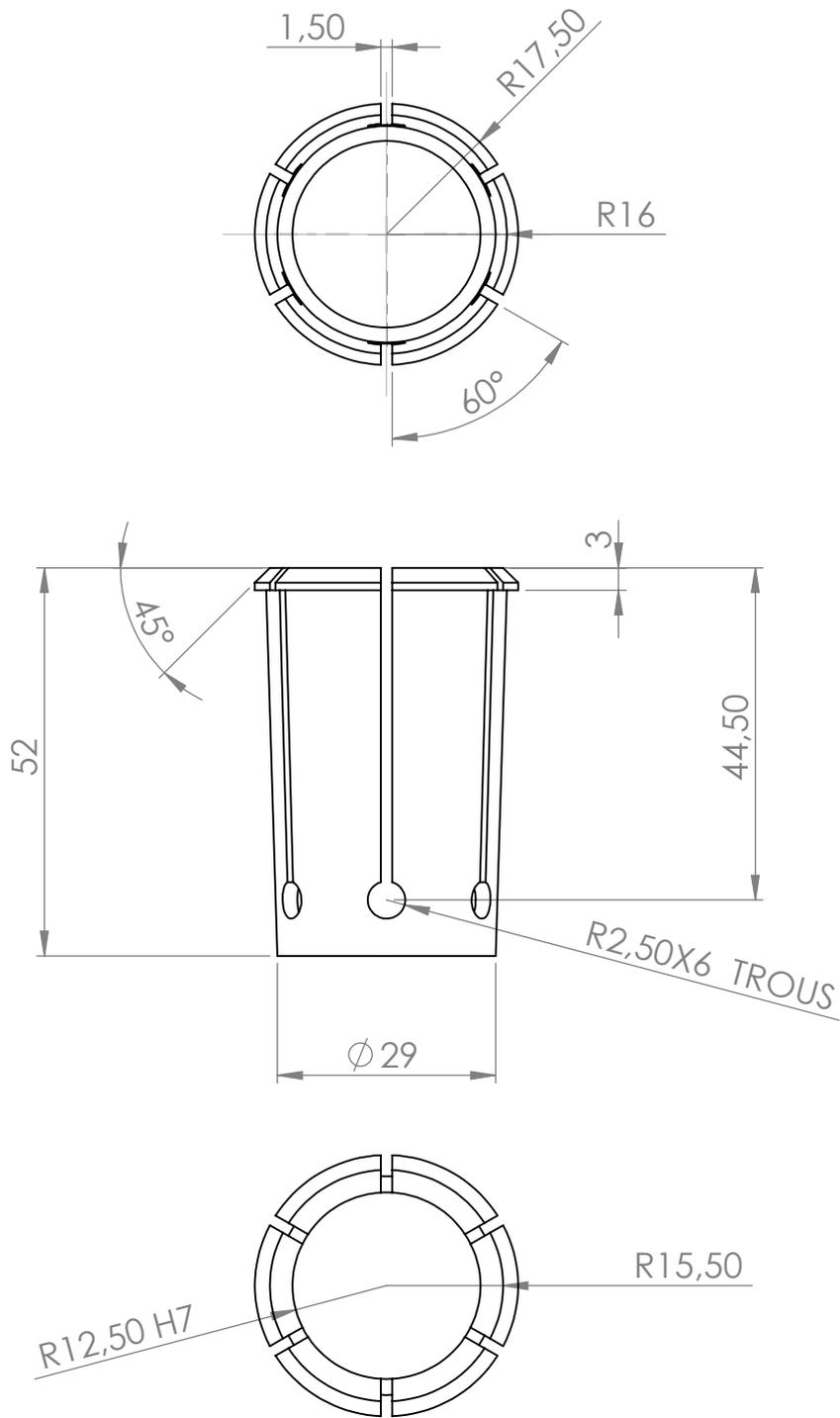
| 06        | 01  | COUVERCLE 1                           | E335  |             |
|-----------|-----|---------------------------------------|---|-------------|
| 05        | 01  | OUTIL                                 | X210Cr12  |             |
| 04        | 01  | CORPS D'OUTIL                         | E335  |             |
| 03        | 01  | COUVERCLE                             |   |             |
| 02        | 01  | PINCE                                 |   |             |
| 01        | 01  | PORTE OUTIL                           |   |             |
| Rep       | Nbr | Désignation                           | Matière   | Observation |
| Echelle : |     | <b>OUTIL DE SOUDAGE FSW</b>           | BOUNDAOUI ZAHIR<br>BENFERHAT NOUARA<br>projet de fin d'etude<br>2016/2017<br>FMP<br>Master II |             |
| 1:2       |     |                                       |   |             |
|           |     |                                       |   |             |
| A 3       |     | Université Mouloud Mammeri Tizi ouzou |   |             |

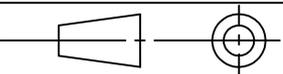


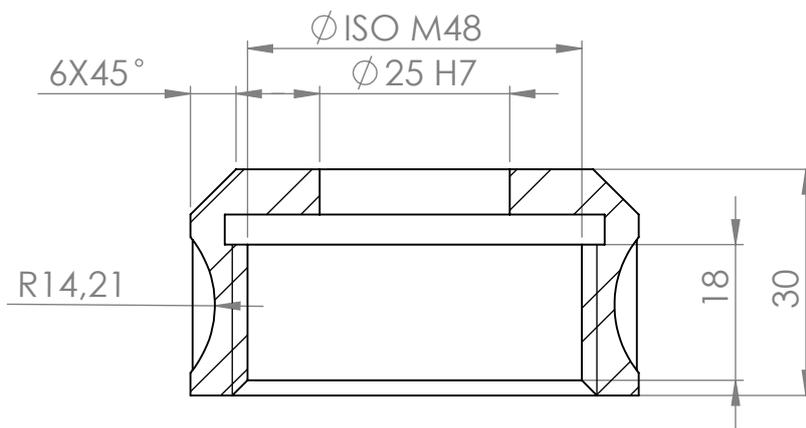
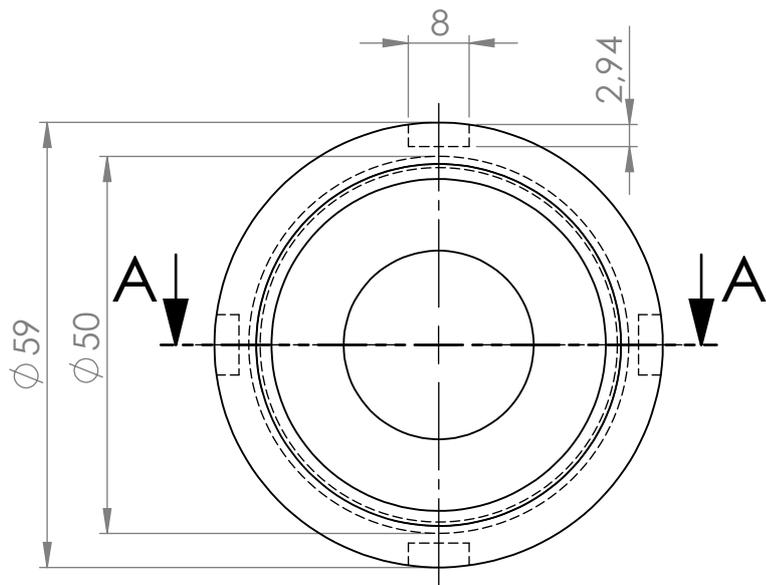
**COUPE** A-A

ECHELLE 1 : 1.5

| 01                | 01  | PORTE OUTIL                           |         |                                     |
|-------------------|-----|---------------------------------------|---------|-------------------------------------|
| Rep               | Nbr | Désignation                           | Matière | Observation                         |
| Echelle:<br>1:1.5 |     | <b>OUTIL DE SOUDAGE FSW</b>           |         | BOUNDAOUI ZAHIR<br>BENFERHAT NOUARA |
|                   |     |                                       |         | projet de fin d'etude<br>2016/2017  |
| A4                |     | Université Mouloud Mammeri Tizi ouzou |         | FMP<br>Master II                    |



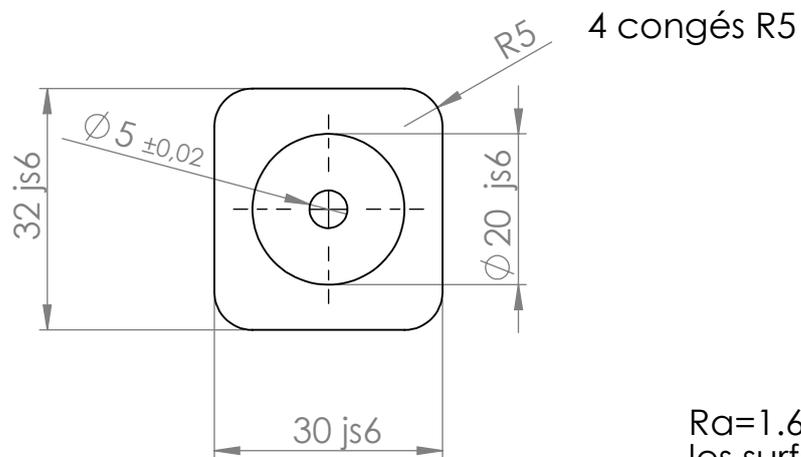
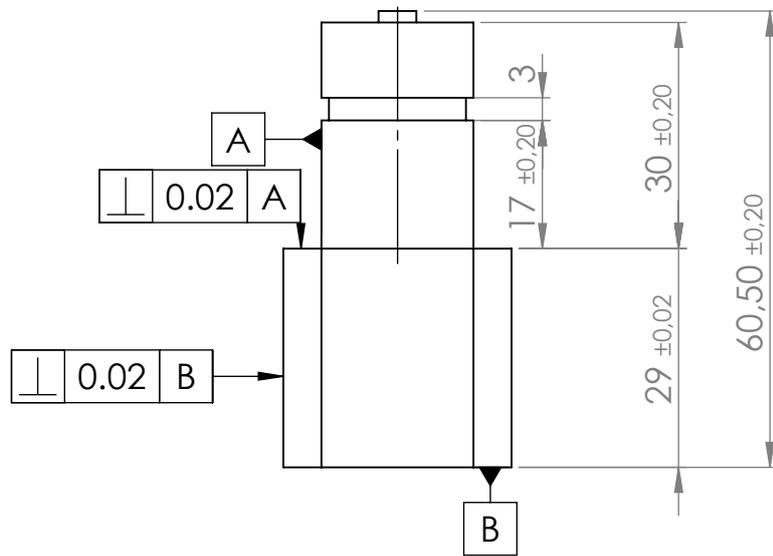
| 02  | 01  | PINCE                                 |                                     |             |
|---|-----|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------|
| Rep   | Nbr | Désignation                           | Matière                             | Observation |
| Echelle:<br>1:1   |     | <b>OUTIL DE SOUDAGE FSW</b>           | BOUNDAOUI ZAHIR<br>BENFERHAT NOUARA |             |
|  |     |                                       | projet de fin d'etude<br>2016/2017  |             |
| A4  |     | Université Mouloud Mammeri Tizi ouzou | FMP<br>Master II                    |             |



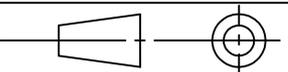
COUPE A-A

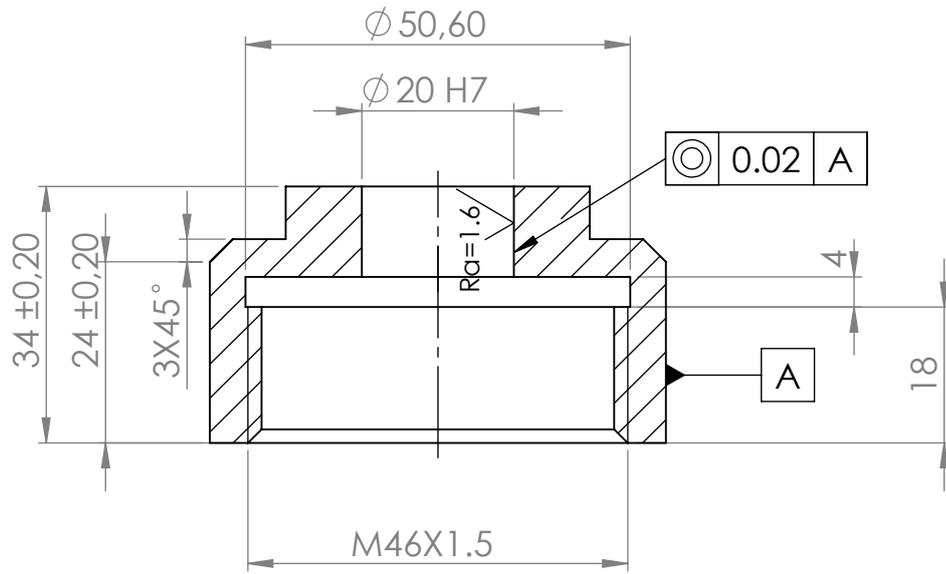
| 03              | 01  | COUVERCLE                   |                                       |                                     |
|-----------------|-----|-----------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| Rep             | Nbr | Désignation                 | Matière                               | Observation                         |
| Echelle:<br>1:1 |     | <b>OUTIL DE SOUDAGE FSW</b> |                                       | BOUNDAOUI ZAHIR<br>BENFERHAT NOUARA |
|                 |     |                             |                                       | projet de fin d'etude<br>2016/2017  |
| A4              |     |                             | Université Mouloud Mammeri Tizi ouzou | FMP<br>Master II                    |



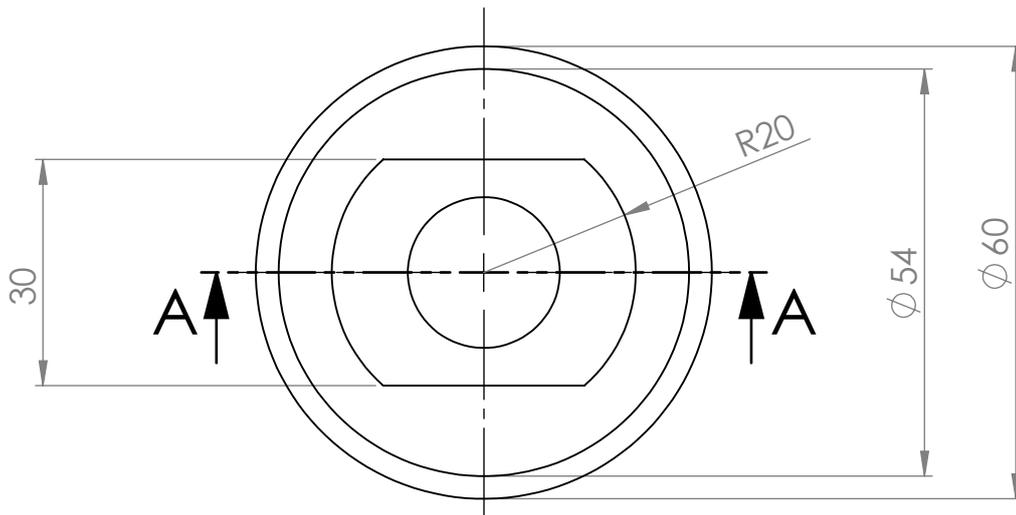


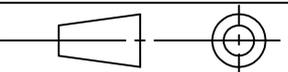
Ra=1.6 pour toutes les surfaces sauf indication contraire

| 05  | 01  | OUTIL                                 | X210C12                             |             |
|---|-----|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------|
| Rep   | Nbr | Désignation                           | Matière                             | Observation |
| Echelle:<br>2:1   |     | <b>OUTIL DE SOUDAGE FSW</b>           | BOUNDAOUI ZAHIR<br>BENFERHAT NOUARA |             |
|  |     |                                       | projet de fin d'etude<br>2016/2017  |             |
| A4  |     | Université Mouloud Mammeri Tizi ouzou | FMP<br>Master II                    |             |



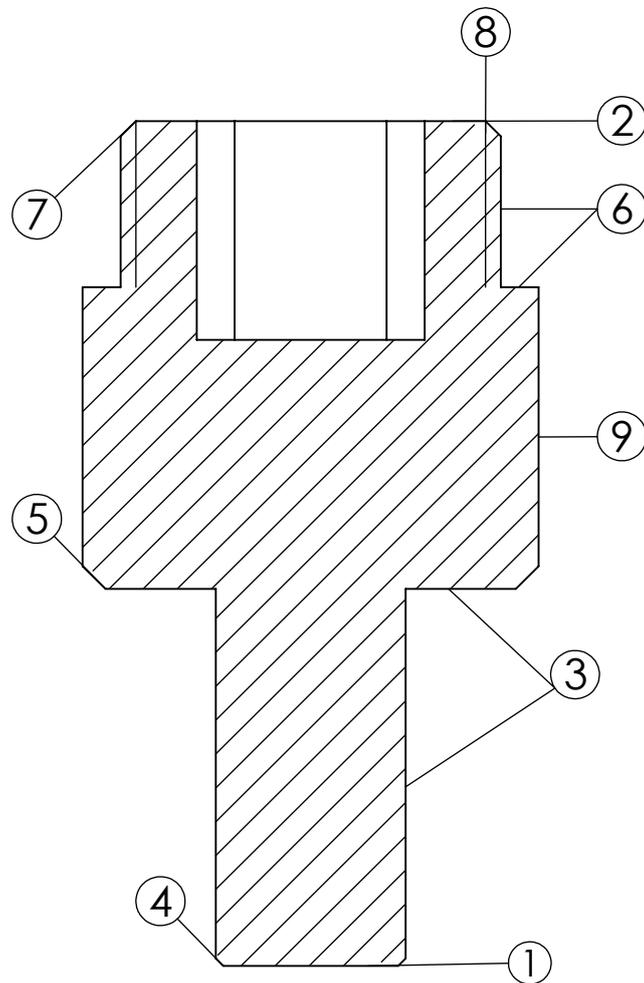
COUPE A-A



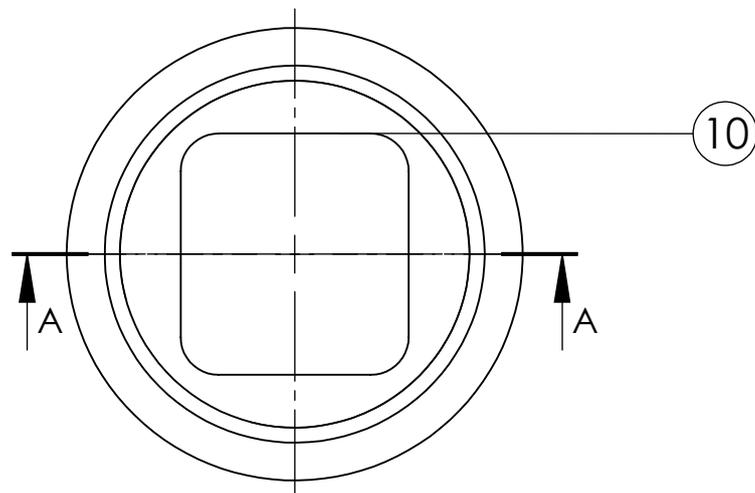
| 06  | 01  | COUVERCLE 1                           | E335                                |             |
|---|-----|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------|
| Rep   | Nbr | Désignation                           | Matière                             | Observation |
| Echelle:<br>1:1   |     | <b>OUTIL DE SOUDAGE FSW</b>           | BOUNDAOUI ZAHIR<br>BENFERHAT NOUARA |             |
|  |     |                                       | projet de fin d'etude<br>2016/2017  |             |
| A4  |     | Université Mouloud Mammeri Tizi ouzou | FMP<br>Master II                    |             |

# Repérage et feuilles d'analyse

## Réperage des surfaces de corps de l'outil

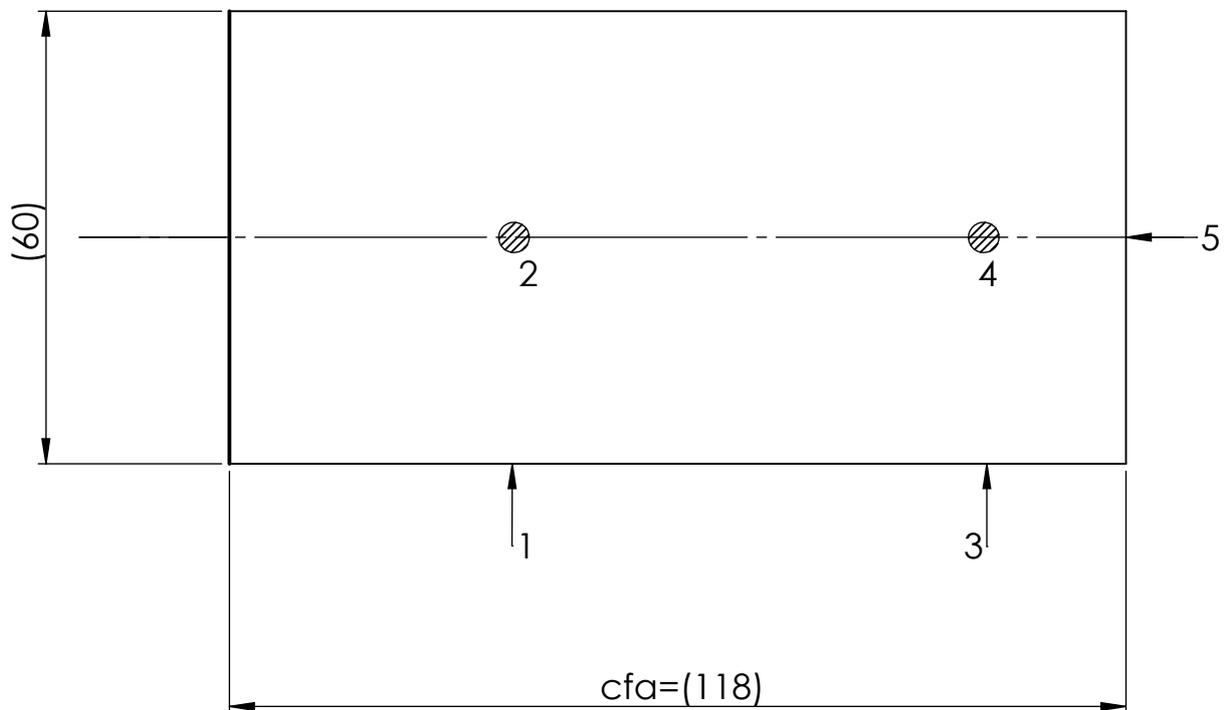


COUPE A-A  
ECHELLE 1 : 1



Les feuilles d'analyse de fabrication:  
1- Feuille d'analyse de Corps de l'outil

| <b>Ensemble:</b> outil de soudage FSW<br><b>Organe:</b> Corps de l'outil |  | <b>Matiere:</b> E335<br><b>cadence:</b> travail unitaire |                     |
|--|--|--|---------------------|
| N° de phase  | Designation de sous phases et opérations | Machine utilisée   | Moyens de contrôles |
| 100  | Tronçonnage du brut                      | scié mécanique   | Règle graduée       |



**Ensemble:** outil de soudage FSW

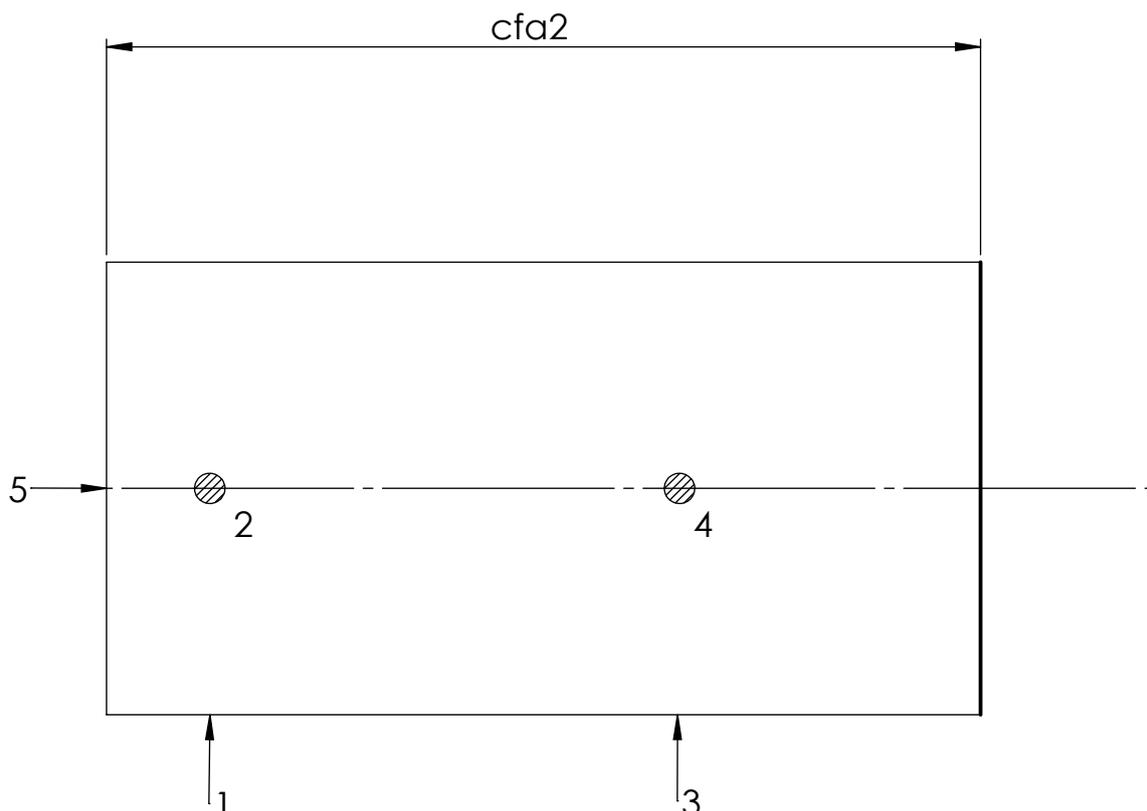
**Matiere:** E335

**organe:** corps d'outil

**cadence:** travail unitaire

| N° de phase | designation de sous phases et opérations   | machine        | Appareillages<br>Outils coupants   | côntrole                            |
|-------------|--|----------------|--|-------------------------------------|
| 200         | <p>Tournage:</p> <p>Sous phase:210</p> <p>Référentiel de départ défini par:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>-Centrage long sur (9), en 04 normales (1,2,3,4).</li><li>- Appui ponctuel (2), en 01 normales(5).</li><li>- Serrage concentrique.</li></ul> <p>Op 211:Dressage de 1E<br/>cfa1 = <math>116 \pm 0.2</math></p> <p>Op 212:Dressage de 1F<br/>cfa2 = <math>115 \pm 0.2</math></p> | tour parallèle | <p>- Moyens de prise:</p> <p>Mandrin à trois mors à serrage concentrique.</p> <p>-Outils coupants:</p> <p>Outil à plaquette amovible en carbure métallique à 45°</p> | comp-arateur<br><br>piéd à coulisse |

Croquis de la pièce



**Ensemble:** outil de soudage FSW

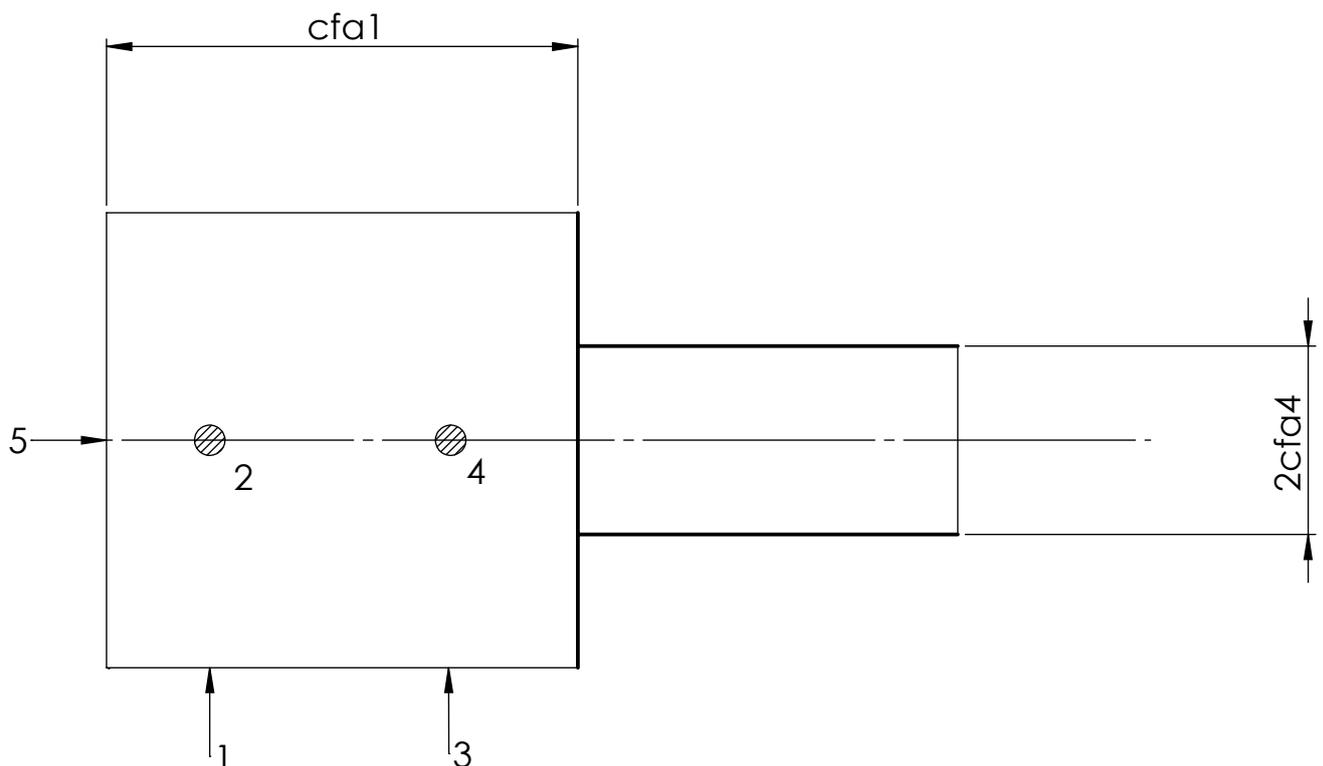
**Matiere:** E335

**organe:** corps d'outil

**cadence:** travail unitaire

| N° de phase | designation de sous phases et opérations   | machine        | Appareillages<br>Outils coupants   | côntrole        |
|-------------|--|----------------|--|-----------------|
| 200         | <p>Tournage:</p> <p>Sous phase:220</p> <p>Référentiel de départ défini par:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>-Centrage long sur (9), en 04 normales (1,2,3,4).</li><li>- Appui ponctuel (2), en 01 normales(5).</li><li>- Serrage concentrique.</li></ul> <p>Op 221: usinage d'épaulement 3E<br/>cfa1 = <math>62 \pm 0.2</math><br/>2cfa2 = <math>26 \pm 0.2</math></p> <p>Op 222: usinage d'épaulement 3F/2<br/>cfa1= <math>62 \pm 0.2</math><br/>2cfa3 = <math>25.5 \pm 0.02</math></p> <p>Op 223: usinage d'épaulement 3F<br/>cfa1= <math>62 \pm 0.2</math><br/>2cfa4 = 25 js6</p> <p style="text-align: right;">1.6/√</p> <div style="border: 1px solid black; display: inline-block; padding: 2px;">◎ 0.02 9</div> | tour parallèle | <p>- Moyens de prise:</p> <p>Mandrin à trois mors à serrage concentrique.</p> <p>-Outils coupants:</p> <p>Outil à charioter à plaquette amovible en carbure métallique 90°</p> | piéd à coulisse |

Croquis de la pièce



**Ensemble:** outil de soudage FSW

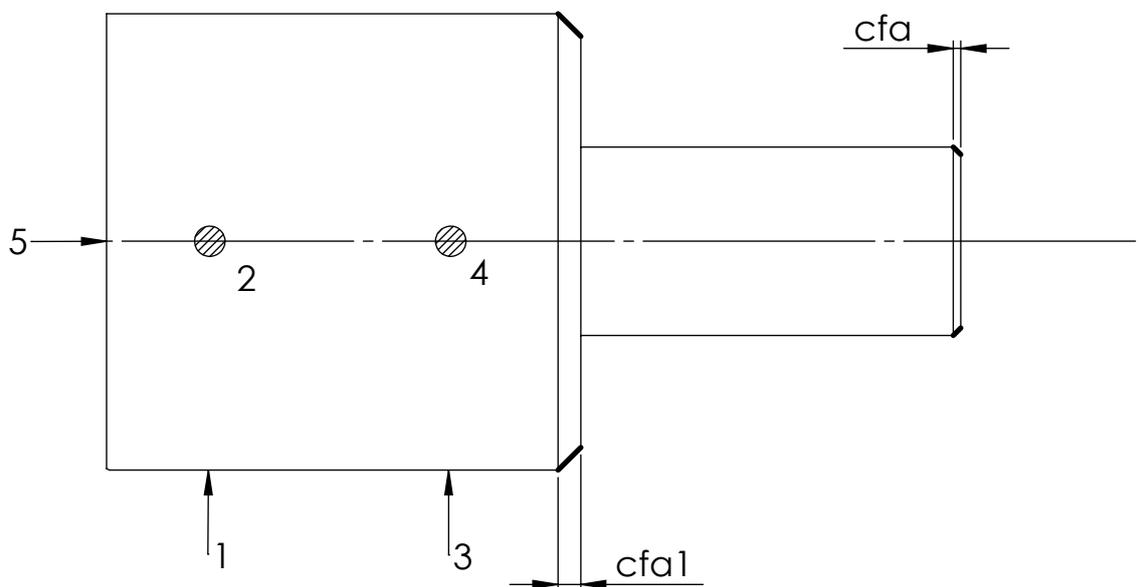
**Matiere:** E335

**organe:** corps d'outil

**cadence:** travail unitaire

| N° de phase | designation de sous phases et opérations  | machine        | Appareillages<br>Outils coupants   | côntrole        |
|-------------|---|----------------|--|-----------------|
| 200         | <p>Tournage:</p> <p>Sous phase:230</p> <p>Référentiel de départ défini par:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>-Centrage long sur (9), en 04 normales (1,2,3,4).</li><li>- Appui ponctuel (2), en 01 normales(5).</li><li>- Serrage concentrique.</li></ul> <p>Op 231: chanfreinage de 4F<br/>cfa = 1X45°</p> <p>Op 232:chanfreinage de 5F<br/>cfa1= 3X45°</p> | tour parallèle | <p>- Moyens de prise:</p> <p>Mandrin à trois mors à serrage concentrique.</p> <p>-Outils coupants:</p> <p>Outil à plaquette amovible en carbure métallique à 45°</p> | piéd à coulisse |

Croquis de la pièce



**Ensemble:** outil de soudage FSW

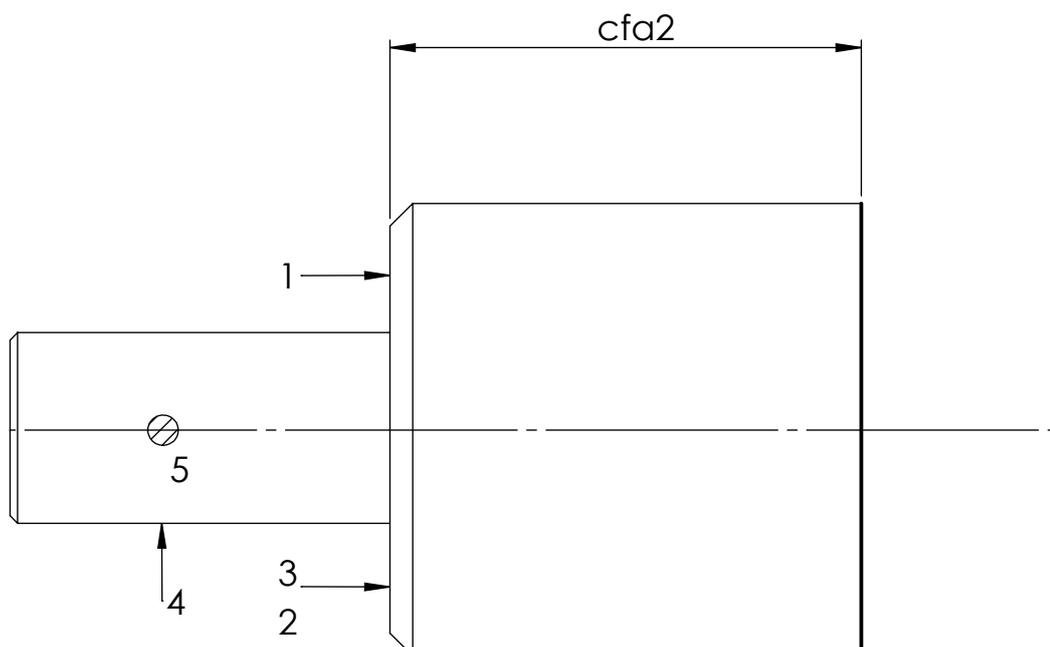
**Matiere:** E335

**organe:** corps d'outil

**cadence:** travail unitaire

| N° de phase | designation de sous phases et opérations  | machine        | Appareillages<br>Outils coupants   | côntrole                            |
|-------------|---|----------------|--|-------------------------------------|
| 200         | <p>Tournage:</p> <p>Sous phase:240</p> <p>Référentiel de départ défini par:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Appui plan sur (3), en 03 normales(1,2,3).</li><li>-Centrage court sur (3), en 02 normales (4,5).</li><li>- Serrage concentrique.</li></ul> <p>Op 241:Dressage de 2E<br/>cfa1 = <math>63 \pm 0.2</math></p> <p>Op 242:Dressage de 2F<br/>cfa2 = <math>62 \pm 0.2</math></p> | tour parallèle | <p>- Moyens de prise:</p> <p>Mandrin à trois mors à serrage concentrique.</p> <p>-Outils coupants:</p> <p>Outil à plaquette amovible en carbure métallique à 45°</p> | comp-arateur<br><br>piéd à coulisse |

Croquis de la pièce



**Ensemble:** outil de soudage FSW

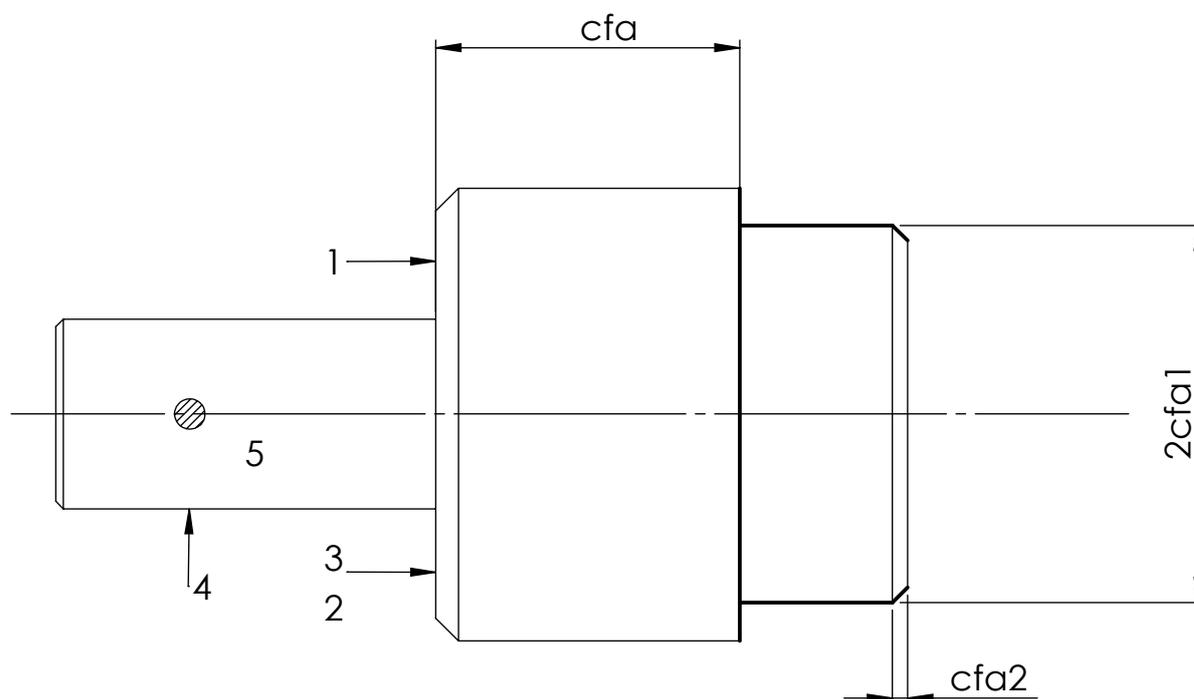
**Matiere:** E335

**organe:** corps d'outil

**cadence:** travail unitaire

| N° de phase | designation de sous phases et opérations  | machine        | Appareillages<br>Outils coupants  | côntrole        |
|-------------|---|----------------|---|-----------------|
| 200         | <p>Tournage:</p> <p>Sous phase:250</p> <p>Référentiel de départ défini par:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Appui plan sur (3), en 03 normales(1,2,3).</li><li>-Centrage court sur (3), en 02 normales (4,5).</li><li>- Serrage concentrique.</li></ul> <p>Op 251: usinage d'épaulement 6E<br/>cfa = <math>40 \pm 0.2</math><br/>2cfa1 = <math>51 \pm 0.2</math></p> <p>Op 252: usinage d'épaulement 6F<br/>cfa= <math>40 \pm 0.2</math><br/>2cfa1 = <math>50 \pm 0.2</math></p> <p>Op 253:chanfreinage de 7F<br/>cfa2 = <math>2 \times 45^\circ</math></p> | tour parallèle | <p>- Moyens de prise:</p> <p>Mandrin à trois mors à serrage concentrique.</p> <p>-Outils coupants:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Outil à chariotier à plaquette amovible en carbure métallique <math>90^\circ</math></li><li>- Outil à plaquette amovible en carbure métallique à <math>45^\circ</math></li></ul> | piéd à coulisse |

Croquis de la pièce



**Ensemble:** outil de soudage FSW

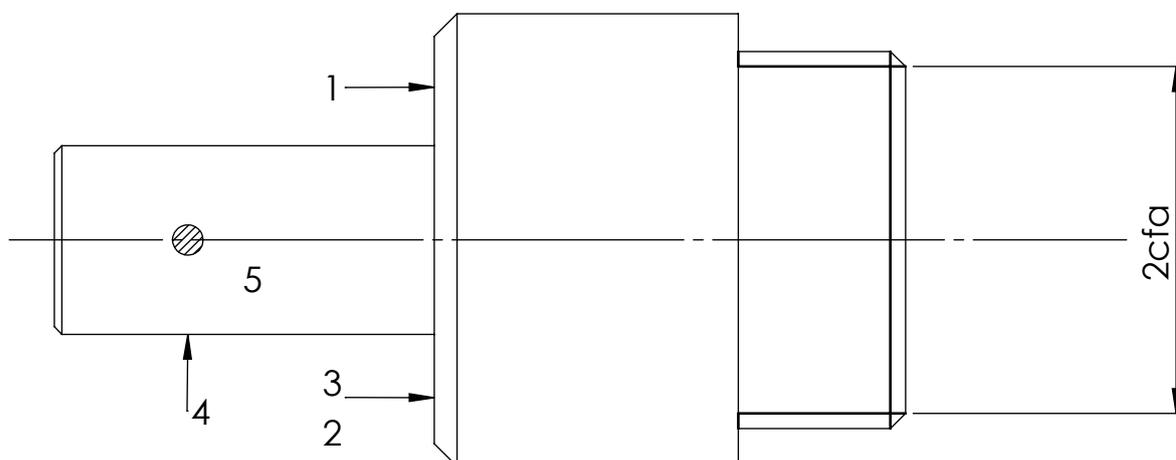
**organe:** corps d'outil

**Matiere:** E335

**cadence:** travail unitaire

| N° de phase | designation de sous phases et opérations  | machine        | Appareillages<br>Outils coupants   | côntrole        |
|-------------|---|----------------|--|-----------------|
| 200         | <p>Tournage:</p> <p>Sous phase:260</p> <p>Référentiel de départ défini par:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Appui plan sur ③ ,en 03 normales(1,2,3).</li><li>-Centrage court sur ③ ,en 02 normales (4,5).</li><li>- Serrage concentrique.</li></ul> <p>Op 261: filetage de la surface 6<br/>2cfa = <math>\varnothing</math> M46X1.5</p> | tour parallèle | <p>- Moyens de prise:</p> <p>Mandrin à trois mors à serrage concentrique.</p> <p>-Outils coupants:</p> <p>outil a fileter a plaquette brasée</p> | piéd à coulisse |

Croquis de la pièce



**Ensemble:** outil de soudage  
FSW

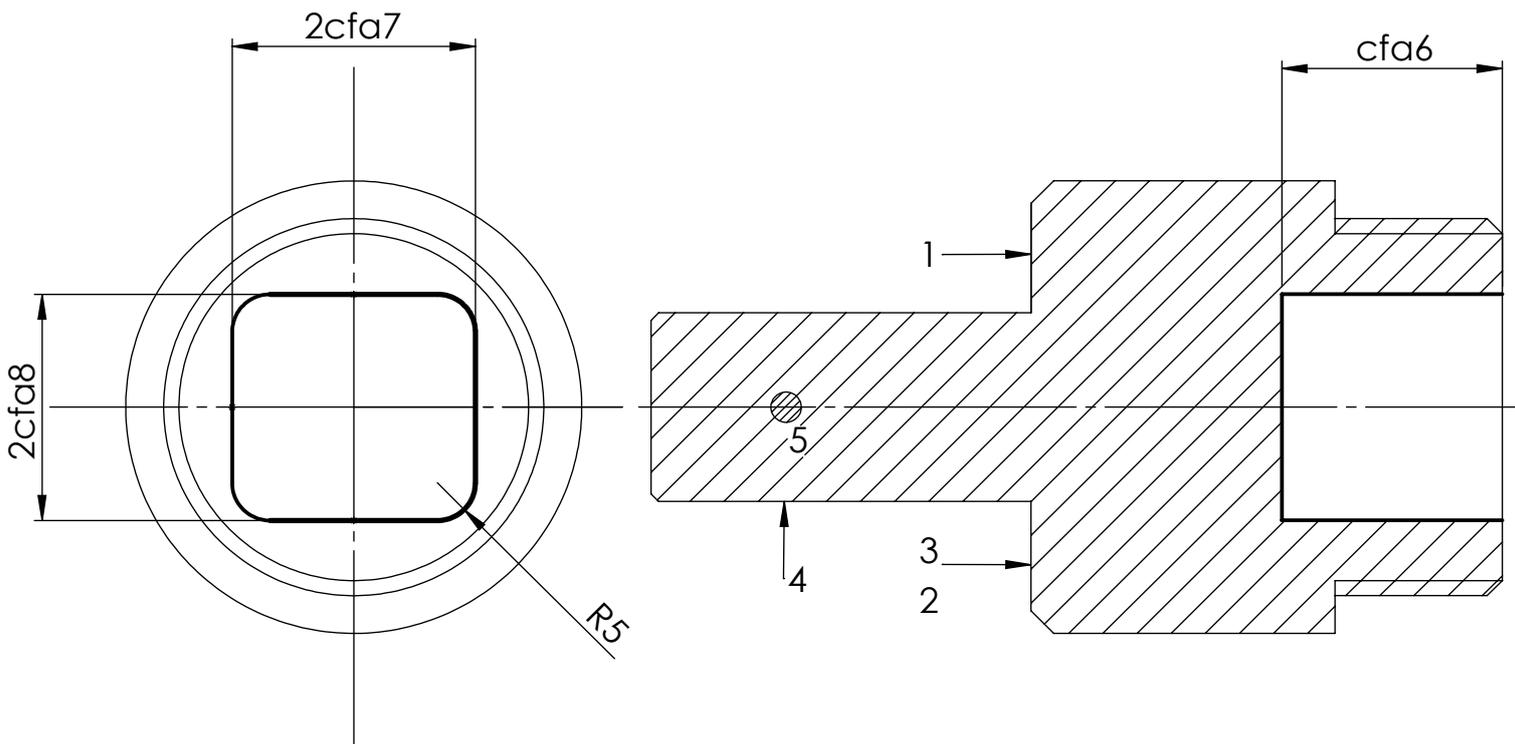
**Matiere:** E335

**organe:** corps d'outil

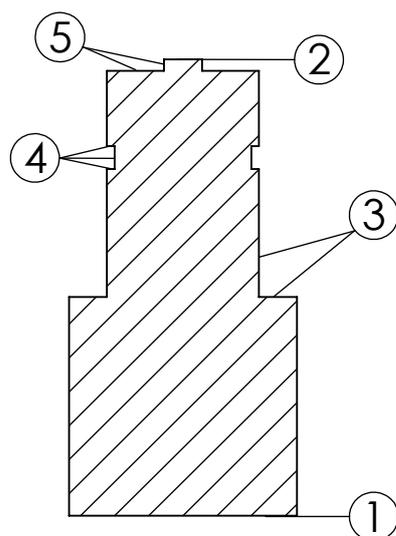
**cadence:** travail unitaire

| N° de phase | designation de sous phases et opérations   | machine             | Appareillages<br>Outils coupants  | côntrole        |
|-------------|--|---------------------|---|-----------------|
| 300         | <p>Fraisage:<br/>Sous phase 310:<br/>Référentiel de mise en position défini par:<br/>appui plan sur ③ en 03 normales<br/>(1,2,3)<br/>centrage court sur ③ à l'aide d'un Vé par 02<br/>Normale (4,5)<br/>- Serrage oposé aux appuis.</p> <p>Op 311:usinage de trou rectangulaire 10E<br/>cfa =<math>25 \pm 0.2</math>      2cfa2= <math>29 \pm 0.2</math><br/>2cfa1=<math>30 \pm 0.2</math></p> <p>Op 312:usinage de deux méplats 10 F/2<br/>cfa3 =<math>28 \pm 0.2</math>      2cfa5=<math>29.5 \pm 0.02</math><br/>2cfa4=<math>31.5 \pm 0.02</math></p> <p>Op 313:usinage de deux méplats 10 F<br/>cfa6 =<math>29 \pm 0.2</math><br/>2cfa7=<math>32H7</math><br/>2cfa8=<math>30H7</math></p> <p>R=5      <math>\perp</math> 0.02   2      <math>\sqrt{1.6}</math></p> | Fraiseuse verticale | <p>- Moyens de prise:<br/><br/>-un vé<br/>-étau</p> <p>-Outils coupants:<br/><br/>Fraise à deux taille<br/><math>\phi 10</math></p> | piéd à coulisse |

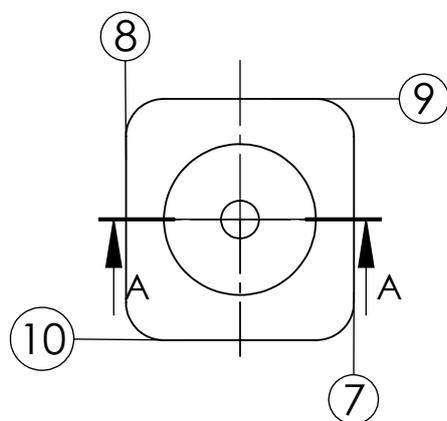
Croquis de la pièce



## Réperage des surfaces de l'outil

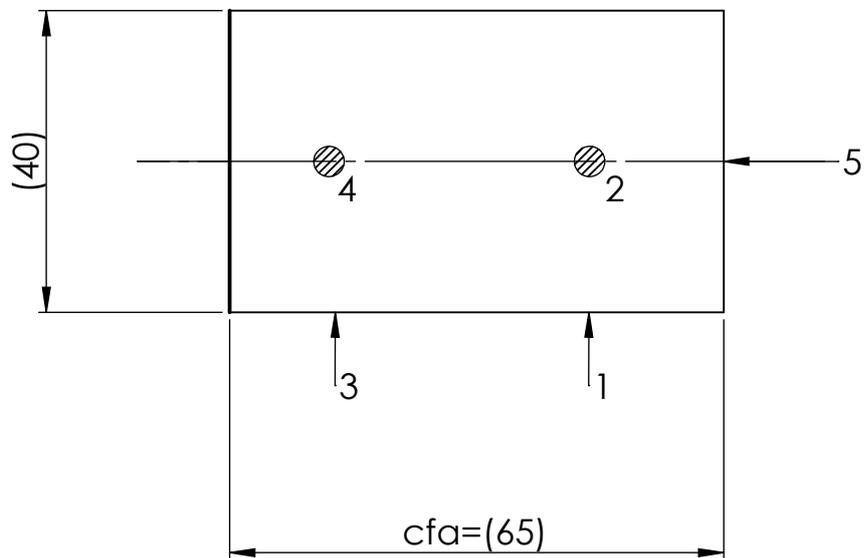


COUPE A-A



Les feuilles d'analyse de fabrication:  
1- Feuille d'analyse de l'outil

| <b>Ensemble:</b> outil de soudage FSW<br><b>Organe:</b> Outil |  | <b>Matiere:</b> X210Cr12<br><b>cadence:</b> travail unitaire |                     |
|---|--|--|---------------------|
| N° de phase   | Designation de sous phases et opérations | Machine utilisée   | Moyens de contrôles |
| 100   | Tronçonnage du brut                      | scié mécanique   | Règle graduée       |



**Ensemble:** outil de soudage FSW

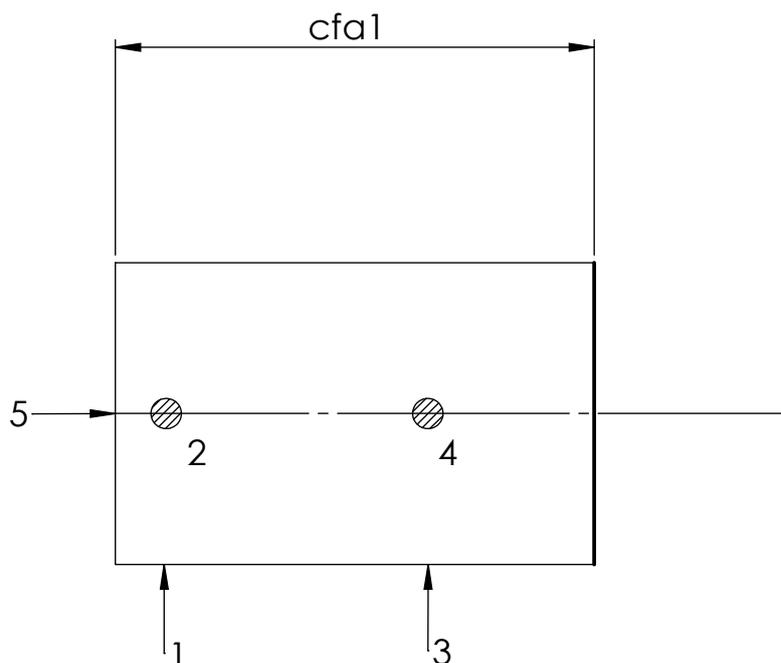
**Matiere:** X210Cr12

**organe:** Outil

**cadence:** travail unitaire

| N° de phase | designation de sous phases et opérations  | machine        | Appareillages<br>Outils coupants   | côntrole                            |
|-------------|---|----------------|--|-------------------------------------|
| 200         | <p>Tournage:</p> <p>Sous phase:210</p> <p>Référentiel de départ défini par:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>-Centrage long sur (6), en 04 normales (1,2,3,4).</li><li>- Appui ponctuel (2), en 01 normales(5).</li><li>- Serrage concentrique.</li></ul> <p>Op 211:Dressage de 1E<br/>cfa = <math>64 \pm 0.2</math></p> <p>Op 212:Dressage de 1F<br/>cfa1 = <math>63 \pm 0.2</math></p> | tour parallèle | <p>- Moyens de prise:</p> <p>Mandrin à trois mors à serrage concentrique.</p> <p>-Outils coupants:</p> <p>Outil à plaquette amovible en carbure métallique à 45°</p> | comp-arateur<br><br>piéd à coulisse |

Croquis de la pièce



**Ensemble:** outil de soudage FSW

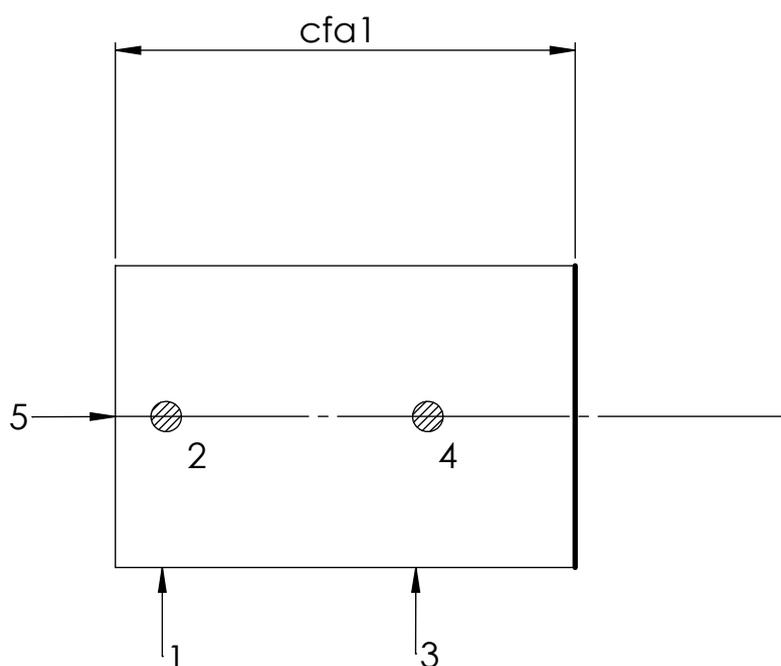
**Matiere:** X210Cr12

**organe:** Outil

**cadence:** travail unitaire

| N° de phase | designation de sous phases et opérations   | machine        | Appareillages<br>Outils coupants   | côntrole                            |
|-------------|--|----------------|--|-------------------------------------|
| 200         | <p>Tournage:</p> <p>Sous phase:220</p> <p>Référentiel de départ défini par:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>-Centrage long sur (6), en 04 normales (1,2,3,4).</li><li>- Appui ponctuel (1), en 01 normales(5).</li><li>- Serrage concentrique.</li></ul> <p>Op 221:Dressage de 2E<br/>cfa = <math>61 \pm 0.2</math></p> <p>Op 222:Dressage de 2F<br/>cfa1 = <math>60.50 \pm 0.2</math></p> | tour parallèle | <p>- Moyens de prise:</p> <p>Mandrin à trois mors à serrage concentrique.</p> <p>-Outils coupants:</p> <p>Outil à plaquette amovible en carbure métallique à 45°</p> | comp-arateur<br><br>piéd à coulisse |

Croquis de la pièce



**Ensemble:** outil de soudage  
FSW

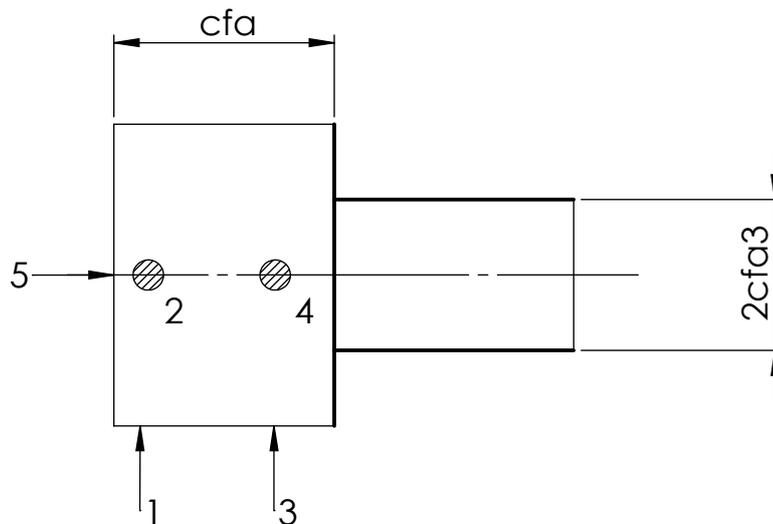
**Matiere:** X210Cr12

**organe:** Outil

**cadence:** travail unitaire

| N° de phase | designation de sous phases et opérations   | machine        | Appareillages<br>Outils coupants   | côntrole        |
|-------------|--|----------------|--|-----------------|
| 200         | <p>Tournage:<br/>Sous phase:230</p> <p>Référentiel de départ défini par:<br/>-Centrage long sur (6), en 04 normales (1,2,3,4).<br/>- Appui ponctuel (1), en 01 normales(5).<br/>- Serrage concentrique.</p> <p>Op 231: usinage d'épaulement 3E<br/>cfa = <math>29 \pm 0.2</math><br/>2cfa1= <math>21 \pm 0.2</math></p> <p>Op 232: usinage d'épaulement 3F/2<br/>cfa = <math>29 \pm 0.2</math><br/>2cfa2 = <math>20.5 \pm 0.02</math></p> <p>Op 233: usinage d'épaulement 3F<br/>cfa = <math>29 \pm 0.2</math><br/>2cfa3 = 20 js6</p> <div style="border: 1px solid black; display: inline-block; padding: 2px;"><span style="font-size: 1.2em;">⊙</span> 0.02   6</div> <div style="text-align: center; margin-top: 10px;">1.6/<br/>√</div> | tour parallèle | <p>- Moyens de prise:<br/>Mandrin à trois mors à serrage concentrique.</p> <p>-Outils coupants:<br/>Outil à charioter à plaquette amovible en carbure métallique 90°</p> | piéd à coulisse |

Croquis de la pièce



**Ensemble:** outil de soudage FSW

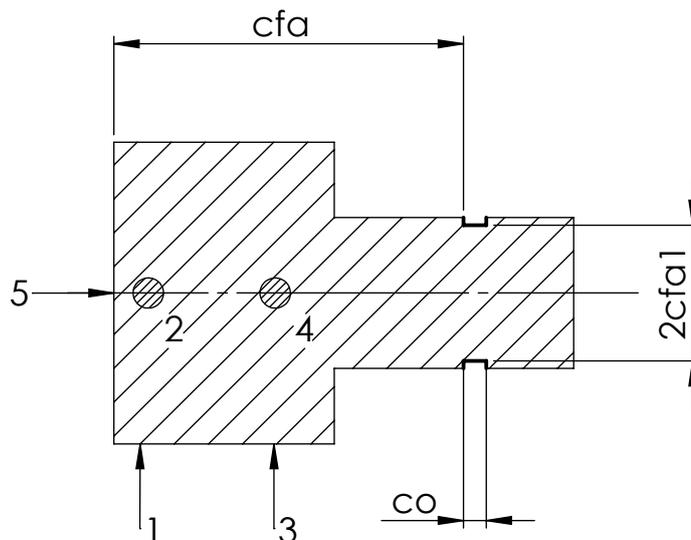
**Matiere:** X210Cr12

**organe:** Outil

**cadence:** travail unitaire

| N° de phase | designation de sous phases et opérations   | machine        | Appareillages<br>Outils coupants   | côntrole        |
|-------------|--|----------------|--|-----------------|
| 200         | <p>Tournage:</p> <p>Sous phase:240</p> <p>Référentiel de départ défini par:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>-Centrage long sur ⑥ ,en 04 normales (1,2,3,4).</li><li>- Appui ponctuel ① ,en 01 normales(5).</li><li>- Serrage concentrique.</li></ul> <p>Op 241:usinage de gorge 4F</p> <p>Cfa = <math>46 \pm 0.2</math></p> <p>2Cfa1 = <math>18 \pm 0.2</math></p> <p>Co = 3</p> | tour parallèle | <p>- Moyens de prise:</p> <p>Mandrin à trois mors à serrage concentrique.</p> <p>-Outils coupants:</p> <p>- outil de gorge (forme)</p> | piéd à coulisse |

Croquis de la pièce



**Ensemble:** outil de soudage FSW

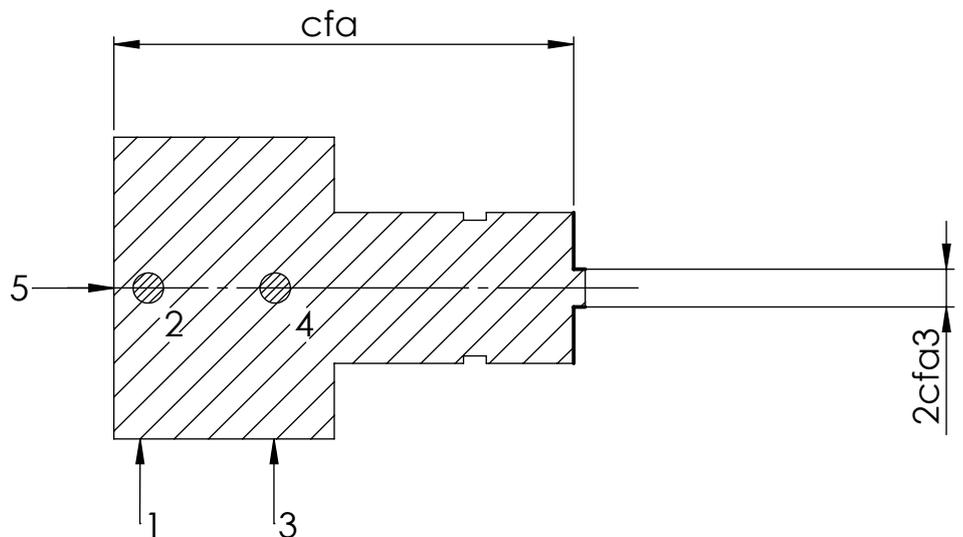
**Matiere:** X210Cr12

**organe:** Outil

**cadence:** travail unitaire

| N° de phase | designation de sous phases et opérations   | machine        | Appareillages<br>Outils coupants  | côntrole        |
|-------------|--|----------------|---|-----------------|
| 200         | <p>Tournage:</p> <p>Sous phase:250</p> <p>Référentiel de départ défini par:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>-Centrage long sur (6), en 04 normales (1,2,3,4).</li><li>- Appui ponctuel (1), en 01 normales(5).</li><li>- Serrage concentrique.</li></ul> <p>Op 251: usinage d'épaulement 5E<br/>cfa = <math>59 \pm 0.2</math><br/>2cfa1 = <math>12 \pm 0.2</math></p> <p>Op 252: usinage d'épaulement 5 F/2<br/>cfa = <math>59 \pm 0.2</math><br/>2cfa2 = <math>7 \pm 0.2</math></p> <p>Op 253: usinage d'épaulement 5F<br/>cfa = <math>59 \pm 0.2</math><br/>2cfa3 = <math>5 \pm 0.2</math></p> | tour parallèle | <p>- Moyens de prise:</p> <p>Mandrin à trois mors à serrage concentrique.</p> <p>-Outils coupants:</p> <p>-Outil à charioter à plaquette amovible en carbure métallique 90°</p> | piéd à coulisse |

Croquis de la pièce



**Ensemble:** outil de soudage FSW

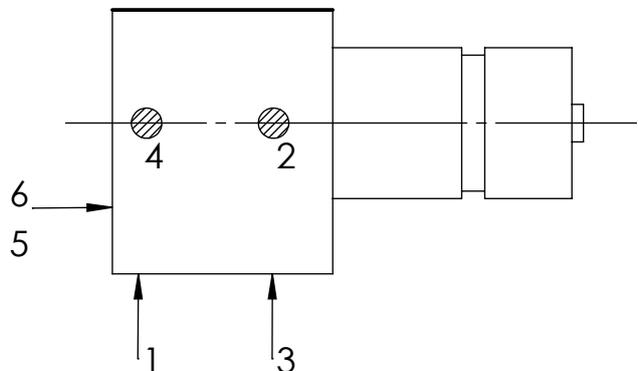
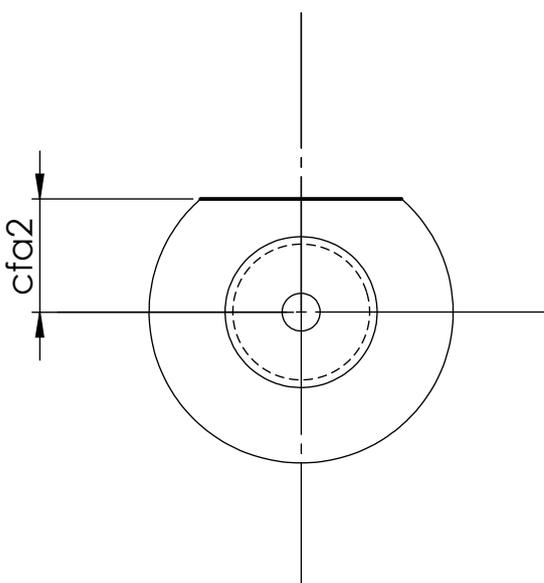
**Matiere:** X210Cr12

**organe:** Outil

**cadence:** travail unitaire

| N° de phase | designation de sous phases et opérations   | machine             | Appareillages<br>Outils coupants  | côntrole        |
|-------------|--|---------------------|---|-----------------|
| 300         | <p>Fraisage:<br/>Sous phase 310:</p> <p>référentiel de départ definir par<br/>-liaison pivot glissant (centrage long) sur ⑥ a l'aide de deux(02) Vé par 4 Normale (1,2,3,4)<br/>-appui (plan linéire) sur ① en 02 normales (5,6) et un serrage</p> <p>Op 311:usinage de 7E<br/>cfa=17±0.2</p> <p>Op 312:usinage de 7F/2<br/>cfa1=16±0.2</p> <p>Op 312:usinage de 7F<br/>cfa2 =15±0.02</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"><div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"><math>\perp</math> 0.02 1</div><div style="text-align: center;">1.6/<br/>√</div></div> | Fraiseuse verticale | <p>- Moyens de prise:<br/>-deux vé<br/>-étau</p> <p>-Outils coupants:<br/>Fraise à deux taille a plaquette amovible</p> | piéd à coulisse |

Croquis de la pièce



**Ensemble:** outil de soudage FSW

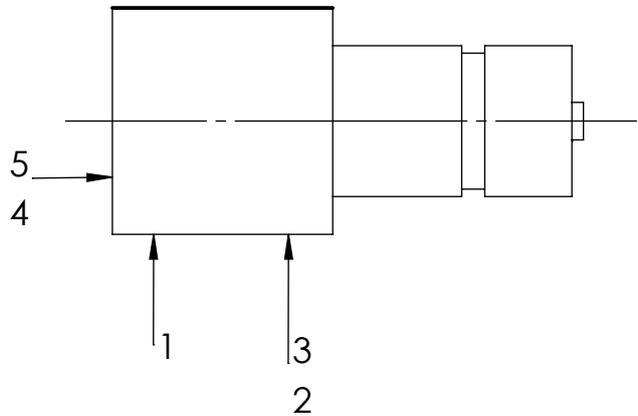
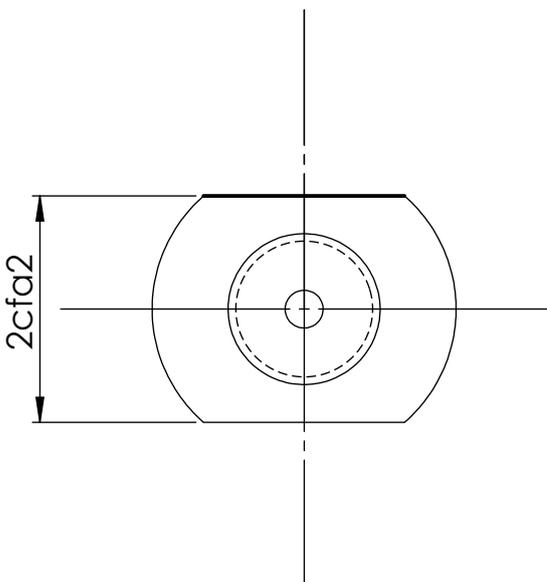
**Matiere:** X210Cr12

**organe:** Outil

**cadence:** travail unitaire

| N° de phase | designation de sous phases et opérations  | machine             | Appareillages<br>Outils coupants  | côntrole        |
|-------------|---|---------------------|---|-----------------|
| 300         | <p>Fraisage:<br/>Sous phase 320:</p> <p>référentiel de départ définir par<br/>-appui plan sur (7) en 03 Normale (1,2,3)<br/>-appui (plan linéire) sur (1) en 02 normales (4,5) et un serrage</p> <p>Op 321:usinage de 8E<br/>2cfa =31±0.2</p> <p>Op 322:usinage de 8F/2<br/>2cfa1=31.5±0.02</p> <p>Op 323:usinage de 8F<br/>2cfa2 =30 js6</p> <p></p> <p></p> | Fraiseuse verticale | <p>- Moyens de prise:<br/>-des cales<br/>-étau</p> <p>-Outils coupants:<br/>Fraise à deux taille a plaquette amovible</p> | piéd à coulisse |

Croquis de la pièce

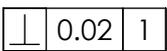


**Ensemble:** outil de soudage FSW

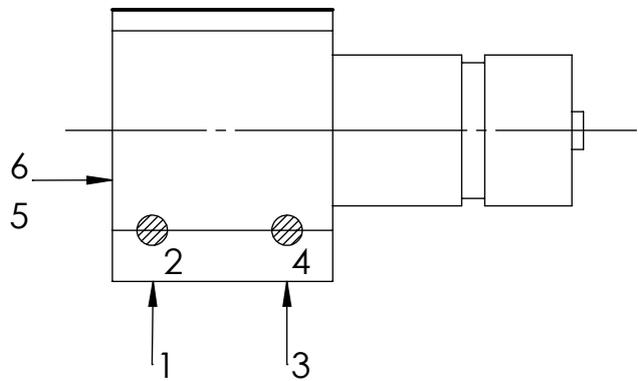
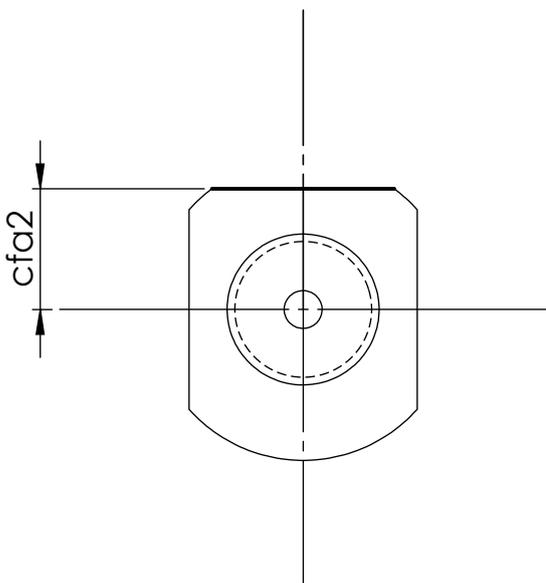
**Matiere:** X210Cr12

**organe:** Outil

**cadence:** travail unitaire

| N° de phase | designation de sous phases et opérations   | machine             | Appareillages<br>Outils coupants  | côntrole        |
|-------------|--|---------------------|---|-----------------|
| 300         | <p>Fraisage:<br/>Sous phase 330:</p> <p>référentiel de départ definir par<br/>-liaison pivot glissant (centrage long) sur 6 a l'aide de deux(02) Vé par 4 Normale (1,2,3,4)<br/>-appui (plan linéire) sur ① en 02 normales (5,6) et un serrage</p> <p>Op 331:usinage de 9E<br/>cfa = <math>18 \pm 0.2</math></p> <p>Op 332:usinage de 9F/2<br/>cfa1 = <math>17 \pm 0.02</math></p> <p>Op 333:usinage de 9F<br/>cfa2 = <math>16 \pm 0.02</math></p> <p></p> <p></p> | Fraiseuse verticale | <p>- Moyens de prise:<br/>-deux vé<br/>-étau</p> <p>-Outils coupants:<br/>Fraise à deux taille a plaquette amovible</p> | piéd à coulisse |

Croquis de la pièce



**Ensemble:** outil de soudage FSW

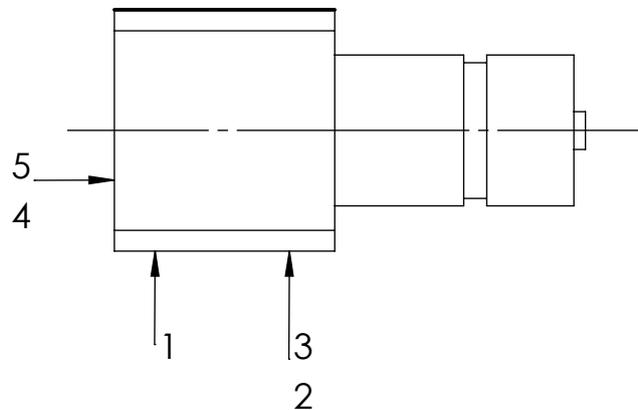
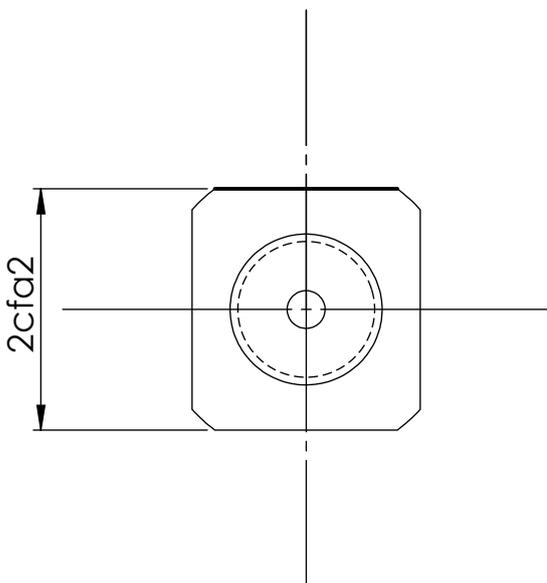
**Matiere:** X210Cr12

**organe:** Outil

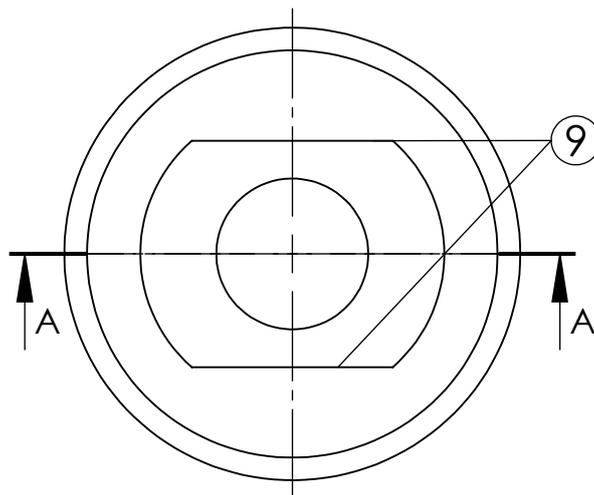
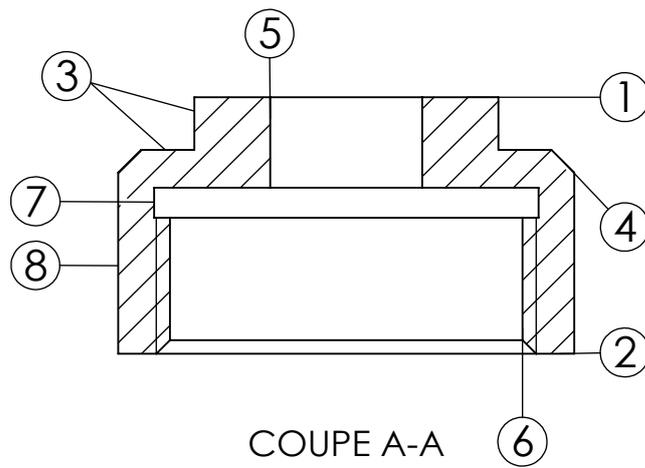
**cadence:** travail unitaire

| N° de phase | designation de sous phases et opérations  | machine             | Appareillages<br>Outils coupants  | côntrole        |
|-------------|---|---------------------|---|-----------------|
| 300         | <p>Fraisage:<br/>Sous phase 340:</p> <p>référentiel de départ definir par<br/>-appui plan sur (9) en 03 Normale (1,2,3)<br/>-appui (plan linéire) sur (1) en 02 normales (4,5) et un serrage</p> <p>Op 341:usinage de 10E<br/>2cfa =33±0.2</p> <p>Op 342:usinage de 10F/2<br/>2cfa1 =32.5±0.02</p> <p>Op 343:usinage de 10F<br/>2cfa2 =32 js6</p> <p></p> <p></p> | Fraiseuse verticale | <p>- Moyens de prise:<br/>-des cales<br/>-étau</p> <p>-Outils coupants:<br/>Fraise à deux taille a<br/>plaquette amovible</p> | piéd à coulisse |

Croquis de la pièce

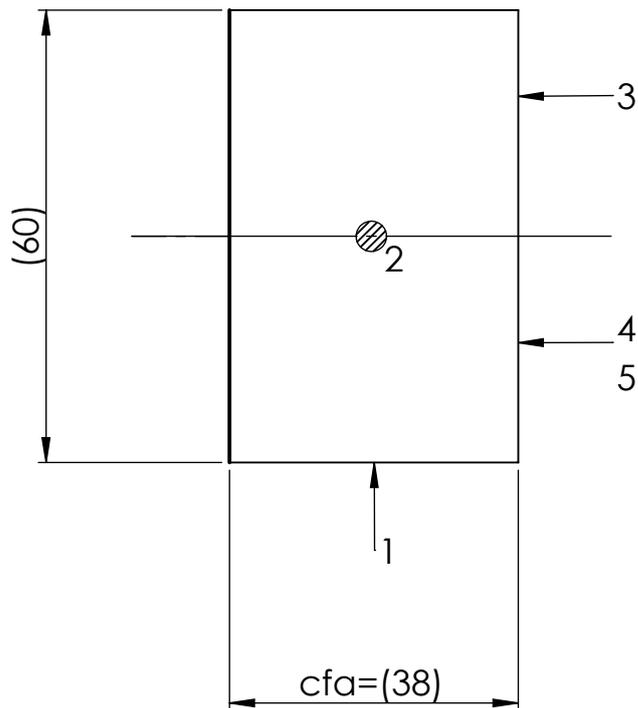


## Réperage des surfaces de couvercle



Les feuilles d'analyse de fabrication:  
1- Feuille d'analyse de Couvercle

| <b>Ensemble:</b> outil de soudage FSW<br><b>Organe:</b> Couvercle |  | <b>Matiere:</b> E335<br><b>cadence:</b> travail unitaire |                     |
|---|--|--|---------------------|
| N° de phase   | Designation de sous phases et opérations | Machine utilisée   | Moyens de contrôles |
| 100   | Tronçonnage du brut                      | scié mécanique   | Règle graduée       |



**Ensemble:** outil de soudage FSW

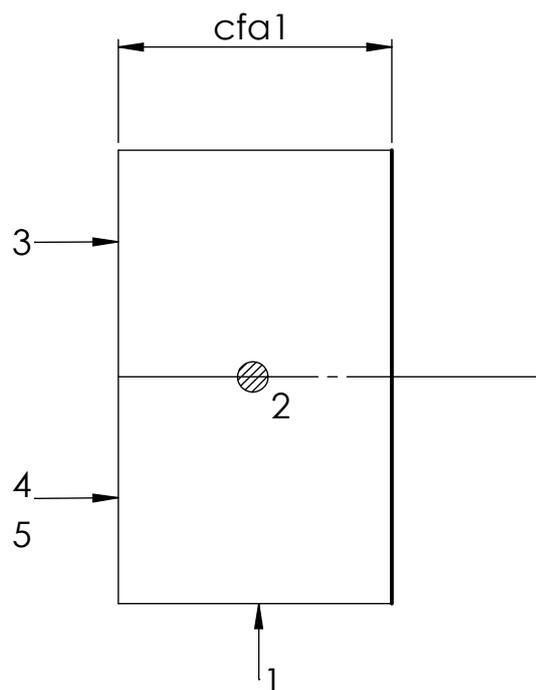
**Matiere:** E335

**organe:** Couvercle

**cadence:** travail unitaire

| N° de phase | designation de sous phases et opérations   | machine        | Appareillages<br>Outils coupants   | côntrole                            |
|-------------|--|----------------|--|-------------------------------------|
| 200         | <p>Tournage:</p> <p>Sous phase:210</p> <p>Référentiel de départ défini par:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>-Centrage court sur (8) ,en 02 normales (1,2).</li><li>- Appui plan sur (2) ,en 03 normales(3,4,5).</li><li>- Serrage concentrique.</li></ul> <p>Op 211:Dressage de 1E<br/>cfa = <math>37 \pm 0.2</math></p> <p>Op 212:Dressage de 1F<br/>cfa1 = <math>36 \pm 0.2</math></p> | tour parallèle | <p>- Moyens de prise:</p> <p>Mandrin à trois mors à serrage concentrique.</p> <p>-Outils coupants:</p> <p>Outil à plaquette amovible en carbure métallique à 45°</p> | comp-arateur<br><br>piéd à coulisse |

Croquis de la pièce



**Ensemble:** outil de soudage FSW

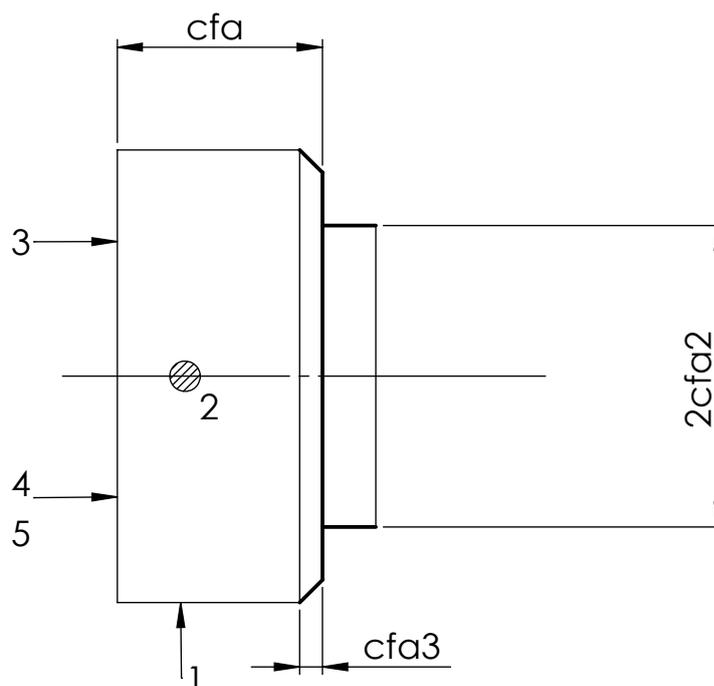
**Matiere:** E335

**organe:** Couvercle

**cadence:** travail unitaire

| N° de phase | designation de sous phases et opérations   | machine        | Appareillages<br>Outils coupants   | côntrole        |
|-------------|--|----------------|--|-----------------|
| 200         | <p>Tournage:</p> <p>Sous phase:220</p> <p>Référentiel de départ défini par:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>-Centrage court sur (8), en 02 normales (1,2).</li><li>- Appui plan sur (2), en 03 normales(3,4,5).</li><li>- Serrage concentrique.</li></ul> <p>Op 221: usinage d'épaulement 3E<br/>cfa = <math>27 \pm 0.2</math><br/>2cfa1 = <math>41 \pm 0.2</math></p> <p>Op 222: usinage d'épaulement 3F<br/>cfa = <math>27 \pm 0.2</math><br/>2cfa2 = <math>40 \pm 0.2</math></p> <p>Op 223:chanfreinage de 4F<br/>cfa3 = 3X45</p> | tour parallèle | <p>- Moyens de prise:</p> <p>Mandrin à trois mors à serrage concentrique.</p> <p>-Outils coupants:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>-Outil à charioter à plaquette amovible en carbure métallique 90°</li><li>-Outil à plaquette amovible en carbure métallique à 45°</li></ul> | piéd à coulisse |

Croquis de la pièce



**Ensemble:** outil de soudage FSW

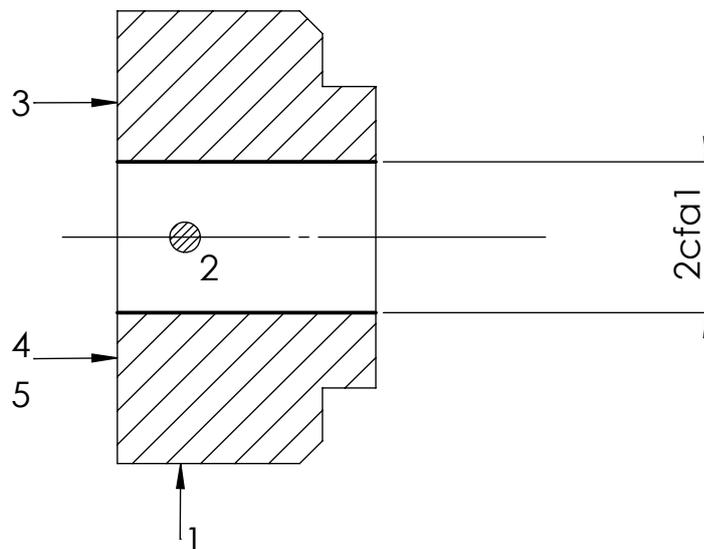
**Matiere:** E335

**organe:** Couvercle

**cadence:** travail unitaire

| N° de phase | designation de sous phases et opérations  | machine        | Appareillages<br>Outils coupants   | côntrole        |
|-------------|---|----------------|--|-----------------|
| 200         | <p>Tournage:</p> <p>Sous phase:230</p> <p>Référentiel de départ défini par:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>-Centrage court sur (8) ,en 02 normales (1,2).</li><li>- Appui plan sur (2) ,en 03 normales(3,4,5).</li><li>- Serrage concentrique.</li></ul> <p>Op 231: Réalisation de trou de centrage</p> <p>Op 232:Perçage 5E<br/>2cfa = <math>\phi 18</math></p> <p>Op 233:Perçage 5F<br/>2cfa1 = <math>\phi 20H7</math></p> <div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"><div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-right: 10px;"><math>\text{Ⓢ}</math> 0.02 8</div><div style="text-align: center;">1.6/<br/>✓</div></div> | tour parallèle | <p>- Moyens de prise:</p> <p>Mandrin à trois mors à serrage concentrique.</p> <p>-Outils coupants:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>-Outil à centré</li><li>-serie de foret jusqu'au <math>\phi 18</math></li><li>-Foret <math>\phi 20</math></li></ul> | piéd à coulisse |

Croquis de la pièce



**Ensemble:** outil de soudage  
FSW

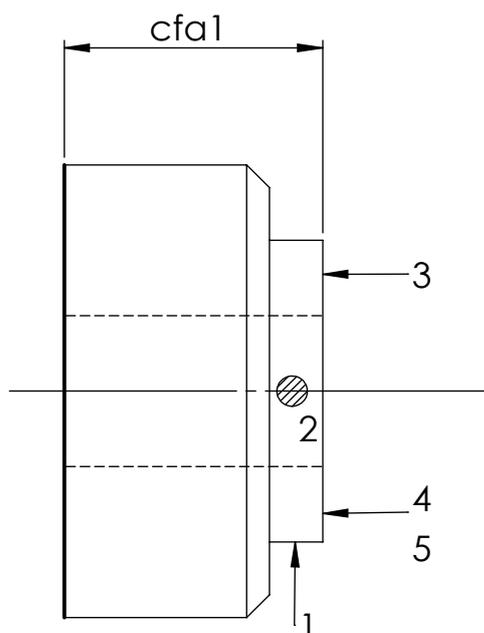
**Matiere:** E335

**organe:** Couvercle

**cadence:** travail unitaire

| N° de phase | designation de sous phases et opérations   | machine        | Appareillages<br>Outils coupants  | côntrole        |
|-------------|--|----------------|---|-----------------|
| 200         | <p>Tournage:</p> <p>Sous phase:240</p> <p>Référentiel de départ défini par:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>-Centrage court sur (3), en 02 normales (1,2).</li><li>- Appui plan sur (1), en 03 normales(3,4,5).</li><li>- Serrage concentrique.</li></ul> <p>Op 241:Dressage de 2E<br/>cfa = <math>35 \pm 0.2</math></p> <p>Op 242:Dressage de 2F<br/>cfa1 = <math>34 \pm 0.2</math></p> | tour parallèle | <p>- Moyens de prise:</p> <p>Mandrin à trois mors à serrage concentrique.</p> <p>-Outils coupants:</p> <p>-Outil à plaquette amovible en carbure métallique à 45°</p> | piéd à coulisse |

Croquis de la pièce



**Ensemble:** outil de soudage  
FSW

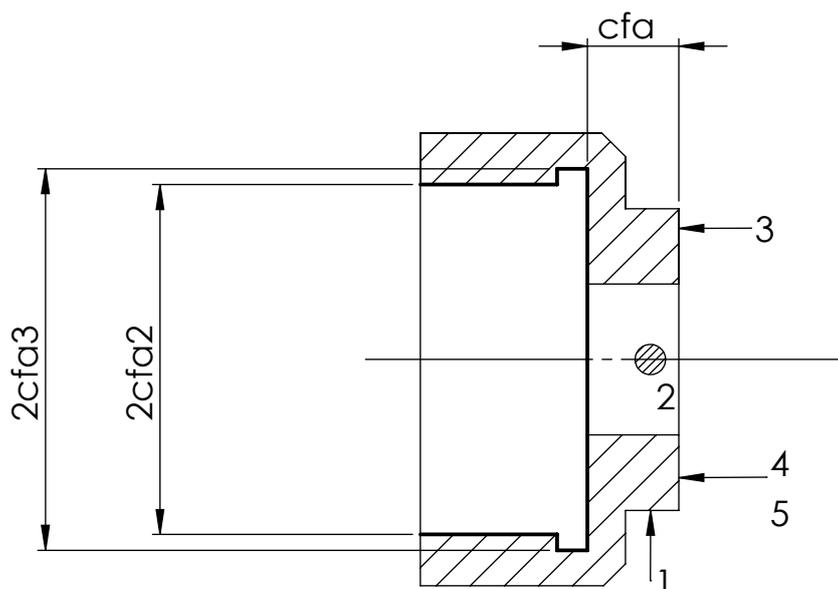
**Matiere:** E335

**organe:** Couvercle

**cadence:** travail unitaire

| N° de phase | designation de sous phases et opérations  | machine        | Appareillages<br>Outils coupants  | côntrole        |
|-------------|---|----------------|---|-----------------|
| 200         | <p>Tournage:</p> <p>Sous phase:250</p> <p>Référentiel de départ défini par:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>-Centrage court sur (3), en 02 normales (1,2).</li><li>- Appui plan sur (1), en 03 normales(3,4,5).</li><li>- Serrage concentrique.</li></ul> <p>Op 251:Alésage de 6E<br/>cfa = <math>12 \pm 0.2</math><br/>2cfa1 = <math>\varnothing 46 \pm 0.2</math></p> <p>Op 252:Alésage de 6F<br/>cfa=<math>12 \pm 0.2</math><br/>2cfa2 = <math>\varnothing 46.40 \pm 0.2</math></p> <p>Op 253:Alésage de 7F<br/>cfa=<math>12 \pm 0.2</math><br/>2cfa3 = <math>50.60 \pm 0.2</math></p> | tour parallèle | <ul style="list-style-type: none"><li>- Moyens de prise:<br/>Mandrin à trois mors à serrage concentrique.</li><li>-Outils coupants:</li><li>- Outil à alser</li></ul> | piéd à coulisse |

Croquis de la pièce



**Ensemble:** outil de soudage FSW

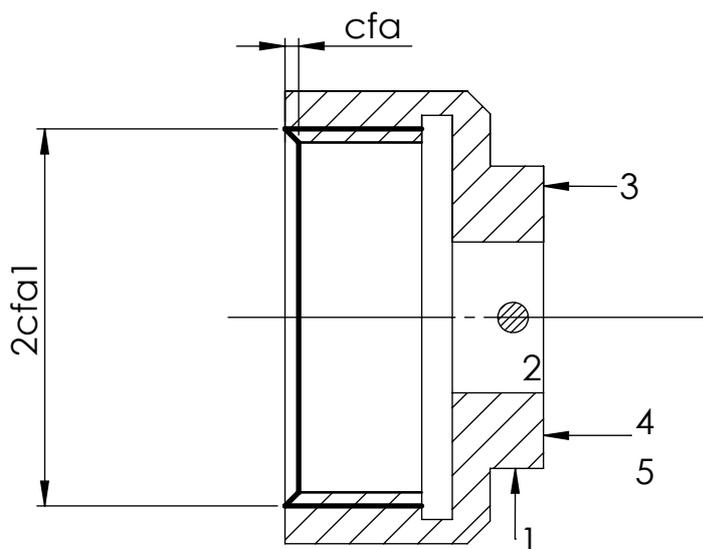
**Matiere:** E335

**organe:** Couvercle

**cadence:** travail unitaire

| N° de phase | designation de sous phases et opérations  | machine        | Appareillages<br>Outils coupants   | côntrole        |
|-------------|---|----------------|--|-----------------|
| 200         | <p>Tournage:</p> <p>Sous phase:260</p> <p>Référentiel de départ défini par:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>-Centrage court sur ③ ,en 02 normales (1,2).</li><li>- Appui plan sur ① ,en 03 normales(3,4,5).</li><li>- Serrage concentrique.</li></ul> <p>Op 261: chanfreinage de 6F<br/>cfa = 1.80X45°</p> <p>Op 262: filetage de la surface 6<br/>2cfa1 = <math>\varnothing</math> M46X1.5</p> | tour parallèle | <p>- Moyens de prise:</p> <p>Mandrin à trois mors à serrage concentrique.</p> <p>-Outils coupants:</p> <p>outil a fileter a plaquette brasée</p> | piéd à coulisse |

Croquis de la pièce



**Ensemble:** outil de soudage  
FSW

**organe:** Couvercle

**Matiere:** E335

**cadence:** travail unitaire

| N° de phase | designation de sous phases et opérations  | machine             | Appareillages<br>Outils coupants  | côntrole        |
|-------------|---|---------------------|---|-----------------|
| 300         | <p>Fraisage:<br/>Sous phase 310:</p> <p>Référentiel de mise en position défini par:<br/>appui plan sur (2) en 03 normales (1,2,3)<br/>centrage court a l'aide d'un Vé par 02 Normale (4,5)<br/>- Serrage opéré aux appuis.</p> <p>Op 311:usinage de deux méplats 9E<br/>2cfa =31<br/>cfa1=28 ±0.2</p> <p>Op 312:usinage de deux méplats 9F<br/>2cfa2 =30<br/>cfa3=27 ±0.2</p> | Fraiseuse verticale | <p>- Moyens de prise:<br/>-etau<br/>-un vé</p> <p>-Outils coupants:<br/>Fraise à deux taille <math>\phi</math> 30</p> | piéd à coulisse |

Croquis de la pièce

