

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

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : Science & Technologie
DEPARTEMENT : Génie Mécanique
N° :



DOMAINE : De Technologie
FILIERE : Génie Mécanique
OPTION : PRODUCTIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par : SILEM Mourad et SAIDANI Hassen

Intitulé :

ETUDE DU SOUDAGE PAR FRICTION

Soutenu devant le jury composé de :

BENARIOUA. Y	Université M'sila	Président
BENKHERBACHE.H	Université M'sila	Rapporteur
FARHAT.H	Université M'sila	Examineur

Année universitaire : 2016 / 2017

***« L'idée à qui tout cède et qui toujours éclaire
Prouve sa sainteté même dans sa colère.
Elle laisse toujours les principes debout.
Être vainqueur, c'est peu ; mais être grands, c'est
tout. »***

(Victor Hugo – Les Châtiments)

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé à l'Université de M'sila au sein de l'Atelier de mécanique (pour la réalisation des éprouvettes et leur soudage par friction) et dans le Laboratoire de résistance des matériaux (pour les essais de rigidité des soudures).

Nous tenons tout d'abord à remercier notre encadreur, M^{elle}. BENKHERBACHE Houria pour sa confiance, son aide précieuse et surtout la disponibilité qu'elle a nous accordé.

Notre profonde gratitude va aussi aux membres de jury qui ont bien voulu nous faire l'honneur de participer au jury.

Nous adressons nos vifs remerciements à l'ensemble des enseignants du Département de génie mécanique qui ont bien dirigé notre cursus universitaires.

Nous remercions particulièrement nos collègues et amis qui ont relu ce mémoire et nous ont fait part de leurs suggestions.

*A ma mère, à qui je dois tout.
A mon père qui m'a tout donné, et surtout beaucoup propulsé.
A mes frères et à mes sœurs.
A ma femme.
A mes deux enfants Mohamed Rami et Yacine.
A Mr. ATTOUI Hocine et sa famille qui vivent au Canada.
A tous ceux qui s'investissent pour que la science soit lumière.
A mon pays.*

(SAIDANI Hassen)

*A mes parents.
A mes frères et à mes sœurs.
A ma femme.
A mes enfants : Zakaria, Fatima Zohra, et Monsaf.
A l'ensemble des professeurs du Département de génie mécanique.
A mes amis : Khelfallah Faras et Raouach El Hadj.
A l'ensemble des ingénieurs de laboratoires du Hall de technologie.
A mes collègues de la promo juin 2017.*

(SILEM Mourad)

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	09
-----------------------------	----

CAHAPITRE I : LE SOUDAGE - GENERALITES

1.1 INTRODUCTION AU SOUDAGE	12
1.2 CARACTERISTIQUES MECANQUES DES PIECES A SOUDER.....	12
Que-est-ce que la soudabilité	12
1.3 DEFINITION DU SOUDAGE	13
1.4 PRINCIPAUX PROCEDES DE SOUDAGE	13
1.4.1 Le soudage au gaz (au chalumeau)	13
a. Principe	13
b. description d'un chalumeau	14
1.4.2 Le soudage à l'arc	15
a. Principe	15
b. Techniques du soudage à l'arc électrique	15
c. Domaines d'application	17
d. Matériaux utilisés	17
1.4.3 Le Soudage par résistance	17
a. Principe	17
b. Domaines d'application	19
1.4.4 Le Soudage par résistance	19
a. Principe	19
b. Domaines d'application	20
1.4.5 Le Soudage par friction malaxage	22
a. Principe	22
b. Domaines d'application	23
1.4.6 Le Soudage par faisceau d'électrons	23
a. Avantages	23
b. Inconvénients	23
c. Utilisations	24

1.4.7 Soudage laser	24
1.5 PRINCIPAUX DÉFAUTS DE SOUDURES.....	24

CHAPITRE II : LE SOUDAGE PAR FRICTION

2.1 DÉFINITION	30
2.2 PRINCIPE	30
2.3 LES DIFFÉRENTS MODES DE SOUDAGE	32
2.3.1 Le soudage par friction piloté	32
2.3.1.1 Principe	32
2.3.1.2 Paramètres de soudage	34
a. Vitesse de friction	34
b. Durée de friction	35
c. Effort de friction	36
d. Effort et durée de forgeage	36
2.3.2 Le soudage par friction inertielle	37
2.3.2.1 Principe	37
2.3.2.2 Paramètres de soudage	40
2.4 COMPARAISON DES DEUX PROCÉDES	40
2.5 MISE EN ŒUVRE DU SOUDAGE PAR FRICTION	41
2.5.1 Préparation de pièces	41
2.5.2 Soudabilité	42
2.6 MACHINES À SOUDER	43
2.7 AVANTAGES DU SOUDAGE PAR FRICTION	46
2.8 LIMITES DU SOUDAGE PAR FRICTION	46
2.9 APPLICATIONS DU SOUDAGE PAR FRICTION	47

CHAPITRE III : PARTIE EXPÉRIMENTALE

3.1 PROBLÉMATIQUE	50
3.2 MOYENS MISE EN ŒUVRE	51
3.2.1 Matière d'œuvre	51
3.2.2 Moyens d'usinage	51

3.2.3 Moyens d'essai et de contrôle	51
3.3 DEROULEMNT DE REALISATION	54
3.3.1 Présentation des éprouvettes	54
a. Dimensions	54
b. Matériaux	54
3.3.2 Usinage des éprouvettes	55
3.3.3 Soudage des éprouvettes	55
a. Processus	56
b. Classement des lots et conditions de soudage	58
c. Eprouvettes obtenues	59
3.4 ESSAIS DES EPROUVETTES	60
3.4.1 L'essai d'ultrason	60
3.4.2 L'essai de traction	60
a. Résultats	60
b. Interprétation de résultats	67
3.4.3 L'examen métallographique	67
a. Résultats	67

CONCLUSION

.....	69
-------	----

BIBLIOGRAPHIE

.....	70
-------	----

LISTE DES FIGURES

.....	76
-------	----

INTRODUCTION GENERALE

Le soudage est une opération de micro-métallurgie consistant à exécuter un cordon fondu liant les bords de deux pièces. Il constitue un moyen d'assemblage privilégié pour toute construction faisant intervenir des matériaux métalliques.

Le soudage assure une continuité métallique de la pièce lui conférant ainsi des caractéristiques au niveau de l'assemblage équivalent à celles du métal assemblé. Caractéristiques mécaniques, thermiques, chimiques, électriques, d'étanchéité, de durabilité....il répond à des sollicitations élevées. Il est durable car insensible aux variations de température, aux conditions climatiques...pour finir il garantit l'étanchéité de la pièce à souder.

Vue son importance, le soudage trouve des applications dans des secteurs d'activité très diversifiés comme la production, la construction, la réparation et la maintenance.

Jusqu'à présent, on estime qu'il y a une quarantaine ou une cinquantaine de procédé de soudage au total. Nous citons par exemple :

- Soudage par résistance ;
- Soudage au gaz ;
- Soudage à l'arc électrique ;
- Soudage par friction...

Parmi les procédés de soudage les plus appliqués, on trouve le soudage par friction (friction welding) qui est un procédé 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. 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.

L'objectif de ce travail, est d'introduire ce type de soudage dans nos Ateliers et d'étudier ses propriétés physiques notamment la rigidité des pièces soudées, et ses avantages.

Ce travail comporte trois chapitres.

- Dans le premier chapitre nous avons parlé sur les principaux procédés de soudage, leurs principes illustrés et des exemples d'application. Comme nous avons fait la comparaison entre ses procédés.
Egalement nous avons introduit les principaux défauts des soudures, leurs causes possibles, et les précautions à prendre.
- Le deuxième chapitre a été consacré à l'étude du procédé de soudage par friction, dont nous avons donné beaucoup de détails sur ce procédé, son principe, ces types, ces avantages, ... etc.
- Dans le troisième chapitre, nous avons réalisé ce procédé sur des éprouvettes normalisées au sein de l'Atelier de mécanique à l'Université de M'sila avec des moyens proches de la machine réelle, suivi par des essais effectués au Laboratoire de résistance des matériaux – Faculté de technologie – pour pouvoir vérifier certaines caractéristiques mécaniques des éprouvettes soudées au niveau du joint de soudure.

Chapitre.1

Le soudage - Généralités

1.1 INTRODUCTION AU SOUDAGE

Souder consiste à établir la continuité métallique entre les parties à assembler. Cela implique qu'il n'y a pas de matières non métalliques interposées entre les éléments réunis. Cette technique d'assemblage est différente du rivetage, de l'agrafage ou du collage. [6]

C'est une technique relativement « jeune » :

- découverte des principes vers 1900 ;
- Industrialisation dans les années 1930 ;
- Progression en parallèle de la soudure et de la connaissance des matériaux métalliques. [6]

Par son succès industriel, elle présente les avantages suivants:

- Facilité de mise en œuvre ;
- Moins de travail ;
- Économie de matière ;
- Meilleure solution technique.

1.2 CARACTERISTIQUES MECANIQUES DES PIECES A SOUDER

Parmi les caractéristiques mécaniques que doivent remplir les pièces à souder, on trouve *la soudabilité, la conductivité thermique, la résistance à la déformation thermique, ...etc.* A ce point, on s'intéresse à l'explication de la soudabilité comme étant le facteur principal dans toute opération de soudure.

Que-est-ce que la soudabilité ?

Pour que deux pièces soient soudées, elles doivent remplir une condition essentielle, il s'agit de la *soudabilité* qui est la propriété que possèdent certains corps, de s'unir par la soudure, opération fréquemment appliquée dans le travail des métaux et qui consiste à rapprocher intimement deux corps de même nature, ou d'une nature différente, de façon à n'en former qu'un seul. [3]

1.3 DEFINITION DU SOUDAGE

D'après la théorie, le soudage consiste à assembler deux pièces de métal (A) en provoquant simultanément une fusion de leurs bords et en ajoutant d'un métal d'apport (il est dit (hétérogène)). La figure 1.1 montre l'assemblage de deux pièces par soudage. [4]

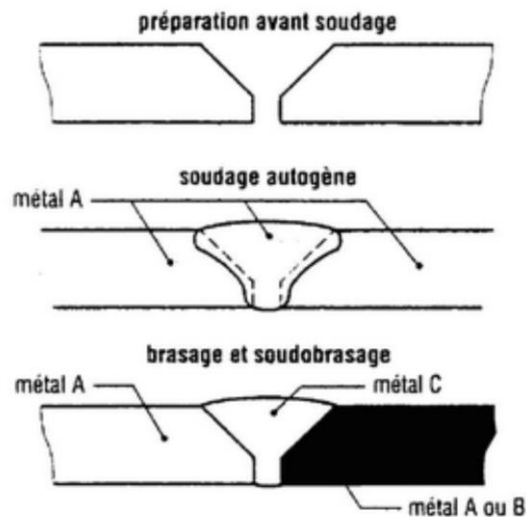


Figure 1.1 Assemblage de deux pièces par soudage.

Autogène : fusion du métal de base et du métal d'apport.

Hétérogène : le métal de base n'est pas fondu, il n'y a que le métal d'apport qui est fondu (soudo-brasage, brasage).

1.4 PRINCIPAUX PROCÉDES DE SOUDAGE

Le soudage étant un domaine très vaste, et les procédés sont nombreux au point qu'on ne peut pas tout étudier dans ce chapitre, alors, on s'est basé sur la description succincte de quelques procédés les plus connus.

1.4.1 Le soudage au gaz (au chalumeau)

a- Principe

Le procédé de soudage oxyacétylénique est un soudage à la flamme autogène. Il est réalisé partir de la chaleur d'une flamme née de la combustion d'un gaz combustible

(Acétylène) et d'un gaz comburant (l'oxygène). La température de la flamme peut atteindre les 3200° C. la figure 1.2 montre ce procédé.

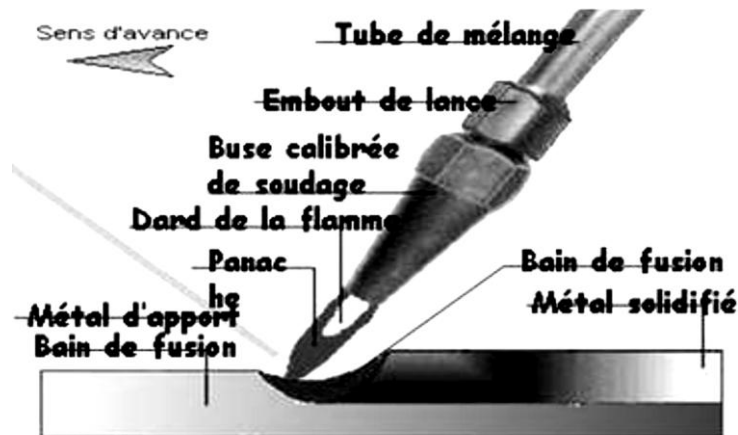


Figure 1.2 Soudage au chalumeau.

On note que le métal d'apport est amené manuellement dans le bain de fusion.

b- description d'un chalumeau

D'après figure 1.3, un chalumeau comportera essentiellement :

- deux robinets assurant la fonction fermé/ouvert et la fonction réglage de débit ;
- un manche ;
- un organe de mélange comburant-combustible qui peut être un injecteur ou un simple mélangeur ;
- une lance et une buse de soudage. [9]

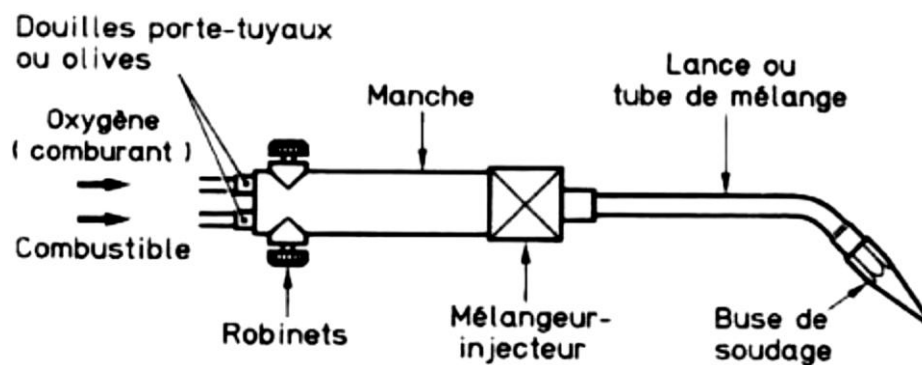


Figure 1.3 Parties constitutives d'un chalumeau.

Ce procédé est beaucoup employé pour le soudage des tôles fines, les tubes de petit diamètre (chauffagiste).

Dans la pratique, ce procédé permet le soudage de différents métaux comme l'acier, l'inox, acier galvanisé, l'aluminium, fonte, cuivre... [4]

1.4.2 Le Soudage à l'arc

a- Principe

Comme le montre la figure 1.4, le soudage à l'arc est un procédé de soudure par fusion où la chaleur est produite par un arc électrique, formé entre le métal de base et l'électrode, ou entre deux ou plusieurs électrodes. Le contact puis le léger éloignement de l'électrode par rapport aux pièces provoque l'arc électrique. L'électrode est constituée d'un métal dont les caractéristiques mécaniques, chimiques et physiques sont très proches du métal des deux pièces à souder.

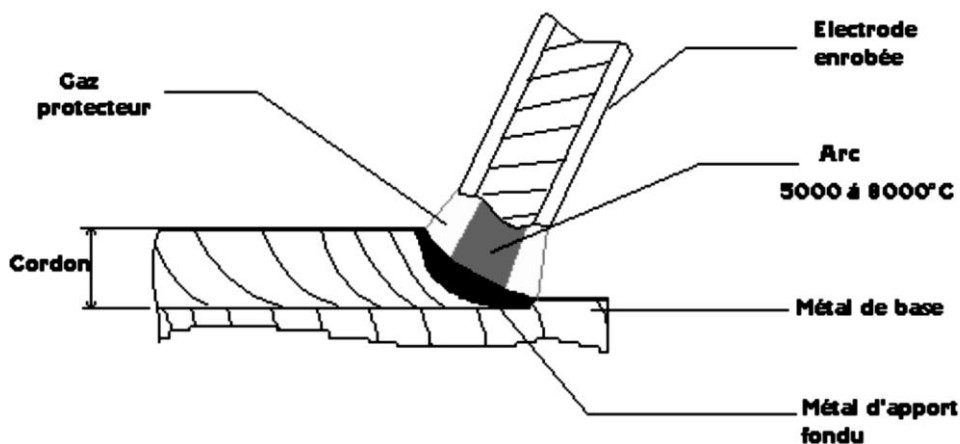


Figure 1.4 Principe de la soudure à l'arc électrique.

b- Techniques du soudage à l'arc électrique

Le soudage à l'arc électrique comprend plusieurs techniques :

* Soudage à l'électrode enrobée :

L'électrode, dirigée manuellement est fusible et fournit le métal d'apport. L'enrobage assure un rôle protecteur et son épaisseur permet de jouer sur la forme du cordon, concave ou convexe (voir schéma précédant). [5]

*** Soudage MIG (Metal Inert Gas) :**

Encore appelé semi-auto, il est très adapté à la petite industrie : facile d'emploi ; arc visible ; pas de laitier ; grande vitesse de soudage ; temps de formation réduit. Il utilise une électrode fusible (fil se déroulant automatiquement) travaillant en atmosphère inerte (gaz protecteur : argon, argon + hélium, etc.) afin de protéger le bain de fusion. [5]

*** Soudage MAG (Metal Active Gas) :**

C'est une variante du soudage MIG utilisant un mélange de gaz carbonique CO_2 et d'argon adaptée au soudage des aciers de construction au carbone.

La figure 1.5 montre le principe des soudages MIG et MAG.

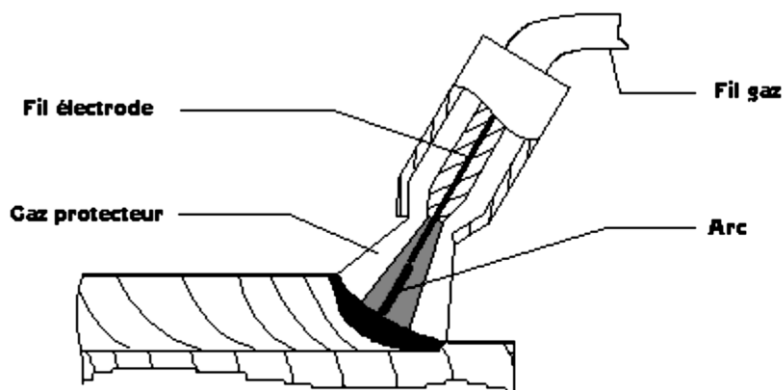


Figure 1.5 Principe des soudages MIG et MAG.

*** Soudage TIG (Tungsten Inert Gas) :**

Variante des précédents, plus productive et utilisant une électrode réfractaire ou non fusible en tungstène. Le métal d'apport est amené manuellement (baguette) ou automatiquement (fil déroulé). Il convient bien aux faibles épaisseurs (0.20 à 3 mm) et peut aussi s'utiliser sans métal d'apport et remplacer le soudage par points (voir soudage par résistance). [5]

On trouve dans la figure 1.6 le principe du soudage TIG.

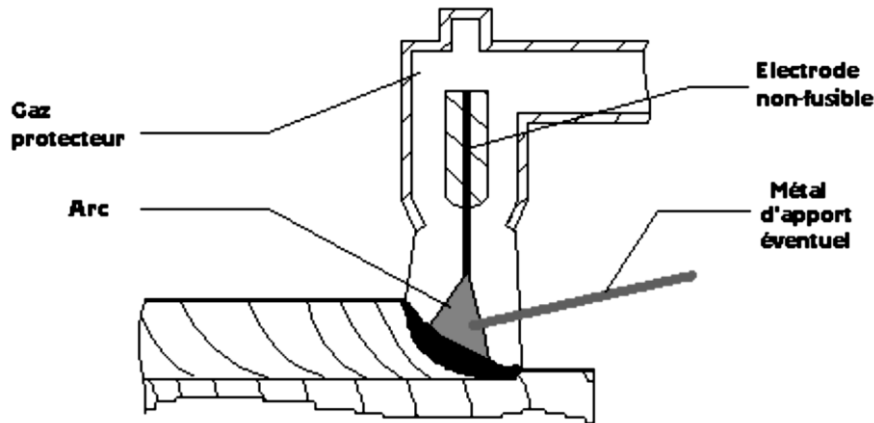


Figure 1.6 Principe du soudage TIG.

c- Domaines d'application

Ce procédé est très utilisé dans l'industrie, car son procédé de fusion entraîne moins de déformations que le chalumeau. Il est employé dans la construction mécano-soudée, la chaudronnerie, les charpentes métalliques, les chantiers navales, l'industrie automobile, le nucléaire, l'aérospatiale. [5]

d- Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés selon le type de soudage ; on trouve pour :

- **Soudage MIG** (Métal Inert Gas) : les aciers inoxydables, aluminium, cuivre.
- **Soudage MAG** (Métal Active Gas) : les aciers ordinaires.
- **Soudage TIG** (Tingsten Inert Gas) : Suivant le type de courants électrique :
 - Courant continu : symbole DC : Aciers ordinaire, aciers inoxydables, cuivre, titane...
 - Courant alternatif symbole ~ AC : Aluminium

1.4.3 Le Soudage par résistance

a- Principe

Les pièces à assembler sont maintenues en contact par un effort de compression puis soudées par recouvrement ou bout à bout sans métal d'apport. La fusion est

provoquée par effet Joule : courant de forte intensité ($I > 2000 \text{ A}$) sous basse tension. Après coupure du courant, l'effort de compression «forge» la soudure. [5]

De nombreux procédés de soudure par résistance existent, en particulier on trouve: *le soudage par points*, très utilisé en grande et petite série, il est réalisé entre deux électrodes. La fusion se produit à la frontière entre les deux pièces à souder comme le montre la figure 1.7.

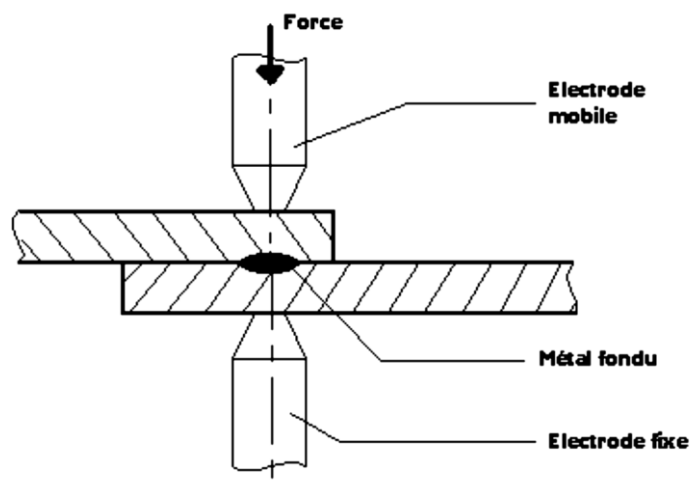


Figure 1.7 Principe du soudage par point.

Il existe de nombreuses variantes de cette technique de soudage tel que le soudage par molette où les électrodes sont remplacées par des molettes tournantes ce qui permet un soudage continu ou discontinu très rapide. Voir figure 1.8.

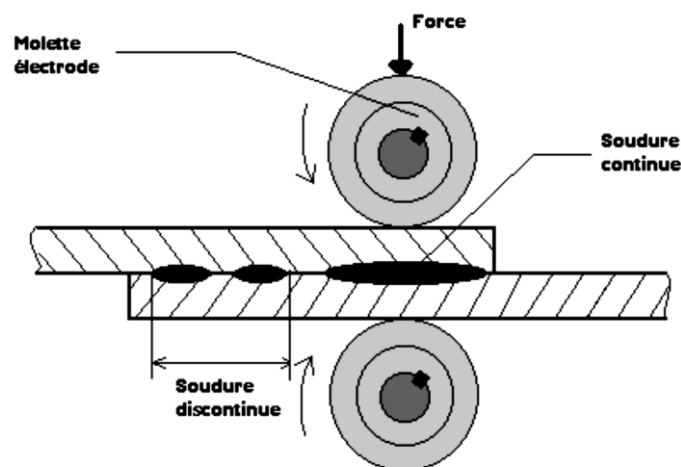


Figure 1.8 Principe du soudage par molette.

b- Domaines d'application

Ce procédé est très utilisé en grande et petite série, il est aussi très rapide. Il est utilisé dans de très nombreux domaines :

- l'industrie automobile,
- l'aéronautique,
- l'aérospatiale,
- le nucléaire,
- l'industrie électrique et électronique,
- les appareils ménagers,
- le mobilier métallique,
- les armatures en fils,
- le soudage en bout de barre, de profilés, de pièces tubulaires, de tôles, ...

Avec ce procédé, on peut souder de différents métaux comme :

- l'acier,
- l'inox,
- l'aluminium...

1.4.4 Le Soudage par friction

On doit parler avec plus de détails sur ce procédé dans le chapitre.2, et on se limite à donner son principe et des exemples d'application.

a- Principe

Le principe est comme suit : Une des deux pièces à assembler est entraînée en rotation (figure 1.9-a). Les deux pièces sont mises en contact par un effort axial (F_a) déterminé (figure 1.9-b). Par frottement les pièces s'échauffent de part et d'autre du plan de joint ($V = 100$ m/min).

Un bourrelet commence à se former (figure 1.9-c). Après un brusque arrêt de la pièce en rotation, l'effort axial est augmenté (figure 1.9-d). C'est la phase de forgeage de la soudure qui se traduit par la formation d'un bourrelet très caractéristique. On élimine ensuite ce bourrelet par usinage.

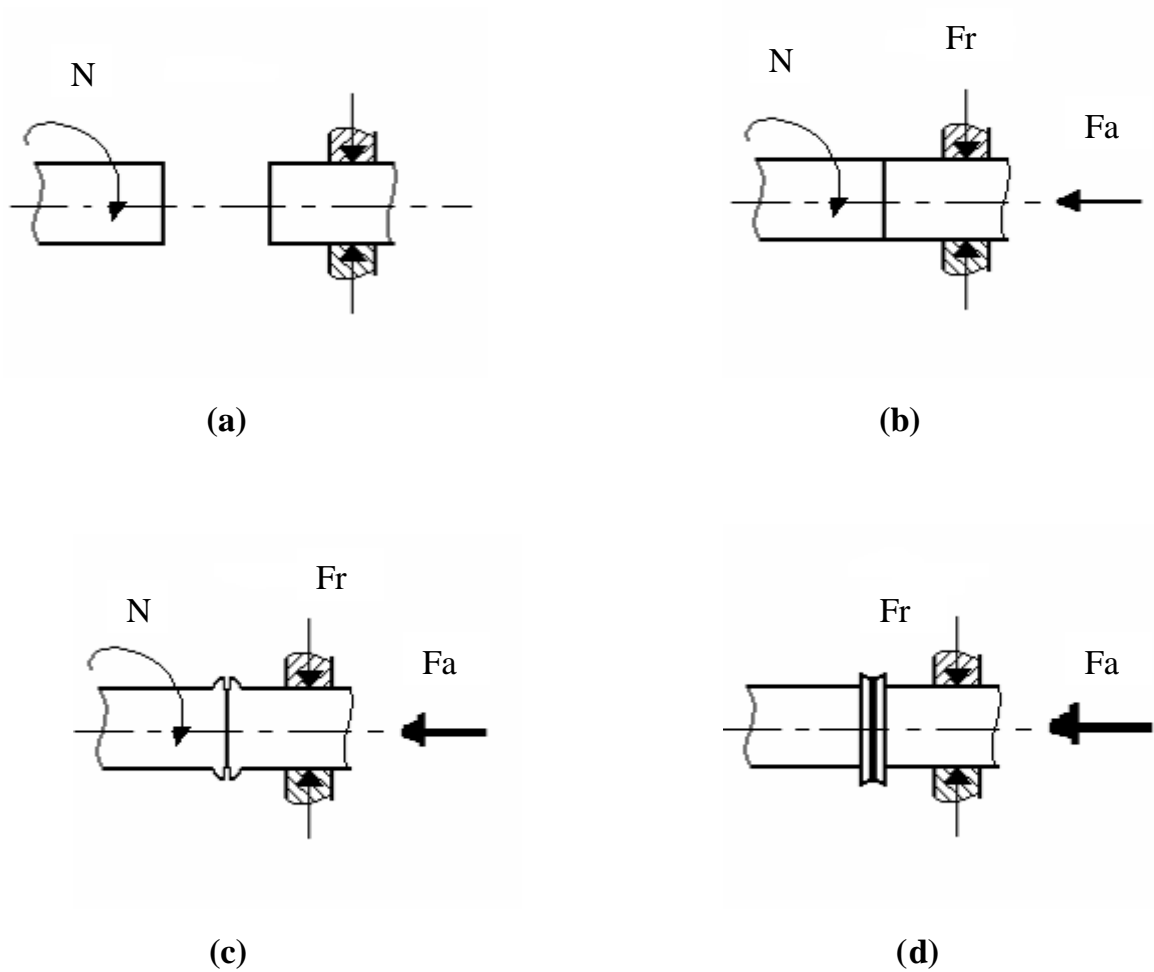


Figure 1.9 Principe du soudage par frottement.

On admettant que :

F_a : force axiale de poussée ;

F_r : force radiale de maintien.

b- Domaines d'application

Ce procédé est appliqué pour les mécanismes nécessitant une grande résistance. On trouve comme exemples :

- Arbres de transmission (figure 1.10 – a) ;
- Engrenages (figure 1.10 – b) ;
- Goujons sur moyeu (figure 1.10 – c) ;
- Tige de piston (figure 1.10 – d).

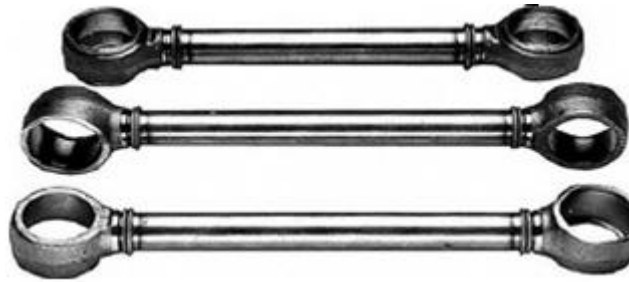


Figure 1.10 – (a) Arbres de transmission soudés par friction.



Figure 1.10 – (b) Engrenage soudé par friction.



Figure 1.10 – (c) Goujons soudés sur moyeu.

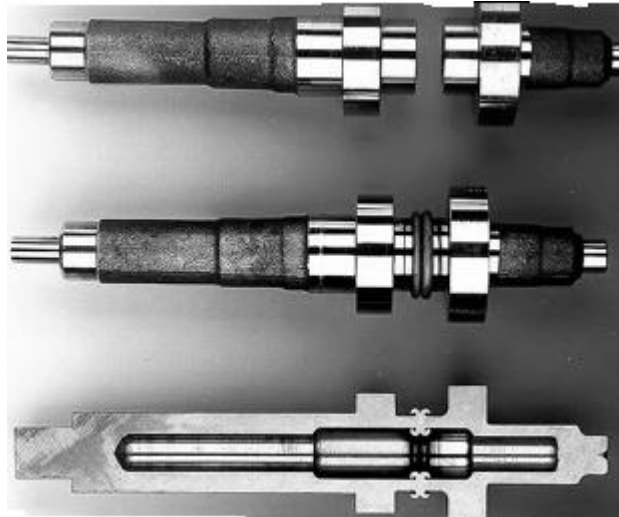


Figure 1.10 – (d) Soudage de tige de piston.

1.4.5 Soudage par friction-malaxage

a-Principe

Lors du soudage par friction-malaxage, un outil rotatif constitué d'un pion profilé et d'un épaulement est enfoncé dans la matière jusqu'à ce que l'épaulement touche la surface du matériau à souder (Figure 1.11). La matière est ainsi chauffée par friction à des températures où elle est facilement malléable sans entrer en fusion.

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

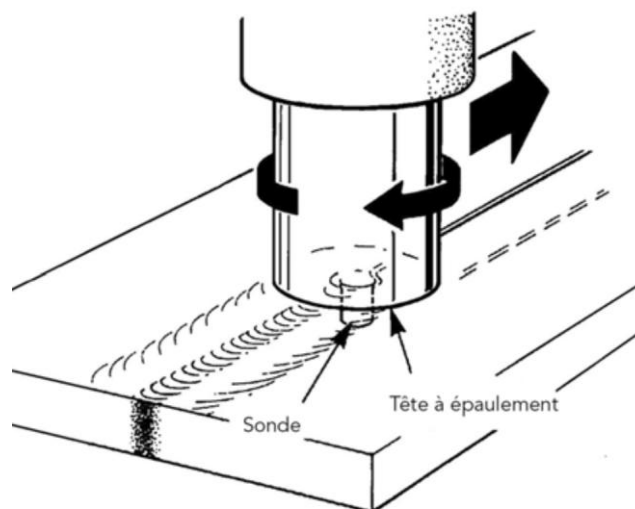


Figure 1.11 Soudage par friction-malaxage.

b- Domaines d'application

Ce procédé permet de souder des alliages d'aluminium non soudables avec les procédés TIG et MIG, ainsi que les alliages sensibles à la fissuration à chaud (alliages Al Cu ou Al Zn Mg Cu)

1.4.6 Soudage par faisceau d'électrons

a- Avantages

Le soudage par faisceau d'électrons (soudage FE) apparaît en 1958 (figure 1.12). Il relève, avec le soudage laser, de la catégorie du soudage par faisceau à haute densité d'énergie. Grâce à l'utilisation de très hautes températures, il permet une pénétration étroite et profonde. [2]

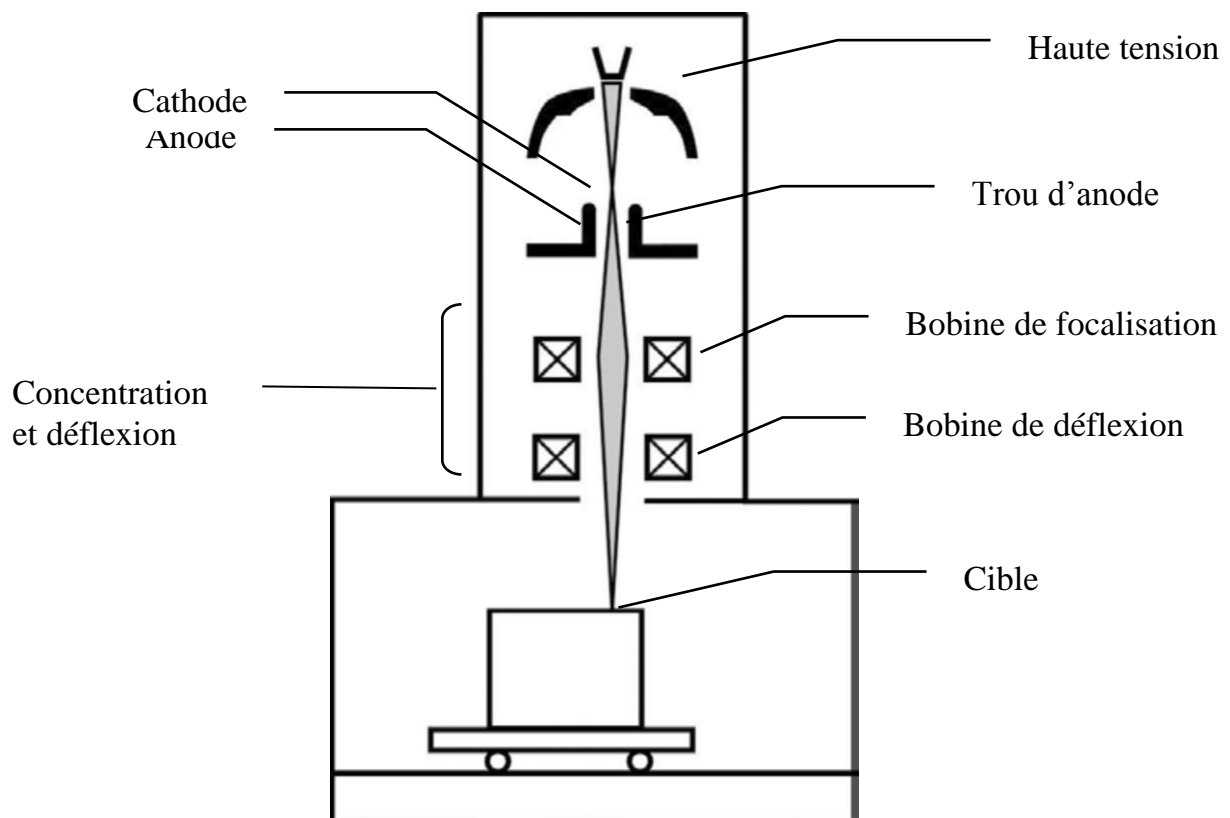


Figure 1.12 Schéma de principe du soudage par faisceau d'électrons.

b- Inconvénients

Il présente néanmoins un inconvénient majeur : il faut en effet pouvoir disposer d'une chambre à vide pouvant contenir à la fois le canon à électrons et la pièce à souder. [2]

c- Utilisations

L'aéronautique et le nucléaire sont les premiers à le plébisciter.

1.4.7 Soudage laser

Le *soudage (et le coupage) laser* ont des caractéristiques idéales à plus d'un titre (figure 1.12). Le faisceau laser permet une conduite plus concentrée de la chaleur, des déformations très faibles et de très grandes vitesses de soudage. Malheureusement, un laser puissant est encombrant et coûteux, et il faut trouver le moyen d'amener le faisceau lumineux jusqu'au point de soudure. Pour y parvenir, un système de miroirs réfléchit le faisceau dans les lasers CO₂, et le rayon peut être transmis par fibre optique dans les lasers YAG, ce qui fait de ces derniers l'instrument idéal pour les robots soudeurs. [2]

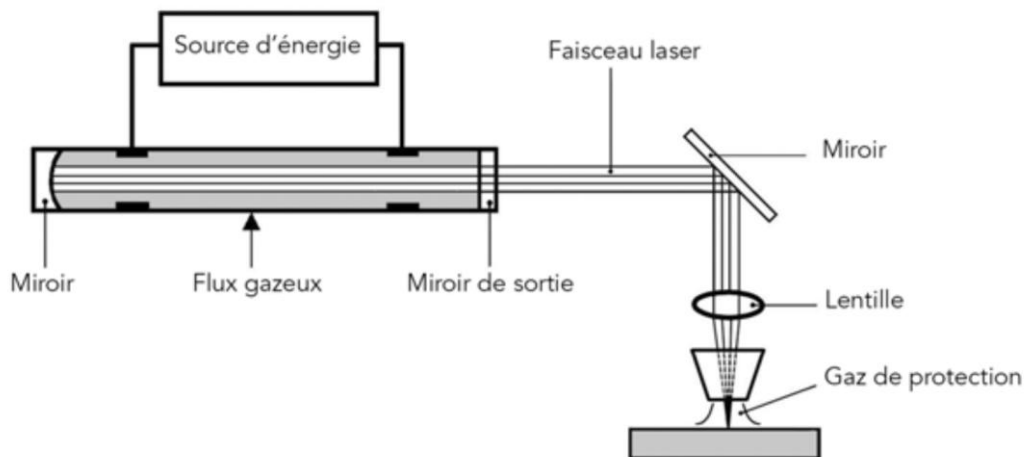


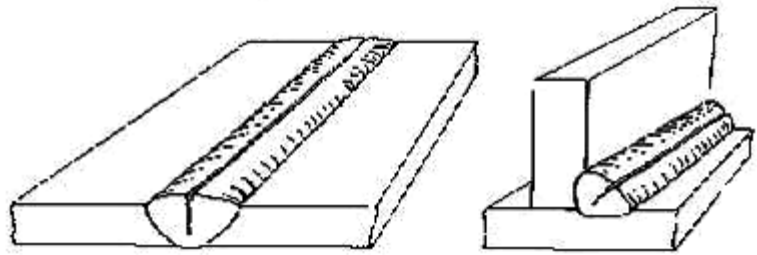
Figure 1.12 Schéma de principe du soudage laser.

1.5 LES PRINCIPAUX DÉFAUTS DE SOUDURE

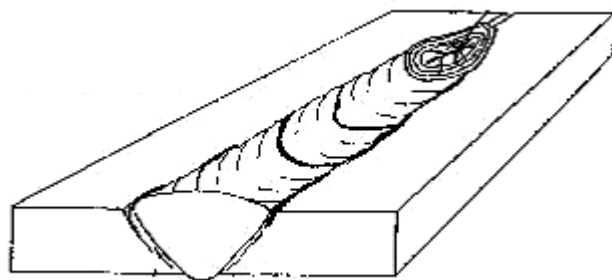
Selon la norme **NF EN 26250**, les défauts de soudure peuvent être classés en six groupes.

Groupe 1 : FISSURES

FISSURATION A CHAUD



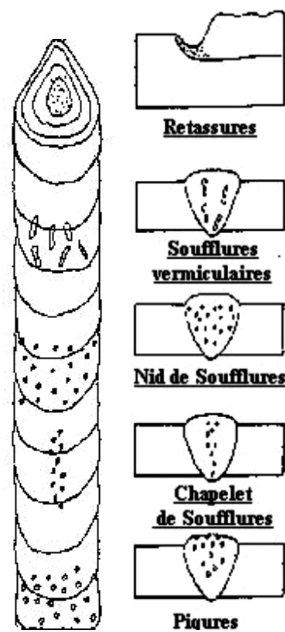
FISSURATION A FROID



Groupe 2 : CAVITES

RETASSURES

SOUFFLURES



Groupe 3 : INCLUSIONS SOLIDES

INCLUSION DE LAITIER



INCLUSION METALLIQUE



Groupe 4 : MANQUE DE FUSION ET DE PENETRATION

MANQUE DE FUSION



Collages



Collages

MANQUE DE PENETRATION



Manques de Pénétration

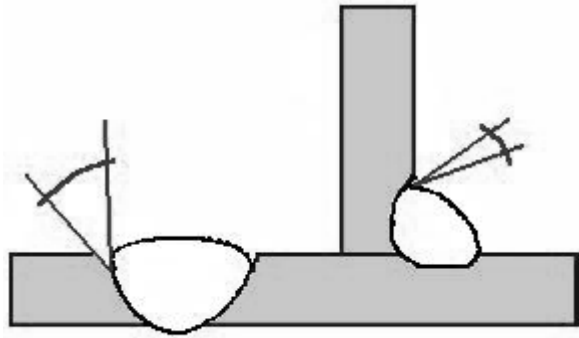
Dénivellation



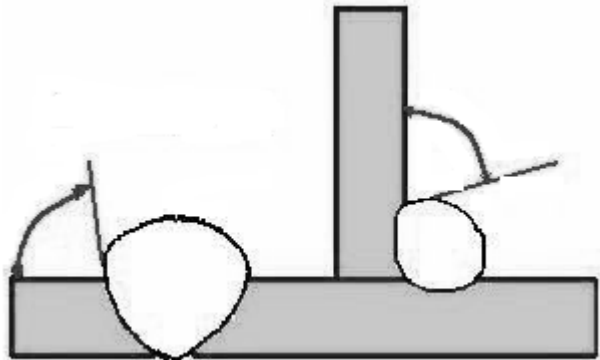
Manques de Pénétration

Groupe 5 : DEFAUTS DE FORME

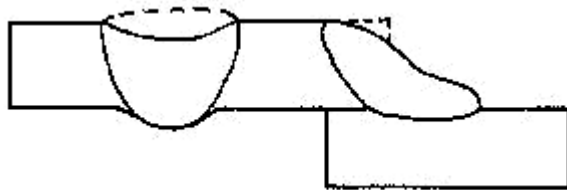
CANIVEAUX



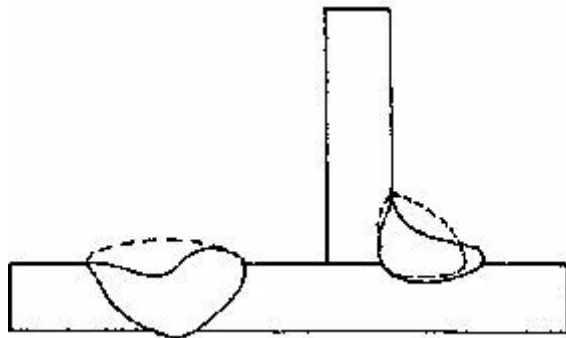
**SUREPAISSEUR OU
CONVEXITE EXCESSIVE**



MANQUE D'EPAISSEUR



EFFONDREMENT



EXCES DE PENETRATION

DEFAUT D'ALIGNEMENT

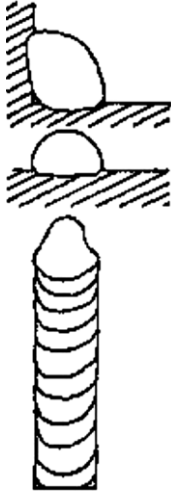

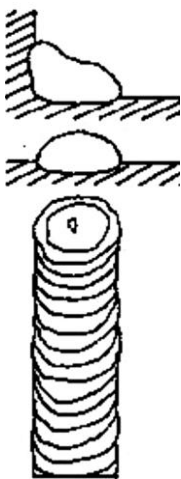



DEFORMATION ANGULAIRE

TROU:

ROCHAGE

MAUVAISE REPRISE

Groupe 6 : DEFAUTS DIVERS ET LEURS CAUSES

	<p>Défauts :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cordon irrégulier • Stries très Prononcées <p>Cause principale :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Arc trop court 		<p>Défauts :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cordon déformé et caniveaux • Projections importantes • Fusion Crépitante <p>Cause principale :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Intensité trop forte
	<p>Défauts :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cordon trop gros • Effondrement des cordons d'angle <p>Cause principale :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vitesse d'avance trop faible 		<p>Défauts :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Largeur de cordon irrégulière • Caniveaux • Fusion irrégulière <p>Cause principale :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vitesse d'avance trop rapide
	<p>Défauts :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cordon irrégulier • Stries très prononcées <p>Cause principale :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Arc trop court 		<p>Défauts :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cordon irrégulier • Projections <p>Cause principale :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Arc trop long

Chapitre 2

Le soudage par friction

2.1 DEFINITION

Le soudage par friction permet de réaliser des **assemblages en bout de deux pièces dont l'une au moins a une symétrie de révolution**. Il met en œuvre l'effet thermique engendré dans leur plan de joint par la rotation rapide sous pression des pièces l'une sur l'autre ou encore par friction. La puissance de chauffe résulte du couple résistant et de la vitesse de rotation maintenue en principe constante. C'est un procédé d'assemblage global qui se classe parmi les procédés de forgeage. Du fait du fluage du matériau pendant la friction et lors du forgeage, la température de fusion n'est jamais atteinte. [11]

2.2 PRINCIPE

La rotation est le moyen presque exclusivement utilisé pour créer la friction (figure 2.1). La pièce qui tourne est serrée dans un mandrin rotatif entraîné par un moteur ou un volant d'inertie ; aussi doit-elle présenter au moins dans la zone de soudage une symétrie de révolution.

Dans ce processus, les faces en contact s'échauffent et deviennent la source de chaleur qui, par diffusion, élève la température des extrémités des pièces. Celles-ci deviennent plastiques et un fluage se produit vers la périphérie en formant un bourrelet caractéristique, tandis que la chaleur continue de se diffuser. Lorsque la température de soudage est atteinte, la rotation est arrêtée et un effort de forgeage est appliqué pour former la soudure.

Dans la pratique, le soudage par friction s'applique de façon naturelle à des assemblages, selon leur axe commun, de deux pièces cylindriques, pleines ou creuses et de même section droite au niveau du joint. Les applications se rencontrent donc surtout dans la construction de pièces mécaniques.

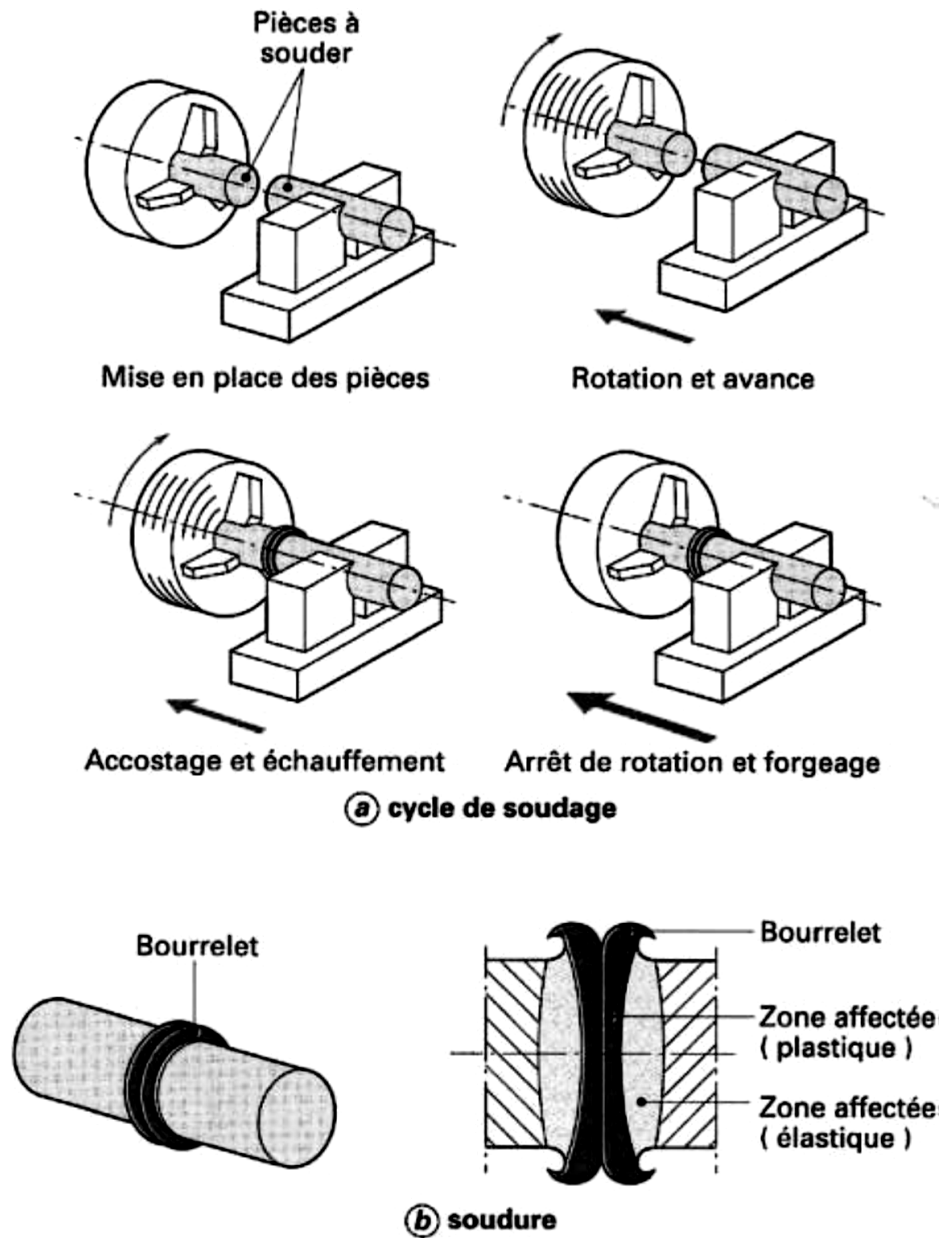


Figure 2.1 Principe du soudage par friction.

Une opération de soudage par friction s'exécute sur une machine très spécifique et souvent adaptée à un type d'assemblage particulier. La figure 2.1b montre la vue en coupe d'un assemblage soudé par friction. [11]

2.3 LES DIFFERENTS MODES DE SOUDAGE PAR FRICTION

On distingue deux modes de soudage :

- **le soudage par friction pilotée** (FP) ou encore *par entraînement direct ou conventionnel* (en anglais, *continuous drive*) ;
- **le soudage par friction inertielle** (FI) ou encore *par accumulation d'énergie* (en anglais, *Inertia welding*, *Inertia* étant une marque de fabrique déposée par son inventeur).

On va étudier uniquement les deux premiers modes de soudage, car ils sont plus proches de notre application.

2.3.1 Le soudage par friction piloté

2.3.1.1 Principe

Le principe du soudage par friction pilotée est présenté à la figure 2.2. Il consiste à réaliser la soudure sur une machine à entraînement direct, c'est-à-dire dans laquelle le moteur fournit directement le couple de friction pendant la phase d'échauffement.

La **machine** comporte schématiquement (figure 2.2a) :

- un mandrin rotatif fixé sur une broche entraînée par le moteur, par l'intermédiaire d'un embrayage et d'un frein ;
 - un mandrin non tournant ou étai, coaxial au premier, associé à une table animée d'un mouvement d'approche et capable d'exercer sur l'assemblage les efforts de friction et de forgeage.

L'opération de soudage passe par les phases suivantes :

- *mise en marche du moteur*, la broche étant débrayée et freinée ;
- *mise en place des pièces* dans les mandrins et fermeture de ces derniers ;
- *démarrage du cycle automatique* (figure 2.2b) qui comprend :
 - l'embrayage de la broche et la mise en rotation de la pièce correspondante,
 - l'accostage des pièces à vitesse lente et sous effort faible. Pendant cette approche, les pièces viennent en contact par leurs aspérités alors qu'un couple résistant erratique apparaît. Il n'y a pas d'échauffement mais égalisation mécanique des surfaces et apparition progressive du couple de friction proprement dite ;

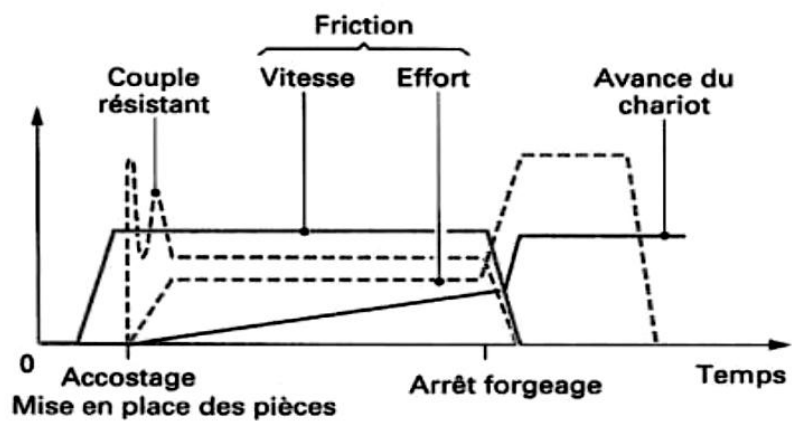
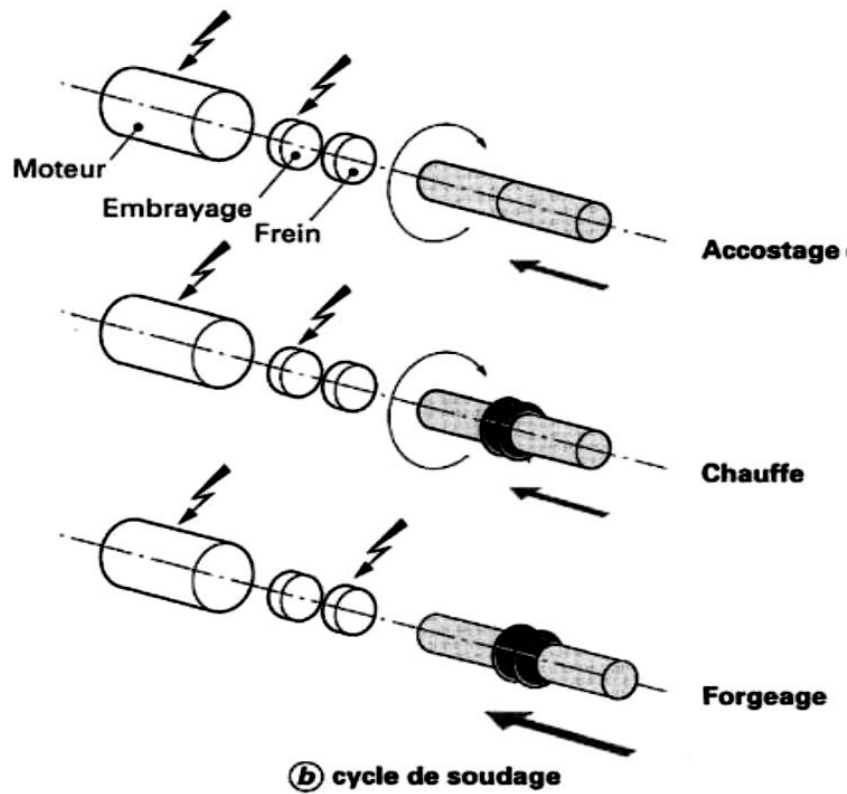
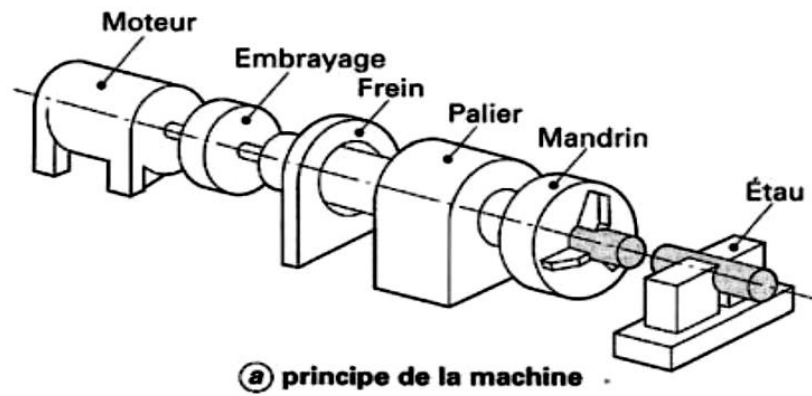


Figure 2.2 Soudage par friction piloté.

-
- *forgeage* par application d'un effort approprié après débrayage et freinage simultanés du mandrin tournant. Le bourrelet subit une nouvelle et définitive augmentation de volume ;
 - *desserrage des mandrins* et retrait de l'assemblage.

Dans ce mode piloté, le soudage est obtenu en **conditions dites thermiques** dans lesquelles les paramètres du forgeage sont définis, en fonction de la nature du matériau, par la température dans la zone soudée et par le temps de refroidissement. La mise au point de la soudure consiste à rechercher les conditions d'échauffement permettant un forgeage optimal et une zone affectée uniforme. [11]

2.3.1.2 Paramètres de soudage

Les paramètres de soudage par friction pilotée se déterminent d'après les caractéristiques des matériaux, leur coefficient de friction et leur section (surface et nature : pleine ou creuse). [11]

Ce sont essentiellement :

- *pour la friction*, la vitesse, l'effort et la durée ;
- *pour le forgeage*, l'effort et la durée d'application de cet effort. [11]

a- Vitesse de friction : physiquement, pour un matériau et une pression donnés, le couple passe par un maximum en fonction de la vitesse. Ces conditions sont à déterminer dans un essai préalable exécuté sur un assemblage tubulaire de diamètre donné. Ainsi, pour les aciers en général, on obtient une vitesse de 2 m/s pour un effort de 5 daN/mm². [11]

Pour appliquer ces valeurs à une *section pleine* de diamètre D pour laquelle les vitesses de friction vont varier de zéro, au centre, au maximum à la périphérie, on choisit un diamètre dit de friction à $2 D/3$. En pratique, pour une section pleine en acier, la diffusion thermique transversale intervient favorablement dans le temps total de friction. La valeur ci-dessus n'est pas critique et cela permet de disposer de

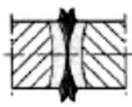

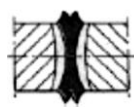
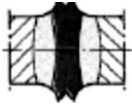


machines standards dont la vitesse de rotation est fixée par construction ou réglable par paliers pour être globalement en rapport avec la section à souder et la capacité de la machine. [11]

Dans le cas de *pièces tubulaires*, la vitesse doit être déterminée de façon plus précise en fonction du diamètre moyen. [11]

b- Durée de friction : elle est déterminée expérimentalement et mise en évidence par le tableau 2.1. Un temps trop court fournit une zone affectée thermiquement irrégulière ; en revanche, un temps trop long entraîne une consommation de métal surabondante. [11]

Tableau 2.1

Effet du temps et de l'énergie sur la forme de la soudure

Durée de friction	Energie (*)		
	Faible énergie	Energie moyenne	Forte énergie
2 à 3 s			
7 à 8 s			

(*) **Faible énergie** : grande vitesse de 3 m/s, faible pression de 2 daN/mm² et avance du chariot de 1 mm/s.

(*) **Énergie moyenne** : vitesse optimale de 2 m/s, pression normale de 5 daN/mm² et avance du chariot de 3 mm/s.

(*) **Forte énergie** : faible vitesse de 1 m/s, forte pression de 10 daN/mm² et avance du chariot de 7 mm/s.

c- Effort de friction : pour une vitesse donnée, le couple résistant passe également par un maximum en fonction de l'effort appliqué. Le réglage de l'effort permet donc d'optimiser le flux de chaleur et par suite l'efficacité de l'échauffement dont la durée est finalement raccourcie. Sous un effort trop faible, le métal trop plastique n'est pas expulsé et, sous un effort élevé, l'expulsion est surabondante et le métal reste froid. Dans les deux cas, le rendement est faible. [11]

Le tableau 2.2 donne des ordres de grandeur d'efforts de friction en fonction du matériau. [11]

Tableau 2.2
Effort de soudage par friction

Matériaux	Effort unitaire de Friction (daN/mm ²)	Effort unitaire de Forgeage (daN/mm ²)	Effort maximal pour barre de Ø 20 mm (daN)
Acier doux	3,5 à 6	8 à 12	3 800
Acier mi-dur	5 à 8	10 à 20	6 300
Aciers rapides et spéciaux	8 à 16	20 à 35	11 000
Aciers inoxydables et réfractaires	8 à 12	20 à 40	12 500
Alliage d'aluminium	1 à 3	3 à 6	2 000

d- Effort et durée de forgeage : ils n'ont rien à voir avec la friction et ne dépendent que des conditions métallurgiques relevant de la nature des matériaux. On admet ainsi pour les aciers courants des valeurs de 8 à 12 daN/mm², et des valeurs plus élevées pour des aciers à haute résistance (tableau 2.2). [11]

2.3.2 Le soudage par friction inertielle

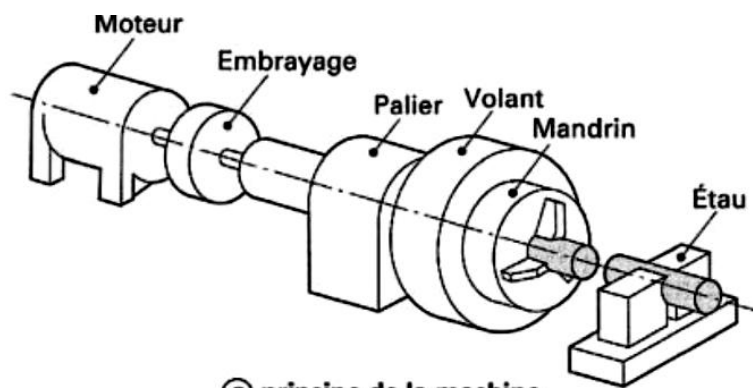
2.3.2.1 Principe

Le soudage par friction inertielle a été développé plus tard et diffusé au départ sous le nom de *Inertia welding*. Elle vient de l'idée d'**opérer en temps courts** en vue d'accroître les caractéristiques des soudures de certains métaux à haute résistance et à faible diffusivité thermique.

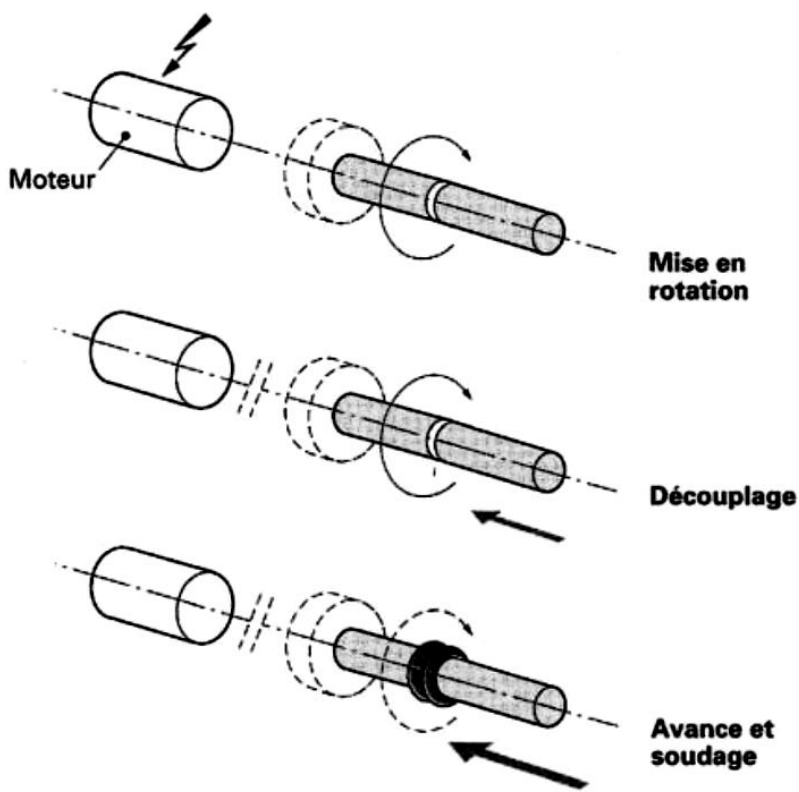
Le principe découle des observations suivantes :

- si l'on veut obtenir, sur un assemblage de deux barreaux pleins, des conditions de friction et d'échauffement uniformes sur toute la section, il faut faire varier la vitesse de rotation depuis une vitesse élevée, efficace près de l'axe, jusqu'à une vitesse plus basse, efficace en périphérie. On obtient cela de façon simple en utilisant un volant d'inertie préalablement accéléré et dont on va ensuite libérer l'énergie par le freinage dû à la friction sous pression élevée. Cette libération s'accompagne d'une diminution de la vitesse jusqu'à l'arrêt. On observe alors que la consommation de métal commence à se produire après un temps de rotation non négligeable au bout duquel l'échauffement s'est étendu à toute la section ;
- lors de l'arrêt naturel, la force de friction devient la force de forgeage sans aucun laps de temps préjudiciable à la formation de la liaison obtenue ainsi dans des conditions thermiques notablement réduites. [11]

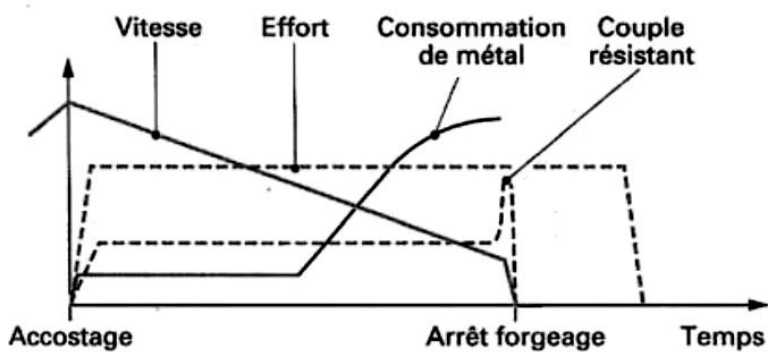
Le principe de la **machine à souder inertielle** est donné sur la figure 2.3a. Dans une telle machine, le mandrin tournant est conçu pour recevoir divers volants d'inertie dont la conjugaison permet d'ajuster la masse *inertielle* et par suite l'énergie engagée par accumulation.



(a) principe de la machine



(b) cycle de soudage



(c) évolution des différents paramètres

Figure 2.3 Soudage par friction inertielle.

Les **différentes phases d'une opération** sont les suivantes :

- *mise en place des pièces* dans les mandrins et fermeture de ces derniers ;
- *démarrage du cycle automatique* (figure 2.3b) qui comprend ;
 - la mise en marche du moteur, la broche étant embrayée et le volant entraîné jusqu'à la vitesse de régime à vide réglée en conséquence,
 - le découplage,
 - l'accostage sous effort faible,
 - application de l'effort de friction avec apparition du couple résistant, jusqu'à l'arrêt ;
- *desserrage des mandrins* et retrait de l'assemblage.

Le mandrin s'arrête rapidement sous l'effet de la force appliquée, lorsque la vitesse est suffisamment basse. Cette force exerce un forgeage élevé et à relativement faible température. Dans cette variante, la liaison résulte de deux effets mécaniques, l'un axial et l'autre radial (figure 2.4), ce dernier donnant lieu à une rotation de fibres métalliques.

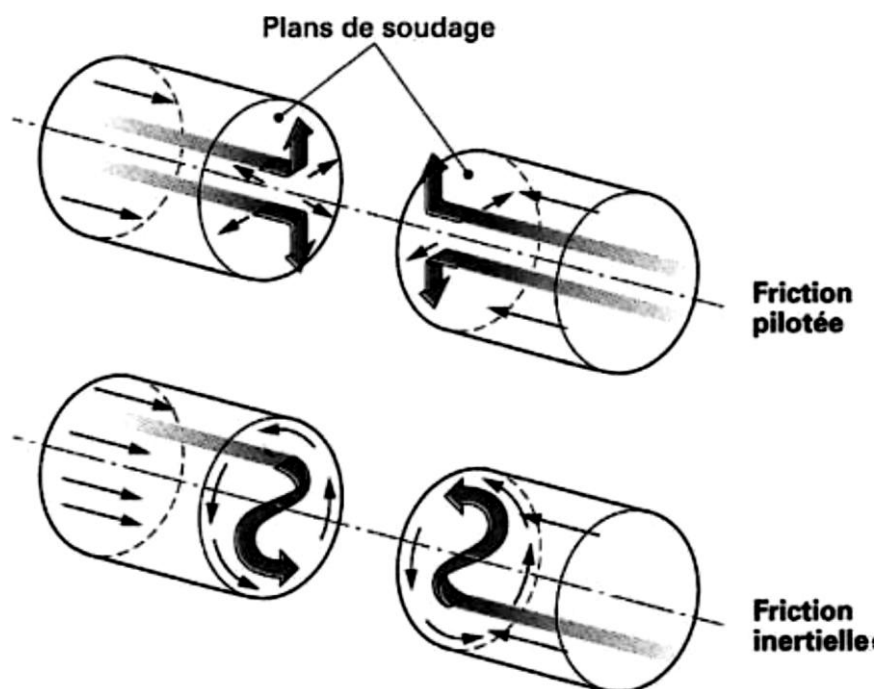


Figure 2.4 Torsion des fibres en soudage par friction.

2.3.2.2 Paramètres de soudage

Les paramètres essentiels dans ce mode sont :

- la masse (et les dimensions) du volant ;
- la vitesse de lancement ou vitesse de départ du cycle ;
- l'effort de friction et de forgeage ;
- le temps de forgeage à l'arrêt

Pour mettre au point l'opération de soudage, il est nécessaire de déterminer les valeurs de la masse du volant d'inertie, de sa vitesse de lancement et de l'effort de friction (freinage du volant) dont les effets sont très liés. Ils déterminent en effet la puissance de friction et, compte tenu de l'énergie accumulée, la durée du processus nécessaire à l'obtention d'une liaison complète satisfaisante.

2.4 COMPARAISON DES DEUX PROCÉDES

Les tableaux 2.3 et 2.4 donnent une comparaison paramétrique des procédés par friction pilotée et par friction inertielle. [11]

Tableau 2.3

**Comparaison sur barres d'acier au carbone
entre soudage par friction pilotée et friction inertielle [11]**

Type de soudage	Friction pilotée	Friction inertielle
Diamètre des pièces à souder : Ø 20 à 60 mm		
Temps de cycle (non compris le chargement et le déchargement)(s)	5 à 25	8
Vitesse de broche (tr/min)	1 500	4 800
Effort de poussée (kN)	410	726
Puissance motrice (kW)	29,5	73,6
Masse de la machine (kg)	4 550	15 650

Diamètre des pièces à souder :		
Ø 50 à 100 mm		
Temps de cycle (non compris le chargement et le déchargement)	(s)	20 à 40
Vitesse de broche	(tr/min)	1 000
Effort de poussée	(kN)	1 000
Puissance motrice	(kW)	110
Masse de la machine	(kg)	9 700
		18
		3 000
		2 427
		184
		47 600

Tableau 2.4

Comparaison des procédés [11]

Type soudage	Friction pilotée	Friction inertielle
Avantages	Temps de soudage court. Zone affectée thermiquement faible. Bonne tenue en fatigue des assemblages.	Facilité de réglage. Excellente reproductibilité. Larges tolérances des longueurs avant soudage.
inconvénients	Centre peu chauffé. Réglages pointus. Duretés dans le cordon. Tolérances serrées des pièces avant soudage.	Temps de soudage longs. Zone affectée thermiquement forte.

2.5 MISE EN ŒUVRE DU SOUDAGE PAR FRICTION

2.5.1 Préparation de pièces

Du point de vue strict de la géométrie, tous les assemblages de révolution sont réalisables par friction.

Selon l'assemblage qu'on désire réaliser, et les possibilités de la machine utilisée, ainsi que le choix de procédé de soudage on trouve dans la figure 2.5 quelques principes de base utilisés couramment pour la préparation de pièces.

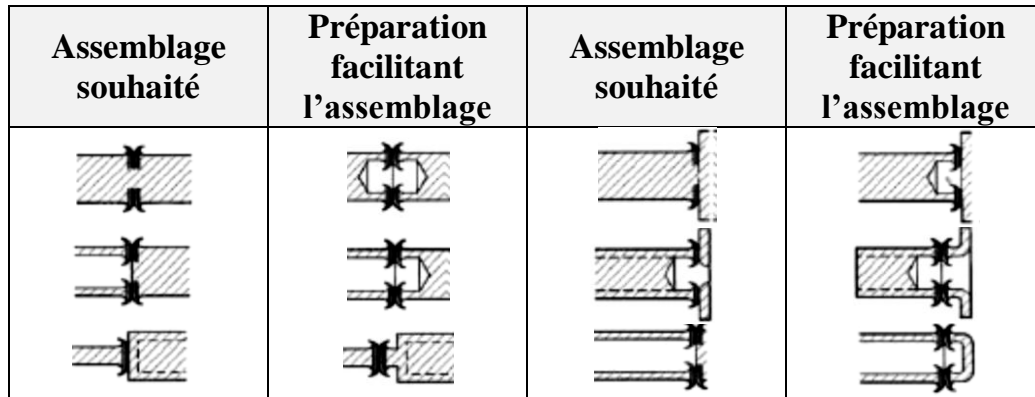


Figure 2.5 Exemples de préparations de pièces par soudage par friction.

2.5.2 Soudabilité

Le procédé de soudage par friction s'applique à un grand nombre de matériaux semblables et dissemblables ainsi que le montre le tableau 2.5. Il présente, de ce fait, par rapport aux soudages par étincelage et à l'arc, un avantage capital.

Tableau 2.5

Soudabilité des métaux et alliages

les plus couramment utilisés en soudage par friction [11]

Métaux et alliages	Aluminium	Alliages d'aluminium	Bronze	Cuivre	Magnésium	Monel	Nickel	Nimonic	Aciers	Aciers coulés	Aciers spéciaux	Aciers inoxydables	Titane
Aluminium	■	■	□	■	▲	□	■	□	■	□	□	■	■
Alliages d'Al	■	■	□	□	▲	□	□	□	●	□	□	▲	□
Bronze	□	□	▲	□	□	□	□	□	▲	▲	□	□	□
Cuivre	■	□	□	▲	□	□	□	□	■	□	□	■	□
Magnésium	▲	▲	□	□	▲	□	□	□	□	□	□	□	▲
Monel	□	□	□	□	□	■	□	□	□	■	□	■	□
Nickel	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■

Nimonic	□	□	□	□	□	□	□	■	■	■	□	■	□
Aciers	■	●	▲	■	□	□	□	■	■	■	■	■	▲
Aciers coulés	□	□	▲	□	□	■	□	■	■	■	■	■	□
Aciers spéciaux	□	□	□	□	□	□	□	□	■	■	■	■	□
Aciers inoxydables	■	▲	□	■	□	■	□	■	■	■	■	■	▲
Titane	■	□	□	□	▲	□	■	□	▲	□	□	▲	■

- bonne soudabilité
- ▲ soudabilité
- soudure délicate
- impossible ou non essayé

2.6 MACHINES A SOUDER

En général, une machine de soudage par friction se caractérise en première approche par l'effort maximal qu'elle peut produire au forgeage. Ce paramètre fournit, en effet, une indication de la taille de machine ainsi que de sa capacité. On admet que, en soudage d'aciers peu alliés, l'effort unitaire moyen de forgeage est de 8 à 12 daN/mm² (tableau 2.2).

Cela permet de déduire :

- la section maximale pleine ou tubulaire soudable par la machine ;
- la puissance et la vitesse de broche pour une section pleine correspondante.

Le tableau 2.6 fournit les caractéristiques de quelques machines à souder par friction pilotée. Il existe actuellement sur le marché des équipements allant de quelques centaines de newtons à 200 000 daN et plus.

Tableau 2.6

Caractéristiques de quelques machines à souder par friction pilotée [11]

Effort maximal en forgeage (daN)	3000	6000	12000	25000	50000	100000	200000
Capacité maximale sur acier mi-dur (*) (mm ²)	200	400	800	1600	3200	6400	13000
Diamètre de barre correspondant (mm)	16	22,5	32	46	64	90	129
Vitesse de rotation nominale de broche (**) (tr/min)	3000 et 1500	3000 et 1500	2200 et 1100	1460 et 730	1200 et 900	1000 et 500	350 et 700
Puissance du moteur de broche (kW)	11	14,7	22	29,5	51,5	73,6	89

(*) La capacité minimale (effort minimal et vitesse maximale) peut être 1/10 ou 1/20 de la capacité maximale.

(**) Sur machines de production, la vitesse est ajustable par modification du rapport d'entraînement.

On considère :

- les machines standards d'emploi général ;
- les machines spécifiques adaptées à un travail particulier.

Dans chacun de ces domaines, les machines peuvent se distinguer par leur cinématique de principe et par la disposition relative de leurs éléments.

Une machine à friction combine essentiellement une broche tournante et une commande d'avance produisant un effort, l'ensemble étant supporté par le bâti.

Dans la figure 2.5 on représente un exemple d'une machine de soudage par friction.

**EXEMPLE DE CARACTERISTIQUES D'UNE
MACHINE DE SOUDAGE PAR FRICTION,
CODE ISO : 42**

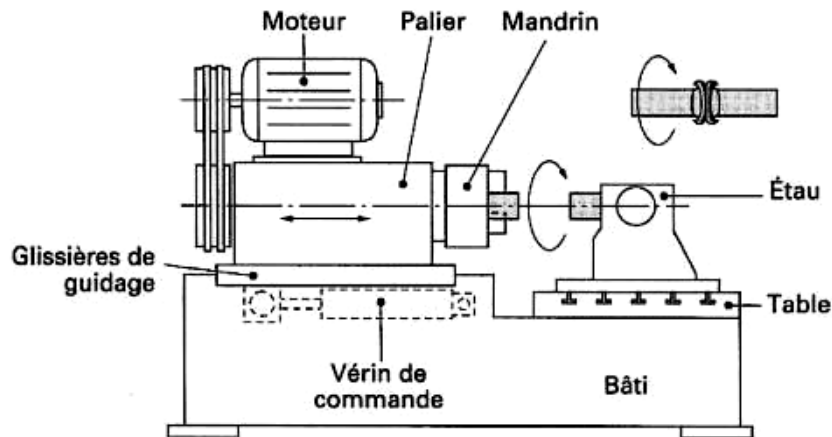


Figure 2.6 Exemple d'une machine de soudage par friction.

Type d'opération	Automatique
Équipement	Moteur de mise en rotation, frein, système de mise en pression axiale, boîtier de contrôle, mors de prise pièces.
Coût de l'équipement	Variable 5 000 euros.

Caractéristiques du procédé :

Vitesse de rotation	50 à 80 000 t/min
Pression axiale	15 à 400 MN/m ²
Gamme de diamètre	1 à 150 mm
Durée de cycle	5 à 500 s
Mise en œuvre	Machine standard à raccorder, outillage spécifique
Portabilité	Généralement fixe en atelier

2.7 AVANTAGES DU SOUDAGE PAR FRICTION

Les avantages du soudage par friction sont :

- Assemblages de haute qualité, avec une bonne structure métallurgique, car le matériau n'est pas porté à fusion.
- Pas de préparation spéciale des pièces.
- Procédé de soudage beaucoup plus rapide que les procédés de soudage conventionnels.
- Peu de déformations après soudage en raison du bref temps de soudage et de la faible température maximale.
- Possibilité de souder des pièces de sections très différentes à condition de prendre certaines mesures de précaution.
- **Economique** : le soudage par friction permet de réaliser des économies sur le coût des pièces soudées (économie en temps, en matériau et en salaire).
- Les matériaux dissemblables ne pouvant être soudés avec d'autres procédés, peuvent être soudés avec le procédé par friction, comme l'aluminium ou le cuivre sur l'acier.
- Très bonne reproductibilité et possibilités d'automatisation.
- Pas de nécessité de métaux d'apport.
- **Ecologique** : pas de gaz de protection, fumées ou rayonnements.
- Pas de nécessité de soudeurs agréés.

2.8 LIMITES DU SOUDAGE PAR FRICTION

- L'alignement des pièces à souder est critique pour la réalisation d'une friction et d'un chauffage uniformes.
- Les ébarbures doivent être éliminées mécaniquement.
- Coût d'investissement de l'appareillage.
- Les techniques de contrôle non destructif ne sont pas encore appliquées sur les soudures par friction. Le risque existe donc que ces techniques ne puissent pas détecter tous les défauts de soudage. La surveillance des paramètres du processus est probablement la meilleure méthode pour le contrôle de qualité.

-
- Le soudage par friction ne peut pas être appliqué sur des matériaux ayant un très faible coefficient de friction comme la fonte grise, le bronze et le laiton à forte teneur en plomb (les particules de graphite agissent comme des lubrifiants et contrecarrent l'échauffement).
 - Lors du soudage de très grandes sections, la capacité de la machine peut constituer une limite.

2.9 APPLICATIONS DU SOUDAGE PAR FRICTION

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.

- Les domaines d'application sont entre autres l'industrie aéronautique et la pétrochimie (soudage de brides ou de tubes de forage). Le soudage par friction est fortement utilisé lors de la production de pièces pour camions et engins agricoles (p.ex. des tiges à des yeux de tige).
- Une nette économie peut être réalisée en remplaçant des pièces complètement forgées par de plus petites pièces forgées soudées à des produits standard comme des barres ou des tubes.
- Le soudage par friction est également utilisé pour la production de pièces dans l'industrie automobile comme des stabilisateurs, des engrenages (**figure 8**), des soupapes, des arbres de transmission, ...
- 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.

Exemples :

Assemblage aluminium-acier (figure 2.6) ou titane-cuivre. Cette possibilité permet de faire des économies en ayant une conception judicieuse de telles pièces.

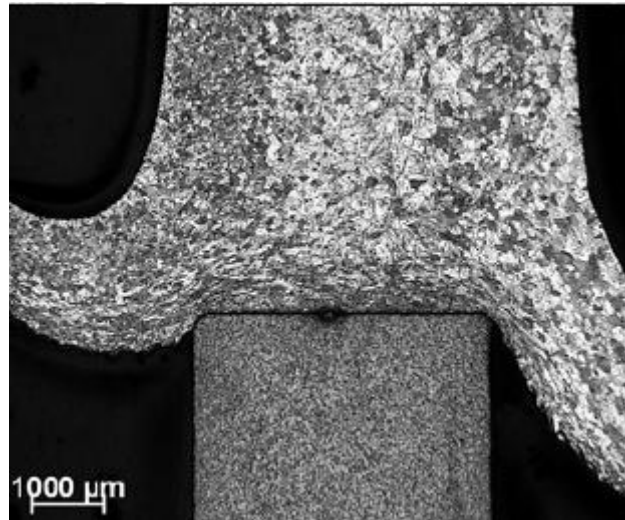


Figure 2.7 Exemple d'assemblage aluminium-acier.

Un exemple est la conception d'une soupape de moteur à combustion. La tête en matériau réfractaire est soudée à la tige en matériau résistant à l'usure.

Chapitre 3

Partie expérimentale

3.1 PROBLEMATIQUE

Le but de ce travail est de réaliser un soudage par friction sur des éprouvettes normalisées en acier et en aluminium, ensuite on les soumet à des essais divers au laboratoire. En fin on compare les résultats obtenus.

Le processus est le suivant :

Etape 1 : Usinage

- Usinage de 3 éprouvettes en acier A60.
- Usinage de 3 éprouvettes en aluminium A9.
- Usinage de 3 éprouvettes mixtes : acier - aluminium.

Etape 2 : Soudage

- Soudage de 3 éprouvettes (acier/acier).
- Soudage de 3 éprouvettes (aluminium/aluminium).
- Soudage de 3 éprouvettes (acier/aluminium).

Etape 3 : Essais de rigidité

- Essai d'ultrason.
- Essai de traction.
- Essai de la micro dureté
- Examen métallographique.

Etape 4 : Résultats expérimentaux

- Comparaison des résultats.

3.2 MOYENS MISES EN ŒUVRE

3.2.1 Matière d'œuvre

- Lot de barreaux d'acier A60.
- Lot de barreaux d'aluminium A9.

3.2.2 Moyens d'usinage

Tour parallèle à charioter et à fileter modèle :E3N-01; équipé de tous les outils nécessaires à l'usinage des éprouvettes comme le montre la figure 3.1.



Figure 3.1 Le tour E3N-01 utilisé pour le soudage par friction.

Les données d'orientation sur la machine sont les suivantes :[12]

Espace machine :	Tour parallèle universel
Constructeur :	TST groupe d'entreprise, TOS Trenčín
Type :	E3N-03
Longueur totale de la machine (mm) :	1000 × 1500 × 2000
Largeur totale (mm) :	1100 × 1100 × 1100
Hauteur totale (mm) :	1410 × 1435 × 1460
Poids de la machine :	1620 kg
Puissance absorbée :	6,6 kW – 50 Hz

3.2.3 Moyens d'essai et de contrôle

- Machine hydraulique d'essais de traction modèle : WP 310 – GUNT HAMBURG d'une capacité de 50 kN; équipée de tous les moyens nécessaires à l'essai des éprouvettes. La figure 3.2 montre la machine d'essai de traction **WP 310**.



Figure 3.2 La machine **WP 310** utilisée pour l'essai de traction.

Les caractéristiques générales de la machine sont les suivantes : [13]

L×I×h :	1000 × 750 × 1740 mm
Force d'essai max :	± 50 kN
Course max du piston :	150 mm
Pression max du système :	175 bar
Vitesse de déplacement, réglable :	0 – 425 mm/min
Force d'essai, réglable :	0 – 50 kN
Puissance motrice :	0,55 kW
Principe de mesure :	Jauges de contrainte en pont intégral
Principe de mesure :	Potentiomètre linéaire
Plage de mesure :	0 – 150 mm
Capacité de serrage pour éprouvettes rondes :	Diamètre 5 – 15 mm
Capacité de serrage pour éprouvettes plates :	Epaisseur 0 – 10 mm

-
- Appareil d'essai d'ultrason modèle : D10+ ; équipé de tous les moyens nécessaires à l'essai des éprouvettes (voir figure 3.3).



Figure 3.3 Appareil d'essai d'ultrason D10+.

- Microscope optique pour l'examen métallographique ; équipé de tous les moyens nécessaires à l'examen des éprouvettes (voir figure 3.4).



Figure 3.4 Microscope optique pour l'examen métallographique.

- Appareil d'essai de la micro dureté ; équipé de tous les moyens nécessaires à l'essai des éprouvettes (voir figure 3.5).



Figure 3.5 Appareil de mesure de la micro dureté.

3.3 DEROULEMENT DE REALISATION

3.3.1 Présentation des éprouvettes

a- Dimensions : Les éprouvettes sont normalisées et ont les dimensions représentées dans la figure 3.6.

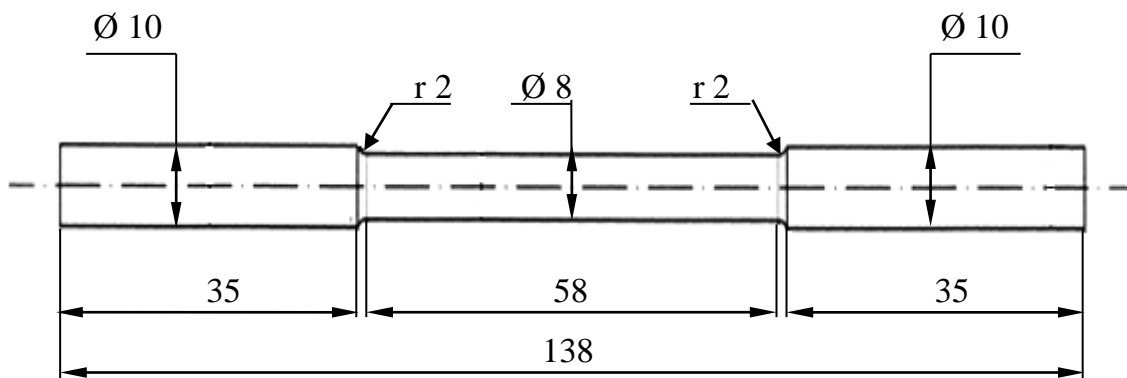


Figure 3.5 Eprouvette de soudage par friction avant découpage au centre.

b- Matériaux : On a choisi deux types de matériaux pour les éprouvettes.

- Eprouvettes en acier non allié de construction, d'usage général de nuance A60. ($0,05 \% < C \leq 2 \%$), ayants les caractéristiques mécaniques suivantes : [15]

Nuance	$R_e(N/mm^2)$	$R_m(N/mm^2)$	A%	Dureté
A 60	335	590-710	14	HV = 171-204

- Eprouvettes en aluminium de nuance A9 (% Al 99,99), ayants les caractéristiques suivantes : [15]

Nuance	$R_e(N/mm^2)$	$R_m(N/mm^2)$	A%	Dureté
A9	22	50	48	HV = 15

3.3.2 Usinage des éprouvettes

L'usinage des éprouvettes a été réalisé comme suit :

Phase 10 : obtention de brute

Phase 20 : dressage des faces

Phase 30 : chariotage $\varnothing 10$

Phase 40 : chariotage $\varnothing 8$

Phase 50 : contrôle finale des dimensions

La figure 3.7 montre l'opération d'usinage d'une éprouvette.



Figure 3.7 Usinage d'une éprouvette.

3.3.3 Soudage des éprouvettes

- ❖ Pour notre réalisation nous avons choisi le **soudage par friction avec rotation** pour les raisons suivantes :
 - Possibilité de réalisation sur le tour parallèle E3N-01.
 - Commodité d'utilisation.
 - Moins couteux.
- ❖ Pour chaque lot de pièces, on a appliqué les régimes de rotation suivants :
 - Eprouvette 1 : $N = 900$ tr/min ;
 - Eprouvette 2 : $N = 1250$ tr/min ;
 - Eprouvette 3 : $N = 1800$ tr/min ;
- ❖ Le temps de forgeage est constant pour toutes les éprouvettes :

Remarque : La seule variante ici c'est la vitesse de rotation pour le soudage.

a- Processus

Le principe du soudage par friction est présenté à la figure.3.8 et 3.9 suivantes. Supposons que deux axes ou deux tubes doivent être soudés bout à bout. Une des pièces est bloquée, tandis que l'autre est mise en rotation contre l'autre à une vitesse constante à l'aide d'un moteur (soudage par friction en continu). Quand les deux pièces sont mises en contact l'une avec l'autre, les forces de friction provoquent un couple de résistance.

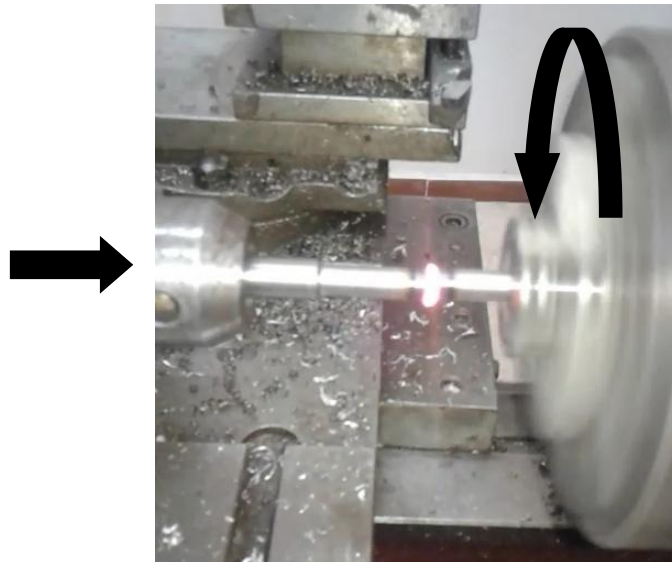


Figure 3.8 Les deux pièces sont clamées et une des pièces est mise en rotation.

L'énergie qui en résulte, est transformée en chaleur dans la surface de contact. La chaleur générée augmente la température en un court d'un laps de temps jusqu'à la température de soudage (température de forgeage). La pièce en rotation est ensuite détachée du mandrin, freinée jusqu'à l'arrêt total (voir figure 3.9).

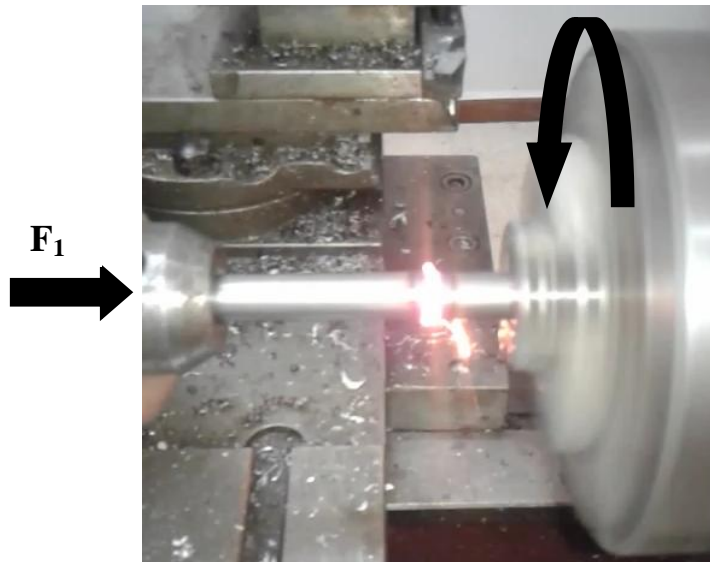


Figure 3.9 Les pièces sont mises en contact l'une de l'autre avec la force friction F_1 : la température augmente dans la surface de contact.

Une force de forgeage axiale est exercée afin de réaliser une soudure entre les deux pièces. Durant la phase d'échauffement et la phase de soudage, une quantité de métal

plastique est refoulée, sous l'action de la force de pression axiale de telle sorte que l'ébarbure caractéristique du soudage par friction se forme (voir figure 3.10).

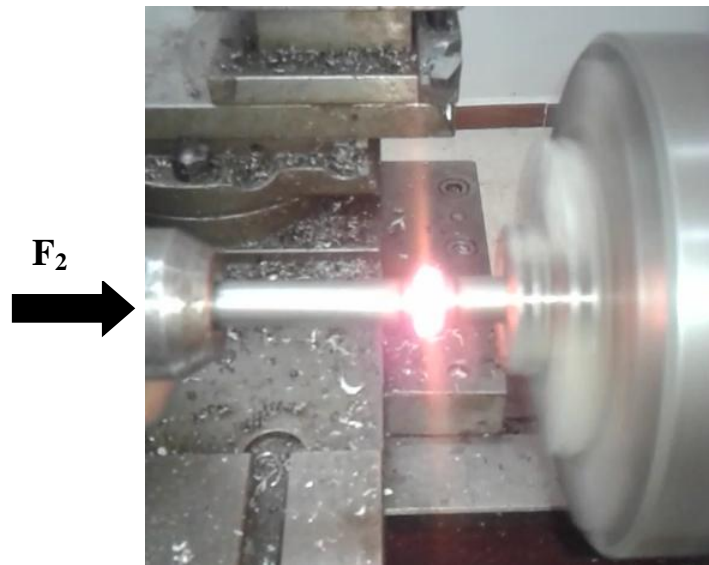


Figure3.10 La partie en rotation est freinée et la force de forgeage F_2 est exercée.

b- Classement des lots et conditions de soudage

Les lots de pièces sont classés comme suit

Lot n° 1 : acier / acier

Les conditions sont les suivantes :

- ✓ Matériaux : **A 60**
- ✓ Machine de réalisation : **Tour E3N-01**
- ✓ Mode de sollicitation : **Friction rotative**
- ✓ Nombre de tours successifs : **900 tr/min ; 1250 tr/min ; 1800 tr/min.**
- ✓ Nombre d'éprouvettes : **3**

Lot n° 2 : aluminium / aluminium

Les conditions sont les suivantes :

- ✓ Matériaux : **A 9**
- ✓ Machine de réalisation : **Tour E3N-01**
- ✓ Mode de sollicitation : **Friction rotative**

-
- ✓ Nombre de tours successifs : **900 tr/min ; 1250 tr/min ; 1800 tr/min.**
 - ✓ Nombre d'éprouvettes : **3**

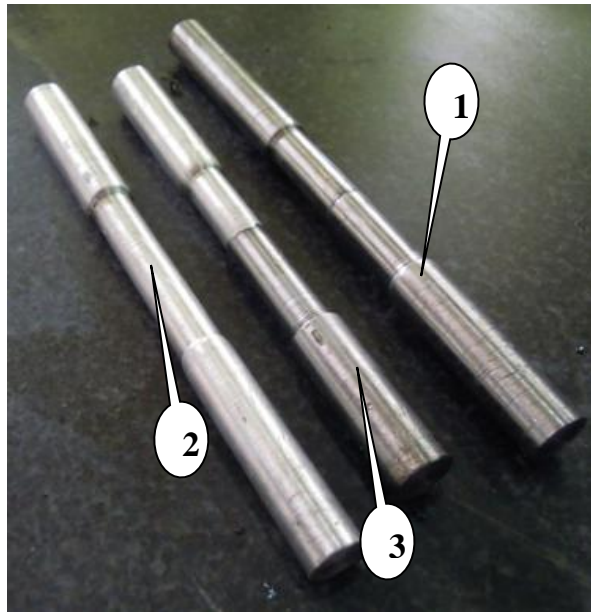
Lot n° 3 : acier / aluminium

Les conditions sont les suivantes :

- ✓ Matériaux : **A 60 et A 9**
- ✓ Machine de réalisation : **Tour E3N-01**
- ✓ Mode de sollicitation : **Friction rotative**
- ✓ Nombre de tours successifs : **900 tr/min ; 1250 tr/min ; 1800 tr/min.**
- ✓ Nombre d'éprouvettes : **3**

c- Eprouvettes obtenues

La figure 3.11 représente les éprouvettes obtenues après soudées.



Légende :

1. Eprouvettes soudées (acier/acier)
2. Eprouvettes soudées (aluminium/aluminium)
3. Eprouvettes soudées (acier/aluminium)

Figure 3.11 Eprouvettes soudées.

3.4 ESSAIS DES EPROUVETTES SOUDEES

3.4.1 L'essai d'ultrason

Le contrôle par ultrasons est basé sur la transmission, la réflexion et l'absorption d'une onde ultrasonore se propageant dans la pièce à contrôler. Le train d'onde émis se réfléchit dans le fond de la pièce et sur les défauts puis revient vers le transducteur (qui joue souvent le rôle d'émetteur et de récepteur).

Pour cela nous avons utilisé l'appareil d'essai d'ultrason (voir figures 3.3 et 3.12).

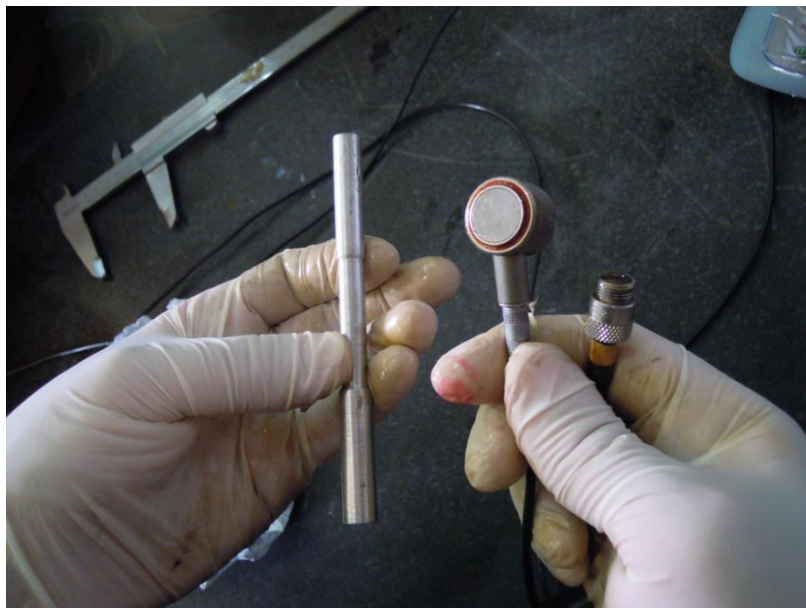


Figure 3.12 Essai d'ultrason.

Résultats :

Après interprétation des signaux, nous avons constaté que les soudures étaient bonnes. En effet l'onde émise par le transmetteur n'a pas changé n'ayant rencontré aucun défaut revient avec le signal initiale .

3.4.2 L'essai de traction

L'essai de traction consiste à soumettre chaque éprouvette soudée à un effort progressif et croissant jusqu'à la rupture de la pièce d'essai.

Nous avons réalisé cet essai sur la machine **WP 310** utilisée pour l'essai de traction (voir figure 3.2).

Le domaine de notre essai est la limite élastique (R_e): L'effort de traction est tel que tout dépassement de cet effort de traction a pour effet de provoquer des déformations résiduelles irréversibles dans la matière qui l'a subi.

Prélèvement de résultats :

Ces résultats numériques ont été donnés par le logiciel intégré dans la machine d'essai.

Vue l'impossibilité d'avoir un tracé précis des courbes, nous avons utilisé le logiciel Excel pour tracer les courbes de traction suite à ses résultats.

F : Force (N)

σ : Contraint (MPa = N/mm²)

$$\Rightarrow \sigma = \frac{F}{S_0} = \frac{4 \times F}{\pi \times (d_0^2)}$$

Avec : $d_0 = 8 \text{ mm}$

ΔL : Elongation (mm)

ε : Déformation

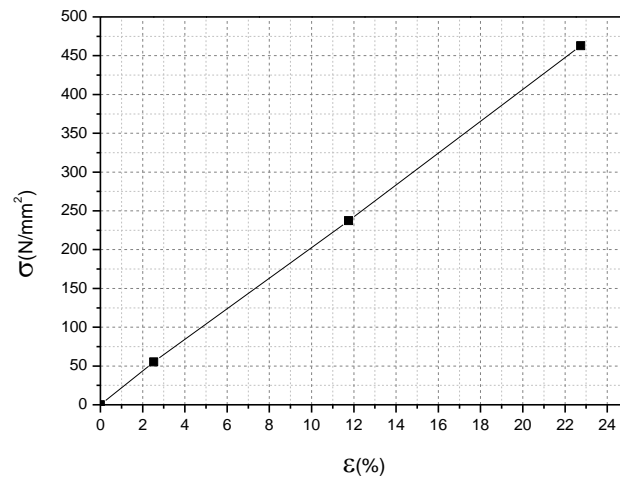
$$\Rightarrow \varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100$$

Avec : $L = 138 \text{ mm}$

Lot n° 1 : acier / acier

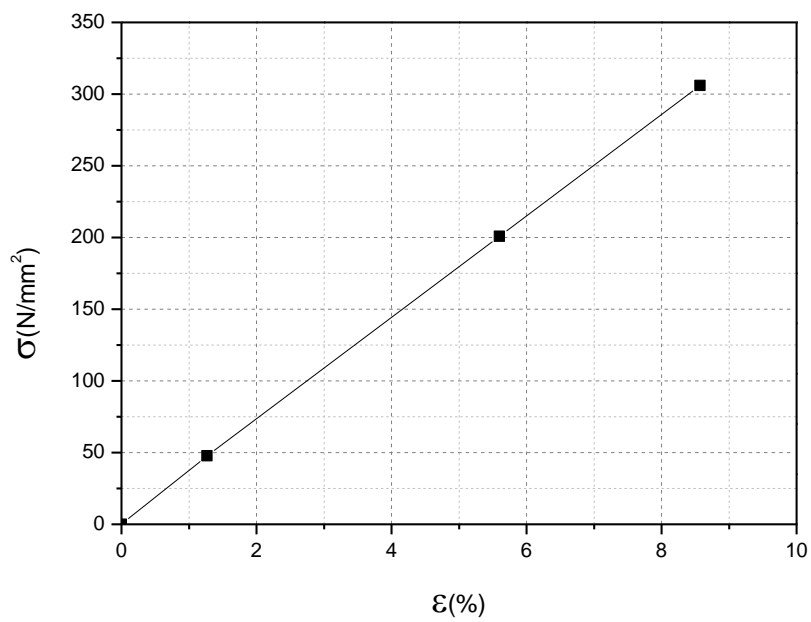
Eprouvette n° : 1

- Rotation de la broche : **N = 900 tr/min**
- Limite élastique : **$R_e = 462,70 \text{ N/mm}^2$**



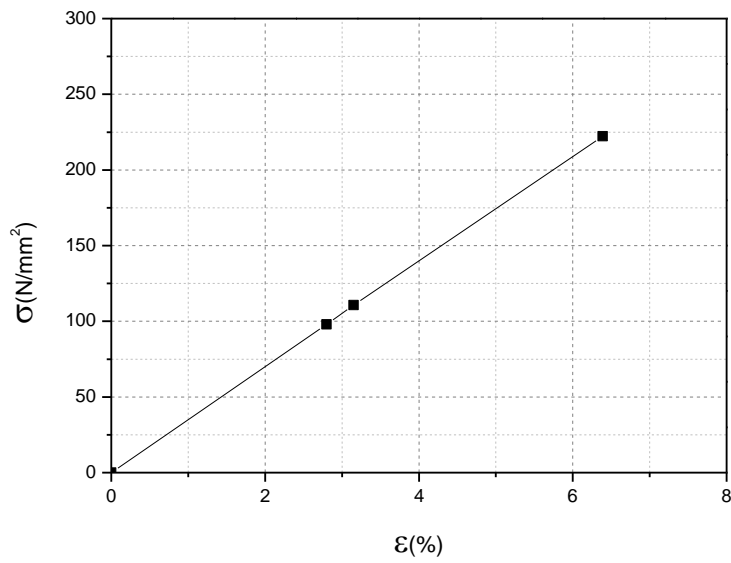
Eprouvette n° : 2

- Rotation de la broche : **N = 1250 tr/min**
- Limite élastique : **Re = 305,98 N/mm²**



Eprouvette n° : 3

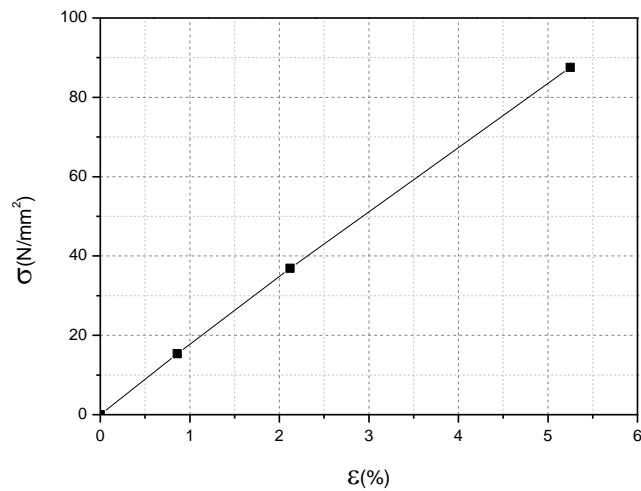
- Rotation de la broche : **N = 1800 tr/min**
- Limite élastique : **Re = 222,22 N/mm²**



Lot n° 2 :aluminium / aluminium

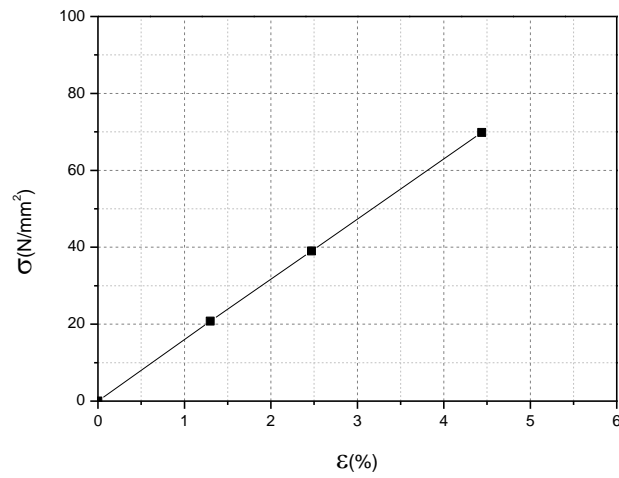
Eprouvette n° : 1

- Rotation de la broche : **N =900 tr/min**
- Limite élastique : **Re = 87,56 N/mm²**



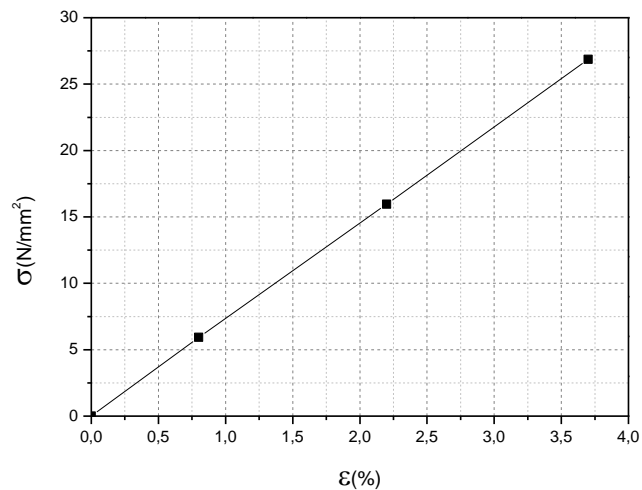
Eprouvette n° : 2

- Rotation de la broche : **N =1250 tr/min**
- Limite élastique : **Re = 69,83 N/mm²**



Eprouvette n° : 3

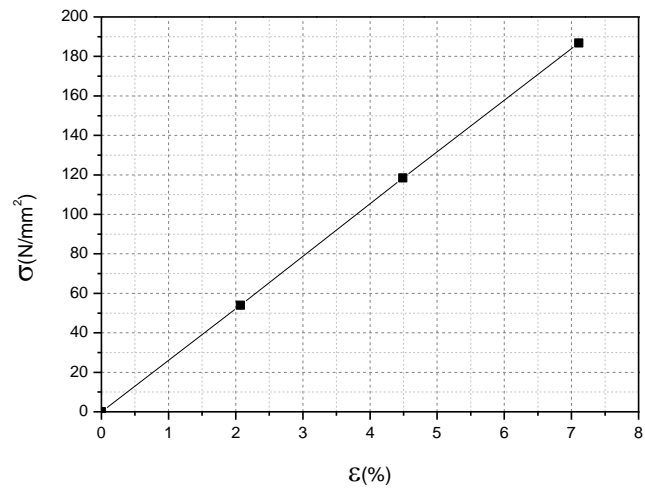
- Rotation de la broche : **N = 1800 tr/min**
- Limite élastique : **Re = 26,86 N/mm²**



Lot n° 3 : acier/ aluminium

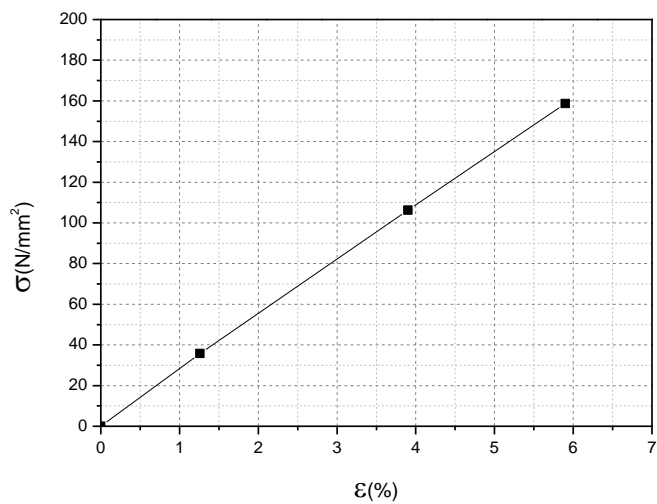
Eprouvette n° : 1

- Rotation de la broche : **N = 900 tr/min**
- Limite élastique : **Re = 186,81 N/mm²**



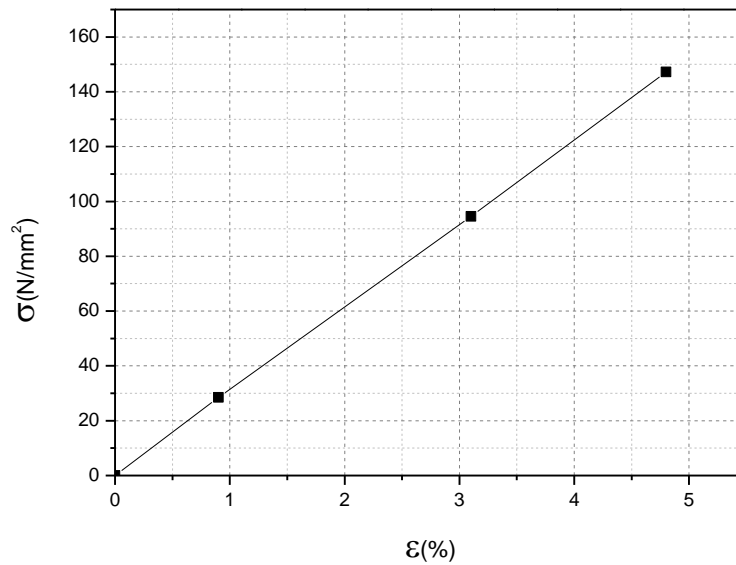
Eprouvette n° : 2

- Rotation de la broche : **N = 1250 tr/min**
- Limite élastique : **Re = 158,65 N/mm^2**



Eprouvette n° : 3

- Rotation de la broche : **N = 1800 tr/min**
- Limite élastique : **Re = 147,17 N/mm^2**



Interprétation de résultats :

L'augmentation de la vitesse de rotation au cours du soudage produit :

- La diminution de la résistance élastique (R_e) des pièces soudées. Cette diminution peut être exprimée par la diminution du frottement.
- La diminution de l'allongement unitaire (ϵ).
- L'augmentation de la vitesse réduire la résistance des joints soudés.
- C'est en comparant les trois combinaisons de matériaux, qu'on peut dire que le soudage ;

Acier/acier : présente une bonne résistance,

Acier/aluminium : présente une résistance moyenne

Aluminium/ Aluminium : présente une faible résistance,

Cela peut être traduit par la résistance de chaque matériau.

3.4.3 L'essai de la micro dureté :

Des profils de micro dureté à mi- épaisseur des joints, perpendiculairement à l'axe de soudage sont effectués. Les prises de mesures s'effectuent tous les millimètres, une attaque au Nital, est un mélange d'acide nitrique et d'alcool, généralement 5 ml /100 ml

permet de distinguer partiellement les différentes microstructures des couches dans le cordon de soudure.

Soudage Acier- Aluminium

Distance	Al			Acier		
	V = 900 rpm	V = 1250 rpm	V = 1800 rpm	V = 900 rpm	V = 1250 rpm	V = 1800 rpm
0	208,3	170,1	120	///////	///////	///////
0,5	73,8	64,4	59,1	276	249	204
1	64,2	63,9	61,1	214	234	192
1,5	64,9	57,5	62,2	158	186	183
2	61,9	61,3	73,4	160	167	180
2,5	56,8	66,1	65,4	156	159	164
3	64,4	68,8	60,3	164	164	158
4	58,1	69	57,7	158	152	155
5	63,7	69,8	62,4	152	163	161

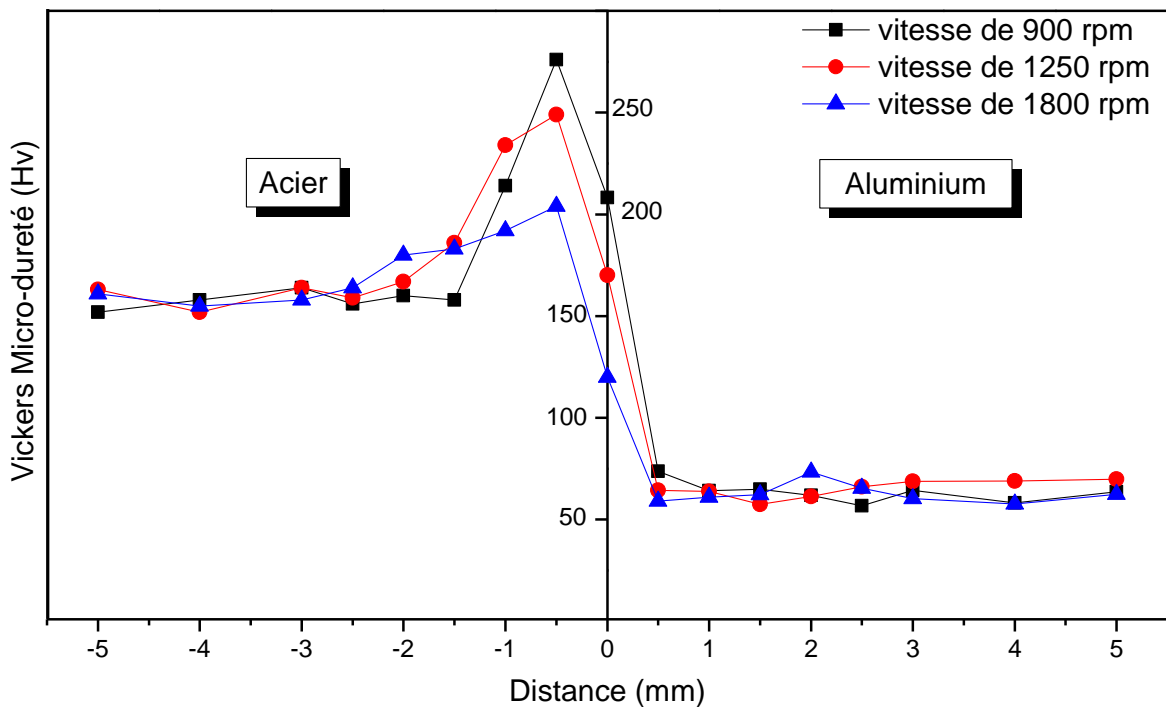


Figure 3.13 : Courbe des valeurs de micro dureté du Soudage Acier- Aluminium

Soudage Acier- Acier

Distance	Acier (1)			Acier (2)		
	V = 900 tr/min	V = 1250 tr/min	V = 1800 tr/min	V = 900 tr/min	V = 1250 tr/min	V = 1800 tr/min
0	333,9	311,6	287,4	//////	//////	//////
0,5	294,6	286,8	285	309,9	305,55	300,2
1	293,6	281,3	282,4	304,3	300,5	296,7
1,5	272,8	263,9	255	304,3	295,35	286,4
2	250,8	259,75	230	292,5	280,35	268,2
2,5	250,8	247,75	240	248,4	257,3	265
3	262,8	245,4	256,7	243,6	256,7	263,7
4	242,5	242,45	253	240,1	253,65	261
5	240,9	240,4	250	241,8	250,55	272,8

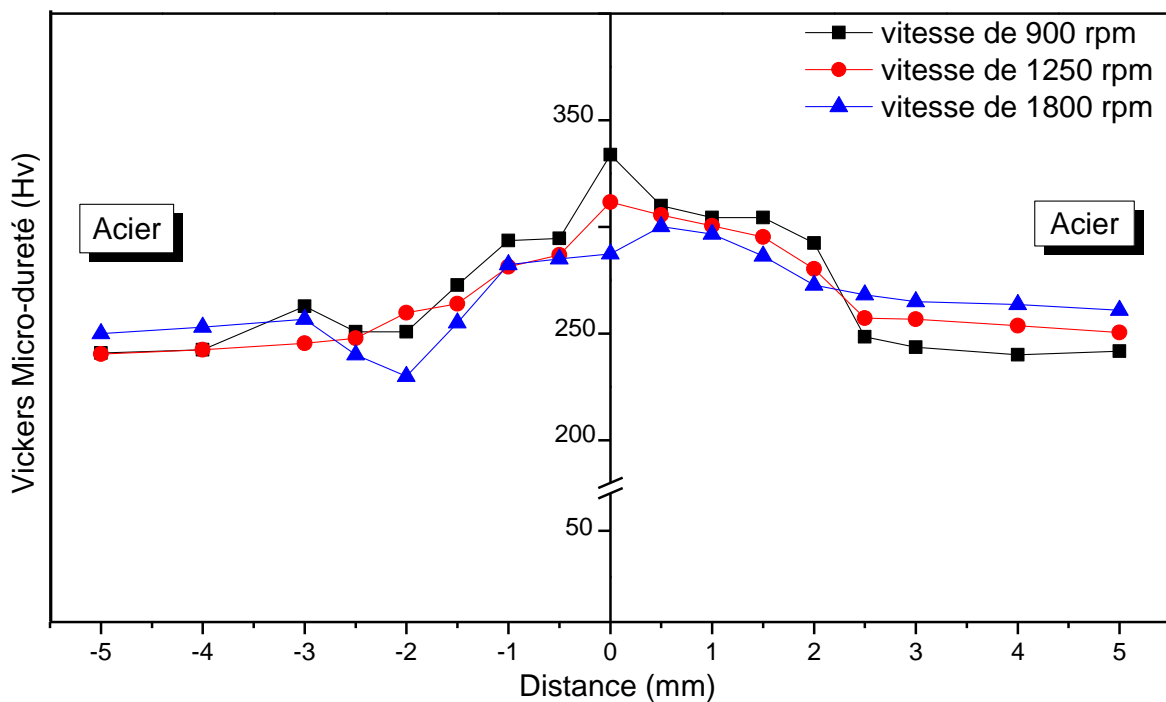


Figure 3.14 Courbe des valeurs de micro dureté du Soudage Acier- Acier

Soudage Aluminium- Aluminium

Distance	Al (1)			Al (2)		
	V = 900 tr/min	V = 1250 tr/min	V = 1800 tr/min	V = 900 tr/min	V = 1250 tr/min	V = 1800 tr/min
0	//////	//////	//////	110,4	93,7	84,4
0,5	73	68,7	69,2	73,8	64,4	59,1
1	63	71,5	67,7	64,2	63,9	61,1
1,5	66,1	69	62,9	64,9	57,5	62,2
2	58,4	64,9	63,7	61,9	61,3	73,4
2,5	67,2	65,8	64	56,8	66,1	65,4
3	61,6	60,8	64,7	64,4	68,8	60,3
4	66,5	68,3	63,4	58,1	69	57,7
5	63,5	61,1	63,9	63,7	69,8	62,4

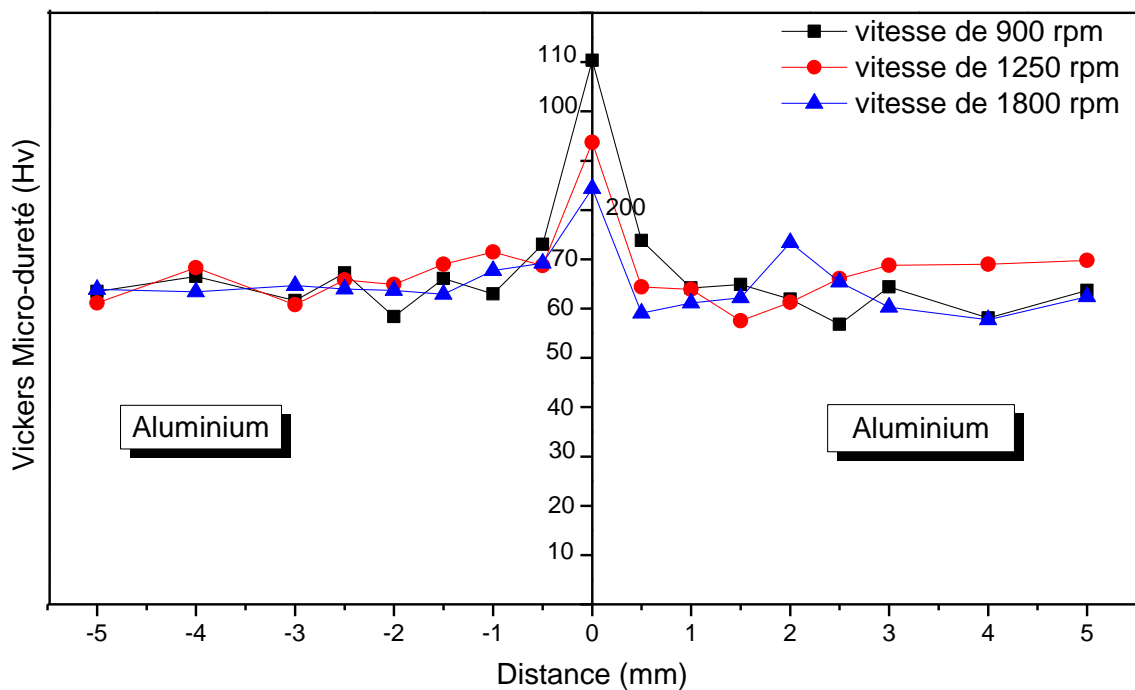


Figure 3.15 Courbe des valeurs de micro dureté du Soudage Aluminium-Aluminium

Remarque :

On remarque d'après les figures précédentes (figure 3.13- 3.14 et 3.15) que pour les différents assemblages, la dureté est grande dans la zone fondue puis diminue graduellement puis devient constante en allant vers le matériau de base. Cela peut être expliqué par l'échauffement important du matériau dans les couches fusion de la

matière puis trempe superficielle de la couche contiguë. Ces figures montrent aussi que la dureté dans les coches diminue avec l'augmentation de vitesse de rotation.

3.4.4 L'examen métallographique

Cet examen permet de révéler la structure métallographique d'une éprouvette soudée prise en travers de la soudure.

Pour cela, nous avons utilisé le microscope présenté dans la figure 3.4, et nous avons suivi les étapes suivantes :

1. La section est coupée avec une meule à eau pour éviter les échauffements si elle était coupée à sec,(il faudra usiner les faces).
2. Puis polie graduellement avec un touret sous eau et des disques abrasifs de granulométrie P120 à P1220, puis de feutre avec un ajout de des pâtes diamantées.
3. Un réactif chimique (nital) est appliqué sur la surface polie pour permettre l'observation des différentes structures métallographiques

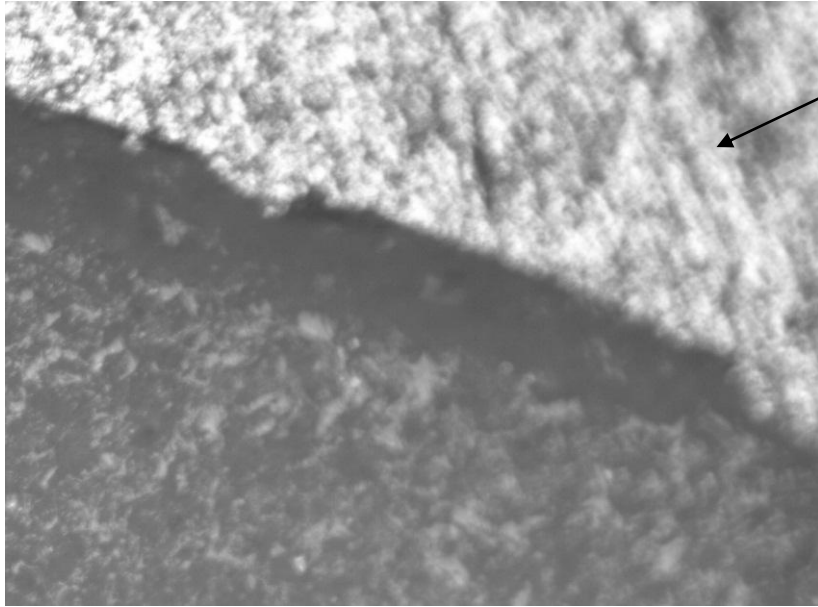
Résultats :

Cet examen nous a permis de mettre en évidence que le soudage ne présente pas de défauts et nous pouvons distinguer entre les structures dans la zone de soudage :

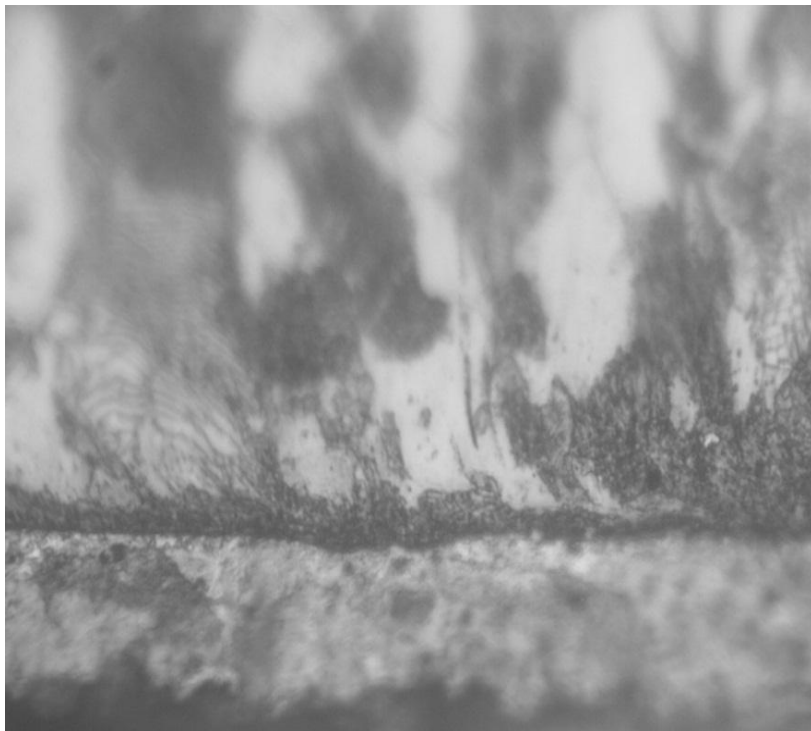
A la jonction deux matériaux soudés, nous observons deux couches une couche fondue et une couche perturbée thermiquement à grains fins puis le matériau de base,

Les mesures de micro dureté montrent bien cette différence de couche.

Les figures 3.16 et 3.17 montrent les différentes structures métallographiques obtenues. Et la différence des couches est bien lisible voir la structure des grains dans la zone de soudage



Acier/aluminium (x 200)



(a) Acier/acier (x 200)

Figure 3.16 structures métallographiques obtenue lors du soudage de différentes éprouvettes.



Aluminium /Aluminium (x 200)

Figure 3.17 Structures métallographiques obtenues.

CONCLUSION

Ce présent mémoire est consacré à l'étude du soudage par friction et le présente une façon simple et faisable pour réaliser le procédé sur tour parallèle.

Nous avons a montré l'importance de la préparation des pièces à souder dont les surfaces doivent êtres bien nettoyées, et les réglages nécessaires avant le soudage afin d'avoir une bonne soudure.

Le but était d'étudier l'influence du changement des paramètres de soudage (la force de contact, la vitesse relative, et la durée de frottement) sur la rigidité des pièces soudées afin d'arriver d'introduire ce procédé dans nos Atelier même avec des moyens simples.

Tous les résultats des essais et examens des éprouvettes étaient obtenus à partir des logiciels intégrés dans les machines et appareils qu'on a utilisés.

Cette étude a montré, qu'il est nécessaire de réduire la vitesse de rotation pour augmenter le frottement afin d'atteindre la température dans la surface de contact sans atteindre la température de fusion.

Nous n'avons pas pu contrôler la force de contact pour le soudage, et la force de forgeage pour la formation de bourrelet par ce que nous nous ne disposons pas d'une machine spéciale pour le soudage par friction.

Enfin, cette étude pourrait être considérée comme une simple introduction à l'étude de ce type de soudage, et il peut être utilisé comme un nouveau procédé d'assemblage dans les TP de soudage et en faire profiter les étudiants de cette manipulation avec tous les avantages constructifs de ce type de soudage.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Dr. Ir. KOEN FAES, *Le soudage par friction, un procédé de soudage multiple et innovateur* – INFO SOUDAGE.
- [2] Klas. WEMAN, *Procédés de soudage*, Dunod, Paris 2012.
- [3] Camille Routhier & Gilles Desjardins. WEMAN, *Soudage et assemblage-soudage – Guide d’auto-apprentissage*. Comité sectoriel de la main-d’œuvre dans la fabrication métallique industrielle (CSMOFMI), Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2010
- [4] COURS PDF, *Soudage – préparation – contrôle*.
- [5] COURS PDF, *Le soudage*.
- [6] Luc. Fairon, *Introduction au soudage* – Technifutur ASBL.
- [7] Paolo. Vannuci, *Cours de mécanique générale*, ISAT- Université de Bourgogne – Nevers , année universitaire 2002-2003.
- [8] G.R. NICOLET, *Conception et calcul des éléments de machines – Volume.1*, Gaston Nicolet CH-1700 Fribourg 2006.
- [9] Lucien. VIGNARDET, *Soudage à la flamme*, Techniques de l’Ingénieur, Traité génie mécanique – Volume B7 710.
- [10] Bernard. PALISSY, *Module soudage* – Lycée des Métiers de l’Acier, De l’Aluminium, et des Services. Académie ROUEN.
- [11] R. CAZE, *Le soudage par friction*, Techniques de l’Ingénieur, Traité génie mécanique – Volume B7 745.

-
- [12]** Manuel d'instructions du tour parallèle E3N-01, Atelier de mécanique, Université de M'sila.
- [13]** Manuel d'utilisation de la machine d'essai universelle 50 kN gunt HAMBURG, Laboratoire de résistance des matériaux, Université de M'sila.
- [14]** Notice d'utilisation de la machine d'essai de résilience PW 30/15, WOLPERT PROBAT, Laboratoire de résistance des matériaux, Université de M'sila.
- [15]** COLLECTION H. LENGEOT & L. JOURDAN, *Construction industrielle*- Edition Dunod © Bordas Paris 1982.

Résumé

Ce travail porte sur l'étude du procédé de soudage par friction. Ce type de soudage a de nombreuses applications dans des différentes branches de l'industrie. Les avantages de ce procédé sont que des assemblages de très haute qualité peuvent être réalisés, que ce procédé est beaucoup plus rapide que les procédés conventionnels et qu'il peut être complètement automatisé de sorte qu'une qualité constante est garantie.

Dans son concept physique, 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.

C'est dans ce cadre que nous avons voulu introduire ce procédé dans nos Ateliers, même si les moyens mis en œuvre sont chers dans un but de créer une harmonisation des procédés industriels.

La deuxième phase de l'étude a consisté à réaliser des éprouvettes normalisées en acier de nuance A60 et en aluminium de nuance Al9 avec des moyens simples disponibles à notre Atelier. Ensuite nous avons fait les essais nécessaires de rigidité des pièces soudées.

Mots clés : Soudage par friction, force de contact, rigidité des pièces soudées.

ملخص:

هذا العمل يتطرق إلى دراسة أسلوب التلحيم بواسطة الاحتكاك. هذا النوع من التلحيم لديه تطبيقات متعددة في مختلف فروع الصناعة. فوائد هذا الأسلوب تتمثل في أن التجميعات ذات الجودة العالية يمكن إنجازها، و هذا الأسلوب يعتبر سريعا إذا ما قارناه بالأساليب الاصطناعية المعروفة كما يمكن تأليته هذا مع ضمان جودة ثابتة. في مظهره الفيزيائي، الاحتكاك يولد تسخيناً نسبياً بسيطاً شريطة أن تكون الأسطح المراد تلحيمها سليمة و نظيفة. عن طريق الحركة النسبية، الشوائب و الأكاسيد تتلاشى من منطقة التلحيم. العوامل الواجب مراقبتها بالنسبة لجميع الأساليب المعتمدة على الاحتكاك هي قوة التلامس، السرعة النسبية و زمن الاحتكاك. في هذا الإطار ارتأينا إدخال هذا الأسلوب في ورشتنا، حتى و إن كانت الإمكانيات المرتبطة به باهظة من أجل هدف واحد هو خلق تناغم بين الأساليب الصناعية الجزء الثاني من الدراسة خصص لإنجاز عينات مقننة من الفولاذ A60 و الألمنيوم Al9 بواسطة إمكانيات بسيطة متوفرة في ورشتنا. ثم بعدها قمنا بإجراء اختبارات لازمة لدراسة مدى متانة القطع الملحمة.

كلمات مفاتيح: التلحيم بالاحتكاك، قوة التلامس، متانة القطع الملحمة.