



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département de Génie Mécanique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologie
Génie Mécanique
Construction Mécanique

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :
Daïra Mohamed Elhadi

Le : dimanche 27 juin 2021

Caractérisation mécanique de la zone soudée par friction rotatif

Jury :

Pr.	Mabrouk Hecini	Pr	Université de Biskra	Président
Pr.	Mohamed Saïd Chebbah	Pr	Université de Biskra	Rapporteur
M.	Benarfaoui Arfaoui	MAA	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2020 - 2021



Remerciements

D'abord nous remercions DIEU de nous avoir venu en aide pour que nous puissions aboutir à la réussite.

Tous le respect et les mots de remerciement à mon encadrant

Pr : MOHAMED-SAÏD CHEBBAH

Pour ses aides, ses conseils directifs, et son suivi durant la réalisation de cette étude.

Nous remercions aussi tous les responsables les personnels de notre département de GENIE MECANIQUE et tous ceux qui ont participé à ce travail.

Enfin nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues, et tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin durant la réalisation de ce travail.

Merci





Dédicaces

Je dédie ce travail en signe de respect et reconnaissance :

À ma mère, mon père et ma grand-mère, que je remercie beaucoup pour leurs sacrifices, leur soutien et leurs encouragements tout au long de ces années; que Dieu les garde.

À mes chères sœurs: IMANE, MENAL, MARAME

Et un merci spécial à ma fiancée ghouzlane pour l'aide au travail

Et toute ma grande famille.

A tous mes amies : AMINE, ADEL.

A la promotion : Génie Mécanique 2021.

A tous mes collègues de l'Université de Biskra

Tous les secrétaires de département Génie Mécanique.

Enfin, je remercie mon ami NAIMI CHAMES EDDINE la crédité de mettre fin à ce travail.



Sommaire

Introduction générale	1
------------------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur le Soudage

I.1. Introduction	3
I.2. Caractéristiques mécaniques des pièces à souder.....	3
I.3. Définition du soudage	4
I.4. Principaux procédés de soudage	5
I.4.1. Le Soudage à l'arc	5
I.4.2. Le soudage au gaz (au chalumeau)	8
I.4.3. Le Soudage par résistance	9
I.4.4. Soudage par friction-malaxage	11
I.4.5. Soudage par faisceau d'électrons	12
I.4.6. Soudage laser	12
I.4.7. Le Soudage par friction	13

Chapitre II : Le Soudage par Friction

II.1. Introduction	15
II.2. Soudage par friction	15
II.3. Classement des procédés de soudage par friction	16
II.4. Le procédé de Soudage par friction rotative	16
II.5. Avantages du soudage par friction.....	17
II.6. Limites du soudage par friction.....	18
II.7. Applications du soudage par friction.....	18
II.8. Les différentes phases de l'opération de soudage par friction rotative	19
II.9. Cycle de soudage.....	19

II.10. Les différents modes de soudage par friction rotative.....	20
II.11. Le soudage par friction pilotée	20
II.12. Le soudage par friction inertielle	23

Chapitre III

Caractérisation mécanique des soudures par essai de traction

III.1. Introduction	25
III.2. Les étapes du travail.....	25
III.3. Moyens mises en œuvre	26
III.3.1. Matière de l'éprouvette	26
III.3.2. Moyens d'usinage	26
III.3.3. Machine de traction mécanique	27
III.4. Déroulement de la réalisation	27
III.4.1. Présentation des éprouvettes.....	27
III.4.2. Usinage des éprouvettes	28
III.4.3 Soudage des éprouvettes	29
III.5. Les étapes del'expérience.....	29
III.6. Classement des lots et conditions de soudage	31
III.7. Résultats de mesure	32
III.8. Test de résistance à la traction.....	33
III.9. ESSAI DE TRACTION SUR MATIERE D'ISOLATION.....	34
III.9.1. Échantillons de test soudés à vitesses (1000tr/min).....	34
III.9.2. Échantillons de test soudés à vitesses (1400tr/min).....	36
III.9.3. Échantillons de test soudés à trois vitesses (2000tr/min).....	37
III.10. Notez les résultats des trois tableaux d'opération de traction.....	40
III.11. Interprétation de résultats.....	41

Conclusion

Résumé

Référence bibliographie

Liste des figures

Figure (I.1): Assemblage de deux pièces par soudage	04
Figure (I.2): Certains des procédés de soudage.....	05
Figure (I.3): Principe de soudage à l'arc avec électrode.....	06
Figure (I.4): Principe des soudages MIG et MAG	06
Figure (I.5) : Principe du soudage TIG.....	07
Figure (I.6) : Soudage au chalumeau.....	08
Figure (I.7) : Parties constitutives d'un chalumeau.....	09
Figure (I.8) : Principe du soudage par point.....	10
Figure (I.9) : Principe du soudage par molette.....	10
Figure (I.10) : Soudage par friction-malaxage.....	11
Figure (I.11) : Schéma de principe du soudage par faisceau d'électrons.....	12
Figure (I.12) : Schéma de principe du soudage laser.....	13
Figure (I.13) : Principe du soudage par frottement.....	14
Figure (II.1) : Classement des procédés par friction.....	16
Figure(II.2) : Exemple d'une machine de soudage par friction.....	17
Figure(II.3) : Le cycle de soudage par friction.....	20
Figure(II.4) : Soudage par friction piloté.....	21
Figure(II.5): Soudage par friction inertielle.....	23
Figure(III.1) : Le tour IMATEC Mod. IP-165 utilisé pour le soudage par friction..	26
Figure(III.2) : machine de traction mécanique Zwick / Roell NF.EN 50182.....	27
Figure(III.3): Eprouvette de soudage par friction avant découpage au centre.....	28
Figure(III.4): La forme des pièces en perspective tridimensionnelle.....	28
Figure(III.5) : Positionnement correct pour un soudage optimal avec des axes Correspondant.....	29
Figure(III.6): Les pièces sont mises en contact l'une de l'autre avec la force friction F1 la température augmente dans la surface de contact.....	30

Figure(III.7): La partie en rotation est freinée et la force de forgeage F2 est exercée.....	31
Figure(III.8): Eprouvettes soudées.....	32
Figure(III.9): Un exemple d'échantillon soudé sous résistance à la traction.....	34
Figure(III.10): Surface soudée après rupture (acier / acier).....	39
Figure(III.11): Surface soudée après rupture (aluminium/aluminium).....	39
Figure(III.12): Surface soudée après rupture (acier/aluminium).....	40

Liste des abréviations

SMAW : Soudage à l'arc à l'électrode enrobée.

GMAW : Soudage sous protection gazeuse actif à électrode fusible MAG.

GMAW : Soudage sous protection gazeuse inerte à électrode fusible MIG.

FCAW : Soudage fil fourré sans gaz.

GTAW : Soudage sous protection gazeuse à électrode réfractaire (TIG).

PAW : Soudage plasma.

RSW : Soudage par résistance par point.

FSW : Soudage par friction malaxage.

EBW : Soudage par faisceau d'électrode

Introduction générale

Introduction générale :

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.

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 [1].

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 procédés de soudage au total. Nous citons par exemple:

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

Dans notre étude, nous traiterons le soudage par friction rotative qui permet de réaliser des assemblages en bout de deux pièces dont l'une au moins à 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.

Le présent travail comprend trois chapitres. Le premier chapitre donne des définitions et une classification des principaux procédés de soudage. Le deuxième chapitre est réservé au

procédé de Soudage par friction rotative dans lequel nous avons présenté son principe, ses avantages et ses inconvénients ainsi que les domaines d'application de ce procédé. Le troisième chapitre est consacré au travail expérimental dans lequel nous avons présenté les résultats obtenus tels que la comparaison entre les caractéristiques géométriques et mécaniques de l'éprouvette avant et après soudage par friction rotative. Les essais de traction sur les éprouvettes sont réalisés au sein du laboratoire de résistance des matériaux ENICA-BISKRA.

A l'issue de ce mémoire, une conclusion générale sera donnée.

Chapitre I

Généralités sur le Soudage

Chapitre I

Généralités sur le Soudage

I.1. Introduction

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 [1].

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 [1].

Par son succès industriel, elle présente les avantages suivants :

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

I.2. Caractéristiques mécaniques des pièces à 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 [2].

I.3. Définition 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 (I.1) montre l'assemblage de deux pièces par soudage [3].

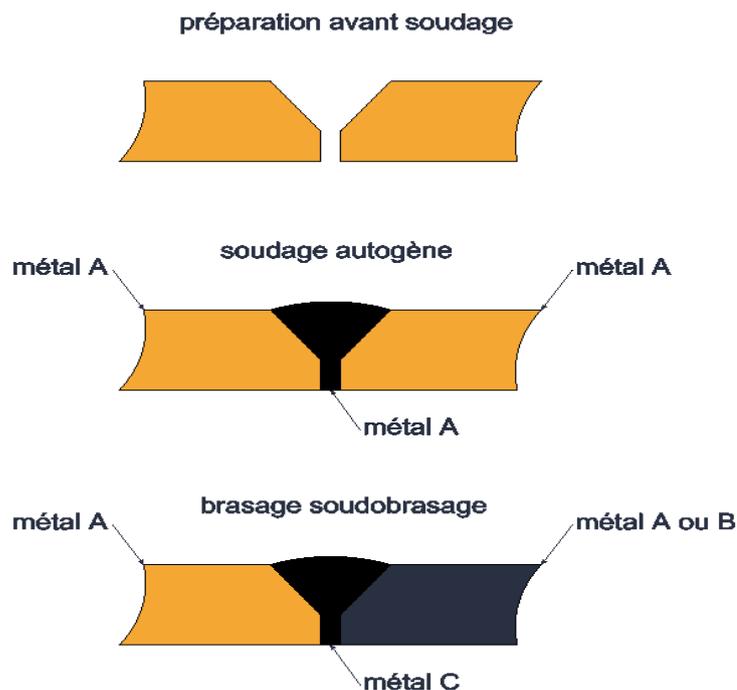


Figure I.1- Assemblage de deux pièces par soudage [3].

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 (soudé-brasage, brasage).

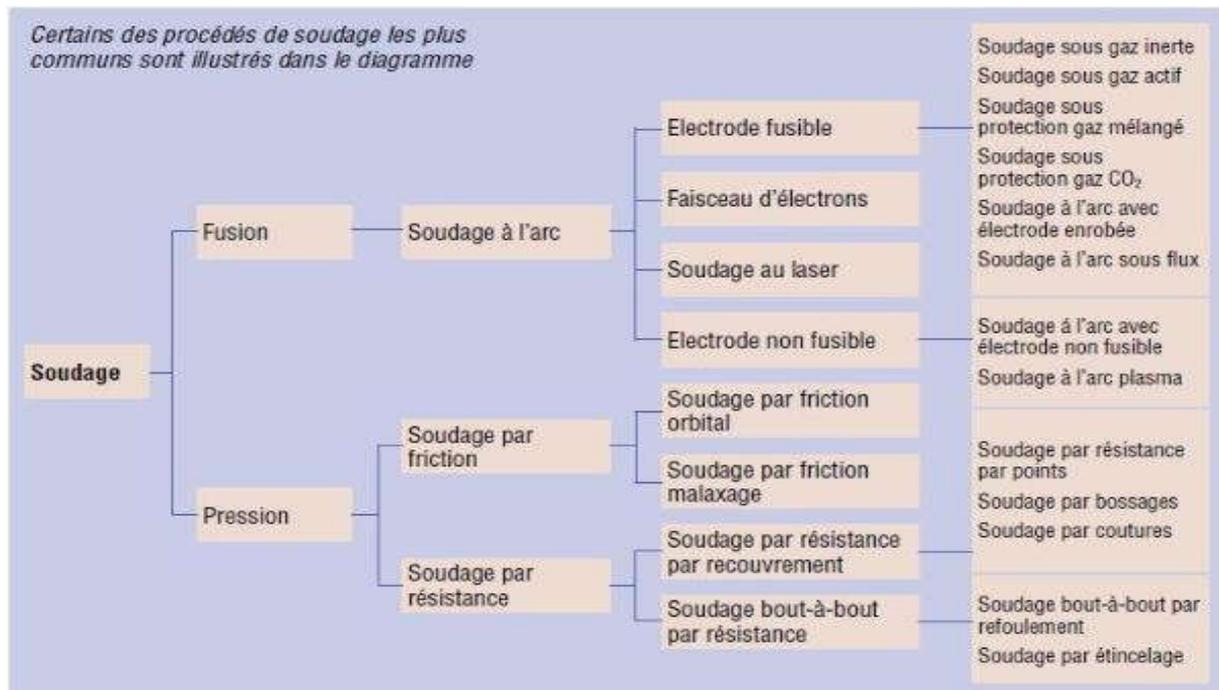


Figure I.2- Certains des procédés de soudage [3].

I.4. Principaux procédés 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.

I.4.1. Le Soudage à l'arc

a- Principe

Comme le montre la figure (I.3), 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.

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) [4].

Soudage MIG (Métal Inerte Gaz) :

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 [4].

Soudage MAG (Métal Active Gaz) :

C'est une variante du soudage MIG utilisant un mélange de gaz carbonique CO₂ et d'argon adaptée au soudage des aciers de construction au carbone. La figure (I.4) montre le principe des soudages MIG et MAG.

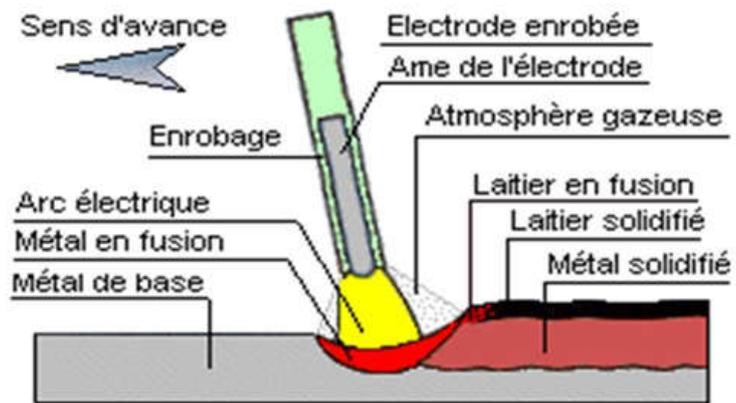


Figure I.3- Principe de la soudure à l'arc électrique [3].

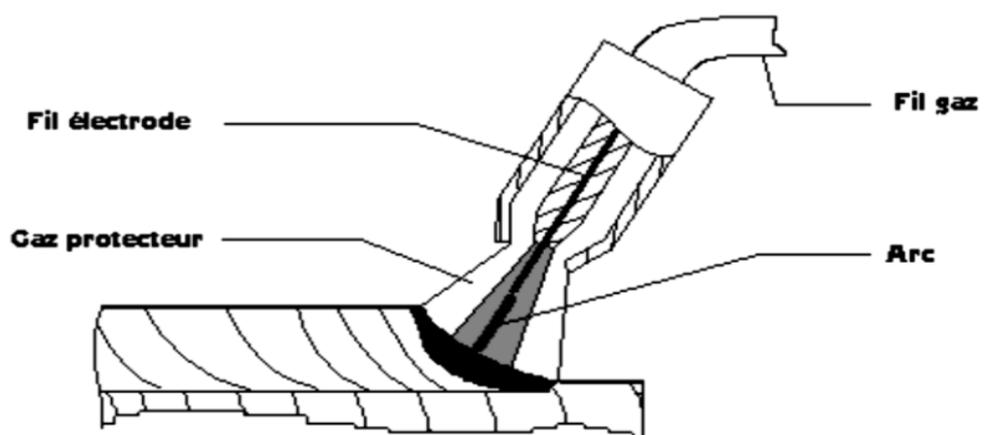


Figure I.4-Principe des soudages MIG et MAG[4].

Soudage TIG (Tungstène Inerte Gaz) :

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 3mm) et peut aussi s'utiliser sans métal d'apport et remplacer le soudage par points (voir soudage par résistance) [4].

On trouve dans la figure (I.5) le principe du soudage TIG.

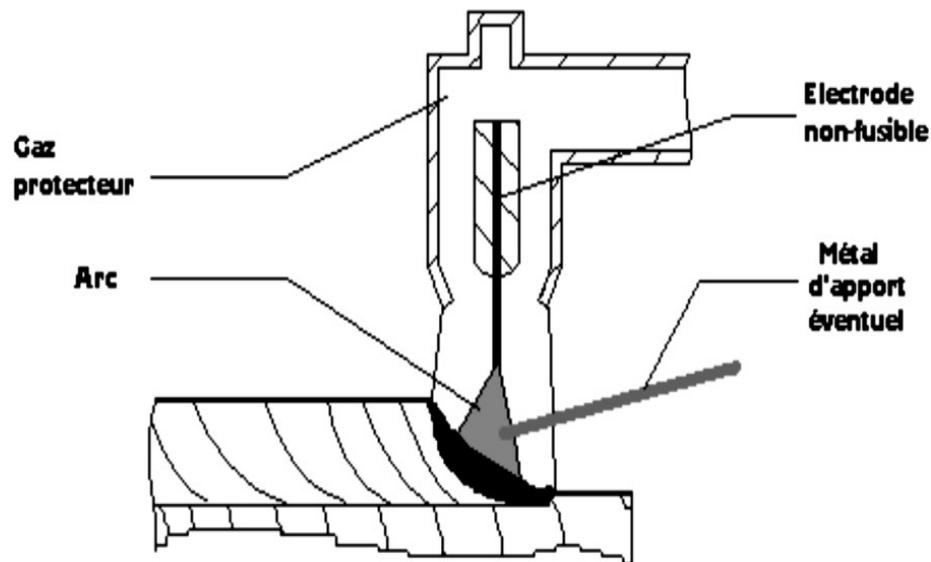


Figure I.5- Principe du soudage TIG[4].

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 [4].

d- Matériaux utilisés

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

- **Soudage MIG** (Métal Inerte Gaz) : les aciers inoxydables, aluminium, cuivre.
- **Soudage MAG** (Métal Active Gaz) : les aciers ordinaires.
- **Soudage TIG** (Tungstène Inerte Gaz) : Suivant le type de courants électrique :

- Courant continu : symbole DC : Aciers ordinaire, aciers inoxydables, cuivre, titane...
- Courant alternatif symbole ~ AC : Aluminium

I.4.2 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 (I.2) montre ce procédé.

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



Figure I.6- Soudage au chalumeau [4].

b- description d'un chalumeau

D'après la figure (I.7), 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 [5].

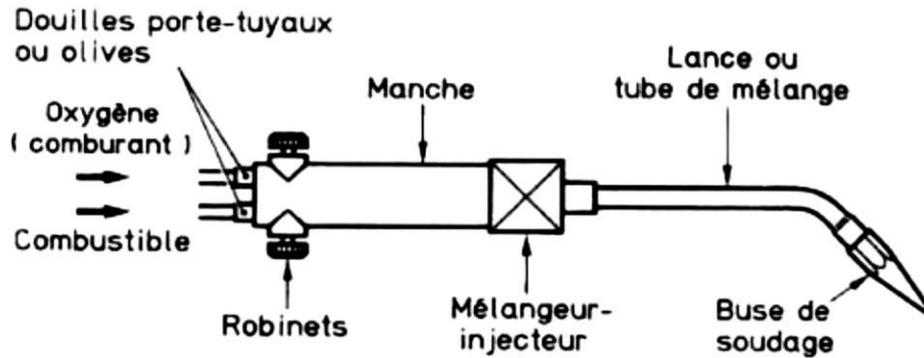


Figure I.7- Parties constitutives d'un chalumeau[5].

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... ; [6].

I.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 [4]. 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 (I.9).

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 (I.9).

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,

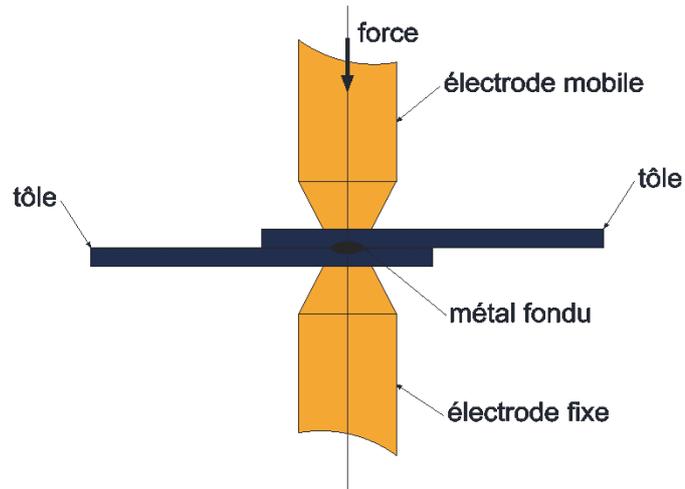


Figure I.8- Principe du soudage par point[4].

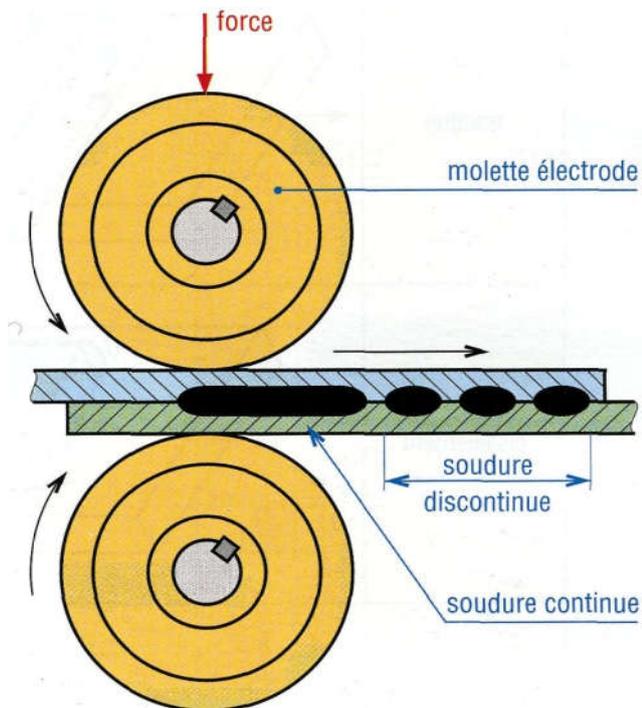


Figure I.9- Principe du soudage par molette[4].

- 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 Soudage par friction-malaxage

a-Principe

Lors du soudage par friction-malaxage, un outil rotatif constitué d'un pion profilé d'un épaulement est enfoncé dans la matière jusqu'à ce que l'épaulement touche la surface du matériau à souder (Figure I.10). La matière est ainsi chauffée par friction à des températures où elle est facilement malléable sans entrer en fusion.

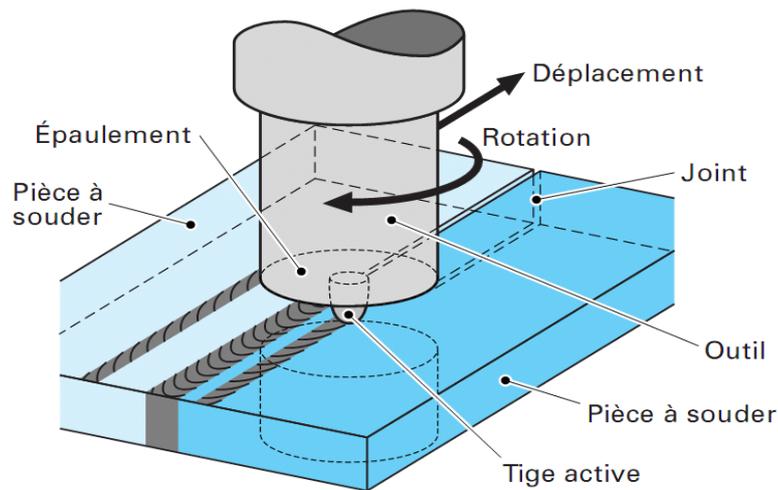


Figure I.10- Soudage par friction-malaxage[5].

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

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).

1.4.5 Soudage par faisceau d'électrons

a- Avantages

Le soudage par faisceau d'électrons (soudage FE) apparaît en 1958 (figure I.11). 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 [3].

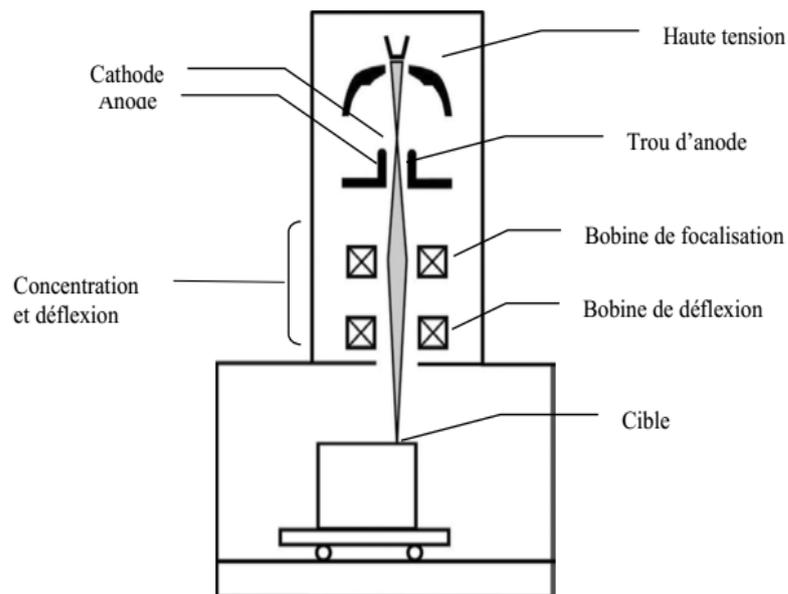


Figure I.11- Schéma de principe du soudage par faisceau d'électrons [3].

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 [3].

c- Utilisations

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

1.4.6 Soudage laser

Le soudage (et le coupage) laser ont des caractéristiques idéales à plus d'un titre (figure I.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 [3].

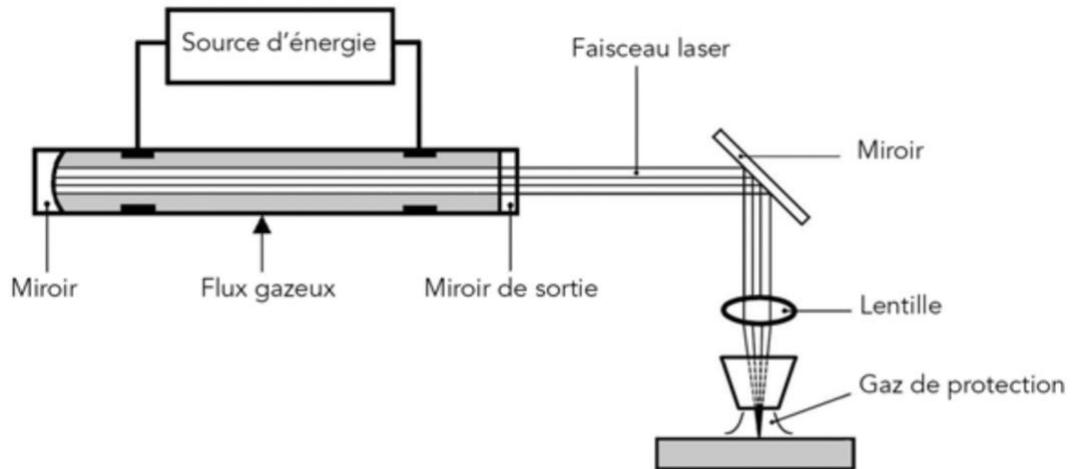


Figure I.12- Schéma de principe du soudage laser [3].

1.4.7 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.

Le principe est comme suit : Une des deux pièces à assembler est entraînée en rotation (figure 1.13-a). Les deux pièces sont mises en contact par un effort axial (F_a) déterminé (figure 1.13-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 1.13-c). Après un brusque arrêt de la pièce en rotation, l'effort axial est augmenté (figure 1.13-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.

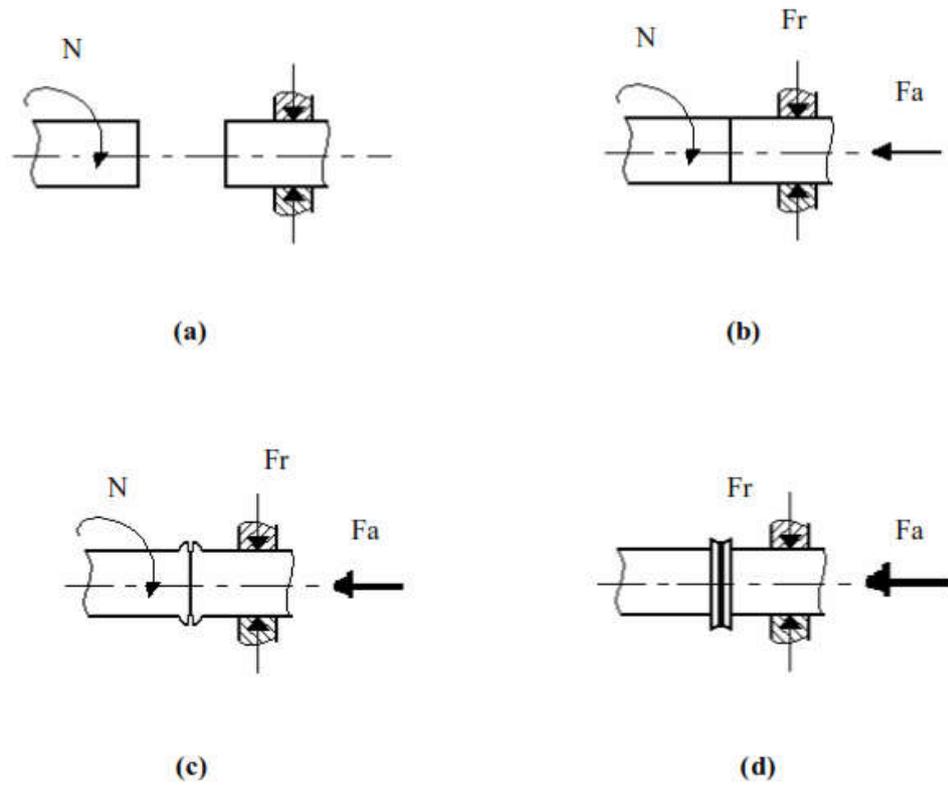


Figure I.13- Principe du soudage par frottement [3].

Fa : force axiale de poussée ;

Fr : force radiale de maintien.

Chapitre II

Le Soudage par Friction

Chapitre II

Le Soudage par Friction Rotative

II.1.Introduction

Ce chapitre traite le principe de fonctionnement et l'aspect technologique en général des principaux procédés de soudage par friction rotative, entre autres ; le soudage par friction piloté et le soudage par friction inertielle, dont on porte un grand intérêt au 21ème siècle en tant que technique émergente permettant l'assemblage des pièces en alliages difficilement soudables par des procédés de soudages classiques ou conventionnels.

II.2.Soudage par friction

Le soudage est une technique d'assemblage qui 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. Le soudage par friction est un procédé de soudage multiple et novateur qui trouve de nombreuses applications dans différentes branches de l'industrie. Les avantages du soudage par friction sont des assemblages de haute qualité, la rapidité du procédé par rapport aux procédés de soudage conventionnel et la possibilité d'une automatisation complète du processus de telle sorte qu'une qualité constante est garantie. De plus, ce procédé peut être réalisé sur une machine-outil (tour ou fraiseuse), ce qui lui confère une flexibilité et une disponibilité de mise en œuvre plus large que les autres procédés de fabrication en général [10].

Ce procédé simple et rapide, permet d'obtenir des liaisons comportant une zone thermiquement affectée relativement étroite, du fait qu'il n'est pas nécessaire de passer par l'état liquide [11].

II.3. Classement des procédés de soudage par friction

Les procédés de soudage basés sur la friction sont très variés (figure II.1). La variante la plus utilisée de ce procédé est le soudage par friction rotative. Il peut être mené pour l'assemblage des pièces de révolution ou non [1].

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 radial. 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, le soudage par friction linéaire et le soudage par friction orbital [12].

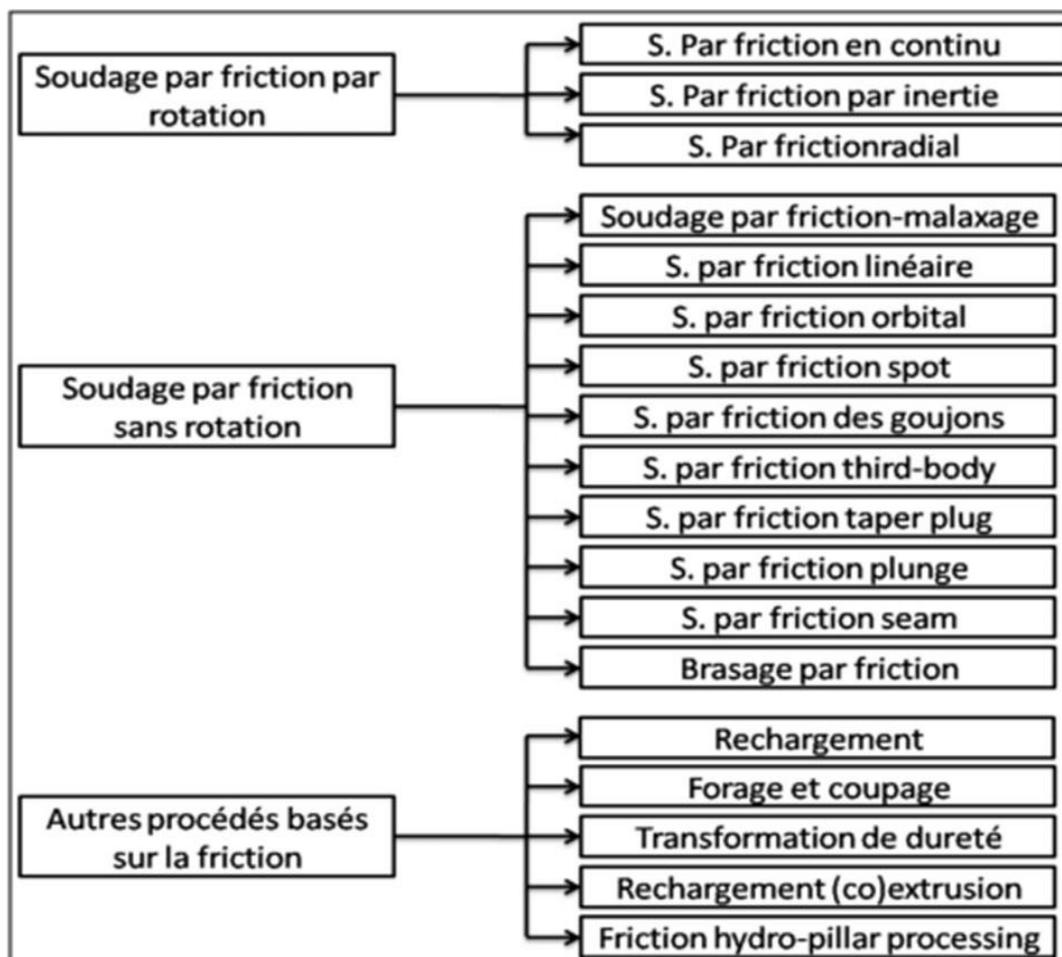


Figure II.1- Classement des procédés par friction [12].

II.4. Le procédé de Soudage par friction rotative

C'est le type de soudage par friction le plus couramment utilisé, notamment pour des pièces de révolution. La pièce est mise en rotation à grande vitesse et pressée contre l'autre pièce, les deux pièces atteignent alors la température de forgeage au point de contact et sont soudées par

effet thermique et déformation plastique. La vitesse de rotation, la pression et le temps de rotation sont les paramètres les plus importants à prendre en compte [13].

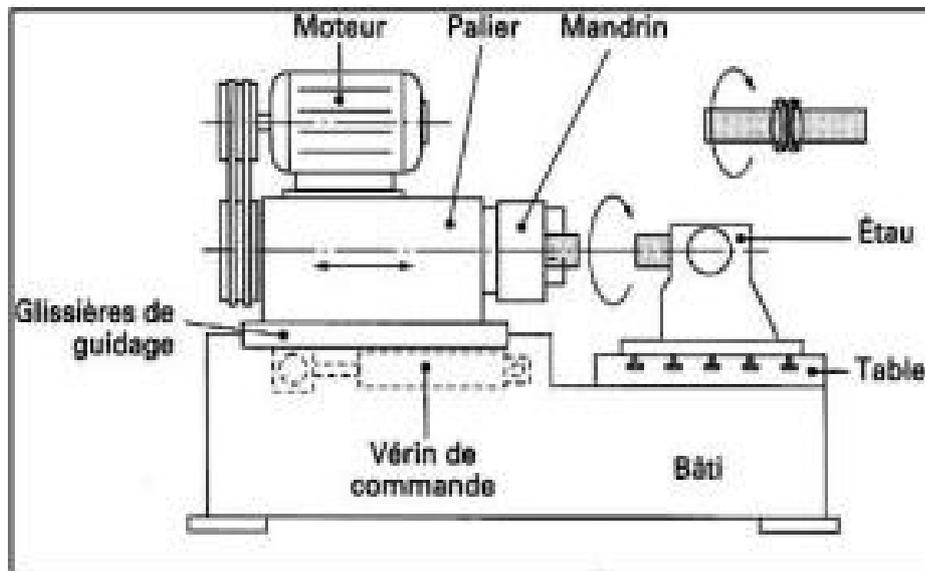


Figure II.2- Exemple d'une machine de soudage par friction [14].

Les principales étapes du procédé de soudage par friction rotative sont schématisées dans la figure (II.2). Supposant 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 quand les deux pièces sont mises en contact l'une à l'autre, les forces de friction provoquent un couple de résistance [15]. L'énergie qui en résulte est transformée en chaleur dans la surface de contact. La chaleur générée augmente la température en un court laps de temps jusqu'à la température de soudage (température de forgeage).

La pièce en rotation est ensuite détachée du mandrin freiné jusqu'à l'arrêt total [15].

II.5. 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 du 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.

II.5.Limites du soudage par friction

Les limitations du soudage par friction sont :

- 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.

II.6.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 1.8), 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 [15].

II.7. Les différentes phases de l'opération de soudage par friction rotative

Le procédé de soudage par friction en rotation se compose de quatre phases essentielles.

1. Phase de friction initiale

Une pièce est mise en rotation simultanément, l'autre pièce est appuyée contre celle-ci en exerçant une pression définie.

2. Phase de friction

Le mouvement relatif et la pression régulière réchauffent les surfaces en contact.

3. Phase de forgeage

La rotation est terminée et la pression est augmentée encore une fois. Le matériau plastifié peut ainsi être assemblé avec l'autre pièce.

4. Phase de maintien

Les deux matériaux sont maintenus sous pression et peuvent ensuite se refroidir lentement [16].

II.8. Cycle de soudage

Les paramètres influant sur la qualité de ce type d'assemblage sont :

- Le temps de soudage ;
- La pression exercée entre les pièces ;
- La vitesse de rotation ;
- La consommation de la matière.

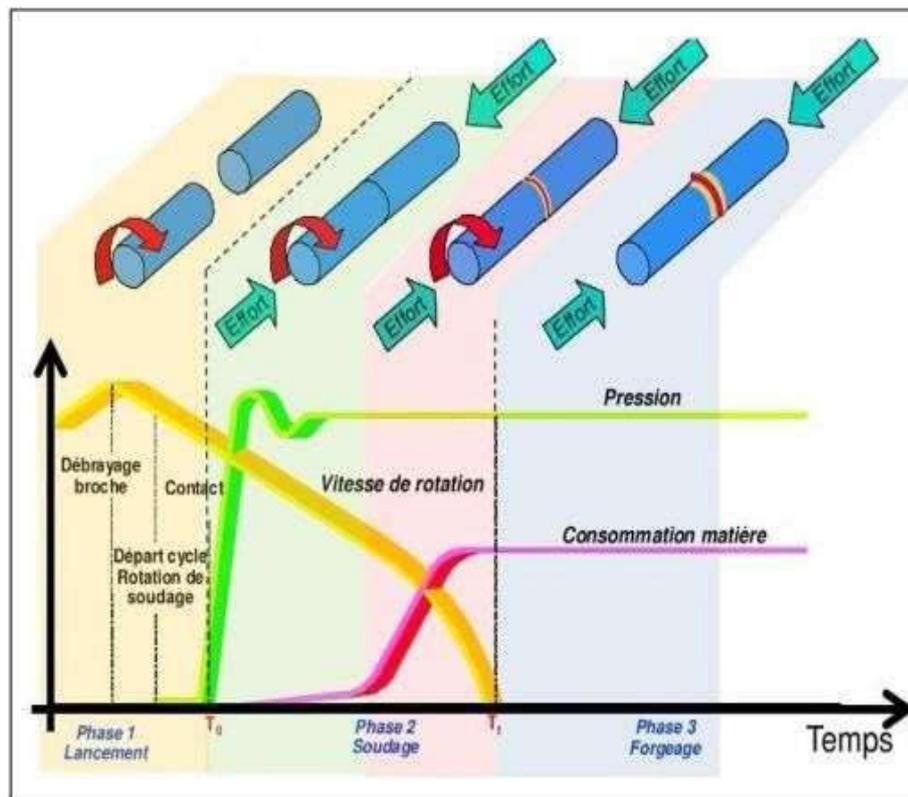


Figure II.3- Le cycle de soudage par friction [17].

II.9. Les différents modes de soudage par friction rotative

On distingue deux modes de soudage :

- a- **Le soudage par friction pilotée (FP)** ou encore par entraînement direct ou conventionnel.
- b- **Le soudage par friction inertielle (FI)** ou encore par accumulation d'énergie (un marque de fabrique déposée par son inventeur).

II.10. Le soudage par friction pilotée

Le principe du soudage par friction pilotée est présenté sur la figure (II.5). Il consiste à réaliser une soudure sur une machine à entraînement direct, c'est-à-dire dans laquelle le moteur est embrayé avec la pièce et donc fournit directement le couple de friction pendant la phase d'échauffement.

La machine doit comporter les éléments suivants (figure II.5a) :

- 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.

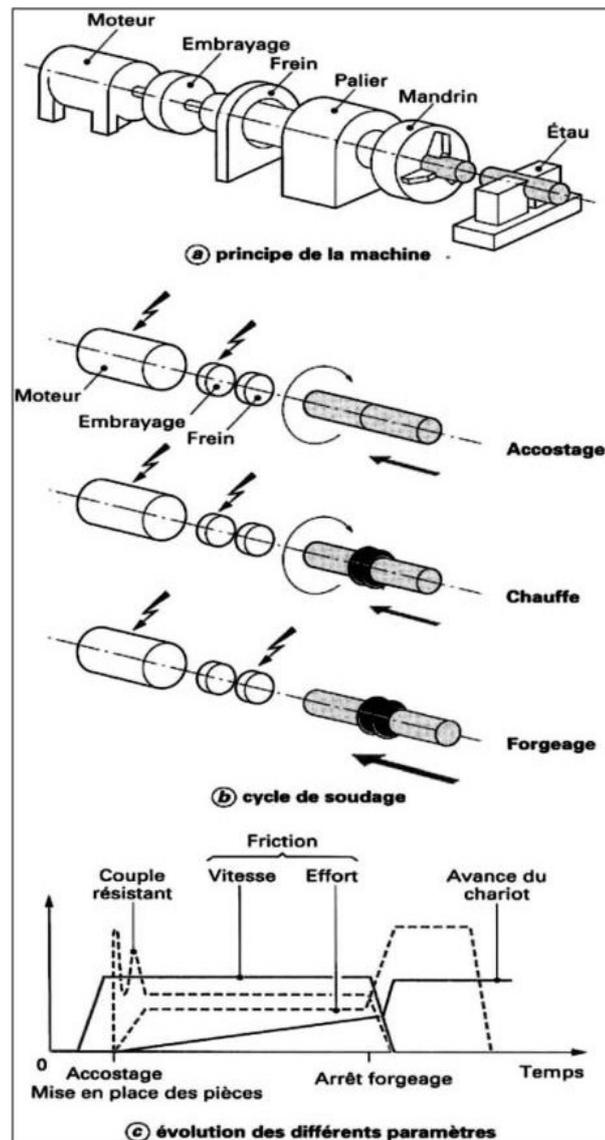


Figure II.4- Soudage par friction piloté [18].

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 fermetures de ces derniers ;
- Démarrage du cycle automatique (figure II-5b) 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 échauffement, mais égalisation mécanique des surfaces et apparition progressive du couple de friction proprement dite ;

✓ 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 [18].

II.12. Le soudage par friction inertielle

a. Principe

Le soudage par friction inertielle a été développé plus tard et diffusée 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.

b. 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.

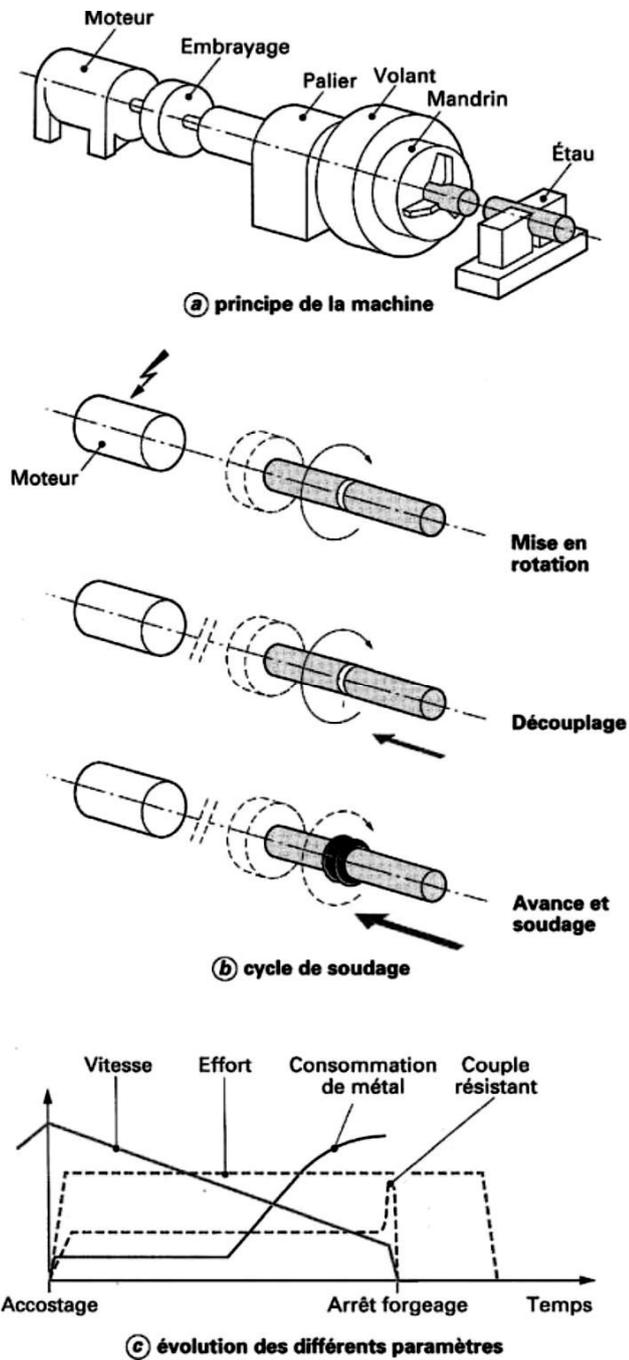


Figure II.5- Soudage par friction inertielle [11].

Chapitre III

Caractérisation mécanique des soudures par essai de traction

Chapitre III

Caractérisation mécanique des soudures par essai de traction

III.1. Introduction

Le but de ce travail est de vérifier la soudabilité des éprouvettes en acier et en aluminium en utilisant le procédé de soudage par friction rotationnel. Les points discutés sont les dimensions de la pièce soudée avant et après soudage cela est nécessaire pour garantir les dimensions de la pièce finale demandée, le deuxième point est la détermination de la résistance à la traction de la zone soudée jusqu'à rupture en utilisant le test de traction unidirectionnel.

III.2. Les étapes du travail

a. Etape 1 : Usinage

Usinage de 3 éprouvettes en acier ;
Usinage de 3 éprouvettes en aluminium ;
Usinage de 3 éprouvettes mixtes : acier-aluminium.

b. Etape 1 : Usinage

Usinage de 3 éprouvettes en acier ;
Usinage de 3 éprouvettes en aluminium ;
Usinage de 3 éprouvettes mixtes : acier-aluminium.

c. Etape 2 : Soudage

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

d. Etape 3 : Résultats expérimentaux

Comparaison des dimensions des éprouvettes, avant et après soudage.

e. **Etape 4** : test de traction.

III.3. Moyens mises en œuvre

III.3.1. Matière de l'éprouvette

Des éprouvettes sous forme de barreaux en acier et en aluminium.

III.3.2. Moyens d'usinage:

Tour parallèle à charioter et à fileter modèle : IMATEC Model IP-165, équipé de tous les outils nécessaires à l'usinage des éprouvettes comme le montre la figure (3.1).



Figure III.1- Tour IMATEC Model IP-165.

Tableau 1. Les données d'orientation sur la machine sont les suivantes :

Espace machine :	Tour parallèle universel
Constructeur :	TST groupe d'entreprise
Type :	IP-165
Longueur totale de la machine (mm) :	1850
Largeur totale (mm) :	1200
Hauteur totale (mm) :	1520
Poids de la machine :	1840 Kg
Puissance absorbée :	KW - 50 Hz

III.3.3. Machine de traction mécanique



Figure 3.2- Machine de traction mécanique Zwick / Roell NF.EN 50182.

Tableau 2. Les données d'orientation sur la machine sont les suivantes.

Norme	NF.EN 50182
Matériel	Zwick / Roell
Capteur de force	100 KN
Données machine	Commande WN: 169011 Traverse WN: 169011 Force WN: 169012 100KN

III.4. Déroulement de la réalisation

III.4.1. Présentation des éprouvettes

a. Dimensions : Les éprouvettes sont normalisées et ont les dimensions représentées sur la figure (III.3).

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

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

$Re (N/mm^2) = 335 ; Rm (N/mm^2) = 590-710$

- Eprouvettes en aluminium de nuance (% Al 99,99), ayants les caractéristiques suivantes : **$Re (N/mm^2) = 22 ; Rm (N/mm^2) = 50$**

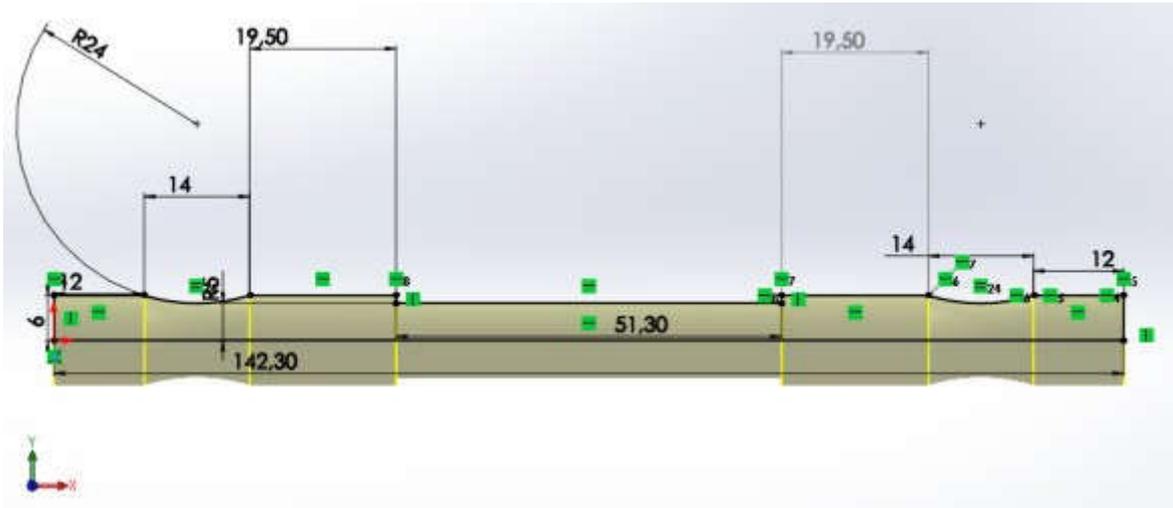


Figure III.3- Eprouvette pour soudage par friction avant découpage au centre.



Figure III.4- La forme des pièces en perspective.

III.4.2. Usinage des épreuves

L'usinage des épreuves a été réalisé comme suit :

Phase 10 : obtention brute

Phase 20 : dressage des faces

Phase 30: chariot age Ø12

Phase 40: chariot age Ø10

Phase 50 : contrôle finale des dimensions.

III.4.3. 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 IP-165.

Commodité d'utilisation.

Moins coûteux.

Pour chaque lot de pièces, on a appliqué les régimes de rotation suivants:

- Epreuve 1 : $N = 1000 \text{tr/min}$
- Epreuve 2 : $N = 1400 \text{tr/min}$
- Epreuve 3 : $N = 2000 \text{tr/min}$

Le temps de forgeage est constant pour toutes les éprouvettes : 1min.

III.5. Les étapes de l'expérience

a. Avant le processus de soudage :

A ce stade, la pièce est coupée au milieu pour assurer le contact entre les deux surfaces, permettant une répartition homogène de la force de compression.

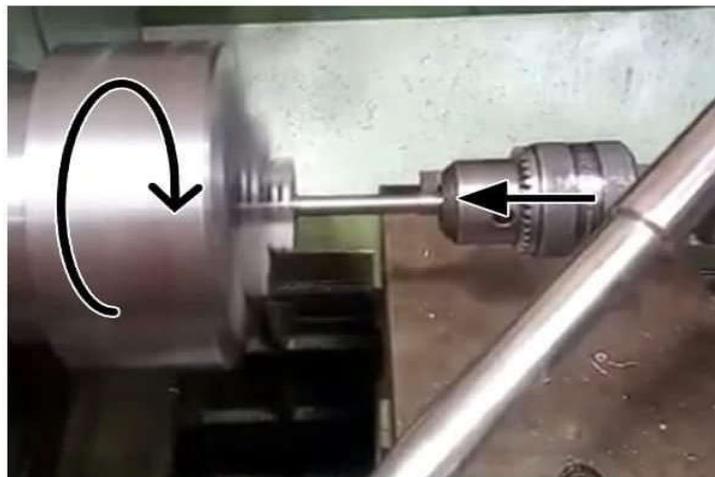


Figure III.5-Positionnement correct pour un soudage optimal avec des axes correspondants.

b. Etape de soudage

La première pièce est fixée dans la partie mobile (le rotor), tandis que la deuxième pièce est dans le stator à la capacité de transmission longitudinale et après que la vitesse de rotation est déterminée et que la machine est actionnée, en veillant à ce que l'axe des deux pièces soit aligné.

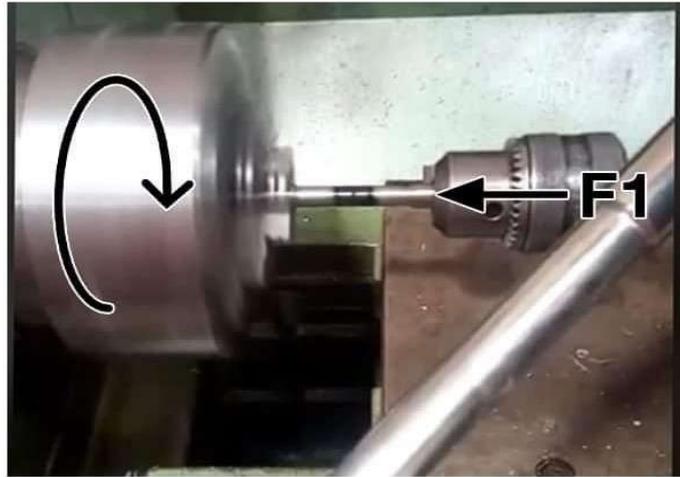


Figure III.6- Les pièces sont mises en contact l'une de l'autre avec la force friction $F1$

La température augmente dans la surface de contact.

Une pression est appliquée qui augmente la force de frottement et cela est évident dans l'effet thermique sur le métal (fer).

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 la figure III.5).

- **Remarque :** lors de la pression et de l'application de la force, l'axe des deux pièces doit être aligné afin d'éviter les oscillations et les vibrations, ce qui affecte la qualité et le temps de soudage, ce qui conduit à une augmentation de la matière consommée lorsque les dimensions changent.

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 figure5).

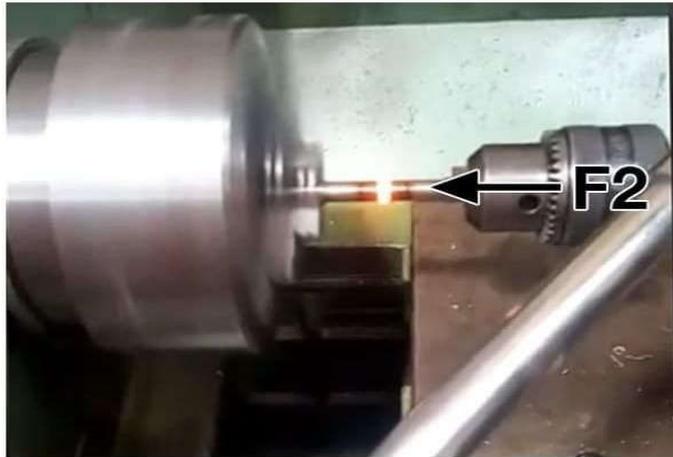


Figure III.7-La partie en rotation est freinée et la force de forgeage F_2 est exercée.

III.6. Classement des lots et conditions de soudage

Les lots de pièces sont classés commesuit

Lot n° 1 : acier /acier

Matériaux : **Acier**

Nombre d'éprouvettes :**3**

Lot n° 2: aluminium /aluminium

Matériaux : **Aluminium**

Nombre d'éprouvettes :**3**

Lot n° 3 : acier /aluminium

Nombre d'éprouvettes :**3**

Les conditions sont les suivantes :

Machine de réalisation : **Tour IP-165**

Mode de sollicitation : **Frictionrotative**

Nombre de tours successifs : 1000 tr/min ; 1400 tr/min ; 2000tr/min.

Eprouvettes obtenues :

La figure (III.8) représente les éprouvettes obtenues après soudées.



Figure III.8-Eprouvettes soudées.

Légende :

Eprouvettes soudées(acier/acier)

Eprouvettes soudées(aluminium/aluminium)

Eprouvettes soudées (acier/aluminium)

III.7. Tableau Résultats de mesure :

Vitesse rotationnel (tr/min)		1000	1400	2000
l'échantillon	acier/acier	3.18 mm	2.02 mm	3.08 mm
	aluminium/aluminium	7.02 mm	3.32 mm	4.64 mm
	acier/aluminium	7.11 mm	3.02 mm	3.48 mm

Ce tableau représente les dimensions d'une pièce en raison du frottement car il corrode le matériau On extrait des valeurs enregistrées dans le tableau

Le matériau corrodé ou perdu dans le processus de soudage en raison du frottement. Elle varie en fonction de la vitesse de rotation et du type de métal, où l'on remarque une nette différence entre

le Acier et l'Aluminium, la valeur de corrosion ou de perte du Acier étant comprise entre 2,02 mm et 3,18mm et à des vitesses différentes 2000. 1400. 1000 (tr/min)

En revanche, on note qu'à la vitesse de rotation de 1400 on enregistre la valeur la plus faible de corrosion dans le métal, et ce n'est que lorsque Acier/Acier Aluminium/Aluminium Acier/Aluminium avec une valeur comprise entre 2,02mm et 3,32mm

Par contre, on remarque le contraire à la vitesse de rotation de 1000 (tr/min) la valeur de perte est confinée entre 3,18mm et 7,11mm

❖ **Tableau** : représente la différence entre les dimensions avant et après le processus de soudage dans le éprouvette acier / aluminium et la valeur du matériau perdu

Vitesse rotationnel (tr/min)		1000	1400	2000
L'échantillon à étudier Acier aluminium	Acier 71.01 mm	70.4 mm	70.05 mm	70.00 mm
	Aluminium 71.01 mm	64.51 mm	68.50 mm	68.54 mm

❖ **Remarque pour le tableau** :

On remarque une différence dans la valeur du métal perdu par rapport à une pièce Acier/Aluminium car le pourcentage de perte en aluminium est supérieur à l'Acier, et cette valeur diminue à mesure que la vitesse de rotation augmente, c'est-à-dire une relation inverse Prenons, par exemple, à une vitesse de 1000 à 2000 dans le Acier, 0,61 à 1,01, soit une diminution de près de la moitié

Quant à l'aluminium, la vitesse est de 1000 à 2000, elle est de 6,5 à 2,47, ce qui est trois fois plus élevé

III.8 -Test de résistance à la traction

Des essais de traction ont été réalisés à température ambiante en laboratoire pour les matériaux souples. METAUX CHEZ ENICABde BISKRA sur la machine de traction électromécanique de Zwick / Rowell Z100 Figure (3.2)

Des tests de traction sont effectués pour connaître la résistance à la traction et l'emplacement de la fracture

Échantillons de test soudés à trois vitesses (1000tr/min) (1400tr/min) (2000tr/min)
(Acier / acier)

(Aluminium / aluminium)

(Acier / aluminium)

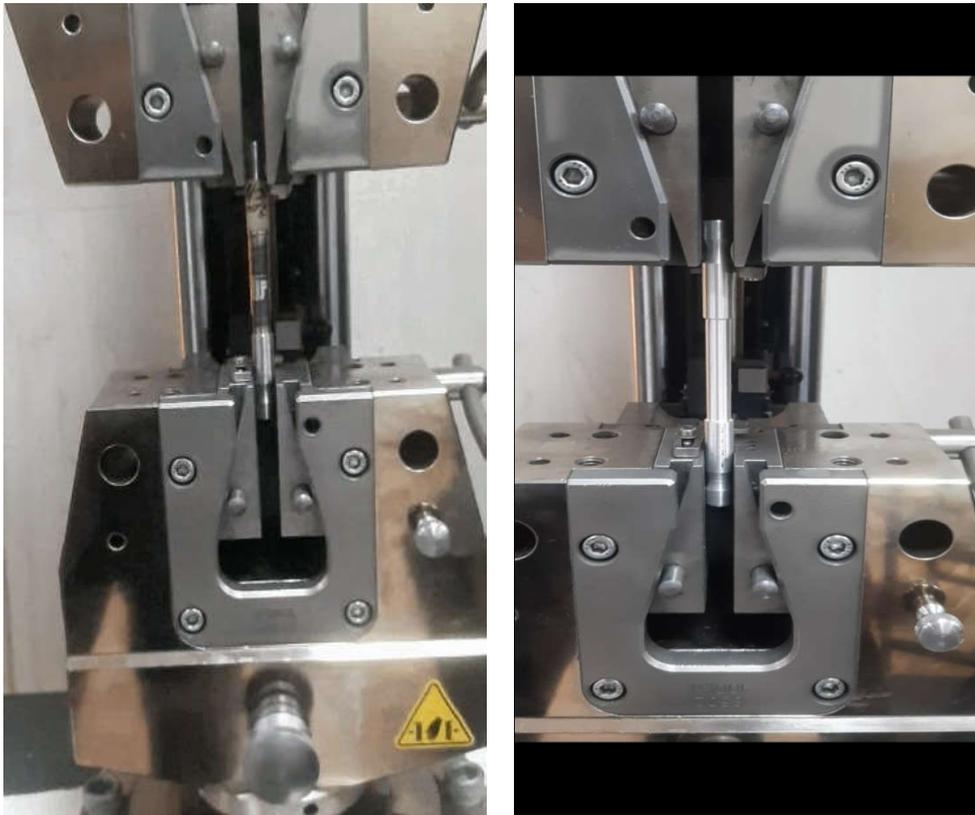


Figure III.9- Un exemple d'échantillon soudé sous résistance à la traction

Les pièces soudées en cours de résistance à la traction sont classées comme suit

- acier/aluminium
- acier/acier
- aluminium/aluminium

III.9. ESSAI DE TRACTION SUR MATIERE D'ISOLATION

III.9-1 Échantillons de test soudés à vitesses (1000tr/min)

❖ Tableau de paramètres:

Opérateur: Technicien de laboratoire

Capteur de force : 100 KN

Norme: NF.EN50182

Matériel : Zwick / Roell

IDéprouvette: **Vitesse1000 tr/min**

Données machine: Commande WN: 169011

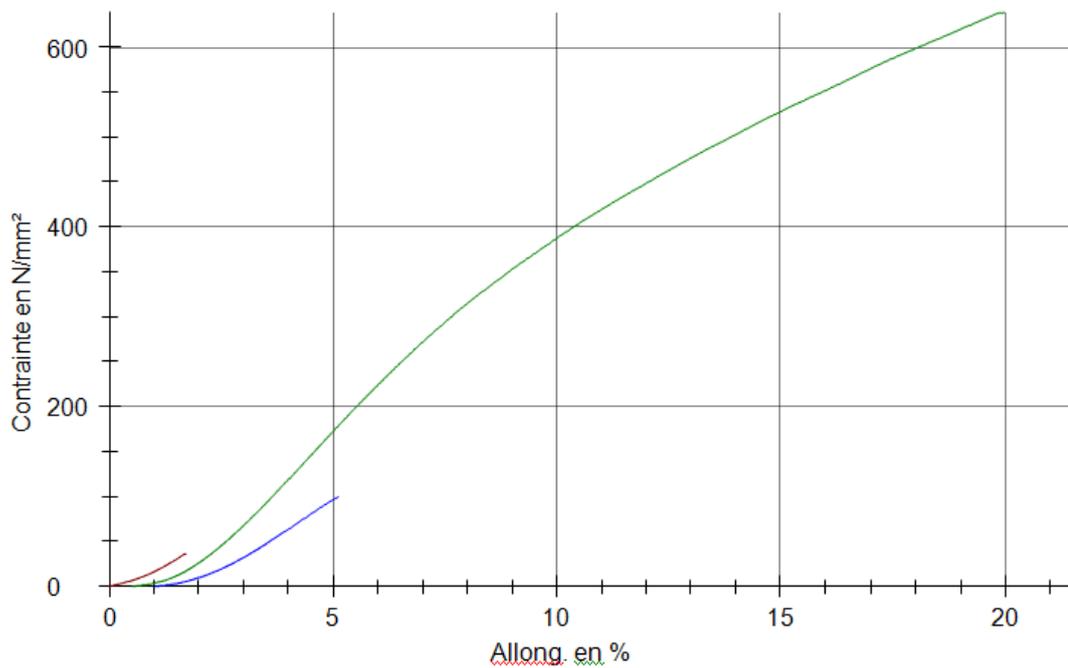
Traverse WN: 169011

Force WN: 169012 100 KN

❖ **Tableau Résultats:** Échantillons de test soudés à vitesses (1000tr/min)

Eprouvettes soudées	Allongement à la rupture (%)	Résistance à la Traction (N/mm ²)	Charge de rupture (KN)
(Acier/ aluminum)	-	36,06	2,29
(Acier / acier)	18,66	638,35	40,61
(aluminum/aluminum)	3,25	99,44	6,33

Graphique de séries:



❖ **Tableau Résultats Statistiques:** Échantillons de test soudés à vitesses (1000tr/min)

Série n =3	Allongement à la rupture (%)	Résistance à la traction (N/mm ²)	Charge de rupture (KN)
\bar{X}	10,96	257,95	16,41
Max	18,66	638,35	40,61
Min	3,25	36,06	2,29
R	15,42	602,29	38,32

III.9.2.Échantillons de test soudés à vitesses (1400tr/min)

❖ **Tableau de paramètres:**

Opérateur: Technicien de laboratoire

Capteur de force : 100 KN

Norme : NF.EN50182

Matériel : Zwick / Roell

IDéprouvette : **Vitesse1400 tr/min**

Données machine : Commande WN: 169011

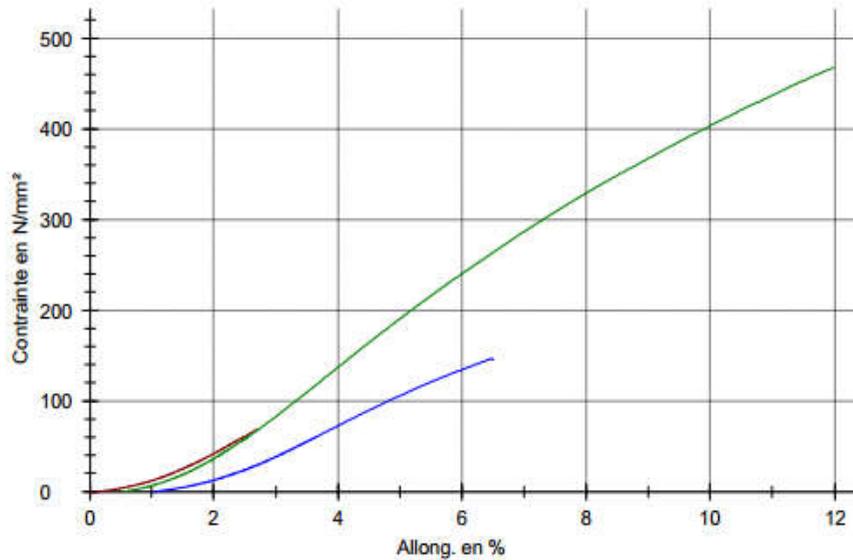
Traverse WN: 169011

Force WN: 169012 100KN

❖ **Tableau Résultats:** Échantillons de test soudés à vitesses (1400tr/min)

Eprouvettes soudées	Allongement à la rupture (%)	Résistance à la traction (N/mm ²)	Charge de rupture (KN)
(Acier/ aluminium)	1,95	68,93	4,38
(Acier / acier)	10,93	467,27	29,73
(aluminium/aluminium)	4.82	146,54	9,32

Graphique de séries:



❖ **Tableau Résultats Statistiques: Échantillons de test soudés à vitesses (1400tr/min)**

Série n= 3	Allongement à la rupture (%)	Résistance à la traction (N/mm ²)	Charge de rupture (KN)
— X	5,90	227,58	14,48
Max	10,93	467,27	29,73
Min	1,95	68,93	4,38
R	8,99	398,34	25,34

III.9.3.Échantillons de test soudés à trois vitesses (2000tr/min)

❖ **Tableau de paramètres:**

Opérateur: Technicien de laboratoire

Capteur de force : 100 KN

Norme : NF.EN50182

Matériel : Zwick / Roell

IDéprouvette : **Vitesse2000 tr/min**

Données machine : Commande WN: 169011

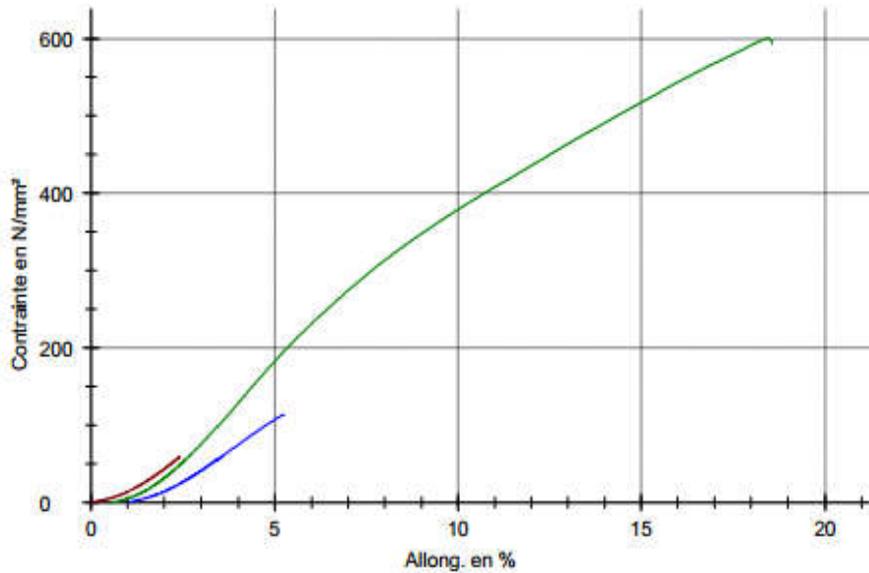
Traverse WN: 169011

F1force WN: 169012 100KN

❖ **Tableau Résultats:** Échantillons de test soudés à vitesses (2000tr/min)

Eprouvettes soudées	Allongement à la rupture (%)	Résistance à la traction (N/mm ²)	Charge de rupture (KN)
(Acier/ aluminum)	-	59,53	3,79
(Acier / acier)	17,41	600,15	38,18
(aluminum/aluminum)	3,65	113,35	7,21

Graphique de séries:



❖ **Tableau Résultats Statistiques:** Échantillons de test soudés à vitesses (1400tr/min)

Série n=3	Allongement à la rupture (%)	Résistance à la traction (N/mm ²)	Charge de rupture (KN)
\bar{X}	10,53	257,68	16,39
Max	17,41	600,15	38,18
Min	3,65	59,53	3,79
R	13,76	540,62	34,39



Figure III.10- Surface soudée après rupture (acier / acier)

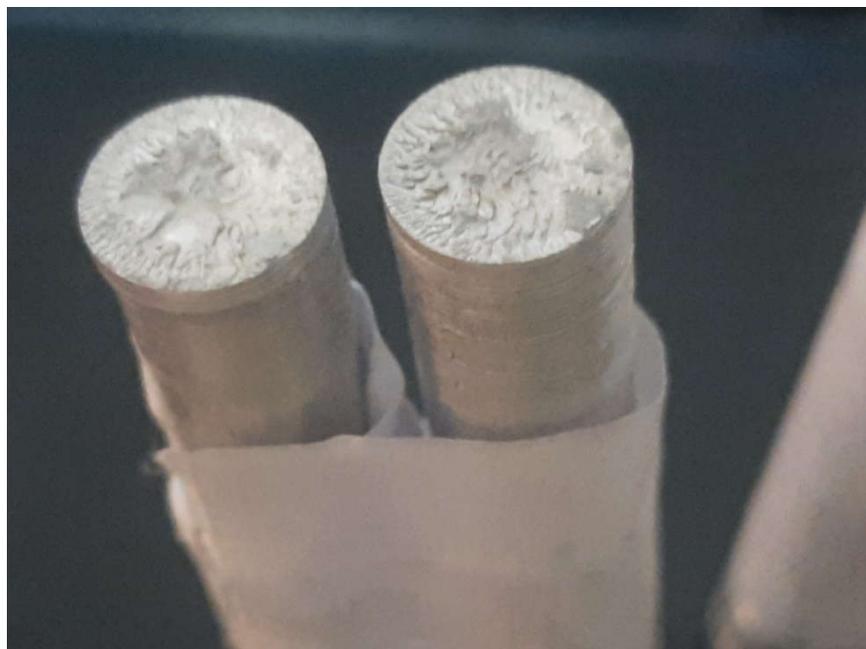


Figure III.11- Surface soudée après rupture (aluminium/aluminium)



Figure III.12- Surface soudée après rupture (acier/aluminium)

III.10. Notez les résultats des trois tableaux d'opération de traction

La résistance à la traction la plus élevée obtenue entre deux échantillons homogènes (Acier/acier) soudés à 1000 tr / min était de 40,61 KN.

De plus, la résistance à la traction la plus faible a été enregistrée entre deux échantillons hétérogènes (acier / aluminium) de 2,29 KN à la même vitesse de soudage.

L'échantillon (aluminium / aluminium) avait la résistance à la traction la plus élevée à 9,32 KN soudée à 1400 tr / min, tandis que la résistance à la traction la plus faible pour le même échantillon était de 6,33 KN soudé à 1000 tr / min.

La résistance maximale à la traction de l'échantillon (acier / aluminium) est de 4,38 KN soudé à 1400 tr / min.

III.11. Interprétation de résultats :

L'augmentation de la vitesse de rotation pendant le soudage conduit à:

- Faible résistance à la traction des pièces soudées. En d'autres termes, la diminution peut être exprimée comme une augmentation de la vitesse de frottement.
- L'augmentation de la vitesse réduit la résistance des joints soudés. En comparant les trois groupes de matériaux, on peut dire ceci
- Lors de l'essai de traction des échantillons, leur forme n'a pas changé (il n'y a pas de déformation)
- Faible résistance (ré) flexibilité des pièces soudées.
- Allongement unitaire réduit (ϵ).
- Nous concluons que la rigidité de la fissure diminue avec l'augmentation de la vitesse de rotation.
- La résistance à la traction augmente à mesure que la vitesse de soudage diminue surtout dans les matériaux homogènes (acier / acier).

Soudage :

- ✓ Acier/acier : présente une bonne résistance,
- ✓ Aluminium /aluminium : présente une résistance moyenne
- ✓ Acier / Aluminium : présente une faible résistance,

Cela peut être traduit par la résistance de chaque matériau.

Conclusion

Conclusion

Cette thèse est consacrée à l'étude du soudage par friction et le présente comme une méthode simple et réalisable pour réaliser le processus de rotation parallèle.

Nous avons expliqué l'importance de préparer les pièces à souder et dont les surfaces doivent être soigneusement nettoyées, et les préparations nécessaires avant soudage pour obtenir une bonne soudure.

L'objectif était d'étudier l'effet de l'évolution des paramètres de soudage (force de contact, vitesse relative et durée de frottement) sur la rigidité des pièces soudées afin de conduire à l'introduction de ce procédé dans nos ateliers. Des moyens simples.

Tous les résultats des tests et examens des échantillons ont été obtenus à partir du logiciel intégré aux machines et appareils utilisés.

Cette étude a montré qu'il est nécessaire de réduire la vitesse de rotation pour augmenter le frottement pour atteindre la température dans la surface de contact sans atteindre la température de fusion, et les résultats que nous avons obtenus en sont la meilleure preuve. Avec une vitesse de rotation de 1000 tr/min.

Nous n'avons pas pu contrôler la force de contact pour le soudage, et la force de forgeage pour former le cordon car nous n'avons pas de machine spéciale pour le soudage par friction.

Enfin, cette étude peut être considérée comme une simple introduction à l'étude de ce type de soudage, et peut être utilisée comme un nouveau procédé d'assemblage en soudage pratique et permettre aux étudiants de profiter de cette manipulation avec tous les avantages constructifs de ce procédé. Type de soudage.

RESUME:

Dans ce travail, nous avons traité de l'étude du soudage par friction rotative, et ce type de soudage trouve des applications dans de nombreux domaines (industrie pétrolière, automobile, aéronautique et spatial...)

Cette étude, que nous avons menée sur des échantillons d'acier et d'aluminium, vise la possibilité de souder chacun d'eux et aussi entre eux à plusieurs vitesses de rotation et d'atteindre la précision de fabrication, en étudiant les dimensions des échantillons avant et après soudage et effectuer un test de résistance à la traction et la capacité de tolérance de l'échantillon pour différentes vitesses et en déduire la résistance La plus grande résistance à la traction et la soudure la plus cohérente entre les échantillons

ملخص:

في هذا العمل تطرقنا إلى دراسة التلحيم بواسطة الاحتكاك الدوراني, وهذا النوع من التلحيم لديه تطبيقات في العديد من الميادين (الصناعة البترولية, السيارات , الطيران و الفضاء...) تهدف هذه الدراسة التي قمنا بها على عينات من الفولاذ والألمنيوم على إمكانية لحام كل واحد منهما و ايضا مع بعضهما في عدة سرعات دورانية والوصول إلى دقة التصنيع ,وذلك بدراسة ابعاد العينات قبل و بعد اللحام و اجراء اختبار قوة الشد وقدرة احتمال العينة لمختلف السرعات واستنتاج قوة الشد الاكبر واللحام الاكثر تماسكا بين العينات

Références Bibliographiques :

- [1] 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 R 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.