

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE

SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie

Mécanique

Thème :

**CRACTERISATION THERMIQUE DE SOUDAGE
PAR FRICTION**

Proposé par :

M^r. M. BELHADEF

M^r. M. BOUBAKEUR

Réalisé par :

Mr. BERTAL Azzeddine

PROMOTION: Juin 2009

ملخص:

الغرض من هذه الدراسة هو دراسة الخصائص الحرارية لفولاذ لين من نوع A60 بطريقة التلحيم بالاحتكاك بواسطة مخرطة متوازية التي تستلزم عملية متواقتة بين لحظة ومدة تطبيق ضغط الاحتكاك و التلحيم و وقت الكبج.

هذه الدراسة تسمح لنا بمعرفة تفاوت درجة الحرارة في موضع معطى من القطعة الملتحمة وفقا للوقت, و تقديرها على مستوى سطح التلامس.

كلمات مفتاحية : التلحيم, الاحتكاك, شد, الخصائص الحرارية.

Résumé :

L'objectif premier de cette étude est la détermination du comportement thermique d'un joint de soudure de barres cylindriques d'acier doux A60 soudé au procédé de soudage par friction sur tour parallèle qui nécessite la synchronisation entre l'instant et le temps d'application de la pression de friction et de forgeage, et le moment du freinage.

Cette étude nous permet donc de déterminer la variation de température d'un point donné de la pièce soudée en fonction du temps, et de l'estimer au niveau de la surface de contact.

Mots clés : soudage, friction, forgeage, comportement thermique.

Abstract:

The main objective of this study is the determination of the thermal behavior of a welding joint of cylindrical bars of A60 mild steel welded by the of friction welding process onto parallel lathe which requires synchronization between the moment of application of the pressure of friction and forging, and the moment of braking.

This study thus enables us to determine the temperature variation of a given point of the part welded according to time, and to estimate it with the level of the surface of contact.

Key words: friction, welding, forging, thermal behavior.

DEDICACES

Je remercie dieu de m'avoir prêté vie, santé et volonté pour achever cet humble travail que j'ai réalisé de tout cœur en mémoire a ma mère qui m'est toujours la plus chère ; que dieu le miséricordieux ait pitié de son âme.

A mon chère Père « *Un homme en vaut cent, et cent n'en valent pas un comme toi* » tu m'as appris les règles de la vie ; tu m'as rendu l'homme que je suis à présent, tu as encore tant à m'apprendre.

A ma chère Belle-mère « *si une femme pouvait être a la moitié de ton égale, elle sera une femme accomplie* », tu n'as jamais cessé de m'encourager et de me soutenir, ton amour m'a donné la volonté d'aller toujours de l'avant.

A mes très chers frères, mes amis : *Fouad, Hamza, Chakib* et le petit ange *Youcef*.

A mes deux sœurs bien aimées, mes bijoux *Khaoula* et la petite aimable *Maria*.

A toutes les personnes que j'aime et valent chère dans mon cœur

A toutes les familles: *BERTAL, BEN.ANTAR, BOUREGUBA*.

A tous mes ami(e)s qui ont rendu ma vie agréable et pleine de bons souvenirs.

Je dédie ce modeste travail.

.AZZEDDINE

Remerciements

Tout d'abord je remercie Allah qui m'a donné la santé, la patience, la volonté, La confiance pour terminer ce modeste travail.

Je tiens à remercier très vivement mes promoteurs, Mr BOUBKEUR, et Mr BELHADJEF pour leur disponibilité, leur gentillesse, leurs conseils et leurs pertinentes remarques.

Je remercie vivement les membres de jury Mr SMAILI, Mr BENBRIKA pour avoir accepté d'apprécier ce modeste travail, je les remercie pour tout le temps qu'ils ont consacré.

Pour les nombreux soutiens que j'ai reçus dans le cadre de mon projet de fin d'étude, c'est une grande satisfaction pour moi de remercier ceux qui m'ont aidé à le mener à bien.

Mes remerciements les plus sincères à Mr GUERGUEB, et Mr BELKASSEMI pour leur aide, leurs conseils

Ma reconnaissance va également à Monsieur NADJI de l'ENGT pour son aide.

Mes remerciements s'adressent également à toute la famille du département Génie mécanique de l'ENSP (Enseignants, Techniciens, et Etudiants).

En fin, je remercie tout qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Table des matières

Résumé

Introduction générale	01
------------------------------------	----

CHAPITRE 1 : Généralités sur le soudage par friction

1.1. Soudage	02
1.2. Procédé de Soudage par friction	04
1.3. Principes du procédé de soudage par friction.....	05
1.4. Avantages et limites de la technique	07
1.5. Applications	08
1.6. Les types de soudage par friction	08
1.6.1. Soudage par entrainement direct	10
1.7. Les différentes phases de l'opération de soudage	10
1.7.1. Phase d'accostage	10
1.7.2. Phase transitoire	10
1.7.3. Phase d'équilibre	11
1.7.4. Phase de forgeage	11
1.8. Le soudage par friction inertielle	12
1.8.1. Le principe du soudage par friction inertielle	12
1.9. Influence des grandeurs physiques	13
1.10. Effet des paramètres d'entrée	13
1.10.1. Effet de l'effort F et de la vitesse de rotation	13
1.10.2. Effet du temps	15
1.11. Influence des paramètres d'entrée sur la qualité de la soudure	16
1.12. Phénomènes thermiques de soudage	16
1.12.1. Cycles thermique de soudage	16

1.13. Transfert de chaleur	18
1.13.1. Transfert de chaleur par conduction	19
1.13.2. Transmission de chaleur par convection	20
1.13.3. Transmission de chaleur par rayonnement	20

CHAPITRE 2 : Revue des travaux antérieurs

2.16. Revue des travaux antérieurs	21
2.17. Conclusion	38

CHAPITRE 3 : Procédures expérimentales

3.1. Introduction	39
3.2. Conditions de soudage	40
3.3. Réalisation du soudage	40
3.3.1. Caractéristiques du tour parallèle Gazeneuve	40
3.4. Montage spécifique	41
3.5. Autres matériels utilisés	42
3.6. Préparation avant soudage	43
3.7. Paramètres de soudage utilisés	44
3.8. Identification du métal de base	44
3.8.1. Choix du métal de base	44
3.9. Opération de soudage par friction direct	45
3.10. Examen micrographique	47
3.10.1. But	47
3.10.2. Mode opératoire	47
3.10.3. Attaque chimique	47

CHAPITRE 4 : Résultats et interprétations

4.1. Introduction	48
4.2. Discussions des résultats.....	48
4.2.1. Les résultats thermiques.....	48
4.2.2. Résultats de l'étude micrographique	54
Conclusion générale	55
Références bibliographiques	56
Annexes	58

Liste des figures

1.1. Principe de soudage par friction	5
1.2. Soudage par friction orbital	6
1.3. Soudage par friction linéaire.....	6
1.4. Soudage par friction bout à bout de barres cylindrique.....	9
1.5. Soudage par entraînement direct ou continu	11
1.6. Phases de soudage par friction inertielle.....	12
1.7. Variation du couple de friction en fonction	14
1.8. Variation de la température de soudage en fonction du temps, pour différents valeurs	14
1.9. Cycle thermique de soudage par TIG	17
1.10. Les différentes zones dans une soudure (par TIG)	17
1.11. Mise en évidence de la conduction d'un matériau	19
2.1. Point de mesure de la température au cours du procédé de soudage par friction	21
2.2. Point de mesure de la température au cours du procédé de soudage par friction	22
2.3. Variation de la température moyenne en fonction de la pression de friction	22
2.4. Résultats d'essais d'endurance de NOVIKOVA	29
2.5. Comparaison des résultats d'essais de traction	34
2.6. Schématisation du procédé de SASSANI et NEELAM.....	35
2.7. Variation de la résistance ultime en fonction de la pression de forgeage, cas titane –nickel en utilisant un intercalaire.....	37
3.1. Vue d'ensemble du tour parallèle	41
3.2. Montage utilisé.....	41
3.3. Vue de l'Unité de soudure de thermocouple.....	42
3.4. Thermocouple série K	42
3.5. Enregistreur électronique utilisé	43
3.6. Disposition des thermocouples soudés	43

3.7. Vue réelle d'une opération de soudage	45
3.8. Polisseuse	47
3.1. Variation de température des trois points en fonction de temps (<i>Eprouvette N 06</i>)	48
4.2. Variation de température des trois points en fonction de temps (Eprouvette N 03)	49
4.3. Variation de température des trois points en fonction de temps (Eprouvette N 08)	49
4.4. Variation de température des trois points en fonction de temps (Eprouvette N 07)	50
4.5 .Variation de température des trois points en fonction de temps (Eprouvette N 10)	50
4.6. Profil de température aux différents instants (4s, 12s, 18s, 24s) (Eprouvette N6)	51
4.7 Profil de température aux différents instants (4s, 12s, 18s, 24s) (Eprouvette N7)	52
4.8. Profil de température aux différents instants (2s, 4s, 8s, 12s) (Eprouvette N10)	52
4.9. Profil de température aux différents instants (2s, 4s, 8s, 12s) (Eprouvette N3)	53
4.10. Profil de température aux différents instants (2s, 4s, 8s, 12s) (Eprouvette N8)	53
4.11. Résultat de l'étude micrographique	54

Liste des tableaux

1.1	Effet du temps et de l'énergie sur la forme de la soudure	15
2.1	Résultats de GAILLARD	21
2.2	Résultats de CHERNENKO	23
2.3	Paramètres de soudage préliminaires utilisés par GAILLARD.....	24
2.4	Valeurs de la charge de résistance moyenne obtenues à partir des essais de traction.....	25
2.5	Résultats d'IMSHENNIK et GOLOVIN	25
2.6	Paramètres de soudage	26
2.7	Composition chimique de l'acier rapide utilisé	26
2.8	Résultats d'essais de traction	26
2.9	Composition chimique des aciers utilisés par la référence.....	27
2.10	Caractéristiques mécaniques.....	27
2.11	Paramètres de l'opération du traitement thermique	27
2.12	Paramètres optimales de soudage	28
2.13	Paramètres de soudage	28
2.14	Paramètres de soudages utilisés par HOLLANDER et CHENG	30
2.15	Paramètres de consommation	30
2.16	Résultats des essais de flexion.....	31
2.17	Résultats des essais de traction	31
2.18	Conditions de soudage.....	32
2.19	Composition chimique des matériaux de base	32
2.20	Caractéristiques mécaniques des matériaux de base	33
2.21	Conditions de soudage.....	33
2.22	Caractéristiques mécaniques des deux matériaux de base	34
2.23	Conditions de soudage.....	35
2.24	Conditions de soudage Ti-Ni en utilisant une couche intercalaire de Cu.....	36
2.25	Conditions de soudage Al - Al.....	36
2.26	Conditions de soudage du laiton - Cu	37
3.1	Paramètres de soudage par friction direct utilisés	44
3.2	Composition chimique du métal de base	44
3.3	Caractéristiques mécaniques de métal de base.....	45
3.4	Exemples de pièces qu'on a soudées par friction.....	46

introduction générale

Introduction générale

Le soudage par friction est un procédé de soudage qui engendre une perte de chaleur importante lors du frottement de deux pièces que l'on veut souder. Le frottement est obtenu en communiquant un mouvement de rotation à l'une des deux pièces en contact par leurs bouts. Après élévation de la température à un niveau contrôlé, l'ensemble est soumis à un forgeage par pression axiale, ce qui conduit à la formation d'un bourrelet dans le plan de soudure.

Le mémoire est composé de quatre chapitres. Les deux premiers (chapitre 1 et 2) présentent une recherche bibliographique, donnant une synthèse des différents travaux relatifs à l'optimisation des paramètres de soudage.

Dans le chapitre (3) on a présenté la partie expérimentale et les résultats expérimentaux obtenus. La réalisation du soudage par friction sur tour parallèle avec des mesures de températures au cours du soudage, et observation de la microstructure autour de l'interface du joint de soudure ont été conduits.

On a essayé de discuter dans le chapitre (4) les résultats de notre étude. Dans cette partie du rapport, on a mené une discussion autour des points suivants :

* l'évolution de la température, et la microstructure

On termine ce travail par une conclusion générale.

Chapitre 1

Généralités sur le soudage par friction

Généralités sur le soudage par friction

1.1. Soudage

La réalisation d'assemblages indémontables en fabrication mécanique utilise couramment les procédés de soudage. Ces techniques assurent la continuité des pièces à assembler contrairement au rivetage, sertissage, collage ou boulonnage qui présentent des discontinuités physiques ou chimiques. Au fur et à mesure de la diversification et de l'évolution des procédés, on a peu à peu utilisé le terme de soudage désignant l'ensemble des techniques mises en œuvre pour la réalisation de soudures, plutôt que celui de soudure désignant alors le joint par lui-même. Le champ d'application de soudage ne se limite pas aux matériaux métalliques puisque l'on soude du verre, des céramiques ou des matières plastiques. Dans le cas particulièrement important des matériaux métalliques on distingue le soudage autogène du brasage ainsi que le métal de base (matériau constituant les pièces à assembler) du métal d'apport (matériau étranger qui intervient dans l'opération d'assemblage). On distingue ainsi le soudage dont « les pièces à assembler participent à la construction du joint », du brasage dont « la constitution du joint est réalisé par l'intervention du seul métal d'apport ». Trois techniques d'assemblages peuvent être ainsi clairement définies :

Soudage : c'est une opération qui consiste à provoquer la fusion de proche en proche des bords des pièces à assembler, généralement de natures très voisines. L'emploi d'un métal d'apport peut être utilisé.

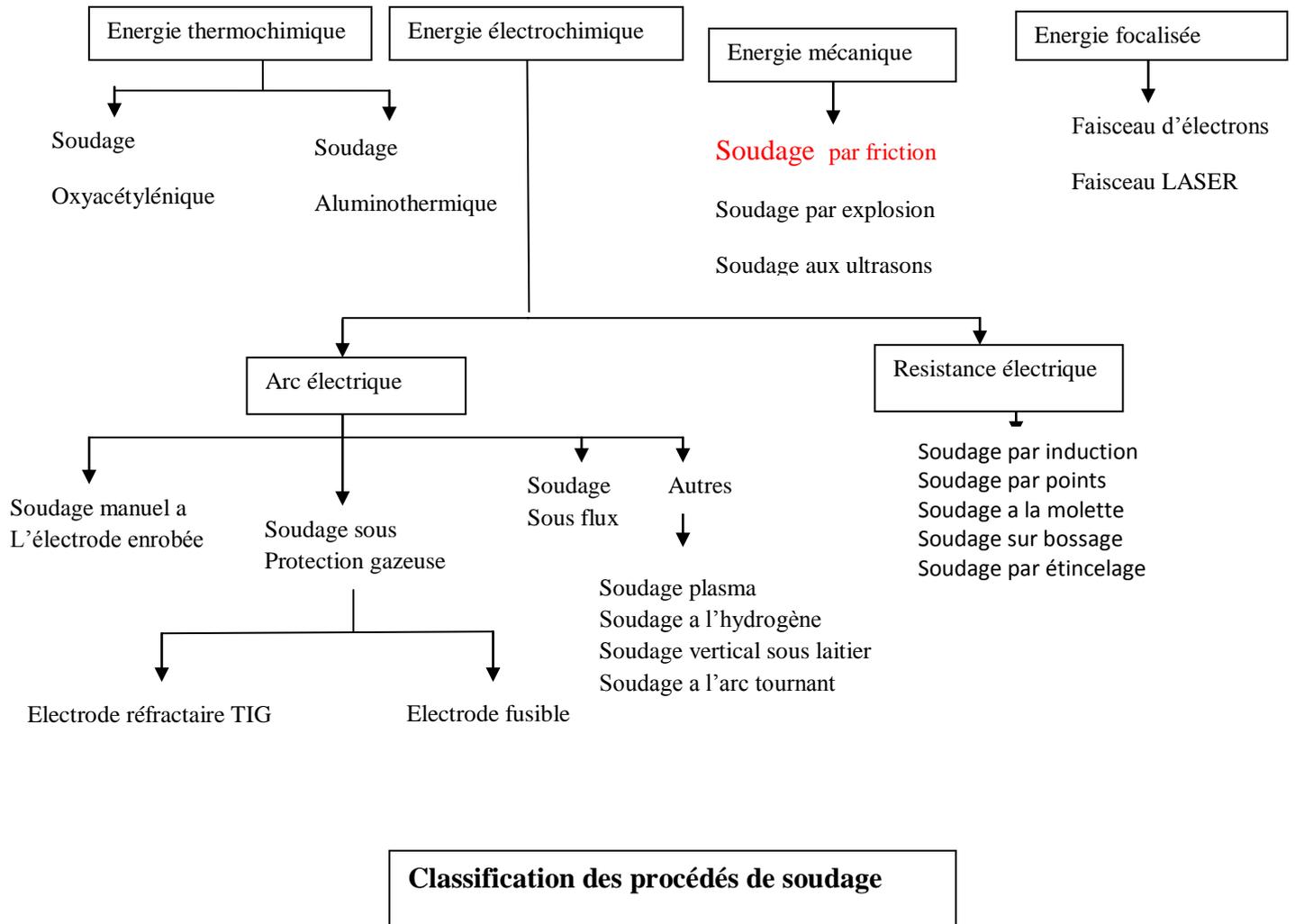
Le brasage : c'est une opération qui consiste à assembler deux pièces métalliques de natures identiques ou différentes par capillarité d'un métal d'apport dans un joint à recouvrement. Ce dernier a un point de fusion toujours inférieur à ceux des métaux de base qui ne fondent pas durant l'opération.

Le soudo-brasage : c'est une technique qui se rapproche du soudage son mode opératoire (joint réalisé de proche en proche) et du brasage (utilisation de métal d'apport dont le point de fusion est inférieur à ceux des deux métaux de base).

Le brasage et le soudo-brasage cherchent à bénéficier des effets de mouillage du métal d'apport sur les pièces. Tels effets existent en soudage mais sont préjudiciables à la morphologie optimale des joints soudés et ne sont pas systématiquement recherchés.

Chapitre 1 : Généralités sur le soudage par friction

Il existe de nombreux procédés de soudage dont les principes et la mise en œuvre sont très différents. Pour les uns, l'assemblage est obtenu par fusion locale des éléments à assembler, pour d'autres, la continuité métallique est obtenue sans fusion mais par effets purement mécaniques.



1.2.Procédé de Soudage par friction

Connu dès la fin du siècle dernier, mais rarement employé, le soudage par friction a été développé sous sa forme industrielle en Union soviétique vers 1956 puis en Grande-Bretagne et aux États-Unis quelques années plus tard. [2].

Le soudage par friction est un procédé de soudage mécanique où la chaleur nécessaire pour le soudage est fournie en frottant l'une contre l'autre les pièces à assembler sous une pression axiale. En pratique, le procédé de soudage par friction par rotation est le plus utilisé. Le principe de base est qu'une des deux pièces à assembler est mise en rotation et ensuite serrée contre l'autre. L'énergie apportée à la pièce en rotation est transformée, par friction, en chaleur dans la surface de contact des pièces à assembler. Cette chaleur augmente la température de la surface de séparation jusqu'à la température de forgeage sans atteindre cependant la température de fusion. À cet instant, les deux pièces sont forgées l'une à l'autre au moyen d'une pression axiale. 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 de soudage par friction sont:

- les assemblages sont de haute qualité;
- la rapidité du procédé par rapport aux procédés de soudage conventionnels;
- la possibilité d'une automatisation complète du processus de telle sorte qu'une qualité constante est garantie.

En 1991 un nouveau procédé de soudage par friction malaxage (FSW) est mis au point par TWI (The Welding Institute). Il permet un assemblage par voie solide, ce qui supprime les défauts liés à la solidification et conduit à des contraintes internes plus faibles que les procédés de soudage classiques [7] [8]. Ce procédé est donc bien adapté aux alliages d'aluminium difficilement soudables. Ce procédé d'assemblage est particulièrement intéressant dans le cadre de l'allègement des structures pour le transport aérien, naval et terrestre.

Dans ce chapitre on donnera une étude bibliographique sur le soudage par Friction. Durant le procédé de soudage, un gradient de température et de matière est mis en jeu à travers le joint, conduisant à des microstructures et des propriétés complexes. Pour simplifier la démarche, nous abordant tout d'abord les différents processus intervenant durant le soudage.

Le processus de soudage à l'état solide se produit à une température plus faible que la température de fusion du métal de base. Ce processus peut être obtenu par déformation partielle plus une diffusion de la matière. Dans cette famille, on y trouve le soudage par friction. Le soudage par friction existe sous différentes formes, les plus significatives sont :

- 1- soudage par friction direct.
- 2- soudage par friction inertielle.
- 3- soudage par friction orbitale.
- 4- soudage par friction radiale.
- 5- dépôt métallique de soudage par friction.
- 6- soudage par friction malaxage (FSW).

1.3.Principes du procédé de soudage par friction

Le soudage par friction est un procédé de soudage mécanique où la chaleur nécessaire pour un soudage est fournie en frottant ou en mettant en rotation l'une contre l'autre les pièces à assembler sous une pression axiale. Le principe du soudage par friction est présenté dans sa forme la plus simple à la *figure .1.1*.

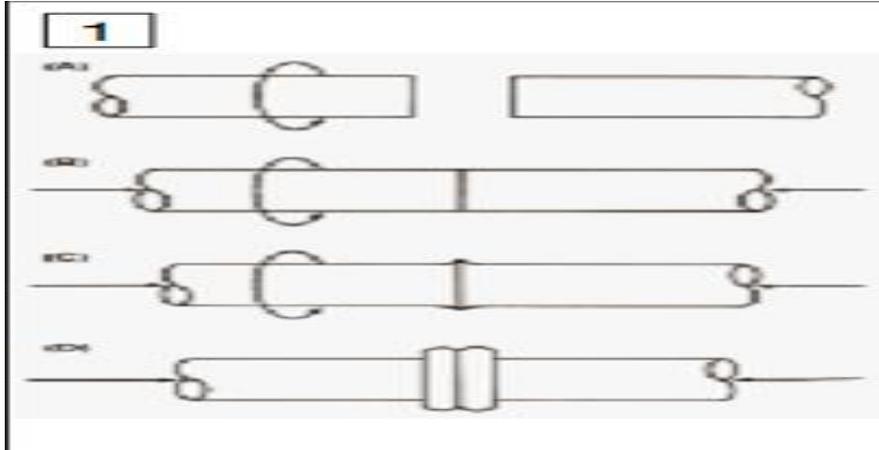


Figure. 1.1 : principe de soudage par friction

La rotation est le moyen presque exclusivement utilisé pour créer la friction (figure.1.1). 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.

Une opération de soudage par friction s'exécute sur une machine très spécifique et souvent adaptée à un type d'assemblage particulier.

La variante la plus utilisée du procédé est le soudage par friction par rotation. On peut l'utiliser pour l'assemblage de pièces symétriques en rotation comme des tuyaux et des barres, mais également pour certaines géométries plus complexes. D'autres variantes existent encore.

Chapitre 1 : Généralités sur le soudage par friction

Le soudage par friction orbital peut être utilisé pour souder des pièces ayant une intersection symétrique mais pas en rotation (*figure .1.2*). Deux pièces sont serrées l'une contre l'autre et une partie exécute un petit mouvement circulaire par rapport à l'autre. Ceci donne une vitesse tangentielle uniforme sur toute la surface. Quand le mouvement s'arrête, les deux parties sont rapidement alignées l'une par rapport à l'autre et la force de forgeage est appliquée afin de former la soudure.

Lors du soudage par friction linéaire (*figure. 1.3*), la chaleur nécessaire est créée par un mouvement de va et vient des pièces à souder. Ce procédé permet de souder des pièces à section rectangulaire. Le procédé par friction peut également être utilisé pour déposer des couches de rechargement ou pour réaliser des réparations à l'aide du procédé de soudage "friction stitch". Lors du soudage par friction malaxage (friction stir welding), un outil rotatif constitué d'un pion profilé et d'un épaulement est enfoncé dans la matière jusqu'à ce que l'épaulement touche la surface du matériau à souder. La matière est donc chauffée par friction à des températures où elle est facilement déformable. Lorsque l'outil avance, la matière s'écoule de l'avant vers l'arrière du pion pour former le joint soudé. Un système de calmage performant est nécessaire pour obtenir de bons joints. Les problèmes inhérents aux procédés de soudage par fusion d'alliages d'aluminium à haute résistance comme les fissures, la porosité ainsi que la diminution de résistance de la zone affectée thermiquement ne sont pas rencontrés en friction stir welding.

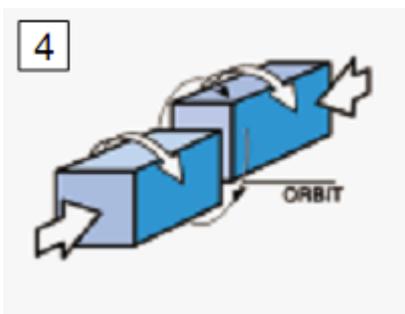


Figure. 1.2 : Soudage par friction orbital

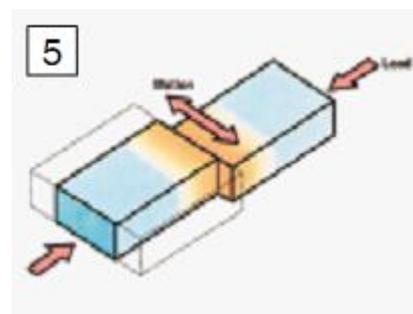


Figure .1.3 : Soudage par friction linéaire

De plus, le retrait des oxydes qui constitue une grande partie du temps de préparation des joints à souder ainsi qu'une protection gazeuse ne sont pas nécessaires. Le procédé de friction malaxage n'est pas limité à la soudure des alliages d'aluminium: des résultats encourageants ont été obtenus avec des alliages de titane, de cuivre, de nickel, de magnésium ainsi qu'avec l'acier, l'acier inoxydable, des thermoplastiques,...

1.4. Avantages et limites de la technique

- Assemblages de haute qualité ayant une bonne structure métallurgique comme le matériau n'est pas porté à fusion.
- Pas de préparation spéciale des pièces.
- Le procédé de soudage est beaucoup plus rapide que les procédés de soudage conventionnels.
- Peu de déformations après soudage en raison des temps de soudage courts et des faibles températures maximales.
- Possibilité d'assembler des pièces de sections fortement différentes à condition de prendre certaines mesures de précaution.
- Économique: le soudage par friction permet de réaliser d'importantes économies sur le coût des pièces soudées (économie en temps, en matériau).
- Des matériaux dissemblables peuvent être assemblés, comme l'aluminium ou le cuivre à de l'acier.
- Très bonne reproductibilité et possibilités d'automatisation.
- Métaux d'apport pas nécessaires
- l'élimination des problèmes de fissurations à chaud et de criques.
- l'équipement utilisé est simple ce qui demande peu de maintenance et peu de qualification pour le fonctionnement.
- métaux d'apport non nécessaires.
- les matériaux à souder ne doivent pas avoir la propriété d'être lubrifiés à sec (les matériaux contenant ; du graphite du sulfure de fer ,Pb.....tels que la fonte grise, bronze, laiton,.....etc. ne peuvent pas être soudés par ce procédé)
- Soucieux de l'environnement: pas de gaz de protection, pas de fumées de soudage ou rayonnement.
- Moins de bruit
- Pas de nécessité de soudeurs agréés.

1.5.Applications

Le procédé de soudage par friction peut être utilisé pour de nombreuses applications. Il est ainsi utilisé, par exemple, dans l'aviation et la navigation spatiale pour le soudage de boulons à crochet, pour la fabrication de tiges de piston légères ou bien pour des éléments de boîtes de vitesse. Le soudage par friction est également utilisé dans la pétrochimie, par exemple. Pour le soudage de brides à des valves hydrauliques ou pour le soudage de tiges de forage. Les soudures par friction sont suffisamment fortes pour résister aux couples élevés durant le forage. De plus, le soudage par friction permet d'assembler des matériaux ne pouvant être assemblés avec des procédés conventionnels.

Exemples: l'aluminium à l'acier ou le titane au cuivre. Cette possibilité permet de faire des économies par une conception judicieuse de telles pièces: des pièces en un matériau très onéreux peuvent être remplacés par des pièces soudées où les matériaux onéreux ne sont utilisés que localement où c'est nécessaire.

Exemple: conception d'une soupape d'un moteur à combustion. Les bases en matériau réfractaire sont soudées à la tige de soupape fabriquée en un matériau résistant à l'usure.

Le soudage par friction est également très utilisé lors de la production d'éléments pour véhicules agricoles. Une économie notable en coût peut être réalisée par le remplacement de pièces complètement forgées par de petites pièces forgées soudées à des barres ou des tubes.

Le soudage par friction est utilisé pour la production de pièces dans l'industrie automobile comme des stabilisateurs, des soupapes, des tiges de piston, des pompes à eau,...

1.6.Les types de soudage par friction

Dans notre projet on s'intéresse au soudage par friction bout à bout de barres cylindrique la figure 1.4a.

Dans la pratique, le soudage par friction s'applique de façon naturelle à des assemblages, selon l'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.

Une opération de soudage par friction s'exécute sur une machine très spécifique et souvent adaptée à un type d'assemblage particulier. La figure I.4b montre la vue en coupe d'un assemblage soudé par friction.

On distingue deux modes de soudage selon la façon dont on exécute la friction :

Chapitre 1 : Généralités sur le soudage par friction

**le soudage par friction directe* : par entrainement direct ou conventionnel.

**le soudage par friction inertielle* : par accumulation d'énergie.

Ils donnent lieu à des assemblages identiques, mais ils ont en pratique des domaines d'application distincts.

Ces deux modes ont été normalisés pour les constructions aéronautique, afin de préciser les caractéristiques et la qualité des assemblages soudés obtenus.

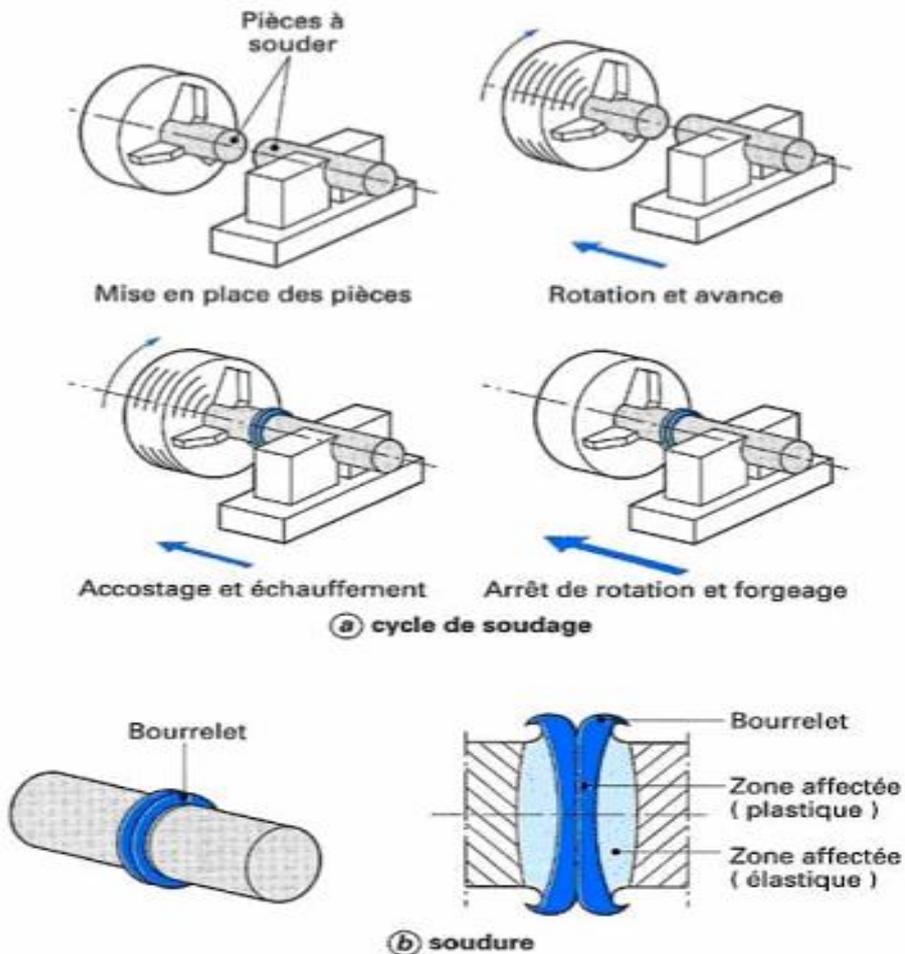


Figure. 1.4. Soudage par friction bout à bout de barres cylindrique [2].

Deux autres façons d'engendrer une soudure par friction :

* *le soudage radial* : particulièrement adapté aux pièces tubulaires de grande longueur, évitant la rotation de l'une d'elles grâce à un anneau intermédiaire formant la liaison.

**le soudage orbital* : qui permet de respecter l'alignement relatif des pièces ou de réaliser l'assemblage de deux barres de section carrée.

1.6.1.Soudage par entrainement direct

Supposons que deux axes ou tubes doivent être soudés bout à bout, on immobilise alors une partie tandis que l'autre est mise en rotation à une vitesse constante. Quand les deux pièces serrées l'une contre l'autre entrent en contact, les forces de friction provoquent un couple de résistance. L'énergie mécanique créée est transformée en chaleur dans la surface de contact.

La chaleur générée augmente la température en un temps relativement court jusqu'à la température de soudage (température de forgeage). Ensuite, la partie en rotation est détachée du moteur, freinée jusqu'à l'arrêt. Une force de forgeage axial est alors exercée afin de réaliser une soudure entre les deux pièces. Durant la phase d'échauffement et la phase de soudage, une quantité de matière plastique est poussée vers l'extérieur, sous l'influence de la force de pression axiale, de telle sorte que le bourrelet de soudage est formé figure. 1.5.

1.7. Les différentes phases de l'opération de soudage

1.7.1. Phase d'accostage

Mise en contact solide des deux pièces, cette phase se caractérise par :

- * Le couple de friction et la force axiale augmentant graduellement jusqu'à ce qu'ils atteignent leur valeur maximum (optimale).
- * A ce stade la formation du bourrelet n'est pas encore déclenchée (aucun raccourcissement axial ne se produit durant cette phase).

1.7.2. Phase transitoire

Cette phase correspond au chauffage des pièces elle est caractérisée par :

- * Une même vitesse que la phase d'accostage
- * Un raccourcissement axial commence au début de cette phase
- * La température de l'interface atteint la température de soudage
- * Le métal se trouve à l'état plastique
- * Le couple de friction et la force axiale diminue durant cette phase jusqu'à atteindre une valeur dite d'équilibre.

1.7.3. Phase d'équilibre

- * Formation du bourrelet durant cette phase
- * Le couple de friction et force axiale augmente durant cette phase
- * La température moyenne diminue cela jusqu'à la fin de l'opération de soudage.

1.7.4. Phase de forgeage

C'est la phase finale du cycle de soudage, au cours de laquelle les pièces commencent à se refroidir, elle est caractérisée par :

- * Une pression de forgeage supérieure à la pression de friction, le couple de friction diminue ensuite et s'annule ;
- * Augmentation du raccourcissement axial [3,4].

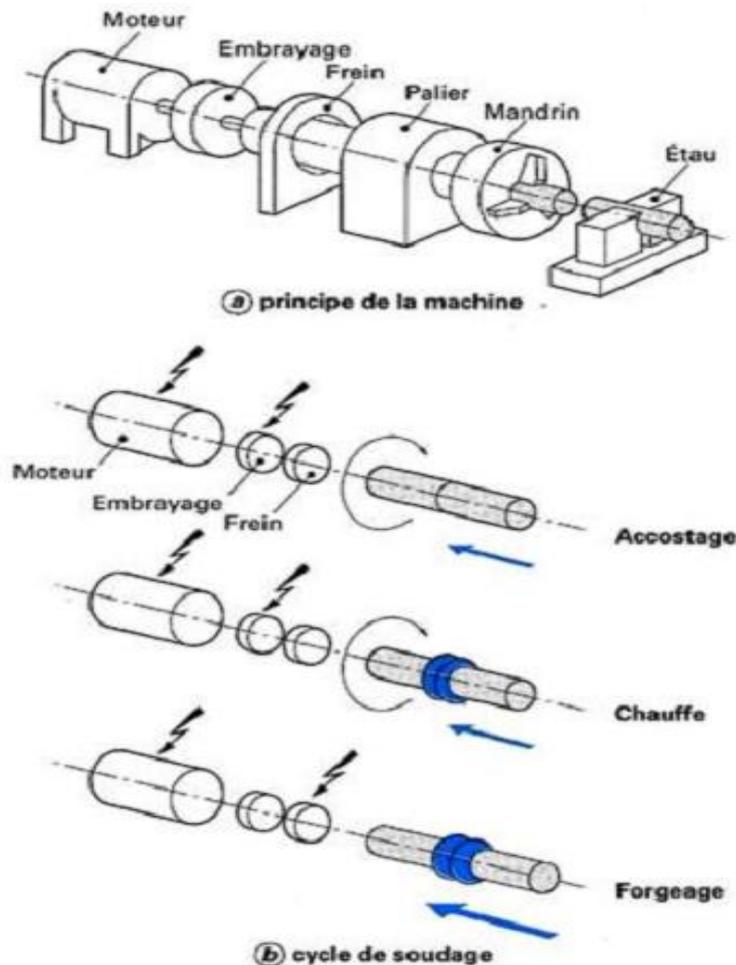


Figure. 1.5. Soudage par entraînement direct ou continu [2].

1.8. Le soudage par friction inertielle

Le soudage par friction inertielle permet l'assemblage sans atteindre la température de fusion. De plus, la rapidité d'exécution de l'opération de soudage entraîne une réduction des coûts de production et il est possible de souder des matériaux très différents.

1.8.1. Le principe du soudage par friction inertielle

Le principe du soudage de deux pièces (notées 1 et 2) peut être décrit en quatre phases :



Figure. 1.6. Phases de soudage par friction inertielle [5].

Phase 1 ($t < t_0$) : La pièce à souder n°1 solidaire d'un ensemble de volants d'inertie, est mise en rotation grâce à un moteur hydraulique. Quand la vitesse de rotation N_a atteint la vitesse de soudage désirée, l'alimentation du moteur hydraulique est coupée. La pièce à souder n°1 est alors libre en rotation.

Phase 2 ($t_0 < t_1$) : Un vérin hydraulique de poussée amène la pièce à souder n°2 en contact avec la pièce n°1 et exerce l'effort de friction nécessaire au soudage.

Phase 3 ($t_1 < t_2$) : Les conditions thermomécaniques du soudage sont réalisées : le vérin de poussée avance sous effort contrôlé. Cette phase cesse avec la rotation de la broche. L'énergie cinétique s'est alors transformée intégralement en énergie thermique permettant la soudure des deux pièces.

Phase 4 ($t_2 < t$) : L'effort de forgeage est maintenu pendant une dizaine de secondes (phase de forgeage).

1.9. Influence des grandeurs physiques

Les grandeurs physiques qui interviennent dans le soudage par friction sont la quantité de chaleur Q et la pression axiale p . en effet, Q aura pour rôle de chauffer les pièces à souder à la température d'assemblage, tandis que p intervient dans le forgeage du joint. Ces deux paramètres ne sont pas indépendants, mais sont liés par des relations complexes et difficiles à quantifier. Par contre les phénomènes physiques qui se produisent à chacune des phases de soudage par friction sont :

1. L'échauffement ;
2. La plasticité ;
3. L'écoulement du métal ;
4. Le forgeage ;

La configuration du soudage par friction est d'une apparence simpliste, mais en réalité on rencontre un certain nombre de difficultés dans l'établissement des relations entre les différents paramètres.

1.10. Effet des paramètres d'entrée

On entend par paramètres d'entrée, les paramètres de fonctionnement affichés tels que :

- La vitesse de rotation, ou loi de sa variation
- La force axiale de friction et de forgeage
- Le temps de friction
- Le temps entre l'arrêt de la rotation et le forgeage.

Les paramètres de sortie sont :

- Soit ceux que l'on peut afficher sur machine ; couple de friction, avance du chariot....
- Soit ceux que l'on peut déterminer sur les pièces soudées tels que :
La déformation et le raccourcissement (taux de consommation du métal) ou variation de température.

1.10.1. Effet de l'effort F et de la vitesse de rotation

L'augmentation de la force axiale F entraîne une augmentation du couple, car cela augmente la friction aux différentes phases du soudage (Figure. 1.7a). Par contre l'augmentation de la vitesse de rotation n (t), à force axiale constante, entraîne une réduction de ce même couple (Figure. 1.7b), car le coefficient de frottement se trouve réduit avec effet variable selon les différentes phases de soudage (Figure. 1.7b) [3].

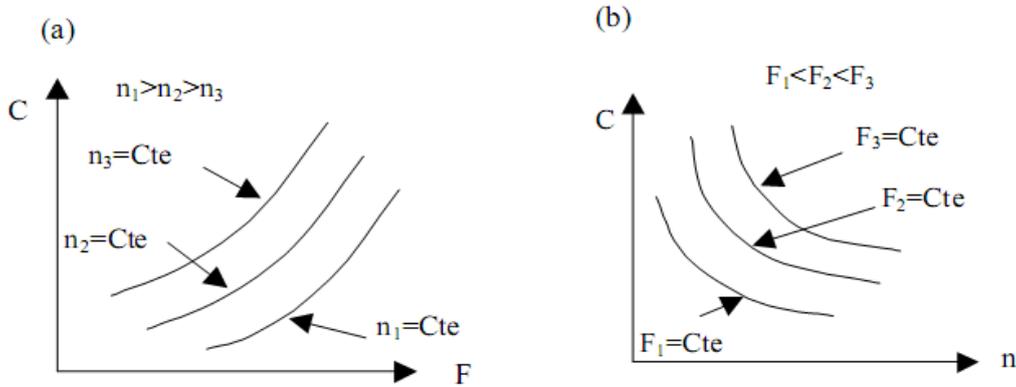


Figure. 1.7 : Variation du couple de friction en fonction : (a) de F et (b) de n [3].

Différentes méthodes expérimentales peuvent être utilisées pour mesurer la température (thermocouples, pyromètre avec fibre optique, etc.). La température croît très rapidement (quelques dixièmes de secondes) au début du soudage pour atteindre environ 1000°C, elle tend ensuite asymptotiquement vers une valeur d'équilibre dont la valeur dépend des conditions de soudage.

On a constaté qu'à une vitesse de rotation constante la température d'équilibre est atteinte d'autant plus rapidement que la force axiale est grande (Figure. I.8a) et qu'à force axiale constante, la température d'équilibre atteinte est légèrement plus élevée lorsque la vitesse de rotation croît (Figure. I.8a). Enfin, l'augmentation du temps de friction fait croître légèrement la température d'équilibre (Figure. I.8b).

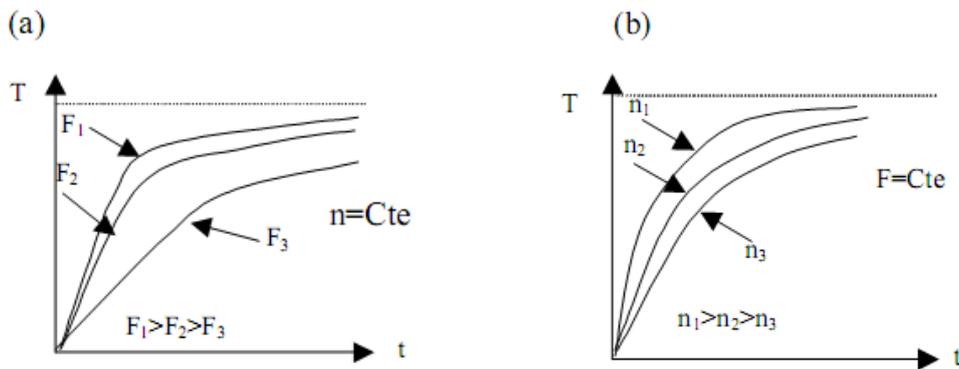


Figure. I.8: variation de la température de soudage en fonction du temps, pour différents valeurs ;(a) de Fet (b) de n. [3]

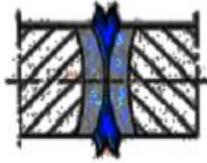
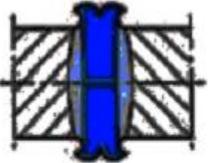
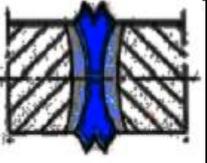
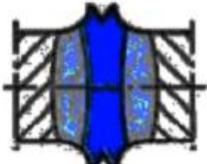
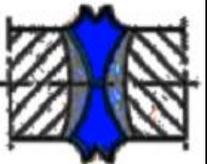
I.10.2. Effet du temps

En dernier lieu, le temps (t_f) entre l'arrêt de la rotation et le moment d'application de l'effort de forgeage à une importance considérable. En fait, cet effet, constitue un temps optimum du cycle de soudage ou la température à l'interface atteint la valeur nécessaire pour le forgeage. Ce temps (t_f) représente un compromis entre le refroidissement de l'interface et la condition de forgeage [3].

* Si le temps (t_f) est très court la température de l'interface peut être importante et la consommation du métal élevée, par exemple sur un cycle total de 12 secondes la consommation du métal peut être réduite de 1,2 mm en choisissant convenablement ce temps,

* Si le temps (t_f) est long, la température de l'interface risque de chuter à une valeur incompatible avec un bon forgeage.

La durée de friction est mesurée et mise en évidence par le Tableau 1.1.

Tableau 1.1 – Effet du temps et de l'énergie sur la forme de la soudure [2]			
Durée d'échappement	Faible énergie	énergie moyenne	Forte énergie
2 à 3 s			
7 à 8 s			
<p>Faible énergie : grande vitesse de 3 m/s, faible pression de 2 daN/mm² et avance du chariot de 1 mm/s</p> <p>Énergie moyenne : vitesse optimale de 2 m/s, pression normale de 5 daN/mm² et avance du chariot de 3 mm/s</p> <p>Forte énergie : faible vitesse de 1 m /s, forte pression de 10 daN/mm² et avance du chariot de 7 mm/s</p>			

Un temps trop court fournit une zone affectée thermiquement irrégulière et en revanche, un temps trop long entraîne une consommation de métal surabondante.

1.11. Influence des paramètres d'entrée sur la qualité de la soudure

Le choix des paramètres d'entrée de soudage est très important. Des travaux ont montré l'effet de la variation de l'effort axial sur la qualité de la soudure. Deux séries ont été effectuées sur des barreaux en acier de 16mm de diamètre dans l'expérience réalisée par les chercheurs soviétiques FOMICHEV et IMSHENNIK [6]. Une série dans les conditions classiques du soudage continu, l'autre en utilisant trois niveaux successifs d'efforts. Les avantages obtenus par l'utilisation d'un effort variable sont résumés comme suit :

- * Cycle de soudage plus court ;
- * Raccourcissement ou consommation du métal plus faible ;
- * Meilleure reproductibilité de l'opération de soudage ;
- * Effort mécanique 40% plus faible.

1.12. Phénomènes thermiques de soudage

1.12.1. Cycles thermique de soudage

Au cours de l'opération, la pièce est soumise à un certain cycle thermique, la zone qui se trouve aux environs de la soudure subit un échauffement. En chaque point de cette région la température varie en fonction du temps suivant une certaine loi qui dépend :

- * du procédé de chauffage.
- * de la nature du métal.
- * de la forme de pièce.

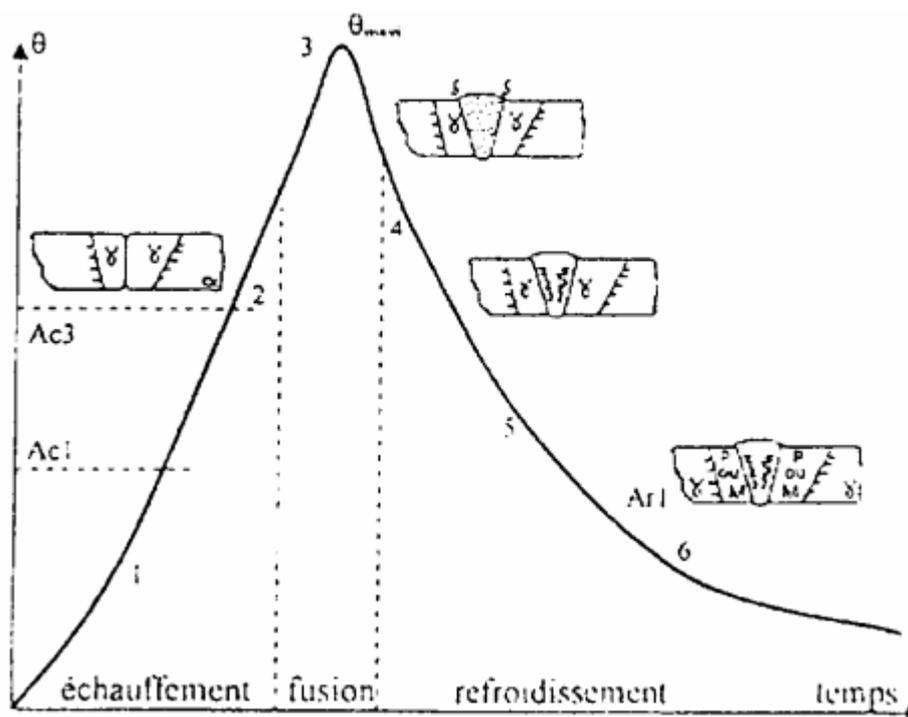


Figure. 1. 9. Cycle thermique de soudage par TIG.

La région de la soudure comporte trois zones visibles sur coupe micrographique de l'assemblage à savoir :

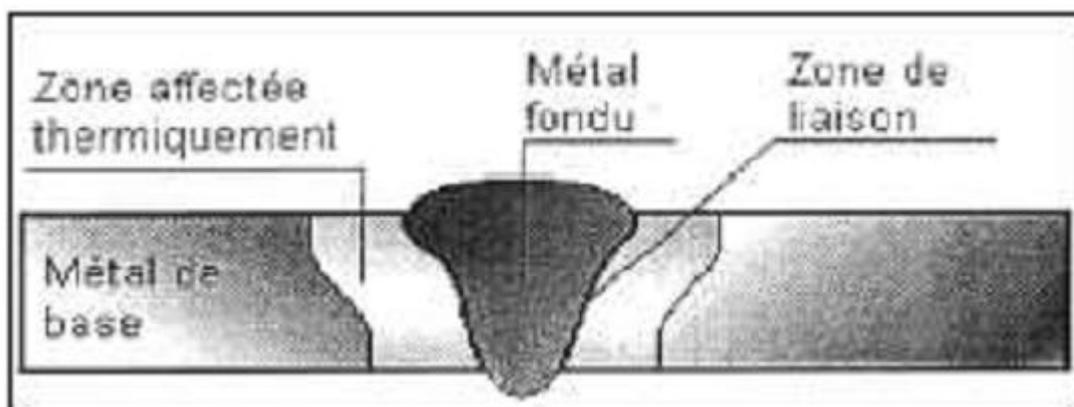


Figure .1.10. Les différentes zones dans une soudure (par TIG).

a. Zone fondue (ZF)

C'est la région où l'état liquide a régné pendant l'exécution de la soudure. Elle a été obtenue par fusion de métal de base, avec la participation plus ou moins importante du métal d'apport. Si la soudure est brute d'exécution, les gains résultant de la solidification y sont en général visibles sans grossissement. Le métal qui la constitue est appelé métal fondu, le métal apporté à l'état liquide, c'est-à-dire avant dilution, est appelé métal déposé.

b. Zone de liaison

Cette zone correspond à la limite jusqu'à laquelle le métal de base a été porté à la fusion. Elle délimite ainsi la zone fondue et elle est mise en évidence par la différence de structure que l'on constate de part et d'autre. Si on y regarde de plus près, on doit tenir compte du fait que tout alliage (métal-métal ou métal-impuretés) est caractérisé par un domaine de température dit intervalle de solidification dans lequel coexistent deux phases liquide et solide. D'autre part, l'intérêt de cette zone, elle représente le siège de l'amorçage de la solidification du métal fondu.

c. Zone affectée thermiquement (ZAT)

La ZAT est la zone au sein de laquelle le cycle thermique de soudage a provoqué une ou plusieurs transformations de la structure du solide intervenant sous l'effet de l'échauffement.

1.13 Transfert de chaleur

Le transfert de chaleur peut être défini comme étant la transmission d'énergie d'une région à une autre sous l'influence d'un gradient de température qui existe à l'intérieur d'un système, ou lorsque deux systèmes à températures différentes sont mis en contact. Le processus par lequel le transfert de chaleur s'effectue est désigné par le terme transmission de la chaleur.

La grandeur transférée, appelée chaleur, ne peut être ni mesurée ni observée directement, mais les effets qu'elle produit sont sujets à l'observation et aux mesures. Le transfert de chaleur s'effectue généralement selon trois modes de transmission : Conduction, convection et rayonnement.

I.13.1. Transfert de chaleur par conduction

Soit barre (figure. 1.11) d'une certaine longueur est chauffée à l'une de ses extrémités. À l'autre extrémité, un thermomètre est implanté au cœur de la barre. Au bout d'un certain temps, le thermomètre reçoit une quantité de chaleur dont l'importance et la rapidité dépendent de la nature et de la longueur de la barre. L'échauffement, imposé à l'origine de la barre, s'est transmis par conduction à son extrémité.

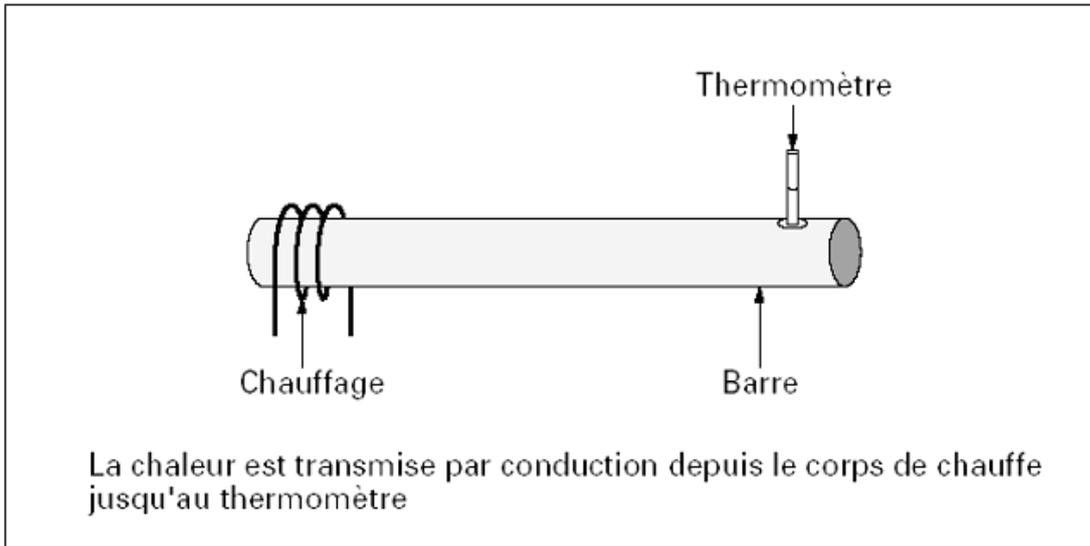


Figure. 1.11. Mise en évidence de la conduction d'un matériau. [8]

La conduction est définie comme le mode de transmission de chaleur (ou l'échange d'énergie interne) provoqué par la différence de température entre deux régions d'un milieu solide, liquide, gazeux ou encore entre deux milieux en contact physique, il n'y a pas de déplacement appréciable de molécule.

La conduction est le seul mécanisme intervenant dans le transfert de chaleur dans un solide homogène, opaque et compact [9]. La conduction est régie par l'équation :

$$\bar{q} = -k \cdot \text{grad}T$$

\bar{q} : Densité de flux de chaleur (puissance par unité de surface) $[W/m^2]$

T : Température. $[^{\circ}C \text{ ou } K]$

K : conductivité thermique dépendent de la nature de matériaux et de sa température.

1.13.2. Transmission de chaleur par convection

Le transfert de chaleur par convection est un mécanisme de transfert d'énergie entre une surface solide et un fluide (liquide ou gaz). Il est désigné selon le mode d'écoulement de fluide par convection libre (naturelle) ou convection forcée.

- Convection libre ou naturelle : ce mouvement résulte simplement de la différence de densité entre les parties chaudes et froides du fluide.
- Convection forcée : ce mouvement des fluides est produit par une action extérieure (ventilateur, pompe, etc...).

1.13.3. Transmission de chaleur par rayonnement

Le terme rayonnement est généralement appliqué à toutes sortes de phénomène électromagnétique, mais dans la transmission de la chaleur, le rayonnement est défini comme le mécanisme par lequel la chaleur se transmet d'un corps à haute température vers un autre à basse température lorsque ces corps sont séparés dans l'espace ou même lorsqu'un vide existe entre eux. Les ondes électromagnétiques de fréquences déterminées constituent les supports matériels de ce type de transmission de chaleur.

1.14. Conclusion

Le soudage par friction est un procédé dont le développement industriel est relativement récent. Son créneau d'emploi est particulier, mais son développement peut être très important en particulier dans l'industrie mécanique de grande série comme l'automobile. Ce procédé est connu par, sa productivité, sa fiabilité, son insertion en chaîne de production, sa résistance aux hautes sollicitations et sa régularité, qui sont des atouts d'incitations à son développement. Une meilleure compréhension des phénomènes physiques et une meilleure évaluation quantitative de l'influence des paramètres de soudage sur la qualité du joint, permettront de mieux contrôler les cycles de fonctionnement des machines et les conditions de soudage à condition que cela ne soit pas au prix d'un investissement trop onéreux. Une connaissance approfondie et quantitative des conditions et une maîtrise des paramètres de soudage permettra de mieux l'adapter aux besoins de l'industrie et de l'utilisateur.

Chapitre 2

Revue des travaux antérieurs

2.1. Revue des travaux antérieurs

Parmi les travaux qu'on a choisis d'inclure dans ce chapitre ceux déjà assez anciens de HOLLANDER, IMSHENNIK, et ceux plus récents RUGE et THOMAS, DUNKERTON, SASSANI, NEELAM, CHERNENKO. Les résultats des travaux publiés rappellent les diverses observations et évaluations qualitatives. GAILLARD [9] a réalisé des essais de relevé du cycle thermique sur des barreaux en acier 35 CD4 de 35mm de diamètres. Les mesures ont été effectuées au plus proche plan du joint, d'une part dans l'axe de symétrie (T_c) et d'autre part à la moitié du rayon ($T_{r/2}$) (figure 2.1). Les résultats des mesures de la température et les paramètres de soudage utilisés par l'auteur sont résumés dans le tableau 2.1.

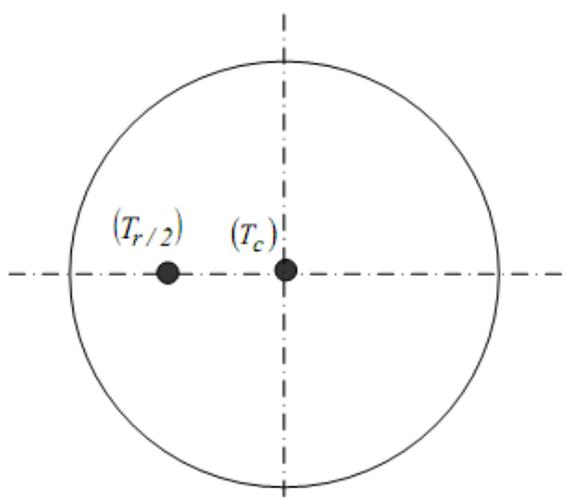


Figure. 2.1 : Point de mesure de la température au cours du procédé de soudage par friction [10]

Machine De soudage	Vitesse De la Broche [tr/mn]	friction		forgeage		Température maximale [°C]	
		Pression [bars]	Temps[s]	Pression [bars]	Temps[s]	Dans L'axe	Demi rayon
Sciaky F2500	1000	65	13	190	2	1060	990

Tableau. 2.1 : Résultats de GAILLARD [9]

Chapitre 2 : Revue des travaux antérieurs

CHERNENKO [11] a réalisé des opérations de soudage par friction sur des barres en aluminium et en acier de 25 mm de diamètre, afin d'effectuer des mesures de température à différents points proches de la section. L'auteur réalise ces opérations de soudage sur une machine standard marque MST- 41 en utilisant, des pressions de friction allant de 25 à 300 MPa de friction (figure. 2.2), des pression de forgeage allant de 60 à 300 MPa et trois vitesses de rotation de l'ordre de 362, 716, et 1126 tr/mn. Une fois ces opérations de soudage effectuées, l'auteur réalise des essais mécaniques pour caractériser le joint de soudure par le biais des essais de traction, de flexion et des essais de chocs. Les résultats publiés sont illustrés dans la figure. 2.3 et le tableau. 2.2.

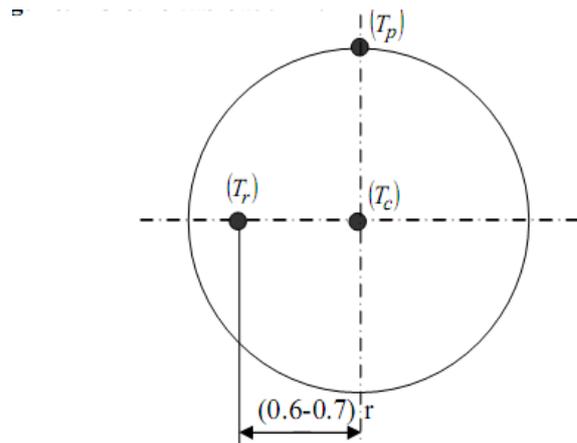


Figure. 2.2 : Point de mesure de la température au cours du procédé de soudage par friction [11]

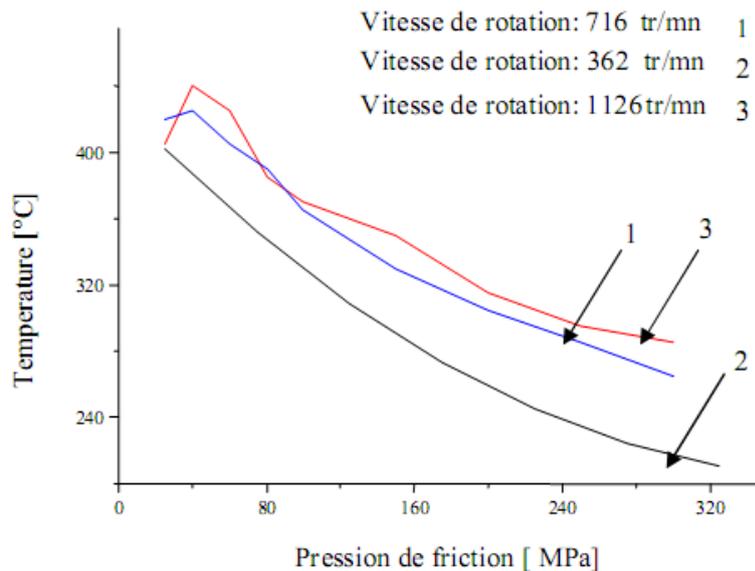


Figure. 2.3 : Variation de la température moyenne en fonction de la pression de friction [11]

Tableau. 2.2 : Résultats de CHERNENKO [11]

N° des essais	F _{friction} [MPa]	F _{forgeage} [MPa]	t (s) (****)	RC ^(*) [J/cm ²]	Rm [MPa]	α[degrés] (***)	Tm [°C] (**)
Vitesse de rotation 362 tr/mn							
1	25	60	15.0	50	85	90	405
2	40	80	8.0	60	87	90	390
3	60	100	4.0	35	90	90	355
4	80	120	3.5	25	70	80	315
5	100	100	2.5	20	40	45	375
6	150	150	2.0	10	30	35	295
7	200	200	1.5	6	18	20	240
8	250	250	1.3	4	12	10	235
9	300	300	1.0	1.5	9	0	220
Vitesse de rotation 716 tr/mn							
10	25	60	9.0	48	88	90	405
11	40	80	5.0	60	90	90	440
12	60	100	3.0	58	89	90	425
13	80	120	2.0	60	89	90	385
14	100	100	1.5	50	86	90	370
15	150	150	1.2	26	69	50	350
16	200	200	1.1	18	40	40	315
17	250	250	0.9	16	35	35	295
18	300	300	0.8	8	20	20	285
Vitesse de rotation 1126 tr/mn							
19	25	60	7.5	53	83	90	420
20	40	80	4.0	52	88	90	425
21	60	100	2.0	54	90	90	405
22	80	120	1.5	57	85	90	390
23	100	100	1.2	37	85	85	365
24	150	150	1.0	22	60	45	330
25	200	200	1.0	15	35	30	305
26	250	250	0.9	8	18	15	285
27	300	300	0.9	2	8	0	265

(*) Résistance au choc, (**) Température moyenne, (***) angle de flexion,

(****) Temps de soudage

D'après les résultats publiés on remarque que pour la même pression de friction et de forgeage, on relève :

- * une diminution du temps de l'opération de soudage avec l'augmentation de la vitesse de rotation. Une multiplication de la vitesse par 2, diminue le temps de l'opération de soudage de 40%,
- * que les deux vitesses de rotation, 362 tr/mn et 1126 tr/mn, donnent pratiquement la même limite de rupture R_m ,
- * que la valeur de la température au cours du procédé est quasi-constante dans les 3 vitesses de rotation,
- * que la résilience est la même pour les trois vitesses de rotation et ce, quand la pression de friction et de forgeage varie respectivement entre 25 – 60 bars et entre 60–100 bars.

GAILLARD [9] réalise un programme d'essai pour le compte de : la Régie National des Usines Renault (R.N.U.R) visant à déterminer certaines propriétés mécaniques du joint en particulier, la traction, la torsion, le chocs à basse température et la fatigue par torsion et ceci, en fonction de la forme du bourrelet. Différentes formes de bourrelet étaient obtenues en considérant trois paramètres de soudage déterminants qui sont la vitesse de rotation de la broche, l'effort de forgeage et le retard dans l'application de cet effort par rapport au début de l'opération de freinage de la rotation de la broche.

La combinaison de ces deux valeurs définies à partir des conditions optimisées conduit à la mise en œuvre d'une série d'essais relevant d'un plan statistique du type 2^n . L'auteur réalise ces essais sur des barreaux en acier 27 CD4 de 24mm de diamètre fournis par la R.N.U.R, dont les conditions de soudage préliminaires sont données dans le tableau. 2.3 :

Vitesse de la broche [tr/mn]	Effort de forgeage [MPa]	Temps (*) [s]
800	100	0,32
1300	14,4	0,76
1100	12,4	0,43

(*) C'est le temps séparant le début de la phase de freinage du début de l'application de l'effort de forgeage

Tableau. 2.3 : Paramètres de soudage préliminaires utilisés par GAILLARD [9]

Chapitre 2 : Revue des travaux antérieurs

L'auteur réalise une série d'essais mécaniques statiques sur les éprouvettes obtenues en utilisant les paramètres préliminaires, à savoir, les essais, de traction, de torsion et de chocs à basse température. Les essais de traction ont été effectués sur une série d'éprouvettes soudées, constituée de l'assemblage de deux barreaux de 200 mm de longueur, les bourrelets étant évidemment conservés. La rupture a été observée systématiquement hors de la soudure et de la zone thermiquement affectée. A titre d'exemple, un résultat relatif est donné dans le tableau. 2.4.

charge à la rupture [N]	contrainte à la rupture [MPa]
365000	1054

Tableau. 2.4 : Valeurs de la charge de résistance moyenne obtenues à partir des essais de traction [9]

IMSHENNIK et GOLOVIN [12] ont réalisé des essais de traction et des essais de dureté Rockwell sur des soudures hétérogènes, en utilisant un acier rapide et un autre de construction C45. Les caractéristiques des métaux de base et du joint testé donnent les résultats regroupés dans le tableau. 2.5.

Type	Limite élastique Re [MPa]	Limite ultime Rm [MPa]	A %	Striction %
Acier rapide	550	850	20	15
C45	420	640	32	25
Joint soudé	410	640	30	10

Tableau. 2.5 : Résultats d'IMSHENNIK et GOLOVIN [12]

VILL et POPANDOPULO [13] ont présenté une comparaison des résultats des essais de traction, réalisés sur des joints obtenus par soudage par friction de l'acier rapide à l'acier de construction C45, aux cordons de soudure obtenus par soudure de résistance. L'opération de soudage par friction a été réalisée sur une machine de modèle MST-31 et MST-35 en utilisant des barreaux de 20 mm de diamètre.

Les paramètres de soudage sont résumés dans le tableau. 2.6.

Chapitre 2 : Revue des travaux antérieurs

Vitesse de rotation [tr/mn]	Pression de friction [bars]	Pression de forgeage [bars]	Temps de friction [s]	Temps de forgeage [s]
500	3 – 20	100 – 350	5 – 30	1.5 – 5
1000	3 – 20	100 – 350	5 – 30	1.5 – 5
2000	3 – 20	100 – 350	5 – 30	1.5 – 5

Tableau. 2.6 : Paramètres de soudage [13]

La composition chimique en pourcent de l'acier rapide utilisé est donnée dans le tableau. 2.7.

C	Cr	W	Mo	V	Co	Si	Mn	Ni
1.0	4.33	5.98	4.78	2.1	7.78	0.33	0.2	0.1

Tableau. 2.7 : Composition chimique de l'acier rapide utilisé [13]

Les parties en acier rapide ont été l'objet d'un traitement thermique de type carburation sur une profondeur de 0,15 mm. Les valeurs de résistance ultime en traction pour le joint soudé par friction sont données dans le tableau. 2.8.

Type	Limite ultime Rm [MPa]
Acier rapide	930
C45	620 – 650
Joint soudé	620

Tableau. 2.8 : Résultats d'essais de traction [13]

L'acier de construction C45 est partiellement affecté dans une zone sous l'effet de la chaleur sur une longueur d'environ 0,5 à 0,6 mm. Le W, Cr et Co se diffuse dans l'acier de construction C45 pendant la soudure, à une distance de 5 microns de l'axe de l'interface. L'auteur réalise un recuit sur les joints soudés. Après analyse, ils concluent que le W et le Mo diffusant sur une distance de 20 microns dans l'acier de construction C45, par contre le Cr à 5 microns. Comparé à la soudure par résistance, les joints de soudure par friction sont métallurgiquement plus résistants et plus reproductibles. WELZ et DENNIN [14] ont étudié la possibilité d'utilisation du soudage par friction pour réaliser des soudures en utilisant l'acier rapide avec l'acier

Chapitre 2 : Revue des travaux antérieurs

C60 sur des barreaux de 20mm de diamètre. La composition chimique en pourcent des deux aciers utilisés est donnée dans le tableau. 2.9. Les caractéristiques des métaux de base utilisés sont données dans le tableau. 2.10 :

Type	C	Cr	W	Mo	V	Si	Mn	P	S
C60	0.65	–	–	–	–	0.3	0.7	0.035	0.035
Acier rapide	0.75-0.86	3.8-4.5	6 – 6.7	4.7-5.2	1.7 - 2	0.25	0.25	–	–

Tableau. 2.9 : Composition chimique des aciers utilisés par la référence [14]

Type	Limite élastique Re [MPa]	Limite ultime Rm [MPa]	L'allongement %
Acier rapide	415	736	18.5
C60	481	735 - 883	14

Tableau. 2.10 : Caractéristiques mécaniques [14]

Avant de réaliser les opérations de soudage les auteurs réalisent successivement un certain nombre de traitements thermiques, en l'occurrence, le recuit, la trempe et le revenu. Le tableau. 2.11 résume ces opérations.

Traitement	C60		Acier rapide	
	température [°C]	temps [s]	température [°C]	temps [s]
recuit	680 - 710	-		2 - 4
trempe	780 – 810**		1190 – 1240*	
	800-830 &&	-	500 – 550 ^{&}	-
revenu	530 - 670	-	540 - 560	-

(*) Avec projection d' l'huile et (**) dans un bain d'eau (&) dans un bain de sel et (&&) dans un bain d'huile.

Tableau. 2.11 : Paramètres de l'opération du traitement thermique [14]

Chapitre 2 : Revue des travaux antérieurs

Les auteurs réalisent un certain nombre d'essais, en l'occurrence des tests métallographiques, des mesures de dureté et de résistance par fatigue. Les meilleurs résultats obtenus ont été pour les joints réalisés dans les conditions résumées dans le tableau. 2.12 :

Vitesse de rotation [tr/mn]	Pression de friction [MPa]	Pression forgeage [MPa]	Temps de friction [s]
1460	60	190	23

Tableau. 2.12 : Paramètres optimaux de soudage [14]

NOVIKOVA [17] dans son travail présente en détail la possibilité de reproduire des joints en acier de construction C45 de très bonne qualité présentant des caractéristiques élevées de la résistance à la fatigue. Les pièces testées sont obtenues par soudage, par inertie et par friction directe, dont les paramètres relatifs au premier cas sont résumés dans le tableau. 2.13.

Vitesse de rotation [tr/mn]	Pression de friction [MPa]	Pression forgeage [MPa]	Temps de friction [s]
2400	5	10	13

Tableau. 2.13 : Paramètres de soudage [17]

Différents essais d'endurance ont été réalisés :

- * sur des joints soudés par inertie,
- * sur des joints soudés par friction directe,
- * sur le métal de base.

Tous les essais ont été conduits sous un chargement de flexion rotative sur des éprouvettes de diamètre 30mm, de longueur 495mm et de longueur utile 22mm. Les résultats de NOVIKOVA sont donnés dans la figure. 2.4. Une comparaison des résultats d'essais montre que la courbe d'endurance des joints obtenus par inertie (courbe 1) est très proche de celle obtenue sur le métal de base (courbe 2). Les examens métallographiques et les essais d'endurance, révèlent que le joint offre de très bonnes propriétés mécaniques et une ZAT très étroite présentant une structure de grains fine. Les mesures de la dureté au niveau de l'interface du joint et au niveau de

la ZAT indiquent que la dureté des régions périphériques des joints est plus haute que celle des régions centrales. L'auteur conclut qu'au cours de l'opération de soudage par inertie, l'augmentation du moment développé de 1100 et 3500 [Nm] fait diminuer la dureté Vickers du joint, de 420 à 290 [N/mm²].

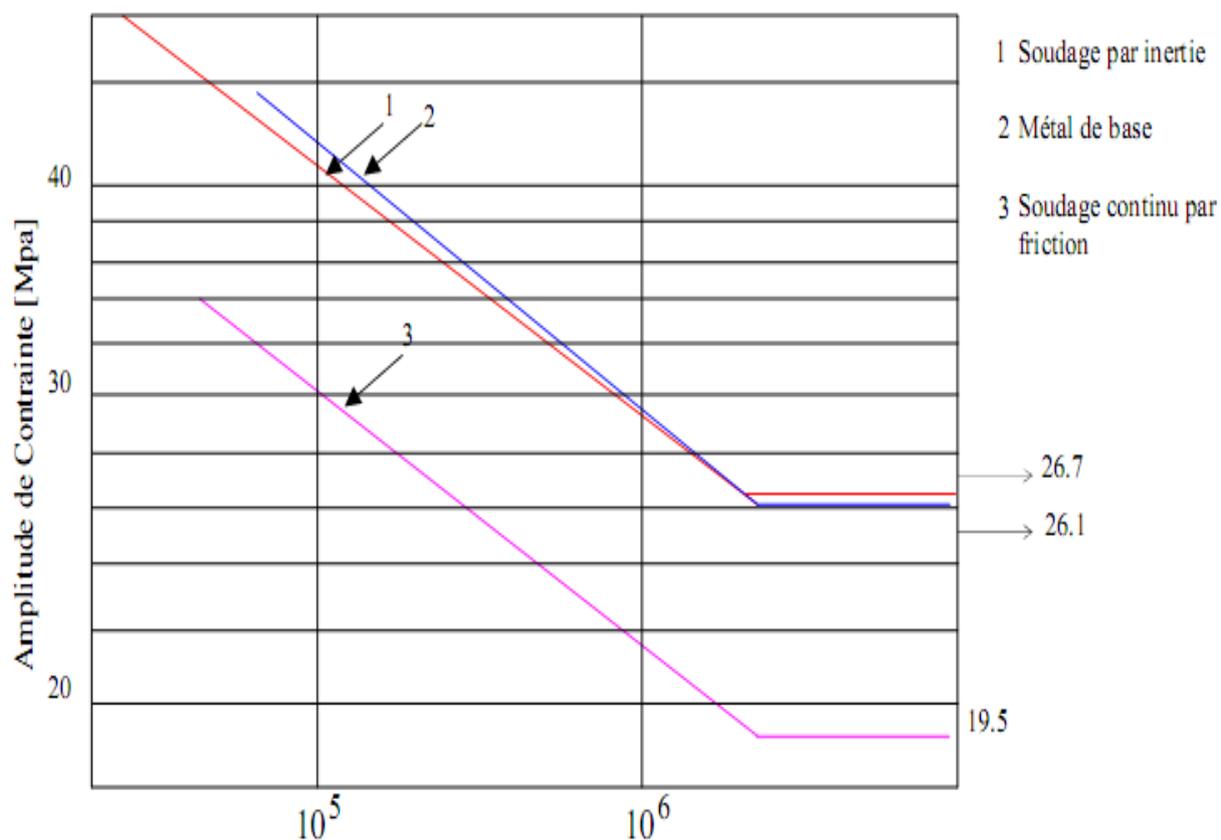


Figure. 2.4 : Résultats d'essais d'endurance de NOVIKOVA [17]

HOLLANDER et CHENG [18] par le biais des essais de chocs, de traction et de flexion statique ont cherché à optimiser les paramètres de soudage par friction en utilisant un acier allié et un acier inoxydable du type 304. Plusieurs lots d'éprouvettes ont été préparés, dont les conditions de soudage sont résumées dans le tableau 2.14. Les résultats publiés par HOLLANDER et CHENG sont donnés dans les tableaux (2.15, 16 et 17).

Chapitre 2 : Revue des travaux antérieurs

Lot d'éprouvettes	Vitesse [tr/mn]	Temps de contact [s]	Temps de friction [s]	Pression de friction [MPa]	Temps total [s]	Pression de forgeage [MPa]
1	3600	3	2	68.9	5	138
2	3600	3	2	68.9	5	207
3	3600	3	2	103	5	207
4	3600	3	2	103	5	275
5	3600	3	7	34	10	138
6	3600	3	7	34	10	207
7	1800	3	2	68.9	5	138
8	1800	3	2	68.9	5	207
9	1800	3	7	34	10	138
10	1800	3	7	34	10	207
11	4800	3	2	68.9	5	138
12	4800	3	2	68.9	5	207

Tableau. 2.14 : Paramètres de soudages utilisés par HOLLANDER et CHENG [18]

Lot d'éprouvettes	Consommation [mm]	La largeur du ZAT		Largeur totale
		Côté de l'acier inoxydable (mm)	Côté de l'acier allié (mm)	
1	4.5	6.12	7.3	17.92
2	5.4	5.1	7.3	17.8
3	7.9	3.6	6.1	17.6
4	10.3	3.6	6.1	20
5	5.7	8.5	11	25.4
6	9.5	7.3	10.2	27.19
7	6.1	4.9	6.8	17.88
8	5.7	4.1	6.1	18.3
9	9.7	7.3	9.8	24.5
10	12.1	5.3	8.5	25.7
11	3.6	7.3	9.8	21
12	6.8	5.1	7.3	19.3

Tableau. 2.15 : Paramètres de consommation [18]

Chapitre 2 : Revue des travaux antérieurs

Lot d'éprouvettes	Angle de Flexion	
	Eprouvettes testées	Rupture au niveau du joint
1	3	3
2	4	2
3	3	1
4	4	2
5	3	0
6	3	0
7	3	3
8	3	3
9	3	3
10	3	3
11	3	3
12	3	3

Tableau. 2.16 : Résultats des essais de flexion [18]

Lot d'éprouvettes	Essai de traction		
	Rm pour 3 éprouvettes [MPa]	Allongement [%]	Localisation de la rupture
1	672	23	01 L 01 A.I et 01 ZATA.I
2	665	28	01 L 01 A.I et 01 ZATA.I
3	680	23.5	03 A.I
4	670	27.0	03 A.I
5	665	44.0	03 A.I
6	680	40.0	03 A.I
7	524	10.0	03 ZAT-A.I
8	636	24.0	01 L et 02 ZAT-A.I
9	640	18.8	01 L et 02 ZAT-A.I
10	624	24.0	01 L et 02 ZAT-A.I
11	689	58.0	03 A.I
12	689	22.0	01 L et 02 ZAT-A.I

L : la rupture au niveau de l'interface du joint, **A.I** : la rupture au niveau de l'acier inoxydable et entre le **ZAT-AI**, la rupture au niveau de la **ZAT** coté acier inoxydable.

Tableau. 2.17 : Résultats des essais de traction [18]

Chapitre 2 : Revue des travaux antérieurs

A l'issu de ces résultats, les auteurs concluent que les conditions optimales donnant un joint soudé offrant une résistance élevée (voir tableaux II.14, 15 et 16) en utilisant la combinaison, acier allié, acier inoxydable du type 304, sont :

- * vitesse de rotation : 3600 tr/mn,
- * pression de friction : 34 MPa,
- * temps de soudage : 10 sec,
- * pression de forgeage : 138 - 207 MPa.

MURTI et SUNDARSEAN [19] ont réalisé une recherche sur des joints travaillants à chaud et sous haute pression interne. Ils réalisent des opérations de soudage par friction continu en soudant des tubes en acier faiblement allié à l'acier inoxydable de diamètre extérieur de 51mm et une épaisseur de la paroi de 7.1mm. Les opérations de soudage ont été réalisées sur une machine de marque KUKA de puissance 20kW, capable de développer une charge maximale de 150KN. Les conditions de soudage optimales sont résumées dans le tableau. II.18.

Vitesse [tr/mn]	Pression de friction [MPa]	Temps de friction [s]	Pression de forgeage [MPa]	Temps de forgeage [s]
1125	32	13	88	4

Tableau. 2.18 : Conditions de soudage [19]

Les deux auteurs réalisent, des mesures de dureté et des essais de traction sur des éprouvettes en présence d'entaille fabriquées dans le matériau de base, afin de caractériser ce dernier. Les propriétés mécaniques et la composition chimique des aciers utilisés sont données dans les tableaux (2.19 et 2.20).

Matériau de base	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	p	S
Acier faiblement allié	0.1	0.48	0.65	1.04	0.5	-	0.03	0.03
Acier inoxydable	0.07	2.00	0.75	18.7	-	11.4	0.03	0.04

Tableau. 2.19 : Composition chimique des matériaux de base [19]

La valeur de la contrainte ultime sous entaille (contrainte à la rupture en traction) a été prise comme référence pour l'évaluation de la qualité du joint. Par contre, la résistance de la traction d'entaille déterminée à partir de la valeur moyenne obtenue par trois essais est de l'ordre de 761 N/mm^2 . Les auteurs concluent que le procédé de soudage pourrait bien être adapté à des pièces travaillant dans des conditions de hautes températures et de haute pression.

Matériau de base	Propriétés mécaniques	
	Rm (MPa) En présence d'entaille	Dureté VHN
Acier faiblement allié	585	224
Acier inoxydable	689	206

Tableau. 2.20 : Caractéristiques mécaniques des matériaux de base [19]

DUNKERTON [20] a caractérisé par des essais de traction une série de joint soudé obtenu en soudant un acier au carbone– manganèse. Deux variantes de soudage par friction ont été utilisées :

* soudage continu.

* orbitale.

Les conditions de soudage sont résumées dans le tableau. 2.21. Les résultats d'essais de résilience et de traction obtenus sur les différents joints, le cordon de soudure classique ont été comparés figure. 2.5. Ces résultats montrent que les soudures par friction orbitale donnent des meilleurs résultats que le soudage direct.

Conditions de soudage	Opération de soudage par friction		
	direct	Inertie	orbitale
Vitesse de rotation [tr/mn]	750	3000	3000
Force de friction [KN]	40	91	12.4
Force de forgeage [KN]		91	27.8
Déplacement d'orbitale [mm]	-	-	2.6

Tableau. 2.21 : Conditions de soudage [20]

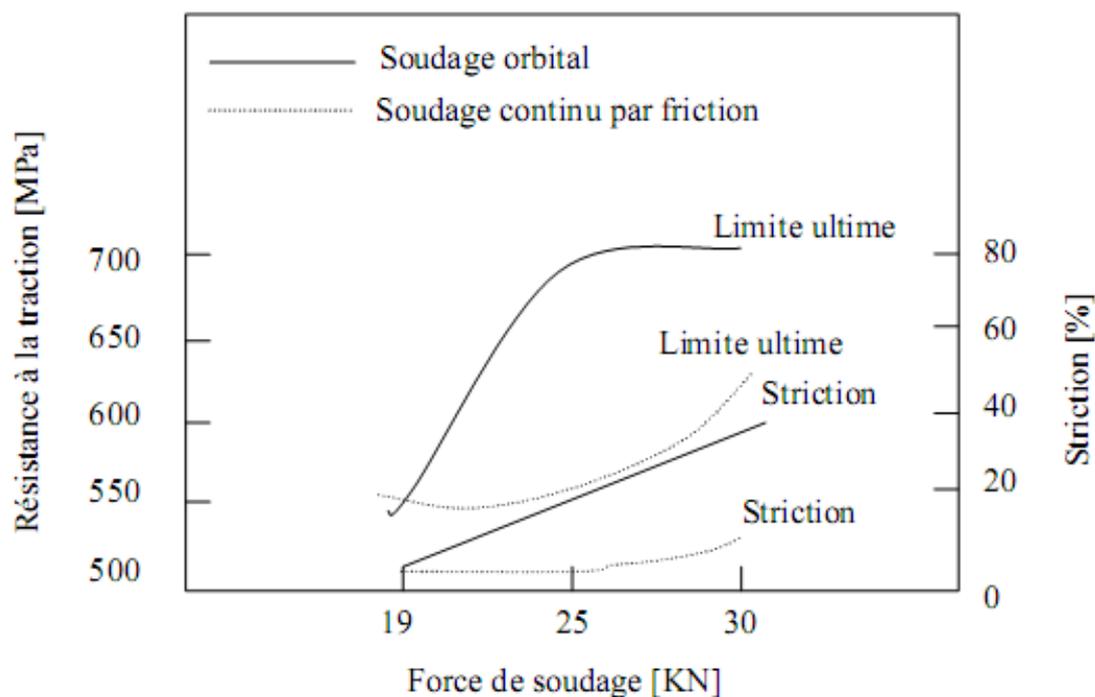


Figure. 2.5 : Comparaison des résultats d'essais de traction [20]

RUGE, THOMAS . [15] ont réalisé une étude métallurgique afin de déterminer les conditions optimales de soudage par friction du cuivre et de Ti. Les opérations de soudage ont été effectuées sur des barres de 20mm de diamètre. Les propriétés mécaniques des deux matériaux soudés et les conditions de soudage sont respectivement données dans les tableaux (2.22 et 2.23).

Propriétés mécaniques	Matériau	
	Ti à 99,7%	Cu à 99,9%
limité d'élasticité à 0.2% Re [MPa]	306	97
Résistance ultime Rm [MPa]	422	220
Striction [%]	55	84.5

Tableau. 2.22: Caractéristiques mécaniques des deux matériaux de base [15]

Chapitre 2 : Revue des travaux antérieurs

Les essais de traction conduits sur des éprouvettes usinées dans les barreaux soudés révèlent que la rupture se produit en dehors du joint soudé et du côté du cuivre. Les auteurs concluent que la qualité de la soudure peut être améliorée par l'adoption d'un temps de friction plus court et d'une pression axiale plus élevée dans la phase de forgeage. Une réduction de la durée de friction diminue la formation d'une couche d'alliage mixte dans la région d'interface.

Vitesse de rotation [tr/mn]	pression de friction [MPa]	pression forgeage [MPa]	de temps de friction [s]
1500 - 3000	80	160 - 275	0.2 - 0.5

Tableau. 2.23 : Conditions de soudage [15]

SASSANI et NEELAM [16] ont étudié une méthode permettant la modification de la procédure de soudage par friction des matériaux incompatibles. Cette méthode consiste à introduire entre les deux surfaces un intercalaire sous forme d'une pièce mince logée dans l'une des pièces à souder (figure. 2.6). Les différents paramètres de soudage réalisés en soudant différentes nuances d'alliages, en l'occurrence :

- * Ti - Ni avec la couche intercalaire de Cu,
- * l'aluminium – l'aluminium sans et avec une couche intercalaire en aluminium,
- * laiton – Cu, avec une couche intercalaire de laiton à 0,75 Sn,

Les résultats sont donnés respectivement dans les tableaux (2.24, 25 et 26).

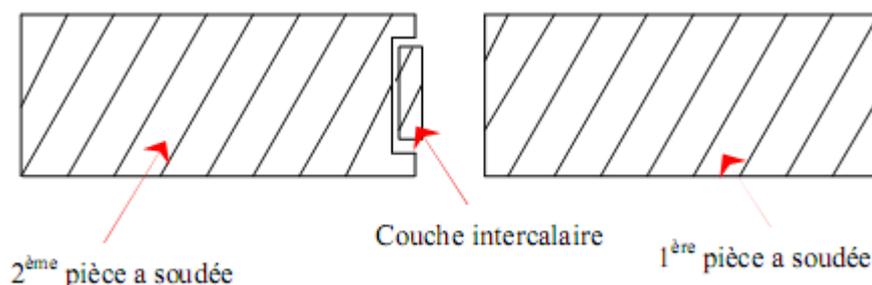


Figure. 2.6 : Schématisation du procédé de SASSANI et NEELAM [16]

Chapitre 2 : Revue des travaux antérieurs

Nombre	Conditions de soudage					
	Vitesse [tr/mn]	Temps de friction [s]	Temps de forgeage [s]	pression de friction [MPa]	Pression de forgeage [MPa]	Rm [MPa]
1	1120	7	7	34.47	68.95	
2		5	7	43.47	86.95	
3		5	7	43.1	68.95	64.70
4		5	7	43.1	86.2	135.48
5		5	14	43.1	86.2	28.53
6		5	7	43.1	68.95	19.16
7		3	7	43.1	68.95	30.69
8		3	7	43.1	68.95	76.32
9		5	7	43.1	68.95	47.29

Tableau. 2.24: Conditions de soudage Ti-Ni en utilisant une couche intercalaire de Cu [16]

Nombre	Conditions de soudage					
	Vitesse [tr/mn]	Temps de friction [s]	Temps de forgeage [s]	Pression de friction [MPa]	Pression de forgeage [MPa]	Rm [MPa]
sans couche intercalaire						
1	1120	3.0	10.0	43.1	51.71	182.14
2		3.5			68.95	177.82
3		3.5			120.66	196.30
4		3.5			120.66	187.06
couche intercalaire en aluminium						
6	1120	4.0	10.0	43.1	68.95	182.14
7		3.5		43.1	68.2	177.82
8		3.0		43.1	68.2	196.30
9		3.0		43.1	25.85	57.99

Tableau. 2.25: Conditions de soudage Al. - Al. [16]

Nombre	Conditions de soudage					
	Vitesse [tr/mn]	Temps de friction [s]	Temps de forgeage [s]	Pression de friction [MPa]	Pression de forgeage [MPa]	Rm [MPa]
1	1120	7	10	43.1	68.95	156.51
2		7		43.1	68.95	104.11
3		7.5		43.1	68.95	73.70
4		8		43.1	68.95	73.77
5		8		43.1	77.57	56.95
6		8		34.47	77.57	133.90
7		9.5		34.47	77.57	93.63
8		10.5		34.47	77.57	208.85

Tableau. 2.26: Conditions de soudage du laiton - Cu en utilisant une couche intercalaire de laiton à 0,75 Sn [16]

Les auteurs, par la suite réalisent des essais de traction statique en essayant de déterminer l'effet de la pression de forgeage sur la résistance ultime des joints soudés. Les résultats donnés par la (figure. 2.7) sont relatifs au joint soudé, titane – nickel, les auteurs concluent sans donner des courbes comparatives ni de résultats chiffrés, que la résistance ultime (Rm) augmente de 13% avec utilisation de la couche intercalaire en aluminium et ce, en comparaison avec le joint obtenu tous intercalaire.

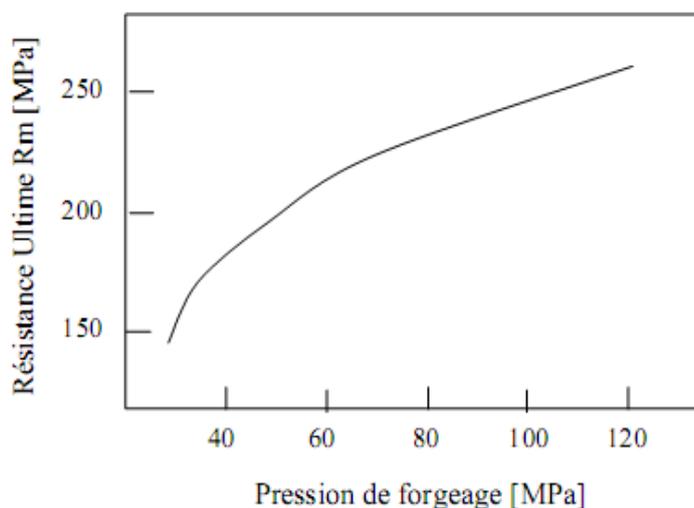


Figure. 2.7 : Variation de la résistance ultime en fonction de la pression de forgeage, cas titane –nickel en utilisant un intercalaire en aluminium [16]

2.2.CONCLUSION

La première partie de l'étude entreprise dont l'objet visait à une meilleure connaissance du procédé de soudage par friction, représente dans l'ensemble une réponse satisfaisante, mais constitue dans l'ensemble une contribution positive à la compréhension des phénomènes encore incomplètement connus.

La maîtrise de tous les paramètres de soudage permet de mieux évaluer l'influence de certains d'entre eux, sur la qualité du joint soudé ou sur l'influence de la forme du bourrelet sur la résistance statique et dynamique du joint.

Le peu d'études relatives à l'influence de la morphologie du bourrelet sur le comportement mécanique et thermique des assemblages soudés ont montré que cette caractéristique est sans influence sensible sur les propriétés de traction, de torsion et de ductilité. Si on désire conserver le bourrelet pour des raisons de prix de revient il y a lieu de se poser le problème de la tenue en fatigue.

On relève le manque de recherches poussées dans la caractérisation des cordons de soudure, le manque de relations empiriques ou mathématiques décrivant l'influence des paramètres de soudage sur la forme du bourrelet et la qualité du joint.

Chapitre 3

Procédures expérimentales

CHAPITRE3: PROCEDURES EXPERIMENTALES

3.1. Introduction

Lors du frottement de deux pièces, il y a déperdition d'énergie qui se traduit par une élévation de la température des deux pièces. Ces anomalies de fonctionnement conduisent à un phénomène de grippage qui se manifeste par une élévation des températures et par un arrachement des particules d'une ou des deux pièces.

Le soudage par friction est un procédé de soudage qui engendre une chaleur importante lors du frottement de deux pièces que l'on veut souder. Le frottement est obtenu en communiquant un mouvement de rotation à l'une des deux pièces en contact bout à bout. Après élévation de la température à un niveau contrôlé, l'ensemble est soumis à un forgeage par pression axiale, ce qui conduit à la formation d'un bourrelet dans le plan de soudure.

Le but de ce travail est de contribuer par une étude expérimentale à réaliser le soudage par friction sur un tour parallèle, tout en prenant des mesures de température durant l'opération de soudage afin de déterminer son comportement thermique.

Plusieurs expérimentations ont été réalisées en contrôlant trois paramètres suivants, dans la limite de ce que permet les limites d'usage du dispositif mis en place, à savoir, la vitesse de rotation, le temps friction, et la disposition des thermocouples.

Les soudures sont réalisées en contrôlant :

- * la coaxialité de pièces soudées et la forme générale du bourrelet.
- * le contrôle du temps de friction.

Dans cette partie du rapport on présente la partie expérimentale concernant:

- * le soudage sur tour parallèle avec prise de températures au cours de l'opération, et l'examen micrographique.

3.2. Conditions de soudage

Pour bien maîtriser l'opération de soudage par friction il est indispensable de distinguer deux étapes, qui sont :

- * Echauffement par friction ;
- * Refoulement d'une pièce mise en rotation contre une autre immobile, l'effort de refoulement, appelé effort de forgeage, étant exercé à la fin de la première étape (phase d'échauffement par friction).

L'objectif de ce travail est d'essayer de réaliser le soudage par friction direct. Pour répondre à cet objectif, nous avons réalisé un certain nombre de pièces soudées. Treize opérations de soudage sous différentes conditions ont été réalisées sur neuf pièces découpées dans un acier doux de $\Phi 12\text{mm}$ et de 60mm de longueur, et quatre pièces dans le même acier doux de $\Phi 16\text{mm}$ et de 60mm de longueur.

3.3. Réalisation du soudage

Comme le soudage par friction est méconnu au niveau de nos ateliers de fabrication, et dans le cas de notre expérimentation, et pour soudage de pièces cylindriques (barres de diamètres $\Phi 12\text{mm}$ et $\Phi 16\text{mm}$), nous avons utilisé un tour parallèle (Type GAZENEUVE HB 725 lathe).

Les essais de soudage par friction ont été effectués au niveau de l'entreprise nationale de grands travaux pétroliers.

3.3.1. Caractéristiques du tour parallèle Gazeneuve.

- *Puissance de moteur : 9kw
- *Trou par l'axe : 81mm
- *Oscillation au-dessus des solides : 400mm
- *Distances entre les centres : 2000mm
- *Longueur : 3640mm
- *Largeur : 1270mm
- *Hauteur : 1355mm
- *Poids : 3100kg



Figure.3.1 : Vue d'ensemble du tour parallèle

3.4. Montage spécifique

La pièce mobile est placée sur le mandrin du tour, alors que, la pièce fixe est placée au niveau de la poupée, l'effort mobilisé va être appliqué à l'aide du fourreau de la poupée (système vis écrou).

On à choisit le montage suivant : la pièce immobile est fixée en utilisant un mandrin de perçage fixe sur la poupée, et la pièce mobile est placée sur le mandrin du tour.

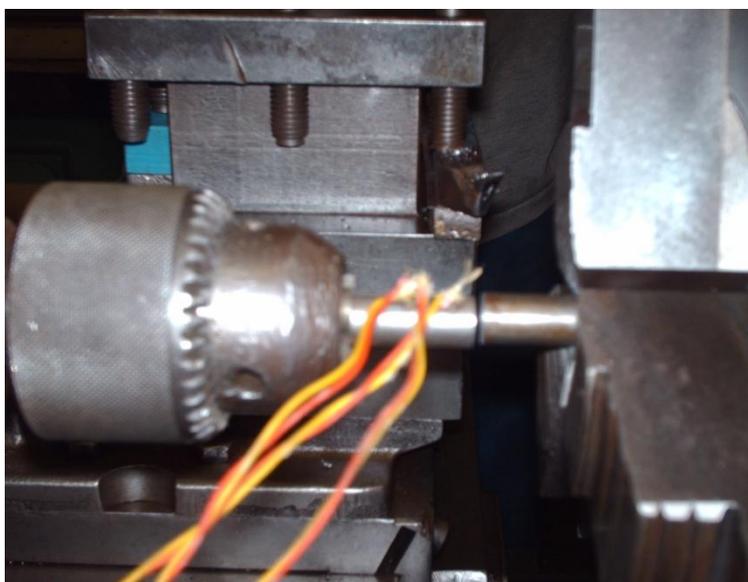


Figure .3.2: montage utilisé

3.5. autres matériels utilisés

- *un chronomètre pour contrôler le temps,
- *un appareil enregistreur de température,
- * Unité de soudure de thermocouple,
- * thermocouples.

Nous avons utilisé pour souder les thermocouples sur les pièces une Unité de soudure de thermocouple de type STD10 (figure.III. 3).

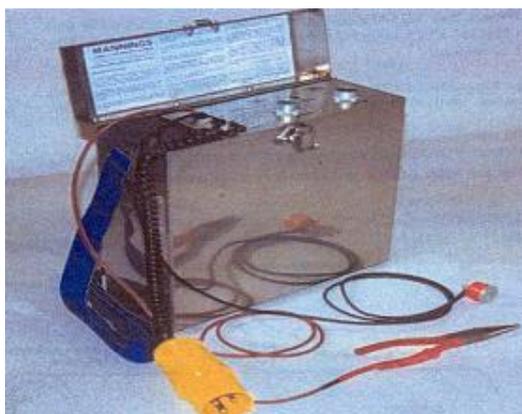


Figure .3. 3 : vue de l'Unité de soudure de thermocouple

Les thermocouples utilisés sont de série K (nickel chrome et nickel alumelle), ce choix est fait, à travers la spécificité de cette série de thermocouple est utilisable pour des plages de température allant de -200°C jusqu'à 1370°C , et dans notre cas la température à atteindre (a une distance du surface de contact) est estimée entre 700°C et 1400°C .



Figure. 3.4:thermocouple série K

L'affichage des valeurs de température est effectué avec un enregistreur électronique SEKONIC de type SA-180P attaché avec des câbles de compensation aux thermocouples soudés sur la pièce, ces câbles convertissent la température en tension ; l'enregistreur reçoit un signal de tension et il l'affiche sur un papier diagramme



Figure.3.5 : enregistreur électronique utilisé

3.6. Préparation avant soudage

Nous avons débité des pièces cylindriques de diamètre 12mm et 16mm, et de longueur 60mm puis nous avons effectué le dressage des surfaces latérales, afin d'assurer une perpendicularité entre la pièce fixe et celle tournante. Cet usinage a permis de diminuer les vibrations pendant le procédé de soudage.

Les thermocouples ont été soudés sur les pièces de la manière suivante :

- *Tous les thermocouples sont soudés sur la superficie des pièces.
- *le premier thermocouple (thermoc N⁰1) à 7mm de la surface de contact.
- *le deuxième thermocouple (thermoc N⁰2) à 12mm de la surface de contact.
- *le troisième thermocouple (thermoc N⁰3) à 17mm de la surface de contact.

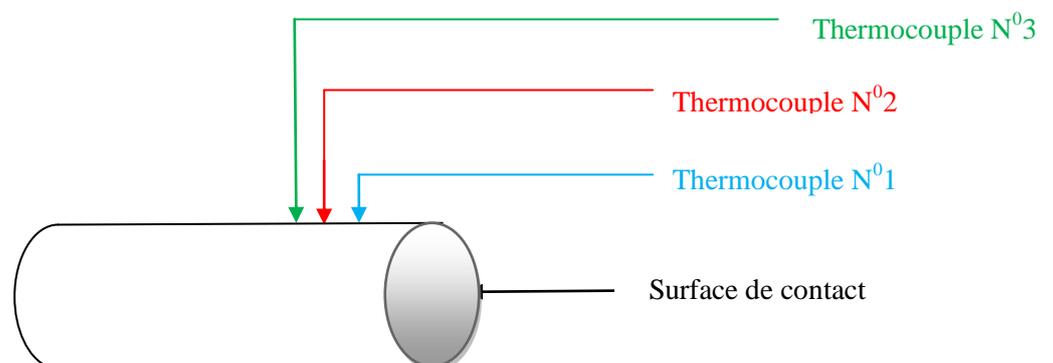


Figure.3.6 : disposition des thermocouples soudés

3.7. Paramètres de soudage utilisés

Tableau.3.1 : paramètres de soudage par friction direct utilisés.

N°PIECE	TEMPS DE FRICTION [s]	TEMPS DE FORGEAGE [s]	TEMPERATURE DE SOUDAGE [C ⁰]	VITESSE DE ROTATION [trs/mn]
1	14.7	7	720	620
2	13.2	8	930	620
3	13	11	1090	800
4	15.3	6	880	620
5	18.6	10.6	940	800
6	26	11.3	1040	620
7	25.5	5	970	620
8	18.3	9	1130	800
9	8.2	8.5	910	800
10	19	10	930	620
11	13.3	6.2	850	800
12	12.5	6	880	800
13	21.2	5.4	770	620

3.8. Identification du métal de base

3.8.1. Choix du métal de base :

Le métal choisit est le l'acier A60 pour : sa disponibilité; Sa bonne soudabilité.

L'acier A60 rentre dans la catégorie des aciers de construction d'usage général, dont la composition chimique et les propriétés mécaniques sont résumées dans les tables ci-dessous.

Composition chimique

% C	%P	%S	%N	% Mn
max 0.25	max 0.045	max 0.045	0.009	0.5

Tableau.3.2 : composition chimique du métal de base

Propriété mécanique

Re (MPa)	Rm (MPa)	A%
305/335	590/770	6/16

Tableau.3.3 : caractéristiques mécaniques de métal de base

3.9. Opération de soudage par friction direct

Le procédé de soudage par friction direct, se sert de l'énergie cinétique créée par frottement, bout à bout des deux pièces en contact, cette énergie mobilisée produit l'échauffement nécessaire au soudage. La photo ci-dessous montre une opération de soudage par friction, de l'une des pièces qu'on a réalisée au niveau d'ENGTP sur une machine de tournage de type **Gazeneuve**.

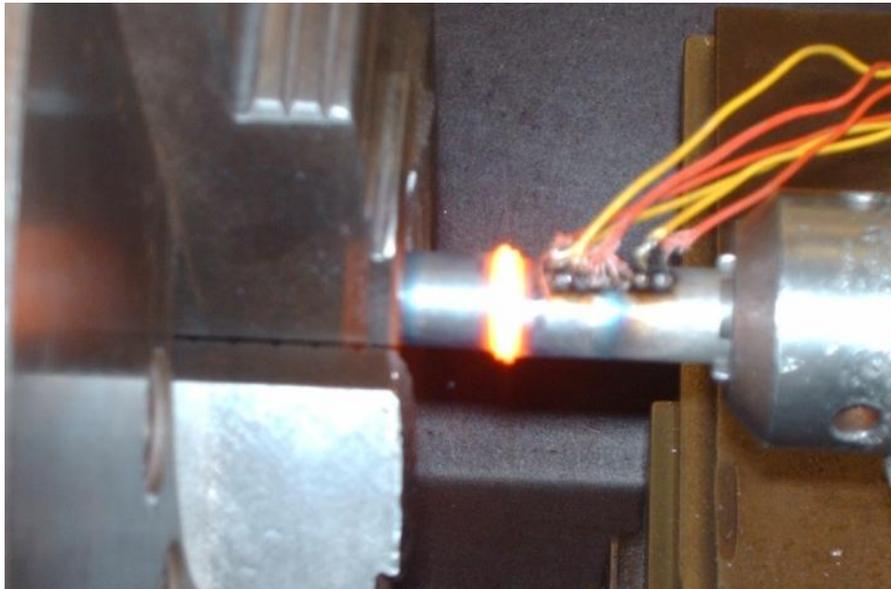
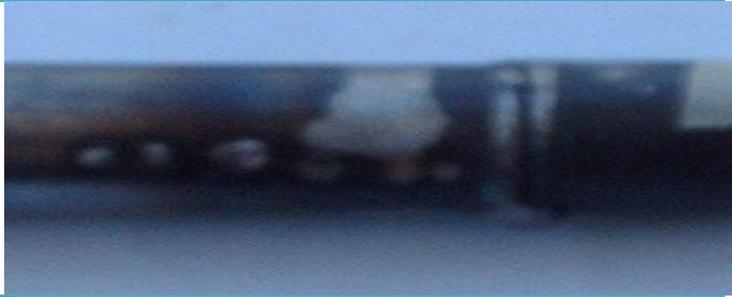


Figure.3.7 : vue réelle d'une opération de soudage

Chapitre 3: Procédures expérimentales

Une série d'exemple de pièces qu'on a soudées sur tour est donné dans le Tableau.3.4

Tableau.3.4 : exemples de pièces qu'on a soudées par friction

N ^o	Temps de friction [s]	Vitesse de Rotation [trs/mn]	photos
2	13.2	620	
3	13	800	
5	18.6	800	
8	18.3	800	
12	12.5	800	

3.10. Examen micrographique

3.10.1. But

L'essai micrographique rend compte de la répartition thermique et met en évidence l'hétérogénéité microstructurale des différentes zones de la soudure. Cet essai fait apparaître les différentes zones d'une soudure à savoir la zone fondue (ZF), la zone affecté thermiquement (ZAT), la zone de liaison (ZL) et le métal de base (MB) et permet de mesurer les étendues des différentes zones.

3.10.2. Mode opératoire

Préparation des échantillons : la première étape à effectuer le polissage en utilisant des papiers abrasifs de granulométries croissantes 180-400-600-800-1000-1200.



Figure. III.8 .polisseuse

3.10.3. Attaque chimique

Pour relever les différentes zones de la soudure, il est nécessaire d'effectuer une attaque chimique adéquate pour la micrographie. Les échantillons sont trempés durant 3 secondes dans le Nitale à 4% :

- * 24 ml alcool éthylique (méthanol concentration 98%) ;
- * 1ml HNO₃.

La préparation et l'examen microscopique des échantillons ont été réalisés au laboratoire métallographie de métallurgie de l'ENSP.

Chapitre 4

Résultats et interprétation

CHAPITRE 4 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

4.1. Introduction

Ce chapitre sera consacré aux résultats et à leur interprétation, les résultats obtenus, vont nous permettre d'avoir une donnée proche de la réalité expérimentale sur la distribution de température au niveau de la surface de contact, en faisant une extrapolation jusqu'à la surface de contact, ainsi que la détermination des zones à risque à savoir la zone fondue (ZF) et la zone affectée thermiquement (ZAT).

4.2. Discussions des résultats

4.2.1. Les résultats thermiques

Les cycles thermiques schématisés sur les figures (4.1 à 4.5) décrivent le comportement thermique des trois points proches de la de la surface de contact. On peut distinguer sur la courbe $T = f(t)$ trois zones différentes:

Une zone où la température est relativement constante, elle correspond à la température ambiante et à la durée où la source d'énergie de soudage n'a pas encore atteint le point nominal.

Une zone correspondant à un chauffage très rapide atteignant la température maximale détectée par le thermocouple le plus proche de la zone de contact, et qui est d'une moyenne de 1030 °C. Cette étape est au cours de la friction (rotation)

Un refroidissement dû à l'arrêt de rotation

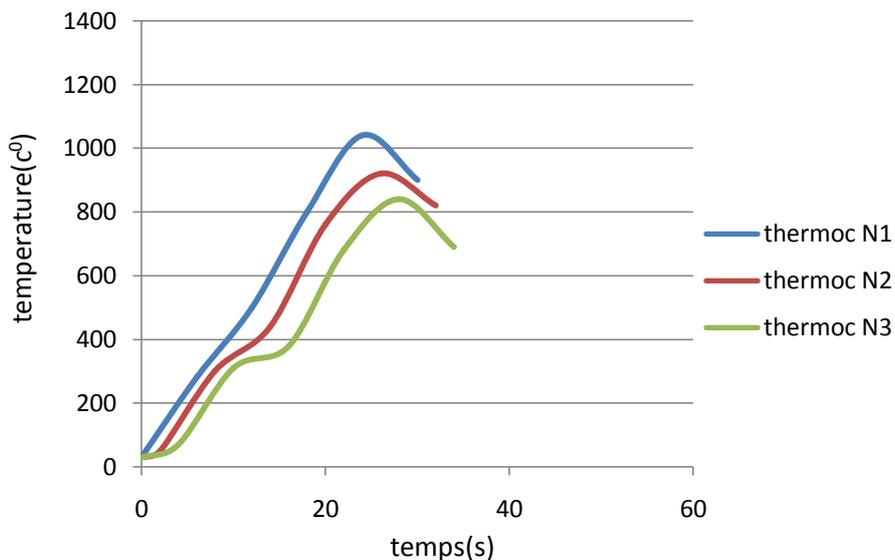


Figure. 4.1. Variation de température des trois points en fonction de temps.

(Eprouvette N 06)

Chapitre 4 : Résultats et interprétations

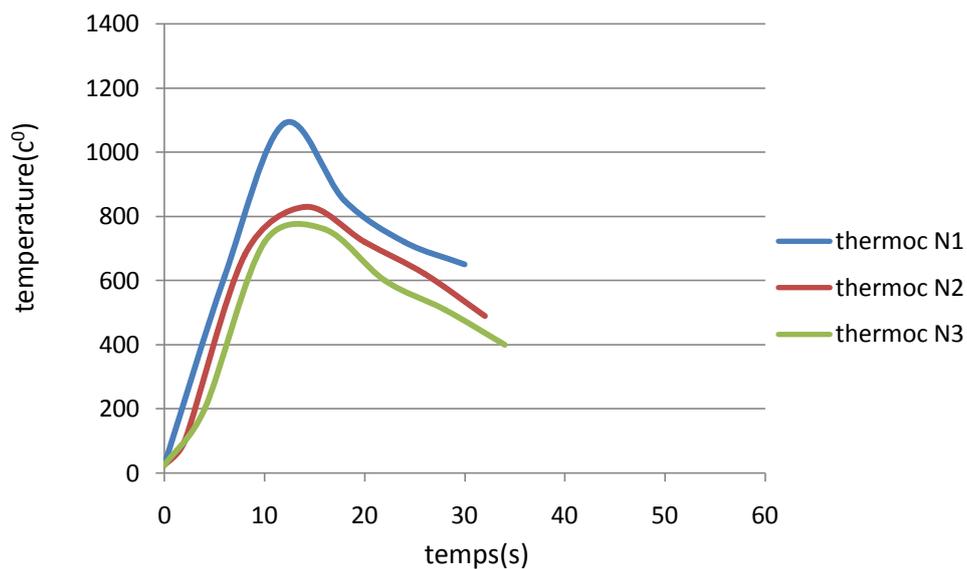


Figure. 4.2. Variation de température des trois points en fonction de temps.

(Eprouvette N 03)

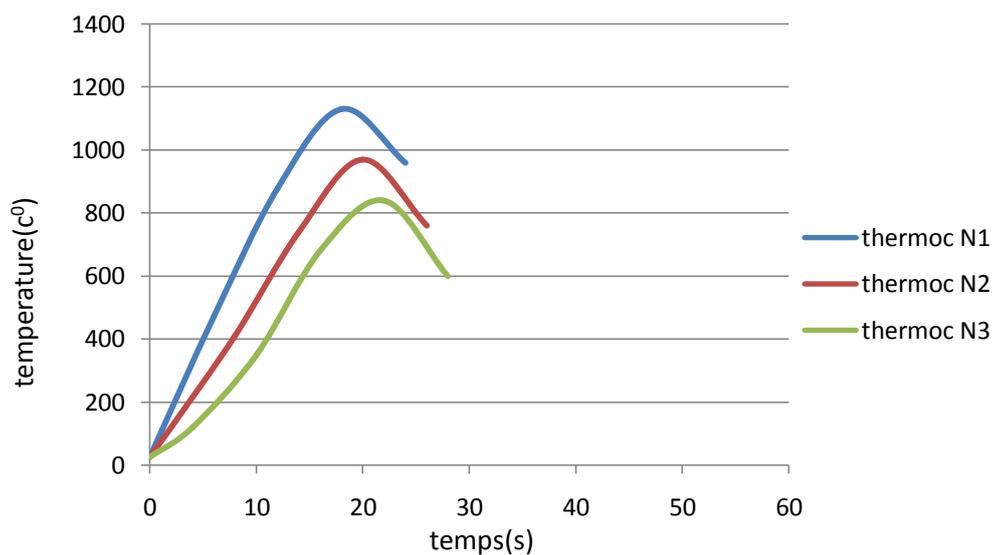


Figure. 4.3. Variation de température des trois points en fonction de temps.

(Eprouvette N 08)

Chapitre 4 : Résultats et interprétations

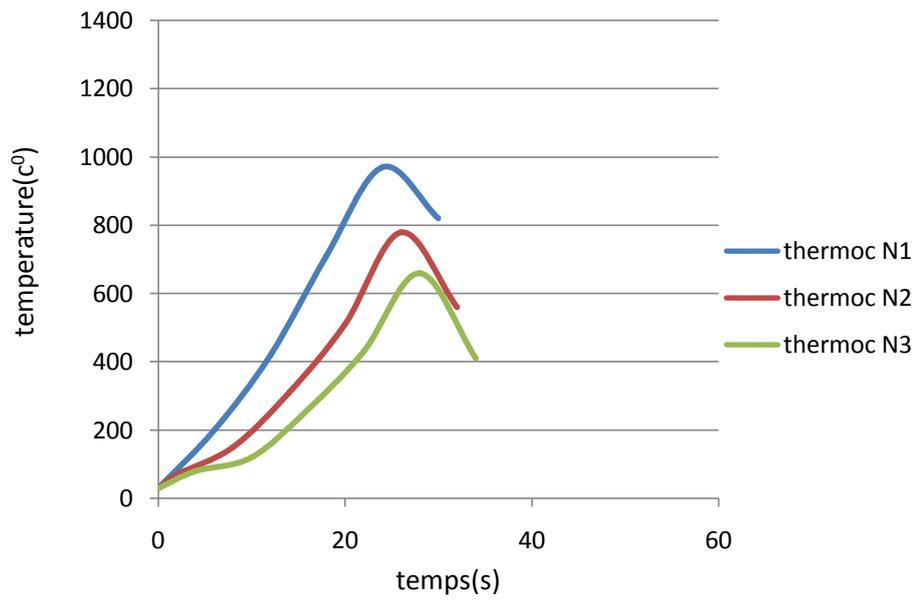


Figure. 4.4. Variation de température des trois points en fonction de temps.
(Eprouvette N 07)

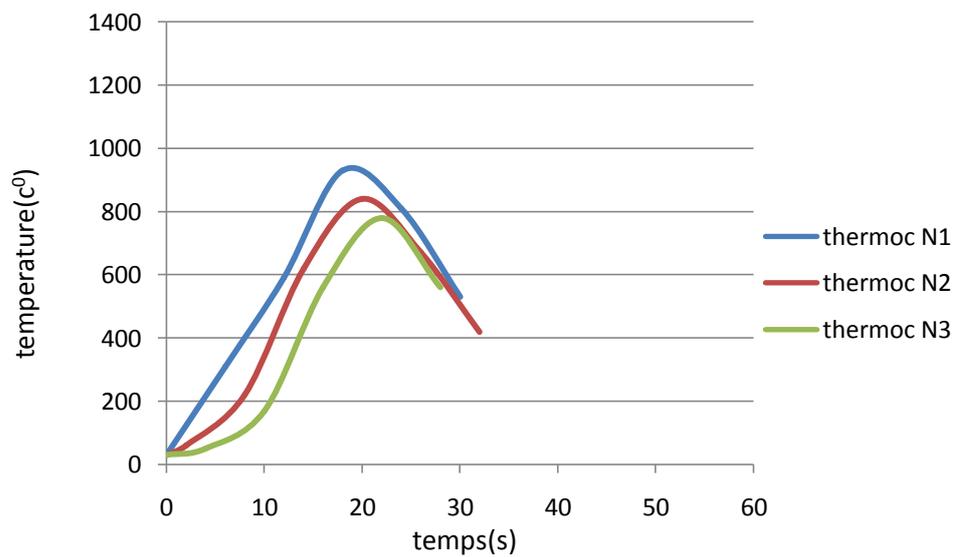


Figure. 4.5. Variation de température des trois points en fonction de temps.
(Eprouvette N 10)

Chapitre 4 : Résultats et interprétations

Les figures de (4.6 à 4.10) décrivent la variation de température en fonction de L'abscisse (emplacement des thermocouples) pour des différents instants.

Dans cette partie on à fait une extrapolation pour avoir les valeurs de la température dans la surface de contact (température a $X=0$) pour des différents instants.

Comme on a pas pu avoir des valeurs expérimentales de la température dans la surface de contact, on a fait une extrapolation, en supposant que la courbe de la température évolue linéairement dans la zone située entre la surface de contact ($X=0$) et le point le plus proche de la surface de contact (position du premier thermocouple) dont on a mesuré la température ($X=7\text{mm}$).

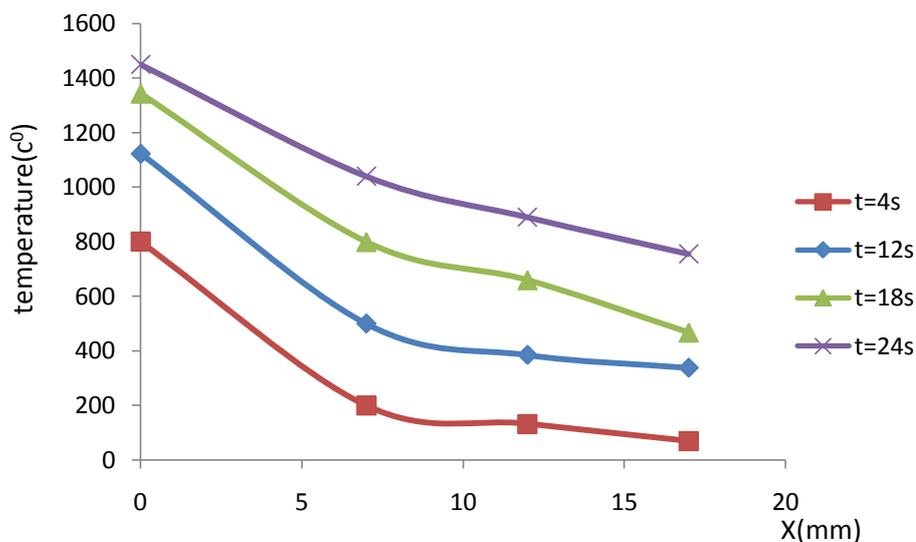


Figure. 4.6. Profil de température aux différents instants (4s, 12s, 18s, 24s)

(Eprouvette N6)

Chapitre 4 : Résultats et interprétations

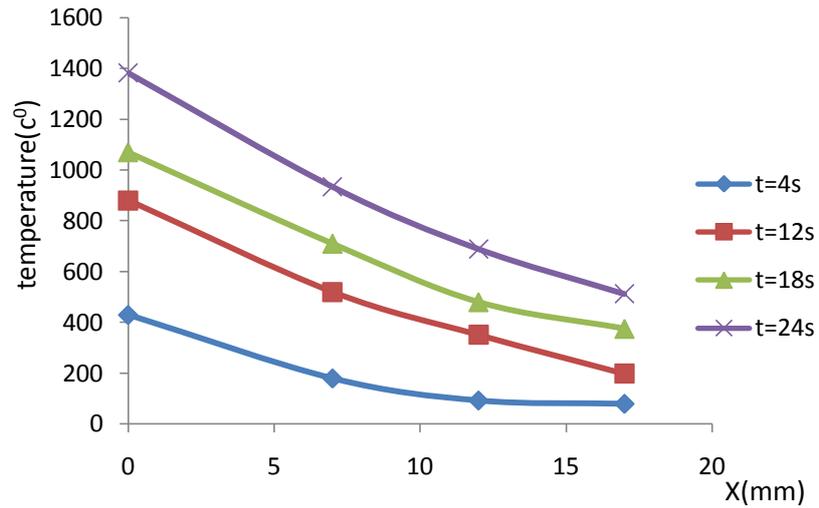


Figure. 4.7. Profil de température aux différents instants (4s, 12s, 18s, 24s)
(Eprouvette N7)

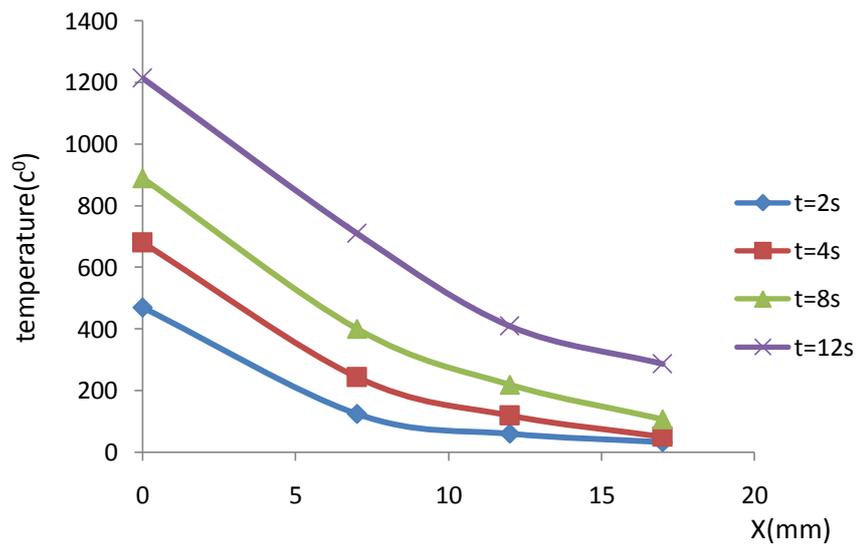


Figure. 4.8. Profil de température aux différents instants (2s, 4s, 8s, 12s)
(Eprouvette N10)

Chapitre 4 : Résultats et interprétations

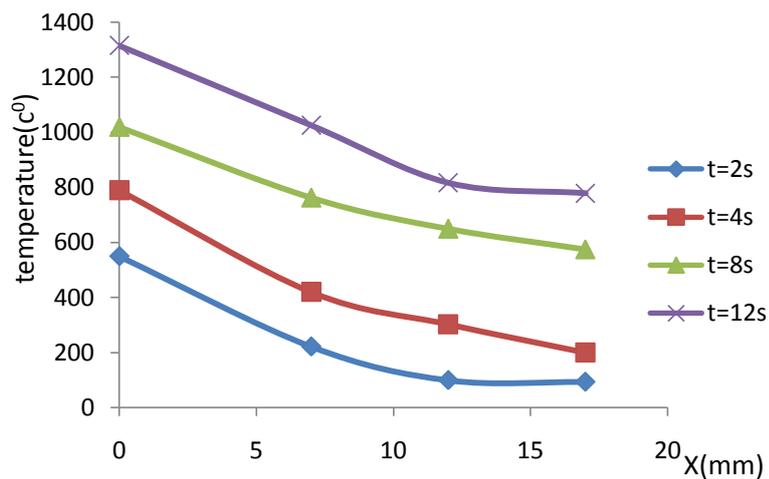


Figure. 4.9. Profil de température aux différents instants (2s, 4s, 8s, 12s)
(Eprouvette N3)

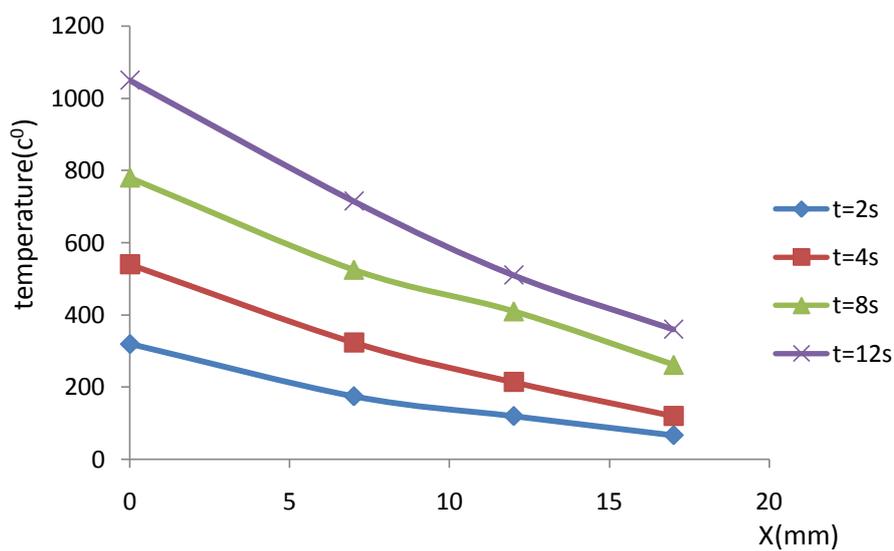


Figure. 4.10. Profil de température aux différents instants (2s, 4s, 8s, 12s)
(Eprouvette N8)

Tel que :

t : le temps en secondes (s)

X : l'abscisse des points d'emplacement des thermocouples

4.2.2. Résultats de l'étude micrographique

Les examens microscopiques ont été réalisés au niveau laboratoire métallurgie de l'ENSP.

Pour l'analyse de la microstructure on a obtenu les résultats sur la figure (4.11)

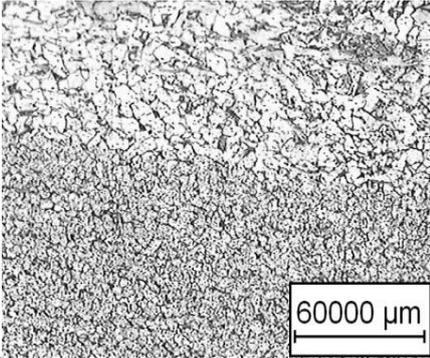
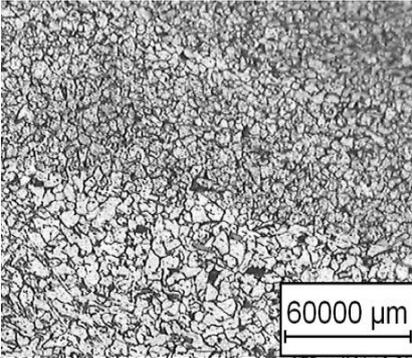
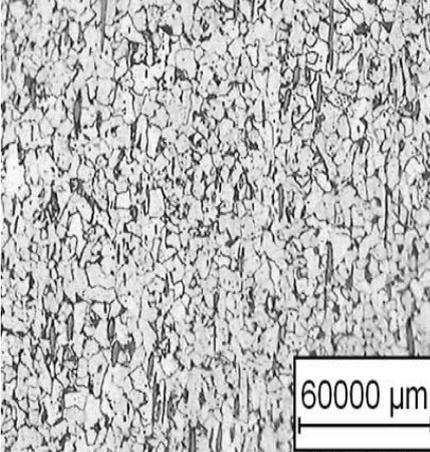
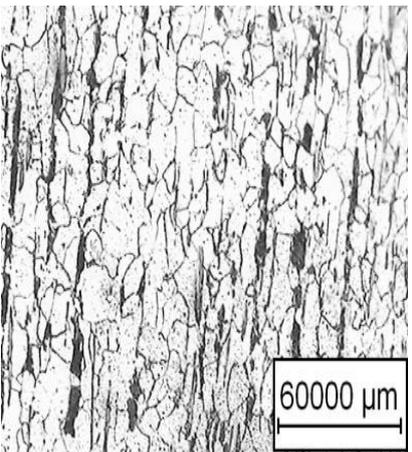
Zone agrandissement et	Microstructures photos	
	Pièce soumise à la rotation	Pièce fixe
Zone de transition X200		
Métal de base X200		

Figure. 4.11 : résultat de l'étude micrographique

4.2.2. Analyse de la microstructure :

Les résultats de l'étude microscopique mettent en évidence les variations des phases au niveau de l'interface du joint soudé. Le métal de base de structure en bande de couche régulière composé de ferrite et perlite, ceci montre qu'il a été produit par un procédé d'étirage de la matière.

Chapitre 4 : Résultats et interprétations

Les variations des phases dans la pièce soudée montrent que pour la microstructure présente de fortes évolutions.

Le joint obtenu est constitué de trois zones comme :

*Le métal de base qui correspond à la partie de la pièce où la température a été suffisamment faible pour ne pas entraîner de changements significatifs de la microstructure.

*Une Zone Affectée Thermiquement qui ne présente que de faibles transformations microstructurales. Les déformations mécaniques y sont très faibles.

*Une Zone Affectée Thermo-Mécaniquement (zone de liaison) qui a subi des déformations mécaniques d'un niveau bien plus important que dans la ZAT (désorientation importante de la microstructure) La température y a été suffisamment élevée pour entraîner des modifications microstructurales de façon significative.

conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de notre étude est d'étudier l'évolution du champ de température lors de l'opération de soudage par friction orbitale, et la caractérisation métallographique après soudage.

Les opérations de soudage ont nécessité la mise en place d'un dispositif pratique pour soudage par friction (tour parallèle, système de fixation avec centrage des pièces à assembler).

Les essais de soudages réalisés, nous ont montré que la température à la surface de contact a atteint, par extrapolation, des valeurs proches de la température de fusion du métal, ce qui représente le but à atteindre par ce procédé de soudage.

La température obtenue à la surface de contact est un indicateur crucial nous permettant de dire qu'on est dans la zone de forgeage.

La pression de forgeage appliquée sur les deux pièces permet le transfert de matière de la première pièce à la deuxième.

Par le fait que la pression de forgeage est manuelle et n'est pas contrôlée dans le temps, peut donner une soudure présentant quelques imperfections.

L'utilisation de paramètres non optimisés peuvent conduire à :

- Une liaison incomplète entre les deux pièces soudées,
- Le non alignement des axes des pièces soudées,
- L'apparition de phases fragiles et de grandes structures causées par l'excès du réchauffement.

Par conséquent, il est très important de connaître les conditions optimales pour palier à ces problèmes lors de l'exécution de l'opération de soudage et pour éviter les surprises quand la pièce est en service.

On suggère, dans un futur travail à développer dans le département de génie mécanique de L'ENSP à tester ce procédé sur une machine de soudage par friction, en transformant un tour en machine de soudage par friction.

La zone affectée thermiquement pour le matériau étudiés et soudés au procédé de soudage par friction est de dimensions réduites. Cela signifie que le soudage par friction est de qualité.

Enfin, nous notons que ce travail reste ouvert et à enrichir. Pour cela nous proposons comme complément à ce travail :

- De suivre l'évolution de température en temps réel avec une camera thermique.
- De réaliser le soudage de deux matériaux différents.
- De faire l'étude thermomécanique et mettre en évidence le phénomène de fissuration qui, à nos jours reste le problème qui a une grande influence dans les assemblages soudés. Il en est de même pour l'étude de l'influence des différents paramètres de soudage.

*références
bibliographiques*

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Bellet et FaChinotti Donea et al.; Haber. 1984.
- [2] Article soudage par friction, technique de l'ingénieur ; traité génie mécanique B(7745).
- [3] G.SAYEGH, et R. GAZES. Possibilités et perspectives du soudage par friction applications – évolution de la technique et perspectives. 1981.
- [4] S.ELLIOT, et E.R.WALLACH. Joining aluminum to steel part 2- friction welding, metal construction, pp. 221-224, April 1981.
- [5] S.N.E.C.M.A, document ressource. PDF : concours d'admission à l'école nationale polytechnique. 2001.
- [6] N.I. FOMICHEV and K.P. IMSHENNIK. New program of for variation in friction welding, doc. IIW, III, 640-80.
- [7] M. James et M. Mahoney. Proc. 1st International on Friction Stir Welding, Thousand Oaks, California, USA, June 1999.
- [8] B. Skrotzki et J. Mucken. Proceedings from Materials Solutions Conference, Indianapolis, IN, ASM International, Novembre 2001.
- [9] R.GAILLARD. Recherche sur la soudabilité et le soudage par friction : cas des aciers, soudage et techniques connexes, pp.160-171, Mai-juin 1981.
- [10] B.HOLLANDER, C.J.CHENG et J.C WYMAN. Friction welding parameter analysis, Welding journal, Nov 1963.
- [11] I.A.CHERNENKO. Friction welding aluminium to steel, Welding International, No.7, pp.586-590, 1989.
- [12] K.P.Imshenik, V.L.Golovin. Friction welding of high speed to structural steel, Welding production, No. 1, pp31-34, 1966.
- [13] V.I.VILL, et A.N.POPANDOPLO. Friction welding high speed steel 45, Welding production No. 8, pp.32-35, 1970.
- [14] W.WELZ, et G.DENNIN. The friction welding of high-speed steel to heat-treatable steel. The welding technology training and research institute at munich, pp.34.44, Feb. 1973.
- [15] J.RUGE, et K.THOMAS. Joining of copper to titanium by friction welding, welding journal, Vol. 65, No.8, pp.28-31, Aug 1986.

Références bibliographiques

- [16] F.SASSANI, et J.R. NEELAM. Friction welding of incompatible materials, Welding Journal, Vol. 67, No. 11, pp.264S-270S, Nov 1988.
- [17] NOVIKOVA, et B.M. DANILKO. The properties of joints in steel 45 made by inertia friction welds, Welding production, No. 8, pp. 34-35, 1977.
- [18] M.B. HOLLANDER et C.J.CHENG. Friction welding parameter analysis, Welding journal, Vol. 42, No-11, pp.495-501, Nov 1983.
- [19] K.J.K.MURTY, et SUNDARESAN. Thermal behavior of austenetic-ferritic transition joints made by friction welds, welding journal, Vol. 63, No. 11, pp. 325S-334S, Déc 1985.
- [20] S.B. DUNKERTON. Toughness properties of friction welds in steel, Welding Journal, Vol. 65, No. 8, pp. 193S-202S, Aug 1986.
- [21] DOUCENE Sofiane. Thèse de projet de fin d'étude, Soudage par friction et tests de l'adhérence par essais de traction. ENSP, 2006.

Annexes

ANNEXES

**ANNEXE A1 : Image d'éprouvettes soudées par moi même- bertal azzeddine
(juin 2009)- avec leurs numéros correspondants.**



Pièce N° 1



Pièce N° 2



Pièce N° 3



Pièce N° 4

ANNEXES



Pièce N° 5



Pièce N° 6



Pièce N° 9



Pièce N° 8

ANNEXES



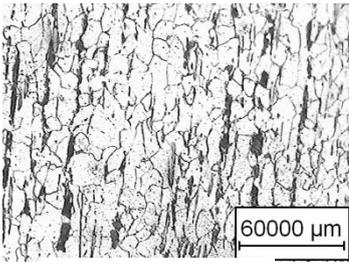
Pièce N° 12



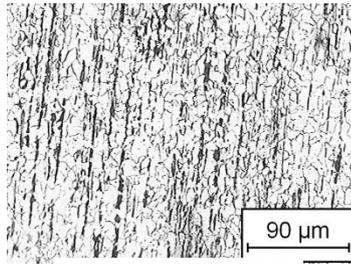
Pièce N° 7

ANNEXES

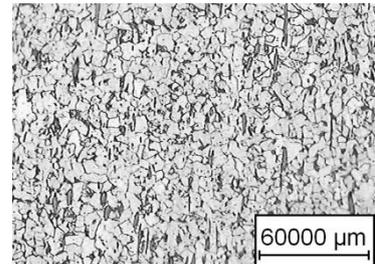
ANNEX A2 : photos micrographique à différentes zones dans le plan de l'axe d'une éprouvette soudée- bertal azzeddine-(2009).



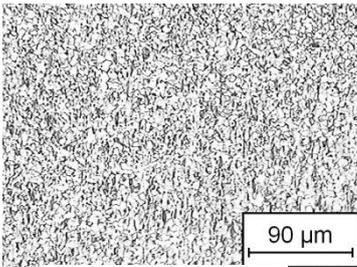
X200.MB.I



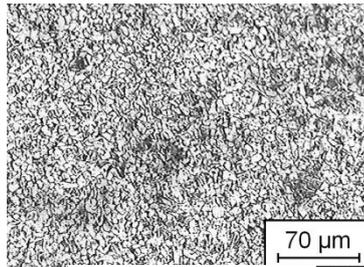
X100.MB.I



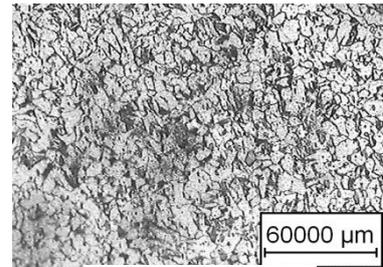
X200.MB.R



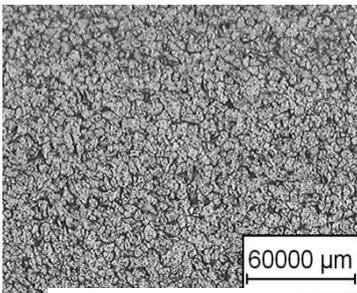
X100.MB.R



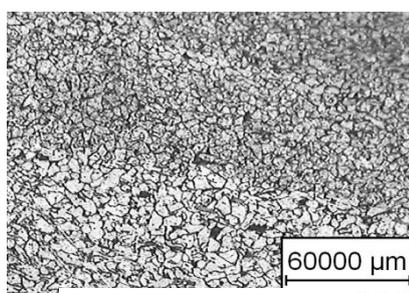
X100.ZAT.I



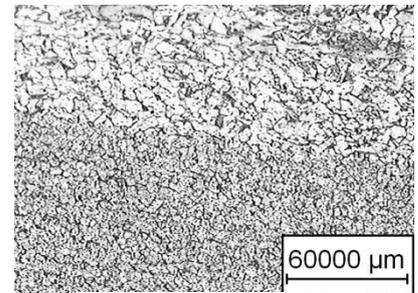
X200.ZAT.I



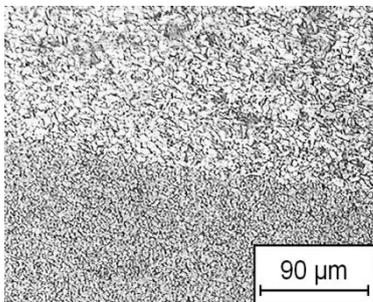
X200.ZAT.R



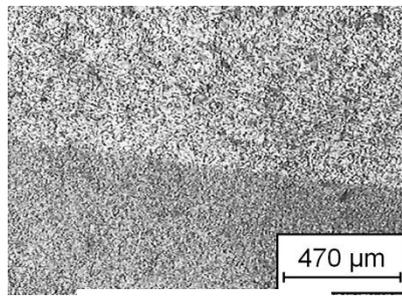
X200.transition. I



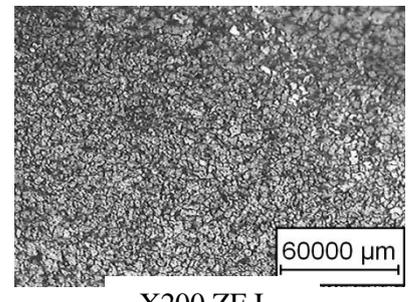
X200.transition. R



X100.transition. R

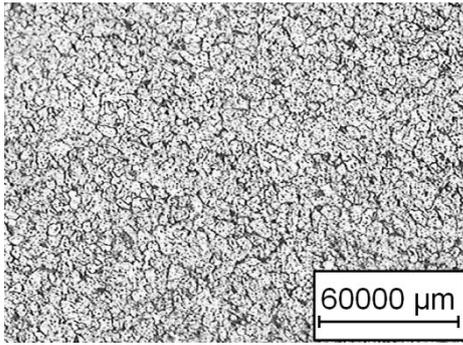


X50.transition. R

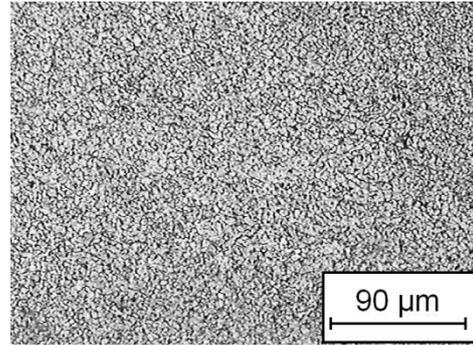


X200.ZF.I

ANNEXES



X200.ZF.R



X100.ZF.R

X: agrandissement

R: cote mobile de la pièce soudée

I: cote fixe de la pièce soudée

MB: métal de base

ZAT: zone affectée thermiquement

ZF: zone fondue

Transition: ZAT+ZF