

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



الجامعة الوطنية للتكنولوجيا
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR D'ETAT EN GENIE
MECANIQUE

***SOUDAGE PAR FRICTION ET
TESTS DE L'ADHERENCE PAR
ESSAIS DE TRACTION***

Dirigé par :

**M^{rs}: Y. BELKACEMI
M. BELHADEF**

Réalisé par :

M^r: DOUCENE Sofiane

Promotion : Juin 2006

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

À mes très chers parents à qui je dois toutes mes études, que Dieu me les garde.

À mes frères, mes sœurs à qui je souhaite tout le bonheur.

À tous mes proches, oncles et tentes, et leurs familles.

A celle qui ma soutenue « A.Sharinasse »

À tous mes amis.

Remerciements

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

Je remercie vivement, Mr MADANI pour l'honneur qu'il me fait en président le jury de cette thèse.

Mes remerciements les plus sincères à Mr GUergueb, pour son aide, ses conseils et d'avoir accepté de juger ce travail.

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 remerciement s'adressent également à toute la famille du département Génie mécanique de l'ENP (Enseignant, Techniciens, et Etudiant).

Ma reconnaissance va également à Monsieur Rachid technicien au laboratoire de génie civil pour son aide.

Enfin et surtout, je remercie le bon dieu de m'avoir donné le courage, la force et la volonté qui m'ont permis de faire aboutir ce modeste travail.

الموضوع: اللحام بالاحتكاك و اختبار التماسك باختبار الشد

الملخص :

عملنا يهدف إلى تحقيق عملية لحام بالاحتكاك على مخرطة متوازية التي تستلزم عملية متواقة بين لحظة ومدة تطبيق ضغط الاحتكاك و اللحام. و وقت الكبح. اختبارات الشد و قياس الصلادة سمحت لنا بمعرفة تغيرات المتانة بتغير ظروف اللحام وتغيرات الصلادة على طول المنطقة المتأثرة بالحرارة باتجاه طولي.

كلمات مفتاحية: لحام، احتكاك، شد، الحدادة

Sujet : Soudage par friction et tests de l'adhérence par essai de traction

Résumé :

Notre travail consiste à réaliser le soudage par friction sur tour parallèle qui nécessite la synchronisation entre L'instant, le temps d'application de la pression de friction et de forgeage, et le moment du freinage.

Les essais de traction et les mesures de dureté nous ont permis de déterminer la résistance ultime en fonction des paramètres de soudage et la variation de la dureté le long de la zone affectée thermiquement (ZAT).

Mots clefs : soudage, friction, forgeage, traction.

Subject: Friction Welding and tests of adherence by tensile test

Summary :

Our work consists in carrying out welding friction on parallel lathe that requires synchronization between the moment, and the time application of friction and forging pressure, with the moment of braking.

The tensile tests and measurements of hardness enabled us to determine ultimate tensile strength according to the parameters of welding and the variation of hardness along heat affected zone (HAT).

Key words : welding, friction, forging, traction.

Table de matière

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 - Le procédé de soudage par friction	01
I.2 - Principes de soudage par friction	02
I.3 - Avantages et limites de la technique	03
I.4 - Types de soudage par friction.....	04
I.5 - Soudage par entraînement direct	06
I.6 - Les différentes phases de l'opération de soudage.....	06
I.6.1 - Phase d'accostage	06
I.6.2 - Phase transitoire	06
I.6.3 - Phase d'équilibre	07
I.6.4 - Phase de forgeage	09
I.7 - Le soudage par friction inertielle	09
I.7.1 - Le principe du soudage par friction inertielle	09
I.7.1.1 - Phase de préparation du système	10
I.8 - Influence des grandeurs physiques	10
I.9 - Effet des paramètres d'entrée	11
I.9.1 - Effet de l'effort F et la vitesse de rotation.....	11
I.9.2 - Effet du temps	13
I.10 - Influence des paramètres d'entrée sur la qualité de la soudure	14
I.11 - Applications	14
I.12 - Conclusion	15

CHAPITRE II : RECENSEMENT DES DIFFERENTS TRAVAUX REALISES

Recensement des différents travaux réalisés.....	17
Conclusion.....	34

CHAPITRE III : PARTIE EXPERIMENTALE

III.1 – Introduction.....	36
III.2 - Conditions de soudage.....	37
III.3 - Réalisation du soudage.....	37
III.3.1 - Caractéristiques du tour parallèle Gazeneuve.....	37
III.3.2 - Montage spécifique.....	38
III.3.3 - Instrument de mesure.....	39
III.4 - Préparation des pièces élémentaires.....	40
III.4.1 - Préparation avant soudage.....	40
III.5 - Paramètres de soudage utilisés.....	40
III.6 - Identification du métal de base.....	41
III-6-1 Choix du métal de base.....	41
III.6.2 - Caractéristiques de cette nuance.....	41
III.6.3 - La composition chimique selon la norme NFA-35-553.....	41
III.7 - Opération de soudage par friction direct.....	41
III.8 - Essais mécaniques.....	43
III.8.1 - Essai de traction.....	43
III.8.1.1 – Principe.....	43
III.8.1.2 - Usinage des éprouvettes selon la norme NFA03-15A.....	43
III.8.1.2.1 - Dimensions des éprouvettes cylindriques.....	44
III.9 - Préparation des éprouvettes.....	45
III.10.1 - Conditions de l'exécution de l'essai.....	45
III.10.2 - Réalisation des essais de traction.....	45
III.11 - Mesure de dureté brinell sur éprouvette souder	46
III.11.1 - Principe.....	46

III.11.2 - Condition d'essais	46
III.12 - Analyse de la microstructure	46
III.12.1 - préparation des échantillons.....	47
III.13 - Conclusion.....	47

CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

IV.1 – Résultats.....	49
IV.1.1 - Résultats d'essai de traction.....	49
IV.1.2 – Résultats de mesure de dureté et de l'étude micrographique....	55
IV.2 - Interprétations des résultats	57
IV.2.1 - Analyse des résultats de traction.....	57
IV.2.2 - Analyse de la microstructure.....	57
IV.2.3 - Analyse des résultats de la dureté.....	58
IV.3 – Conclusion.....	58

CONCLUSION GENERALE

ANNEXE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

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 I et II) présentent une recherche bibliographique, donnant une synthèse des différents travaux relatifs à l'optimisation des paramètres de soudage.

Dans le chapitre (III) on a présenté la partie expérimentale et les résultats expérimentaux obtenus. La réalisation du soudage par friction sur tour parallèle, et une série d'essais de traction, mesure de dureté, et observation de la microstructure autour de l'interface du joint de soudure ont été conduits.

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

- La résistance ultime
- La dureté
- La microstructure
- La définition de quelques paramètres de soudure résistante.
-

Et on termine ce travail par une conclusion générale.

Chapitre I

Etude Bibliographique

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 - 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. [1].

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 [2] [3]. Ce procédé est donc bien adapté aux alliages d'aluminium difficilement soudables (série 2000, 6000, 7000). Ce procédé d'assemblage est particulièrement intéressant dans le cadre de l'allègement des structures pour le transport aérien, naval et terrestre [4] [5] [6].

Dans ce chapitre nous passerons en revue tout d'abord une étude bibliographique sur le soudage par Friction. Durant le procédé de soudage, un gradient de flux de chaleur et de matière est mis en jeu à travers le joint, conduisant à des microstructures et des propriétés complexes. Pour simplifier la démarche, nous parlerons tout d'abord des 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 [7]. Ce processus peut être obtenu par déformation partielle plus une diffusion de la matière [8]. Dans cette famille, on 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 [9] ;
- 4- soudage par friction radiale [10, 11, 12,13] ;
- 5- dépôt métallique de soudage par friction [14] ;
- 6- soudage par friction malaxage (FSW). [15, 16,17]

I.2 - Principes de soudage par friction :

Le soudage par friction permet de réaliser des assemblages en bout de deux pièces dont l'une au moins a une symétrie de révolution. Il met en œuvre l'effet thermique engendré dans leur plan de joint par la rotation rapide sous pression des pièces l'une sur l'autre ou encore par friction. La puissance de chauffe résulte du couple résistant et de la vitesse de rotation maintenue en principe constante. C'est un procédé d'assemblage global qui se classe parmi les procédés de forgeage. Du fait du fluage du matériau pendant la friction et lors du forgeage, la température de fusion n'est jamais atteinte [1].

Le soudage par friction consiste à transformer l'énergie cinétique d'une pièce mise en rotation, en énergie calorifique produite par friction à l'interface des pièces à assembler. La quantité de chaleur

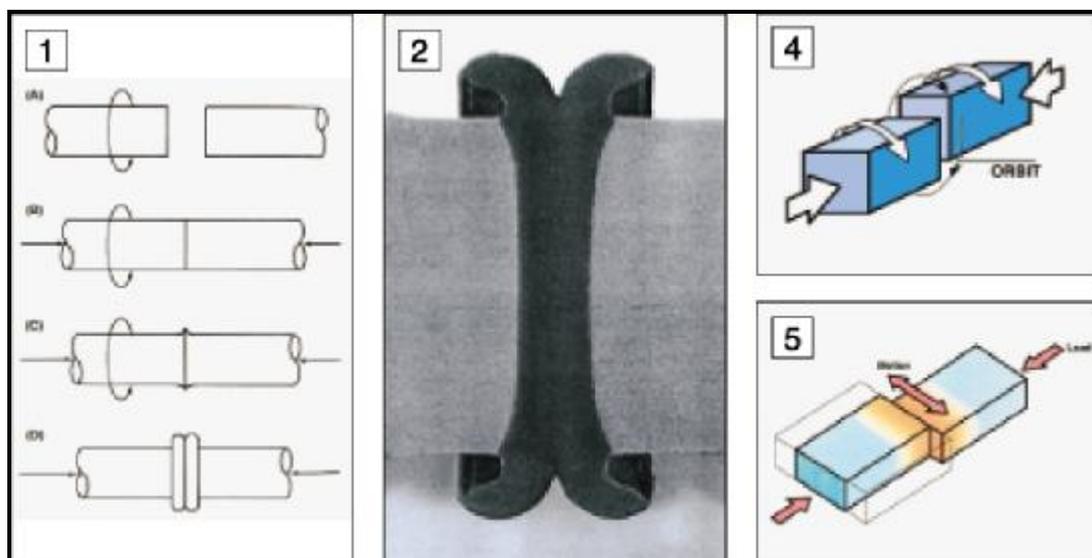


Figure.I.1 [18]

générée à l'interface porte rapidement les pièces à la température de soudage, sans atteindre la fusion du métal. Lorsque le mouvement de rotation s'arrête, on applique une pression axiale pour compléter l'assemblage par forgeage (Figure.I.1) [18].

La variante la plus utilisée du procédé est le soudage par friction rotatif. On peut l'utiliser pour l'assemblage de pièces symétriques en rotation comme des tuyaux et des barres (Figure.I.1), mais également pour certaines géométries plus complexes. D'autres variantes existent encore. Le soudage par friction orbital (Figure.I.1), par friction linéaire (Figure.I.1) qui peuvent être utilisés pour souder des pièces ayant une intersection symétrique mais pas en rotation. Aussi le soudage par friction malaxage (friction stir welding) où les deux tôles à souder sont mises en contact et solidement

bridées. L'outil en rotation (400 à 1200 tr/min) pénètre la matière puis se déplace le long du joint à souder (100 à 1000mm/min) (Figure.I.1).

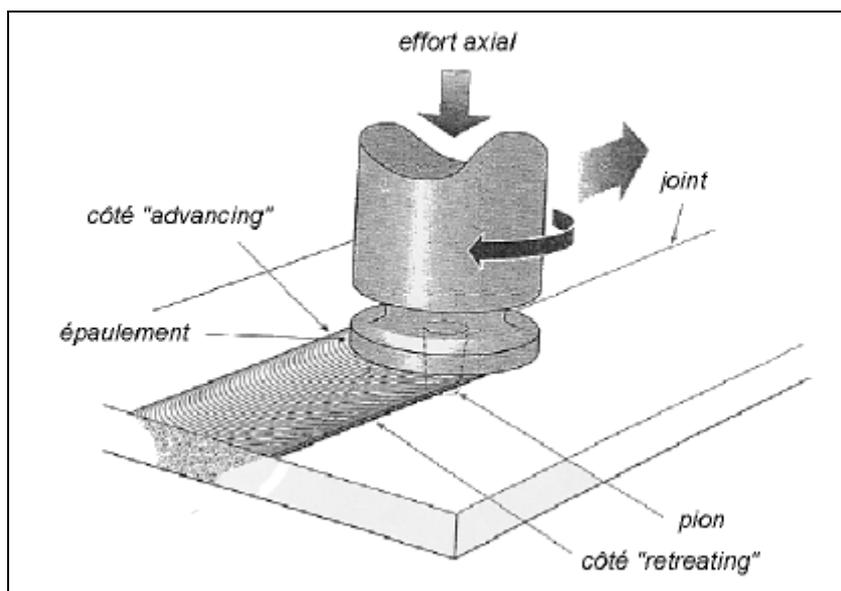


Figure. I.2 schéma du procédé de soudage par friction malaxage (FSW) [20].

I.3 - Avantages et limites de la technique :

- Assemblages de haute qualité ayant une bonne structure métallurgique vue que 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, l'aluminium ou le cuivre à l'acier ;
- Très bonne reproductibilité et possibilités d'automatisation ;
- l'élimination des problèmes de fissuration 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 pas nécessaires ;

- Soucieux de l'environnement : pas de gaz de protection, pas de fumées de soudage ou rayonnement ;
- Moins de bruit : les soudures ne doivent pas être meulées ;
- Pas de nécessiter de soudeurs agréés ;
- Néanmoins, il est difficile d'emploi sur des matériaux n'ayant pas de caractéristiques favorables au phénomène de friction et en particulier les matériaux très électro-conducteurs tels le cuivre et ses alliages, et les soudures par friction malaxage possibles aujourd'hui restent limitées à des géométries simples, bord à bord, une tôle sur une autre ou encore soudure en T. De plus, les vitesses de soudage utilisées par ce procédé sont plus faibles que par le soudage laser [19].
- les matériaux à souder ne doivent pas avoir la propriété d'être lubrifiés a sec (les matériaux contenant : du graphite du sulfure de fer, Pbtels que fonte grise, bronze, laiton, etc. ne peuvent pas être soudés par ce procédé) [21].

I.4 - Types de soudage par friction :

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

La rotation est généralement le moyen utilisé pour créer la friction (Figure.I.3). 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 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 (Figure.I.3b) montre la vue en coupe d'un assemblage soudé par friction.

On a coutume de distinguer deux modes de soudage selon la façon dont on exécute la friction :

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

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

Ces deux modes ont été normalisés (NF L 06-384) pour les constructions aéronautiques, afin de préciser les caractéristiques et la qualité des assemblages soudés obtenus.

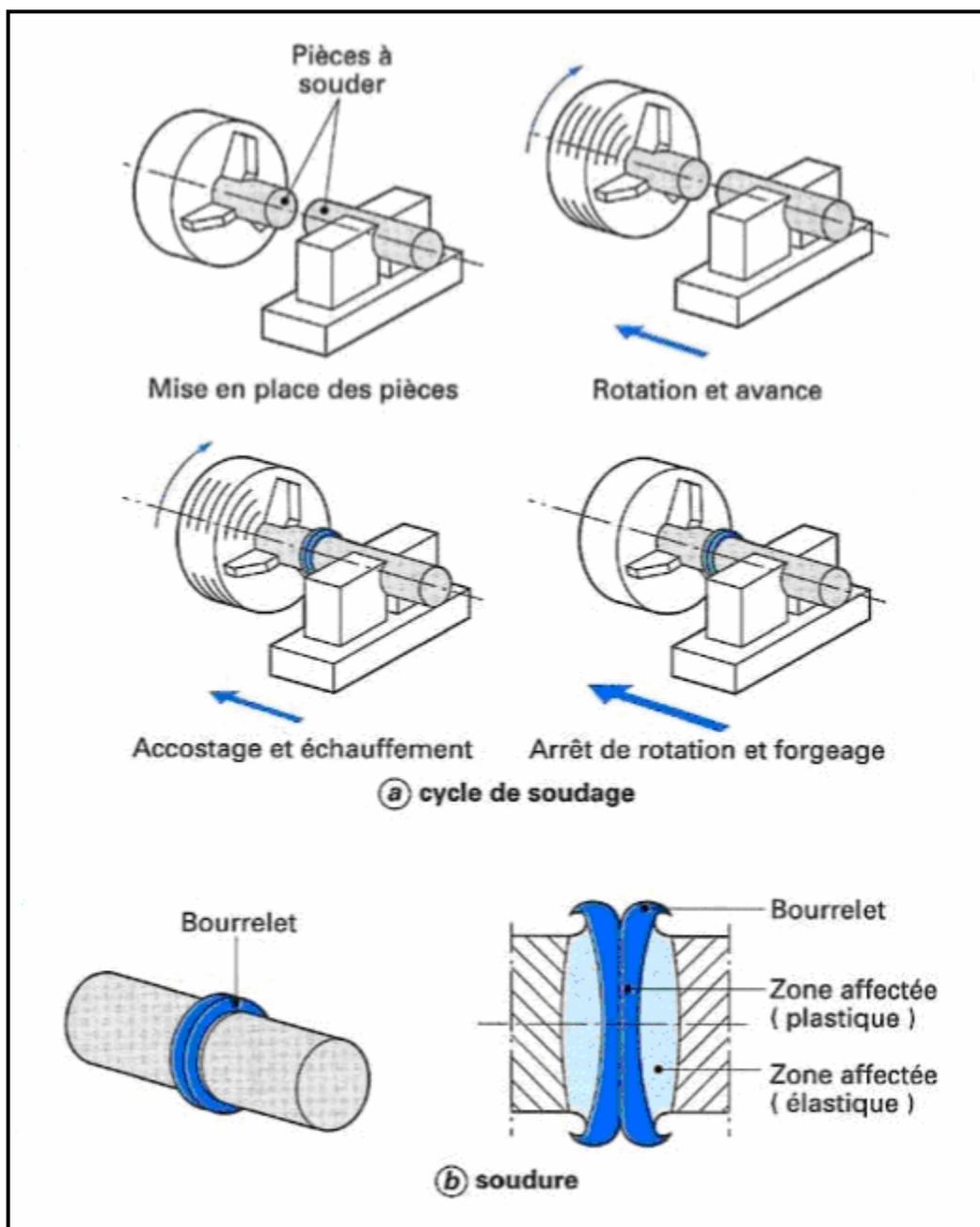


Figure.I.3 Principe du soudage par friction [1].

Il est bon de savoir que l'on a utilisé, mais d'une manière peu courante, 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].

I.5 - Soudage par entraînement direct [Figure.I.4] :

Le principe du soudage par friction est présenté dans sa forme la plus simple à la figure (Figure.I.1) ; 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 axiale 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 caractéristique du soudage par friction est formé(Figure.I.4).

I.6 - Les différentes phases de l'opération de soudage :

I.6.1 - Phase d'accostage :

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

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

I.6.2 - Phase transitoire :

Cette phase correspond au chauffage des pièces elle est caractérisé 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.

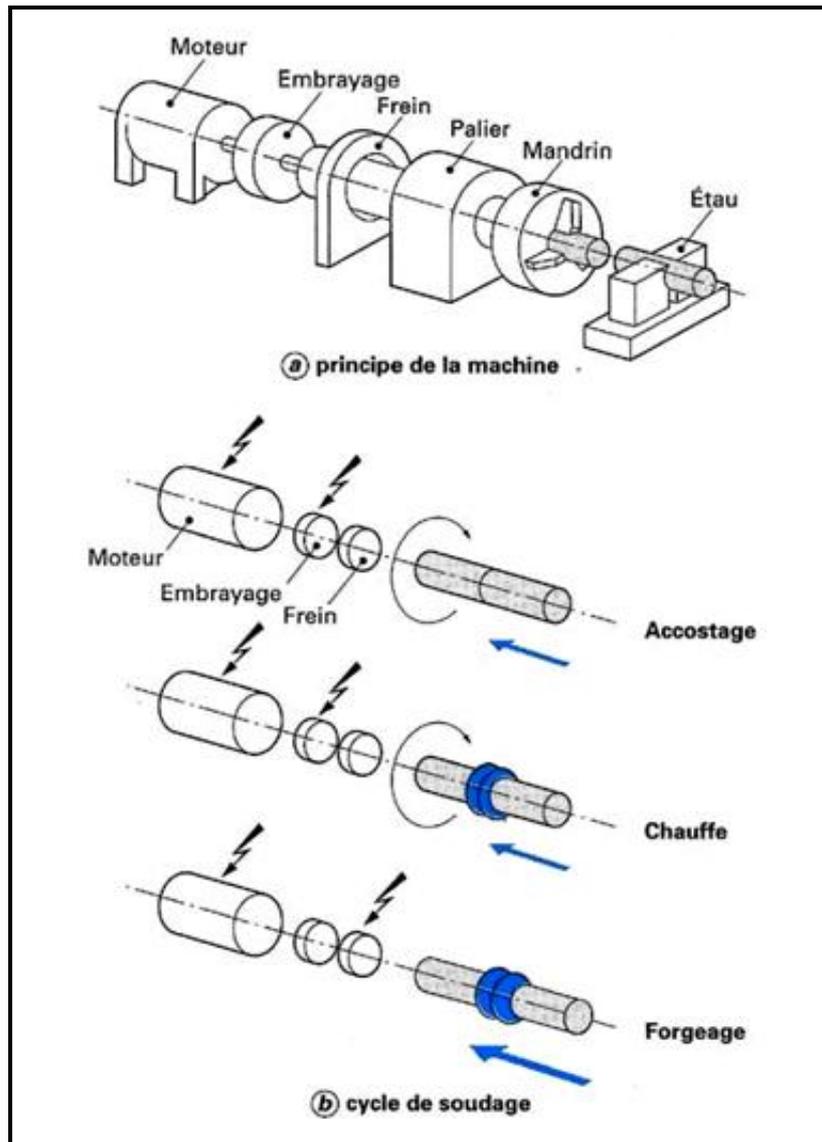


Figure.I.4 Soudage par entraînement direct ou continu [1].

I.6.3 - 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.

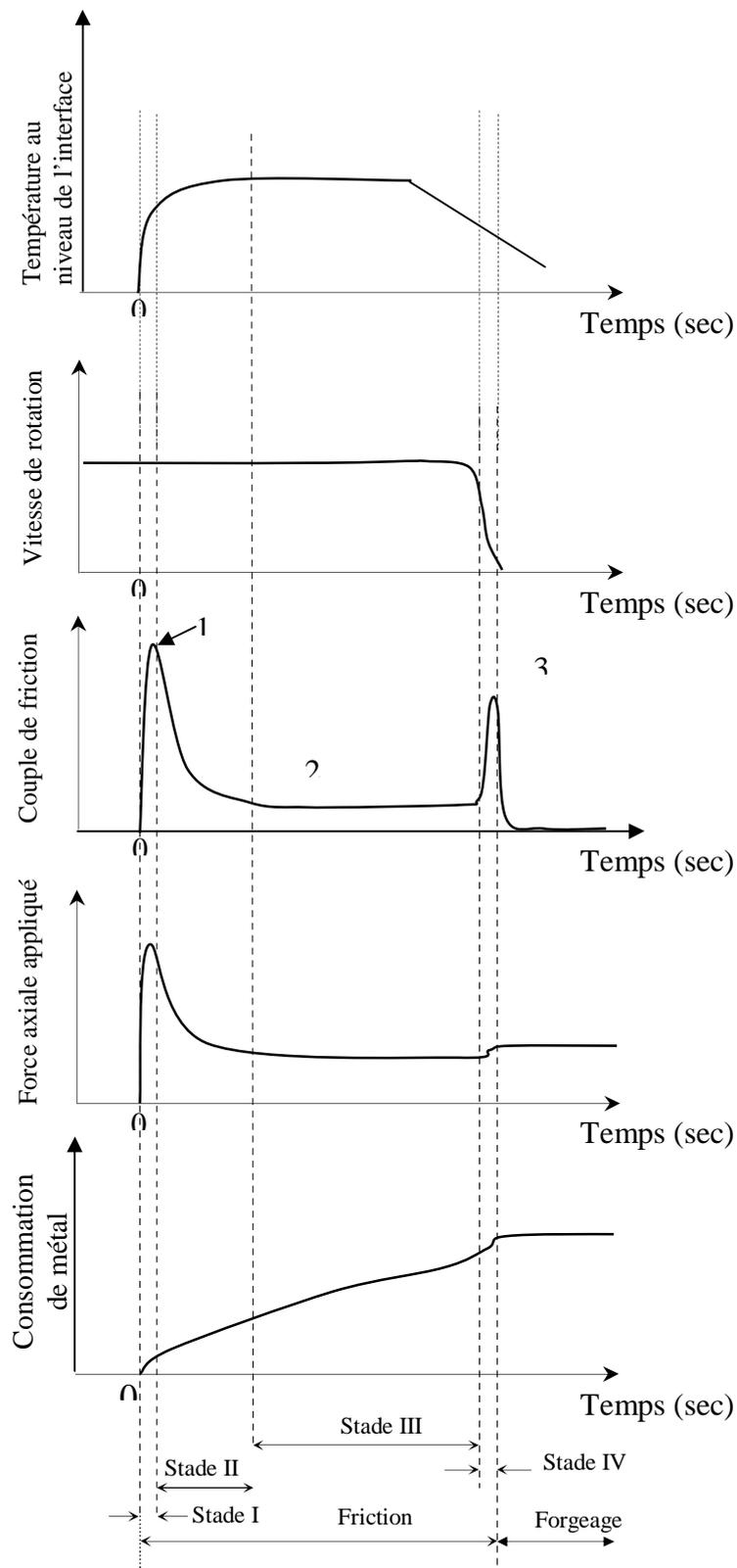


Figure.I.5 : Caractéristiques du soudage par friction direct [16,27]

I.6.4 - 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 [21,22].

I.7 - Le soudage par friction inertielle :

Le soudage par friction inertielle permet l'assemblage sans atteindre la température de fusion. Il altère peu la qualité métallurgique des matériaux. 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.

I.7.1 - Le principe du soudage par friction inertielle :

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

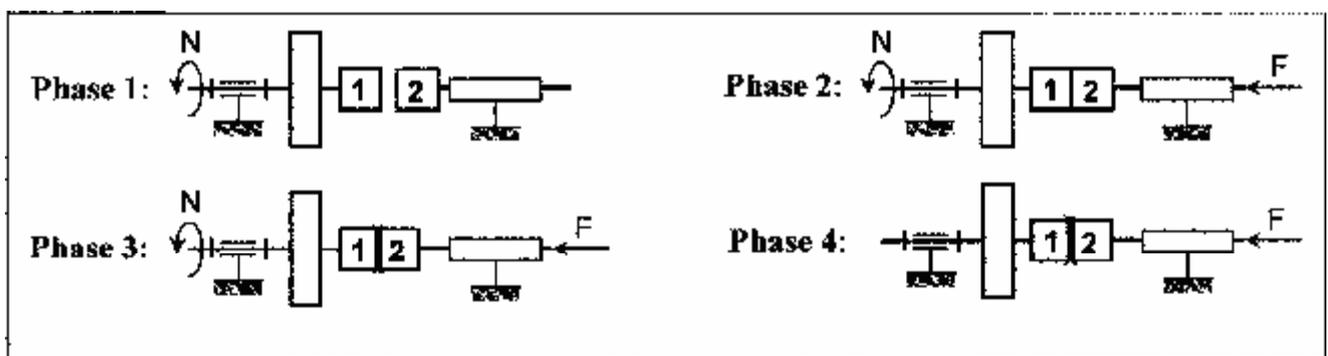


Figure.I.6 phases de soudage par friction inertielle [23].

* **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 N , 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 thermo-mécaniques 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).

Pour choisir et mettre en œuvre la machine à souder, il faut connaître, pour chaque soudure, l'inertie I de l'ensemble en rotation, la vitesse de rotation N_S et l'effort F [23].

I.7.1.1 - Phase de préparation du système :

L'opérateur fixe les volants d'inertie adéquats sur la broche et les deux pièces dans les mandrins de serrage. Il déplace le chariot à l'aide du vérin de coulisseau jusqu'à ce que les pièces soient distantes de quelques millimètres.

Un robot manipulateur aide l'opérateur au chargement des volants d'inertie et des pièces à souder.

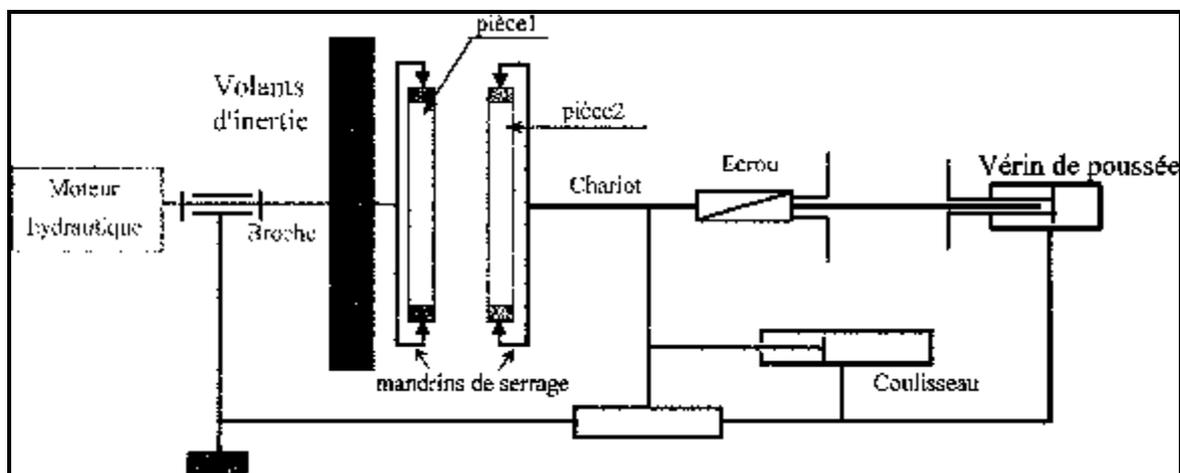


Figure.I.7 : Machine MTI 480 en phase de préparation [23]

L'opérateur ramène alors manuellement l'écrrou en butée sur le piston du vérin de poussée et ferme la porte coulissante de sécurité.

I.8 - 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.

I.9 - 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, etc.
- soit ceux que l'on peut déterminer sur les pièces soudées tels que :
 - ◆ la déformation et le raccourcissement (taux de consommation du métal).

I.9.1 - 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.I.12a**). Par contre l'augmentation de la vitesse de rotation $n(t)$, à force axiale constante, entraîne une réduction de ce même couple (**Figure.I.12b**), car le coefficient de frottement se trouve réduit avec effet variable selon les différentes phases de soudage (**Figure.I.12b**) [21].

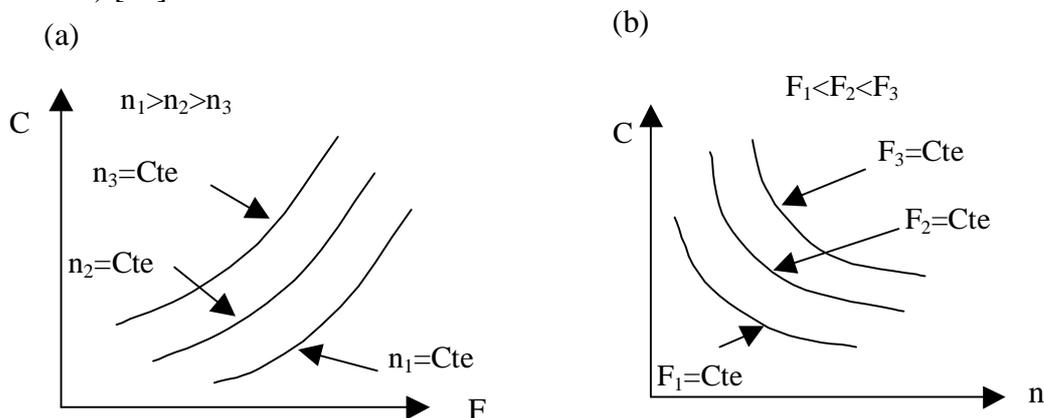


Figure.I.8 : Variation du couple de friction en fonction : (a) de F et (b) de n [21].

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.7a) et qu'à force axiale constante, la température d'équilibre atteinte est légèrement plus élevée lorsque la vitesse de rotation croît (Figure.I.13a). Enfin, l'augmentation du temps de friction fait croître légèrement la température d'équilibre (Fig.I.13b).

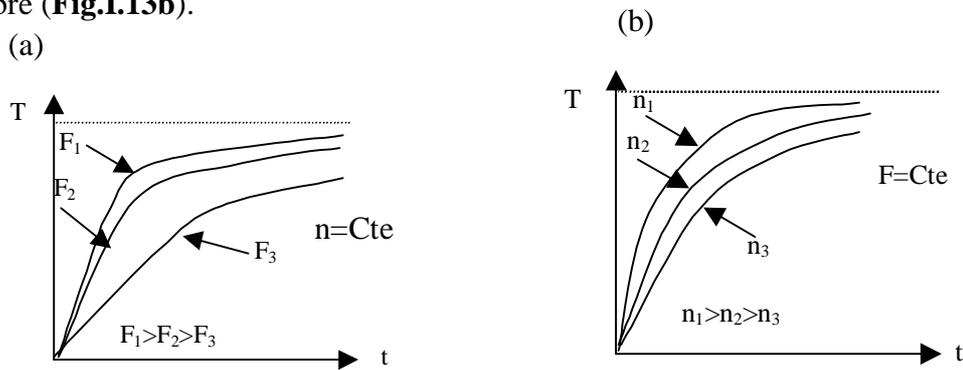


Figure.I.9 : Variation de la température de soudage en fonction du temps, pour différentes valeurs : (a) de F et (b) de n [21].

Divers travaux publiés dans la littérature [21, 24,25] mettent en évidence la possibilité de visualiser l'écoulement du métal à l'interface des pièces en examinant les traces des inserts placés dans l'une des pièces à souder. On constate, les effets suivants :

- que le matériau s'écoule radialement,
- que la consommation du métal diminue lorsque la vitesse augmente à $F = \text{cte}$ (Figure.I.14b),
- que la déformation croît lorsque la force axiale ou le temps de friction augmente, à une vitesse constante $n = \text{cte}$ (Figure.I.14a).

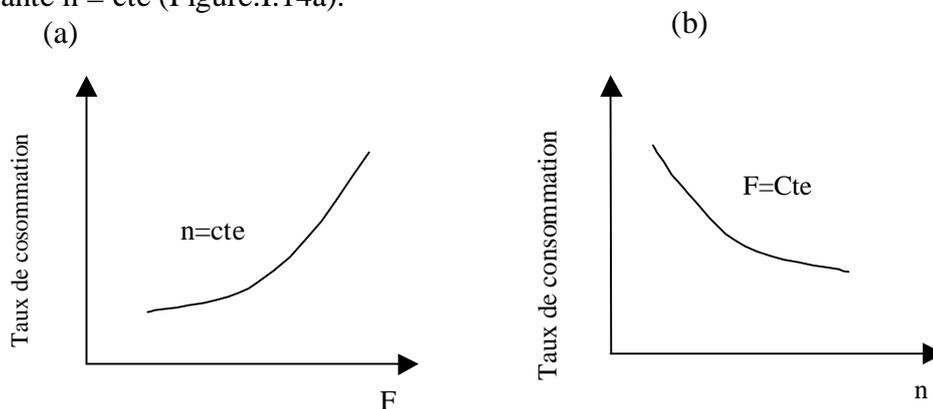


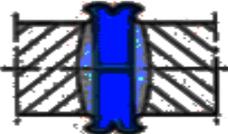
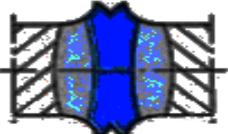
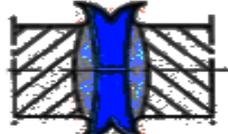
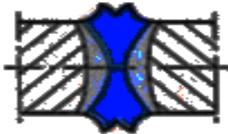
Figure.I.10 : Effet sur le taux de consommation (a) de l'effort axial et (b) de la vitesse de rotation [21].

I.9.2 - 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 où 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 [21].

- 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 totale 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 I.1. Un temps trop court fournit une zone affectée thermiquement irrégulière ; en revanche, un temps trop long entraîne une consommation de métal surabondante.

Tableau I.1 – Effet du temps et de l'énergie sur la forme de la soudure [1]			
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>			

I.10 - Influence des paramètres d'entrée sur la qualité de la soudure :

Le choix des paramètres d'entrée de soudage est très important, citons l'expérience réalisée par les chercheurs soviétiques. FOMICHEV et IMSHENNIK [26] dans leurs travaux ils ont montré l'effet de la variation de l'effort axial sur la qualité de la soudure. Deux séries d'essais ont été effectuées sur des barreaux en acier de 16mm de diamètre, l'une dans les conditions classiques du soudage continu, l'autre en utilisant trois niveaux successifs d'efforts (Tableau I.2). 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.

En conclusion, les auteurs, suggèrent que l'on contrôle l'effort axial en cours de l'opération de soudage.

Condition de soudage						Temps de cycle	H	Caractéristiques mécaniques des joints		
1ère phase		2ème phase		3ème phase				R _{m,F}	Ecart type	(*)
(N/mm ²)	Temps (s)	(N/mm ²)	Temps (s)	(N/mm ²)	Temps (s)	(s)	(mm)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	
9.5	8.5	-	-	25	3	19.5	2.5-2.6	123.9	13.67	84.5
15	3	7	8	15	3	14	1.5-1.7	122.53	11.53	85.8

(*) Probabilité d'obtention des résultats supérieurs à l'écart type %, H : La consommation de la matière, R_{m,F} : La résistance à la flexion.

Tableau I.2 : Résultats de FOMICHEV et IMSHENNIK [26].

I.11 - Applications :

Le soudage par friction est utilisé pour des diamètres de pièces allant de 5 mm à plus de 50 mm. La température de soudage qui est relativement basse dans des joints d'excellente qualité avec de nombreux métaux. En général, une pièce est maintenue fixe alors que l'autre est mise en rotation.

Il est cependant possible d'utiliser une pièce intercalaire mise en rotation entre deux pièces fixes, si bien qu'en fait deux soudures en une opération.

Cela permet de souder des pièces longues ou peut maniable sans les mètres en rotation.

La rotation simultanée, et opposée des deux pièces est possible dans le cas des petits diamètres, mais pour ces tailles il existe d'autres procédés de soudages mieux adaptés.

La majorité des applications se situe dans le domaine de production mécanique. Dans l'industrie automobile on a :

- pièces primaires de forge ;
- transmission (cardon, arbres)
- tiges de soupapes ;
- arbres de compresseurs ou de pompes
- embouts de cylindres et des tubulures ;

Dans l'industrie électrique pour des liaisons composites de métaux dissemblables, par exemple les cosses électriques (Cu-Al)

Dans l'industrie aéronautique on peut citer les axes de turbines et les compresseurs hauts pression pour réacteur aéronautique [21, 27].

I.12 - 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 d'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 II

Recensement des Différents Travaux Réalisés

CHAPITRE II : RECENSEMENT DES DIFFERENTS TRAVAUX REALISES

Parmi les travaux qu'on a choisis d'inclure dans ce chapitre ceux déjà assez anciens de HOLLANDER [29], IMSHENNIK [31], et ceux plus récents RUGE et THOMAS [37], DUNKERTON [9], SASSANI, NEELAM [38], CHERNENKO [30]. Les résultats des travaux publiés rappellent les diverses observations et évaluations qualitatives.

GAILLARD [28] 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 II.1**). Les résultats des mesures de la température et les paramètres de soudage utilisés par l'auteur sont résumés dans le **tableau.II.1**.

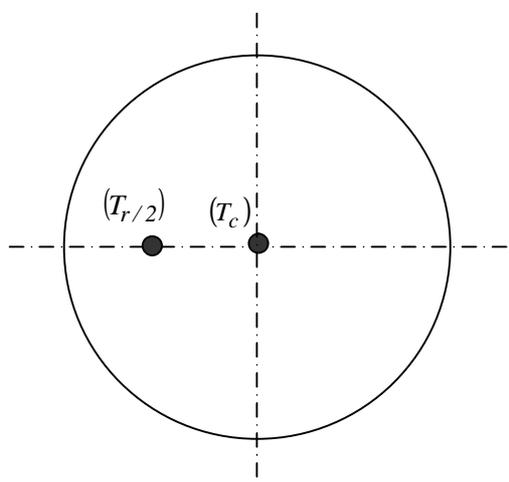


Figure.II.1 : Point de mesure de la température au cours du procédé de soudage par friction [29]

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.II.1 : Résultats de GAILLARD [28]

CHERNENKO [30] 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 II.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.II.3** et le **tableau.II.2**.

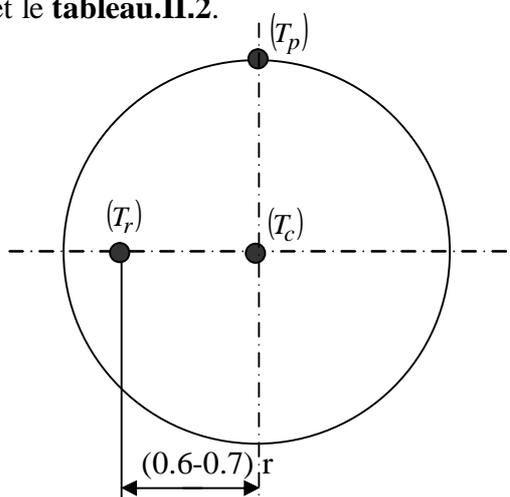


Figure.II.2 : Point de mesure de la température au cours du procédé de soudage par friction [30]

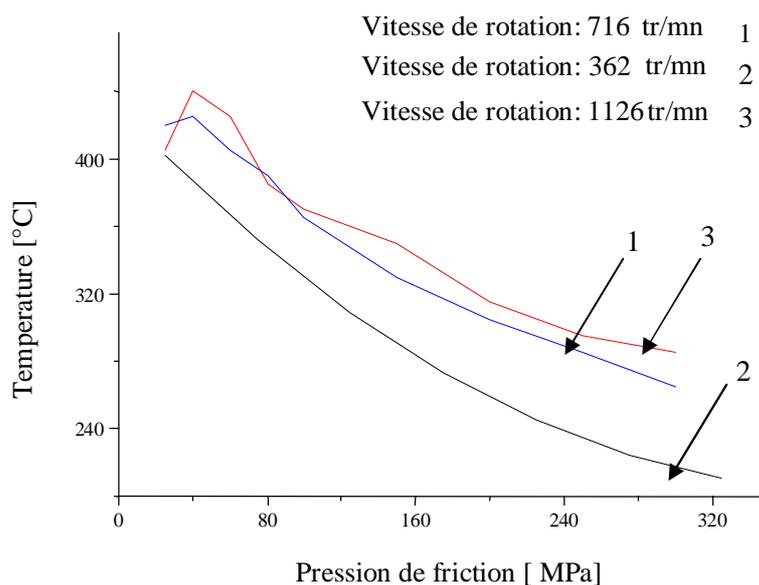


Figure.II.3 : Variation de la température moyenne en fonction de la pression de friction [30]

N° des essais	$P_{friction}$ [MPa]	$P_{forgeage}$ [MPa]	t (s) (****)	$R_C^{(*)}$ [J/cm ²]	R_m [MPa]	a [degrès] (***)	T_m [°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 chocs, (**) Température moyenne, (***) angle de flexion, (****) temps de soudage

Tableau.II.2 : Résultats de CHERNENKO [30]

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 [28] 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.II.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.II.3 : Paramètres de soudage préliminaires utilisés par GAILLARD [28]

L'auteur réalise une série d'essais mécaniques statiques sur les éprouvettes obtenues en utilisant les paramètres préliminaires, à s'avoir, 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.II.4**.

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

Tableau.II.4 : Valeurs de la charge de résistance moyenne obtenues à partir des essais de traction [28]

IMSHENNIK et GOLOVIN [31] 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.II.5**.

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

Tableau.II.5 : Résultats de IMSHENNIK et GOLOVIN [31]

VILL et POPANDOPULO [32] 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.II.6**.

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.II.6 : Paramètres de soudage [32]

La composition chimique en pourcent de l'acier rapide utilisé est donnée dans le **tableau.II.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.II.7 : Composition chimique de l'acier rapide utilisé [32]

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.II.8**.

Type	Limite ultime R_m [MPa]
Acier rapide	930
C45	620 - 650
Joint soudé	620

Tableau.II.8 : Résultats d'essais de traction [32]

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 [33] ont étudié la possibilité d'utilisation du soudage par friction pour réaliser des soudures en utilisant l'acier rapide avec l'acier C60 sur des barreaux de 20mm de diamètre. La composition chimique en pourcent des deux aciers utilisés est donnée dans le **tableau.II.9**. Les caractéristiques des métaux de base utilisés sont données dans le **tableau.II.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.II.9 : Composition chimique des aciers utilisés par la référence [33]

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

Tableau.II.10 : Caractéristiques mécaniques [33]

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.II.11** résume ces opérations.

Traitement	C60		Acier rapide	
	température [°C]	temps [s]	température [°C]	temps [s]
recuit	680 - 710	-	780 - 820	2 - 4
trempe	780 – 810 ^{**}	-	1190 – 1240 [*]	-
	800-830 ^{&&}	-	500 – 550 ^{&}	-
revenu	530 - 670	-	540 - 560	-

(*) avec projection d'huile et (**) dans un bain d'eau (&) dans un bain de sel et (&&) dans un bain d'huile

Figure.II.11 : Paramètres de l'opération du traitement thermique [33]

Les auteurs réalisent un certains nombre d'essais, en l'occurrence des testes métallographique, des mesures de dureté et de résistance par fatigue. Les meilleurs résultats obtenus ont été pour les joints réalisés dans les conditions résumés dans le **tableau.II.12** :

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

Tableau.II.12 : Paramètres optimales de soudage [33]

NOVIKOVA [34] 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.II.13**.

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

Tableau.II.13 : Paramètres de soudage [34]

Différents essais d'endurance ont été réalisé :

- 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 [34] sont donnés dans la **figure.II.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].

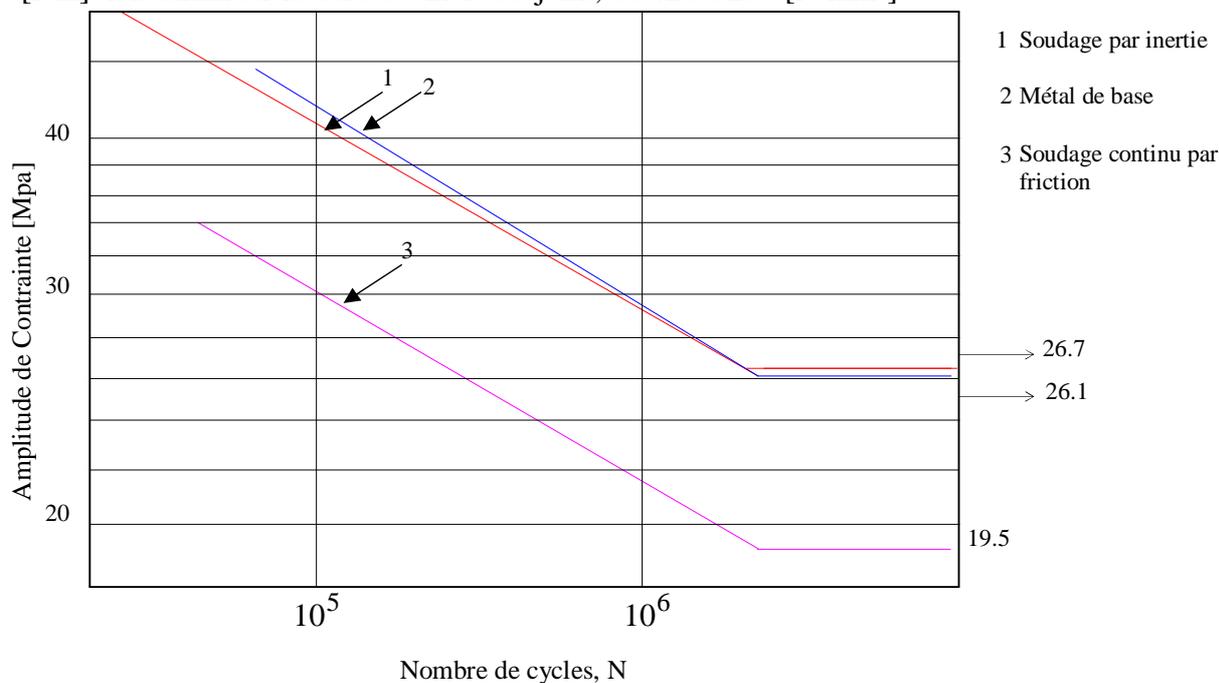


Figure.II.4 : Résultats d'essais d'endurance de NOVIKOVA [34]

HOLLANDER et CHENG [35] 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.II.14**. Les résultats publiés par HOLLANDER et CHENG [35] sont donnés dans les **tableaux (II.15, 16 et 17, 18)**.

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.II.14 : Paramètres de soudages utilisés par HOLLANDER et CHENG [35]

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

(*) Largeur totale ZAT + consommation (mm)

Tableau.II.15 : Paramètres de consommation [35]

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.II.16 : Résultats des essais de flexion [35]

Lot d'éprouvettes	Essai de traction		
	R _m pour 3 éprouvettes [MPa]	Allongement [%]	Localisation de la rupture
1	672	23	01 L 01 A.I 01 ZAT-A.I
2	665	28	01 L 01 A.I 01 ZAT-A.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 02 ZAT-A.I
9	640	18.8	01 L 02 ZAT-A.I
10	624	24.0	01 L 02 ZAT-A.I
11	689	58.0	03 A.I
12	689	22.0	01 L 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.II.18 : Résultats des essais de traction [35]

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 [36] 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 51 mm et une épaisseur de la paroi de 7.1 mm.

Les opérations de soudage ont été réalisées sur une machine de marque KUKA de puissance 20 kW, capable de développer une charge maximale de 150 kN. Les conditions de soudage optimales sont résumées dans le **tableau.II.19**. Les auteurs remarquent qu'au cours de l'opération de soudage se forme une couche martensitique du côté de l'acier inoxydable limité par l'axe de l'interface.

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.II.19 : Conditions de soudage [36]

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 (II.20 et II.21)**.

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.II.20 : Composition chimique des matériaux de base [36]

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/mm².

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	
	R _m (MPa) En présence d'entaille	Dureté VHN
Acier faiblement allié	585	224
Acier inoxydable	689	206

Tableau.II.21 : Caractéristiques mécaniques des matériaux de base [36]

DUNKERTON [9] 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.II.22**. Les résultats d'essais de résilience et de traction obtenus sur les différents joints, le cordon de soudure classique ont été comparés **figure.II.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]	90	91	27.8
Déplacement d'orbitale [mm]	-	-	2.6

Tableau.II.22 : Conditions de soudage [9]

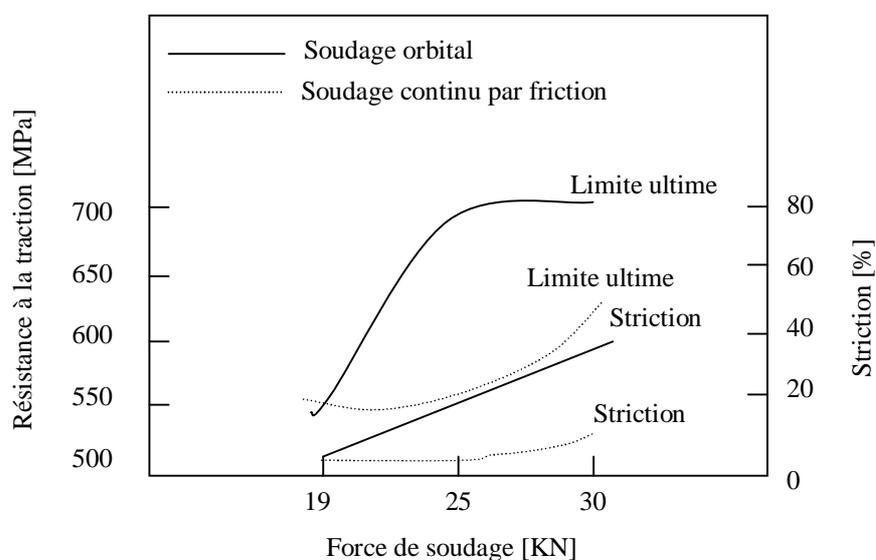


Figure.II.5 : Comparaison des résultats d'essais de traction [9]

RUGE, THOMAS et al. [37] 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 (II.23 et II.24)**.

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

Tableau.II.23: Caractéristiques mécaniques des deux matériaux de base [37]

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 de forgeage [MPa]	temps de friction [s]
1500 - 3000	80	160 - 275	0.2 - 0.5

Tableau.II.24 : Conditions de soudage [37]

SASSANI et NEELAM [38] 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.II.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 (II.25, 26 et 27)**.

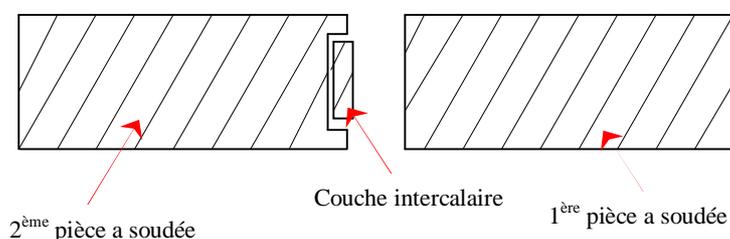


Figure.II.6 :Schématisation du procédé de SASSANI et NEELAM [38]

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.II.25: Conditions de soudage Ti-Ni en utilisant une couche intercalaire de Cu [38]

Nombr e	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.II.26: Conditions de soudage Al. - Al. [38]

Nomb e	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.II.27: Conditions de soudage du laiton - Cu en utilisant une couche intercalaire de laiton à 0,75 Sn [38]

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.II.7** sont relatifs au joint soudé, titane – nickel, les auteurs concluent sans donner des courbes comparatives ni de résultats chiffrés, que la résistance ultime (R_m) augmente de 13% avec utilisation de la couche intercalaire en aluminium et ce, en comparaison avec le joint obtenu tous intercalaire.

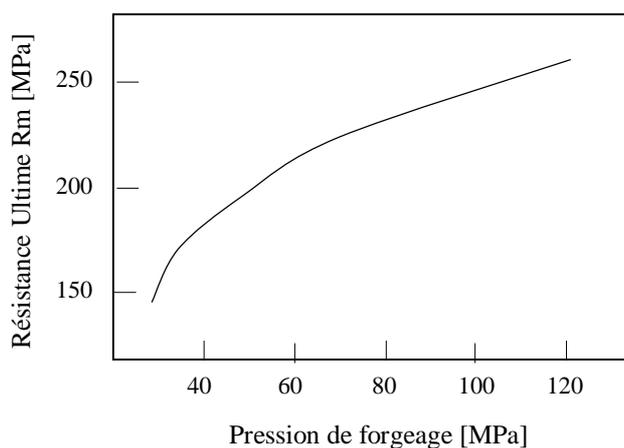


Figure.II.7 : Variation de la résistance ultime en fonction de la pression de forgeage, cas titane – nickel en utilisant un intercalaire en aluminium [38]

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 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 III

Partie Expérimentale

CHAPITRE III : PARTIE EXPERIMENTALE

III.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, et faire des tests de l'adhérence par traction. Une vingtaine d'opérations de soudage par friction direct ont été réalisées. Treize éprouvettes ont été retenues pour les essais mécaniques, en soudant de l'acier (XC 10). Plusieurs soudures ont été réalisées en contrôlant quatre paramètres suivant les limites d'usage du dispositif mis en place, à savoir, la vitesse de rotation, le déplacement de friction et son temps d'application, et le déplacement de forgeage.

Les soudures sont réalisées en contrôlant :

- la coaxialité des pièces souder et la forme générale du bourrelet ;
- le contrôle du déplacement pendant la friction et le forgeage ;
- le contrôle du temps de friction ;

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

- le soudage sur tour parallèle ; les essais de traction ; les mesures de dureté, et l'examen micrographique.

III.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, à partir d'une étude par tests mécaniques. 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 des pièces découpées dans un acier au carbone (XC10) de $\Phi 14$ mm et de 65mm de longueur.

III.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, nous avons mis en place un dispositif pour soudage de pièces cylindriques (barre de diamètre $\Phi 14$) Pour cela nous avons utilisé un tour parallèle (Type GAZENEUVE).

III.3.1 - Caractéristiques du tour parallèle Gazeneuve (figure.III.1):

Nous avons choisit ce tour car sa poupée mobile est robuste, en plus ce tour possède un bon frein. Il est caractérisé par :

- puissance maximale : 7ch (5152 W) ;
- moteur asynchrone triphasé de 220/380 v ;
- gamme des vitesses : 18 vitesses allant de 40 à 2000 tr/mn ;
- Hauteur : 1270 mm ;
- Largeur : 740 mm ;
- Longueur : 1970 mm ;



Figure.III.1 : Vue d'ensemble du tour parallèle

III.3.2 - Montage spécifique :

On a essayé plusieurs montage en partant du principe que la pièce mobile sera placée sur le mandrin du tour, et la pièce fixe au niveau de la poupée car l'effort mobilisé va être appliqué à l'aide du fourreau de la poupée (système vis écrou).

- Premier montage possible : la pièce immobile est fixé en utilisant un mandrin de perçage (coté mobile), avec lequel on a fait plusieurs tentatives. Les vibrations provoquées à cause de l'excentricité, ajouté au glissement ont rendu les paramètres de soudage incontrôlables et nous ont poussé à chercher un autre système plus pratique.

- Deuxième montage retenue (figure.III.2): la pièce immobile est fixé en utilisant un cône de réduction, et une pince conique ($\Phi 14$, des portes pince d'anciennes fraiseuses de type : SOMUA, et HURE), qui nous ont permis d'éliminer le glissement et de réduire les vibrations.

Au niveau du mandrin du tour nous avons placé à l'intérieur un système qui a servis de butée pour la pièce tournante.

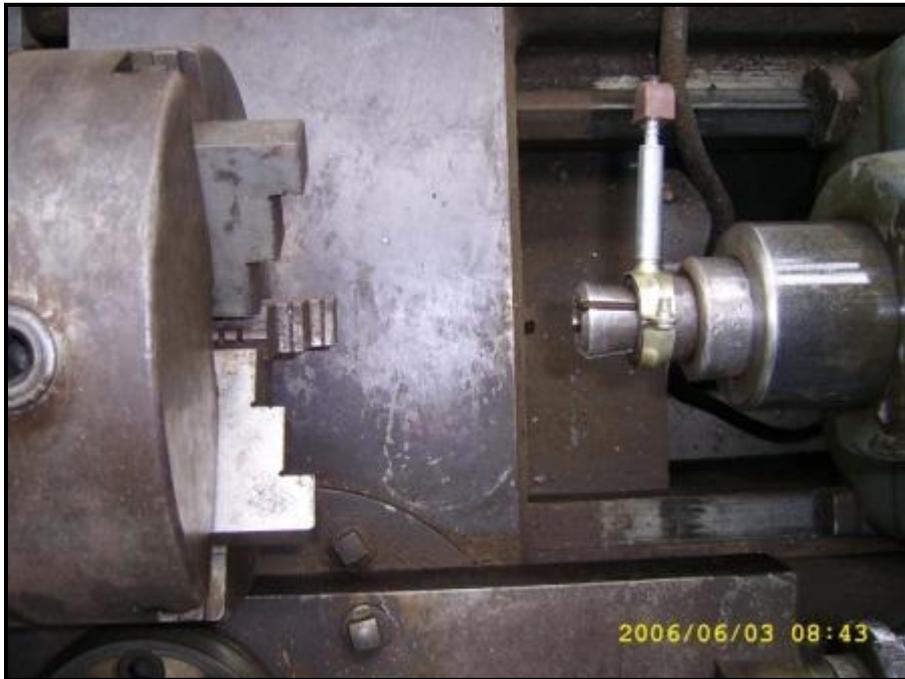


Figure.III.2 : Montage utilisé.

III.3.3 - Instrument de mesure (figure.III.3) :

- Pour le contrôle du déplacement de la matière au cours de l'opération de soudage ; on fixe sur la pince conique un système composé d'un collier de plomberie, avec une extension qui bute sur le palpeur du comparateur au 1/100.

- le temps est contrôlé avec un chronomètre.



Figure.III.3 : Emplacement du comparateur

La photo ci-dessus (figure.III.3) montre le montage utilisé. Où après préparation des pièces, nous les avons fixé deux à deux sur les organes de la machine, à savoir, la broche fixe et le mandrin animé en rotation. Les paramètres utilisés ont été imposés par les limites d'utilisation du montage, pour éviter les problèmes parasites (la flexion, le flambement et les vibrations).

III.4 - Préparation des pièces élémentaires :

III.4.1 - Préparation avant soudage :

Nous avons débité des pièces cylindriques de diamètre 14mm, et de longueur 65mm puis nous avons effectués le dressage des surfaces latérales ; permettant ainsi d'assurer une perpendicularité entre la pièce fixe et celle tournante. Cet usinage a permis de diminuer les vibrations pendant le procédé de soudage.

III.5 - Paramètres de soudage utilisés (Tableau.III.1) :

Dans le contrôle des paramètres de soudage au lieu de contrôler l'effort pour le manque de moyen matériels ; on a choisit de contrôler les déplacements.

N°PIECE	DEP. : FRICTION (MM)	DEP. : FORGEAGE (MM)	TEMPS FRICTION(S)	VITESSE DE ROTATION
1	0.32	1.28	21.3	630
2	-	1.5	18.9	800
3	-	2	20.1	800
4	0.25	0.95	6.7	1000
5	0.20	1.20	6.3	1000
6	0.23	0.54	10.2	630
8	0.18	0.97	9.2	630
10	0.40	1.50	32.0	800
11	0.32	0.95	22.5	800
13	0.40	1.70	27.4	800
14	0.42	0.58	11.1	1000
20	0.31	1.19	41.1	800
22	0.25	1.59	15.0	800

Tableau.III.1 : paramètres de soudage par friction direct utilisés.

N°PIECE	1	2	3	4	5	6	8	10	11	13	14	20	22
TCM%	0.204	-	-	0.231	0.192	0.215	0.177	0.346	0.285	0.346	0.362	0.277	0.239

TCM : taux de consommation de matière ;

Tableau.III.2 : taux de consommation de matière durant le soudage

III.6 - Identification du métal de base :

III.6-1 Choix du métal de base :

Le métal choisit est le « XC10 » pour :

- Sa bonne soudabilité ;
- Sa disponibilité.

III.6.2 - Caractéristiques de cette nuance :

XC10 : acier non allié pour traitement thermique dont la teneur en carbone est comprise entre 0.06 et 0.12 (NF A-35-553).

III.6.3 - La composition chimique selon la norme NFA-35- 553 :

Nuance	%C	%MO	%MN	%SI	%S	%P	%CR	%NI	%AL
XC10	0.06 - 0.12	-	0.30 - 0.60	0.15 - 0.35	≤0.025	≤0.035	-	-	-

Tableau.III.3 : composition chimique du métal de base (NFA).

Limite élastique (MPa) min	Limite de rupture (MPa)	Elongation A% min
215	350 à 430	31

Tableau.III.4 : Caractéristiques mécaniques du métal de base (NFA).

III.7 - Opération de soudage par friction direct (figure.III.4) :

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, sur une machine de marque KUKA-type RS30 -1982.

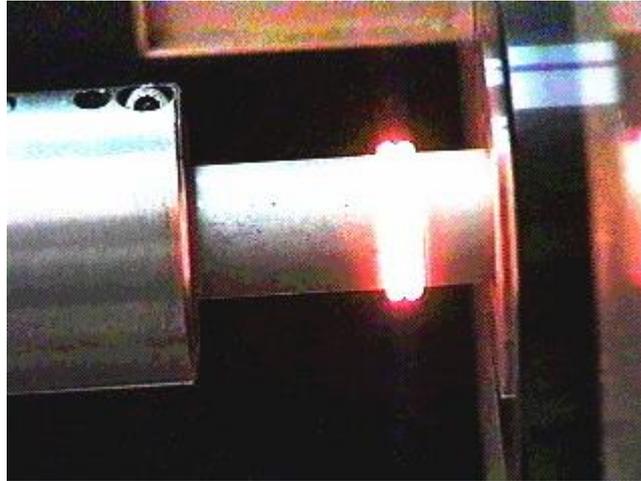


Figure.III.4 : Vue réelle d'une opération de soudage [16].

Une série d'exemple de pièces soudées sur tour est donné dans le **Tableau.III.5**

N°	Déplacement de friction [mm]	Déplacement de forgeage [mm]	photos
1	0.32	1.28	
4	0.25	0.95	
6	0.23	0.54	

13	0.40	1.70	
20	0.31	1.19	

Tableau.III.5 : Exemple de pièces souder par friction.

III.8 - Essais mécaniques :

Les essais mécaniques ont pour but de déterminer un certain nombre de caractéristiques des métaux et alliages.

Nous nous intéresserons dans notre expérimentation uniquement à l'essai de traction pour déterminer la résistance ultime.

III.8.1 - Essai de traction utilisé :

III.8.1.1 - But :

L'essai consiste à soumettre une éprouvette à un effort de traction jusqu'à rupture.

III.8.1.2 - Usinage des éprouvettes selon la norme N.F.A :

Les éprouvettes sont usinées en utilisant des moyens mécaniques appropriés en prenant les précautions nécessaires pour éviter l'écaillage ou un échauffement excessif du matériau. Les dimensions des éprouvettes fixées par la norme N.FA sont schématisées par la figure.III.5. Les éprouvettes sont usinées de façon que l'axe de la soudure demeure à mi longueur de la partie calibrée de l'éprouvette.

Après l'usinage des éprouvettes, un recuit a été effectué sur deux des pièces soudées (N°8, et N°10).

- Un Recuit à 900°C.

III.8.1.2.1 - Dimensions des éprouvettes cylindriques :

Les dimensions des éprouvettes cylindriques sont données suivant la norme NFA03-15A.

La longueur de la partie calibrée L_C doit être comprise entre $L_0+d/2$ et L_0+2d

La longueur entre repère est généralement déterminée à partir de l'équation :

$$L_0 = K \cdot \sqrt{S_0} \quad \text{Ou } K=5,65 \text{ pour les aciers}$$

S_0 =la section initiale de l'éprouvette

Les équations suivantes donnent des dimensions de l'éprouvette selon la norme NFA03-15A.

$$\text{avec } L_0 = K \cdot \sqrt{S_0}$$

$$L_c = L_0 + d/2 \text{ à } L_0 + 2 \cdot d$$

$$L_t = L_c + 2 \cdot d \text{ à } L_c + 4 \cdot d$$

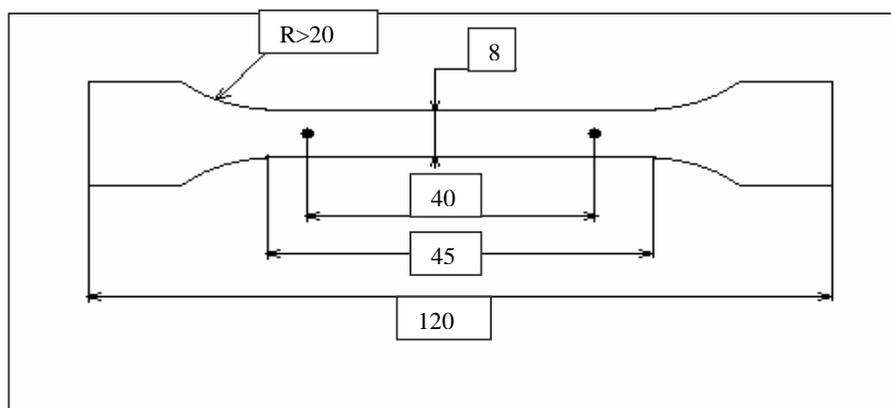


Figure.III.5 éprouvette cylindrique de traction selon la norme NFA



Figure.III.6 : éprouvette usiné.

III.9 - Préparation des éprouvettes :

Après avoir réalisé les opérations de soudage nous avons procédé à la préparation d'un lot de 15 éprouvettes de même dimensions et de même forme, dont deux éprouvettes non soudées. La **figure.III.7** nous donne un aperçu.

Les éprouvettes ont été usinées en forme standard avec une partie utile de diamètre constant de 8 mm reliée aux deux têtes d'amarrage avec un rayon de raccordement de 5 mm. Une fois les éprouvettes usinées, nous avons réalisé une série d'essais de traction pour avoir les valeurs de la résistance ultime.

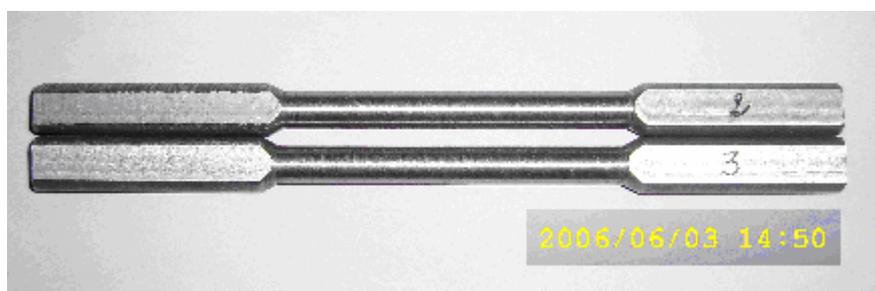


Figure.III.7 : éprouvettes destinées aux essais de traction.

III.10.1 - Conditions de l'exécution de l'essai :

La charge devra être appliquée progressivement à l'éprouvette de façon continue dans la direction perpendiculaire au plan de la soudure jusqu'à rupture.

III.10.2 - Réalisation des essais de traction :

Les essais de traction ont été réalisés au sein du laboratoire de génie civil de l'ENP avec une machine de traction de type : Sintco, sa capacité est de 50 KN (**figure.III.8**).

Le but de cette série d'essais de traction est double, localiser la zone de la rupture et déterminer la résistance ultime. Quinze essais ont été conduits dont deux sur éprouvettes non soudées, et deux ont subits un traitement thermique (Recuit à 900°C).



Figure.III.8 : Image de la machine de traction

III.11 – Mesure de dureté brinell sur éprouvette souder :

III.11.1 – principe :

La dureté est la faculté de résistance qu'offre un corps à sa pénétration par un autre corps. Elle est caractérisée par un nombre qui dépend du genre d'essai exécuté.

III.11.2 – Condition d'essais :

- l'essai est effectué à température ambiante ;
- nous avons préparé la surface par meulage et une lubrification abondante de la structure pour éviter toute altération ;
- La pièce est posée sur un support rigide.

III.12 – Analyse de la microstructure :

L'analyse de la microstructure est effectuée sur deux échantillons, le premier est prélevé au niveau de la soudure de l'éprouvette N° 5 ; le deuxième sur le matériau de base (XC10).

III.12.1 – préparation des échantillons (figure.III.9) :

Après meulage, nous avons enrobé les échantillons dans de la résine puis nous avons procédé à un polissage avec du papier abrasif de granulométrie croissante 180-400-600-800-1000-1200. Par la suite, les échantillons sont trempés durant 3 secondes dans le Nital à 4% :

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

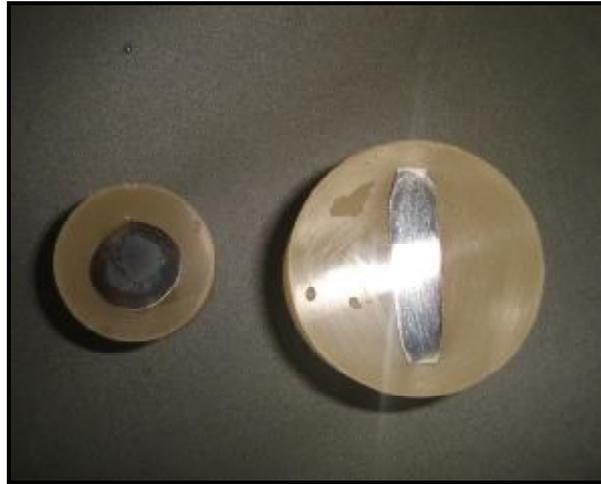


Figure.III.9 : Echantillons préparés pour observation microscopique.

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

III.13 - Conclusion :

Pour la réalisation du soudage par friction sur tour, nous avons utilisés des paramètres qui paraissent trop faible par rapport à ceux utilisés dans l'industrie, la différence de ces paramètres d'une soudure à une autre est dû au changement de condition de soudage imposés par les limites d'usage du montage (figure.III.3), et la variation de l'influence des effets parasite (vibration, flambement...etc.).

Chapitre IV

Résultats et interprétation

CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

IV.1 - Résultats :

Dans ce chapitre on présente les résultats des essais de traction.

IV.1.1 - Résultats d'essai de traction :

Les essais de traction ont été réalisés au niveau du laboratoire de génie civil de l'ENP, avec une machine d'une puissance maximale de 50 KN le compte rendu des tests réalisés est indiqué dans le tableau ci-dessous.

Les résultats des essais de traction de l'acier XC10 sont donnés dans les **tableaux (IV.1, III.2, et III.3)**.

XC 10					
N° de la pièce	$\Delta l/l_0$ (%)	Striction à la zone rupture %	Striction au joint %	Effort de rupture (KN)	Rm (MPa)
1	27.11	63.99	4.91	21.7	431.67
2	23.61	68.35	7.34	20.8	413.77
3	21.25	65.48	2.47	22.3	443.6
4	21.11	66.93	7.34	21.1	419.73
5	23.33	66.93	9.73	21	417.74
6*	03.33	9.73	9.73	18.5	368.01
11*	09.56	12.09	12.09	21.2	421.72
13	24.00	68.35	2.47	22.5	447.58
14*	12.00	14.42	14.42	21.2	421.72
20	25.78	71.1	0	22.7	451.56
22	23.33	62.48	0	22.8	453.55

* : rupture au joint ;

Tableau.IV.1 : résultats de l'essai de traction des éprouvettes non traitées thermiquement

Des résultat on remarque :

- le comportement ductile des éprouvettes rompues en dehors de l'interface du joint contrairement à celles rompues au niveau du joint;
- La striction au joint est négligeable par rapport aux autres régions ;

XC10					
-	$\Delta l/l_0$ (%)	Striction à la rupture %	Striction au joint %	F (KN)	(MPa)
Moyenne	23.69	66.70	4.28	21.86	434.90

Tableau.IV.2 Moyenne des résultats de traction pour éprouvettes (non T.TH) rompues en dehors du joint.

XC10					
N° de la pièce	$\Delta l/l_0$ (%)	Striction à la rupture %	Striction au joint %	F (KN)	(MPa)
8*	07.78	-	-	21.1	419.73
10	32.67	68.35	23.42	21.3	443.6

* : rupture au joint.

Tableau.IV.3 : résultats de l'essai traction des éprouvettes ayant subi un recuit.

XC10					
N° de la pièce	$\Delta l/l_0$ (%)	Striction à la rupture %	F (KN)	(MPa)	
NS1	33.33	71.10	20.30	403.82	
NS2	34.22	71.10	20.90	415.75	

Tableau.IV.4 : résultats de l'essai de traction des éprouvettes non soudées



Figure.IV.1 : photos d'éprouvettes rompues lors d'essai de traction.

Les figures ci-dessous montrent le mode de rupture d'éprouvettes entre les mors de la machine à traction avec le numéro correspondant pour chaque essai.

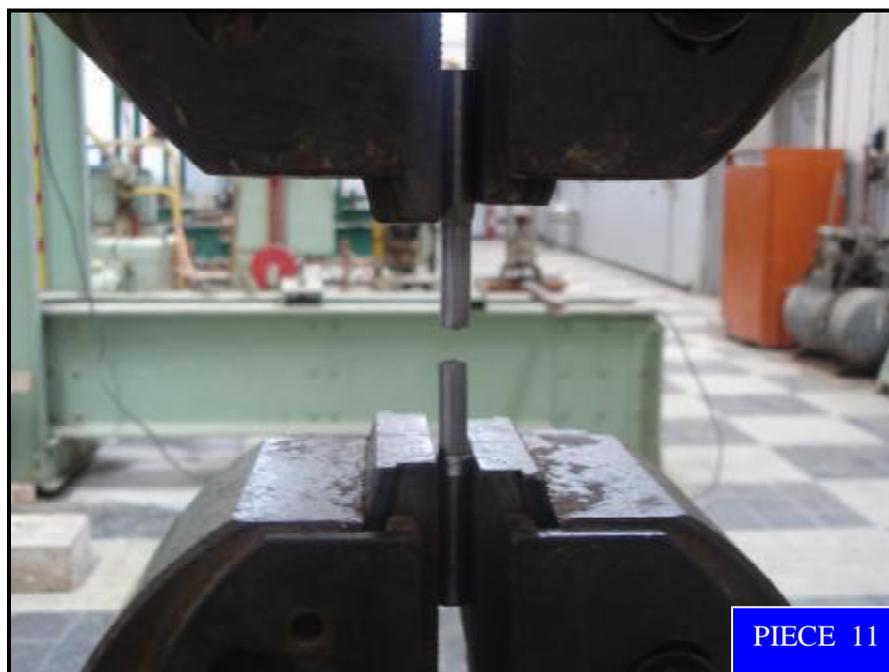


Figure.IV.2



Figure.IV.3

NS : non souder

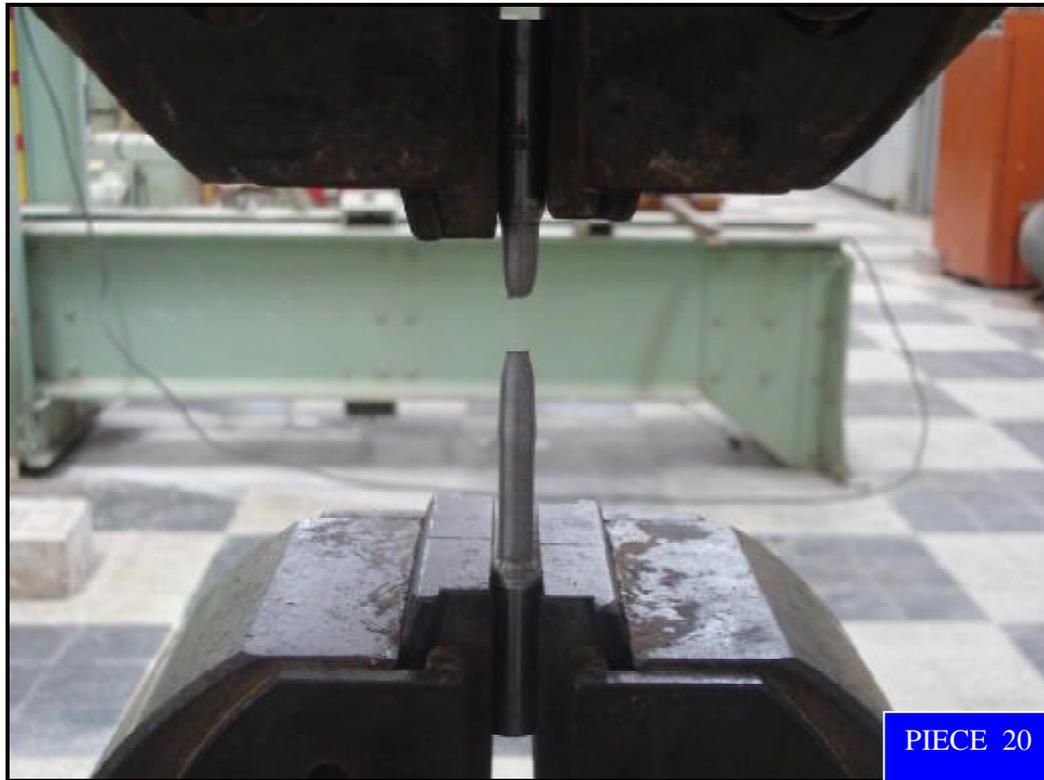


Figure.IV.4



* : Traitement thermique recuit

Figure.IV.5

Les trois figures ci-dessous représentent les graphes de variation de la résistance ultime R_m en fonction des paramètres de soudage (temps, déplacement de friction, et de forgeage) dont on distingue trois série suivant la vitesse de rotation de la broche pendant le soudage.

Variation de la résistance ultime en fonction du temps de soudage

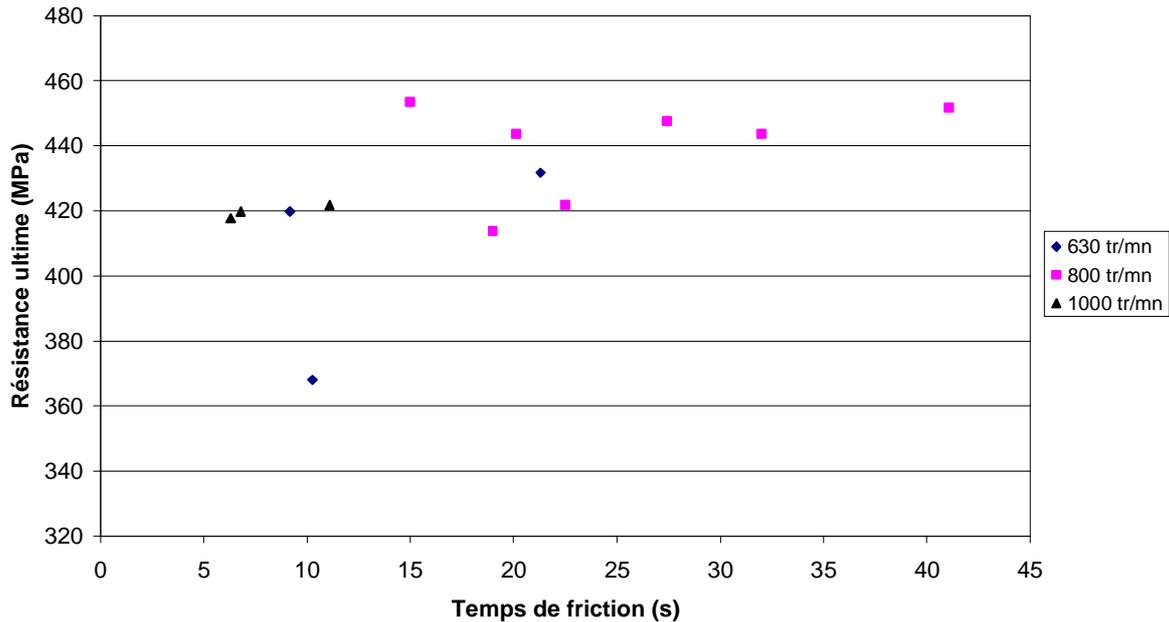


Figure.IV.6

Variation de la résistance ultime en fonction du déplacement de friction

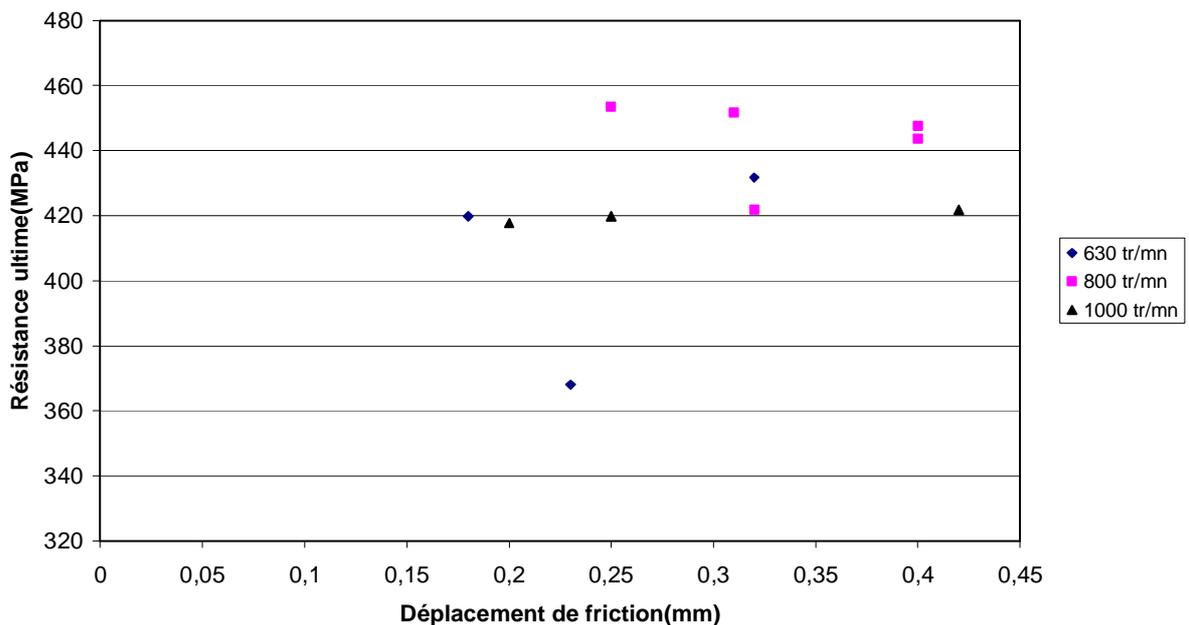


Figure.IV.7

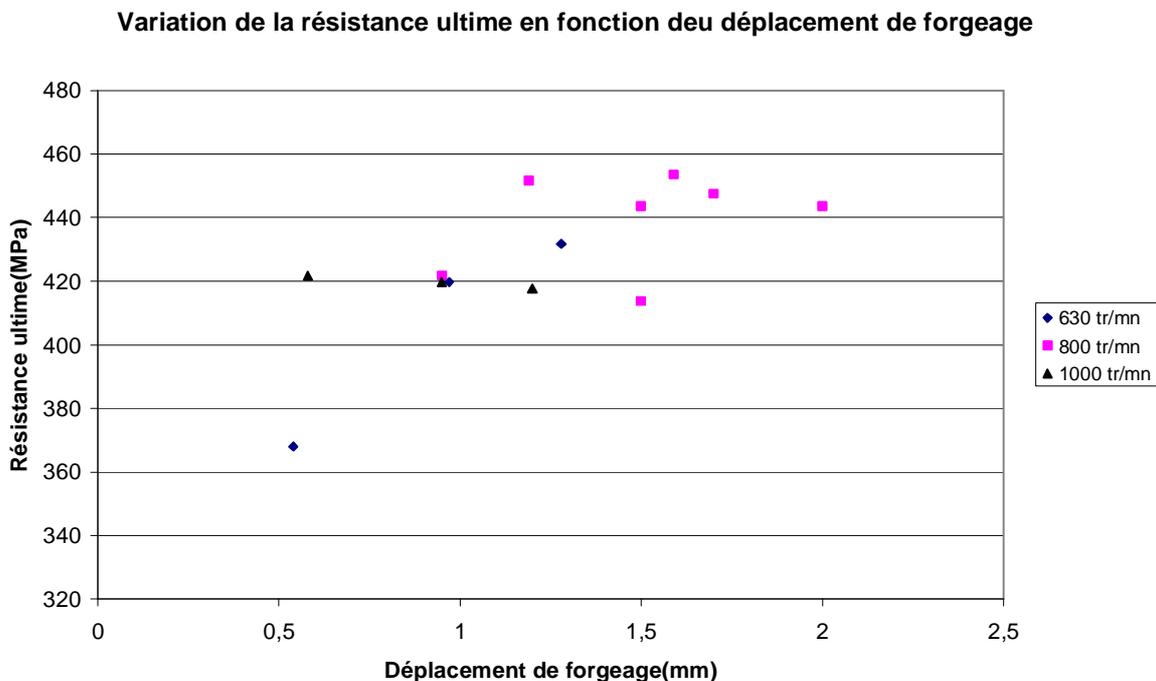


Figure.IV.8

Des figures (IV.6, IV.7, IV.8) on peut au moins remarquer que les paramètres qui nous ont donnés une meilleure résistance ultime sont ceux correspondant à la vitesse de rotation 800 tr/mn. Donc on peut déduire que les efforts de friction et de forgeage utilisés sont plus compatible avec le paramètre vitesse 800 tr/mn pour l'obtention d'une soudure résistante. A l'issu de ces résultats on conclue que les conditions optimales donnant un joint soudé offrant une résistance élevée (voir tableau IV.1, IV.2, IV.3) pour le XC10 sont :

Vitesse de friction (tr/mn)	Déplacement de Friction (mm)	Déplacement de Forgeage (mm)	Temps de friction (s)
800	0.25	1.59	15

Tableau.IV.5

IV.1.2 – Résultats de mesure de dureté et de l'étude micrographique :

Les examens microscopiques avec ont été réalisés au niveau laboratoire métallurgie de l'ENP. Pour l'analyse de la microstructure on a obtenus les résultats dans le tableau (IV.6) :

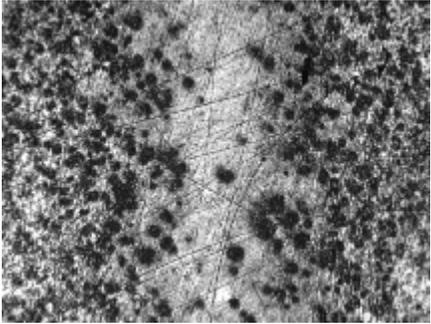
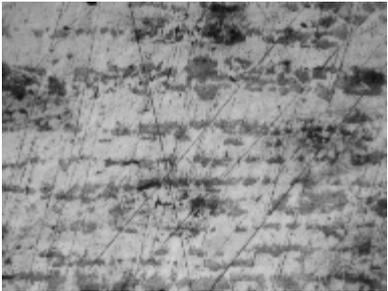
Zone et agrandissement	Microstructure photos
Transition des zones (fondues et ZAT) X 250	
Métal de base X 100	

Tableau.IV.6 : résultat de l'étude micrographique

Dans la vue microscopique nous pouvons distingué 3 zones :

- structure de solidification aciculaire dendritique (α + cémentite)
- Structure globulaire (grossissement de grains)
- Structure en bande (Matériau de base), sa matrice est composée de 2 phases :
- Une phase α ; dont on distingue une très faible concentration de phase (cémentite+ α).

Les mesures de dureté espacés de 2mm effectués sur un l'échantillon soudé N°5 sur l'interface (P1) perpendiculaire au plan de soudure (P2) (figure.IV.10):

- Dans le sens longitudinal ;
- Dans le sens transversal au niveau de l'interface (P1).

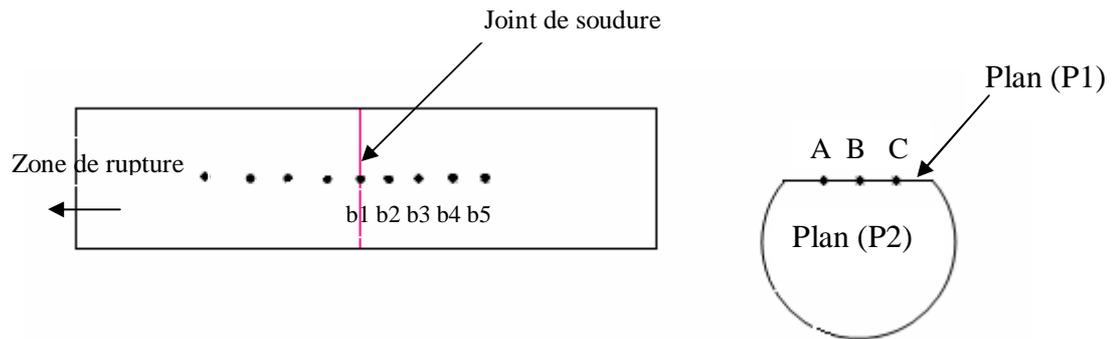


Figure.IV.9 : points où ont été effectuées des essais de dureté

Points de mesure	b1	b2	b3	b4	b5	A	B	C	Métal de base
Dureté HBR	56	58	57	53	50.5	58	56	57	42

Tableau.IV.5 : résultat de mesure de dureté Brinell

Courbe de dureté dans le sens longitudinal à partir du coeur

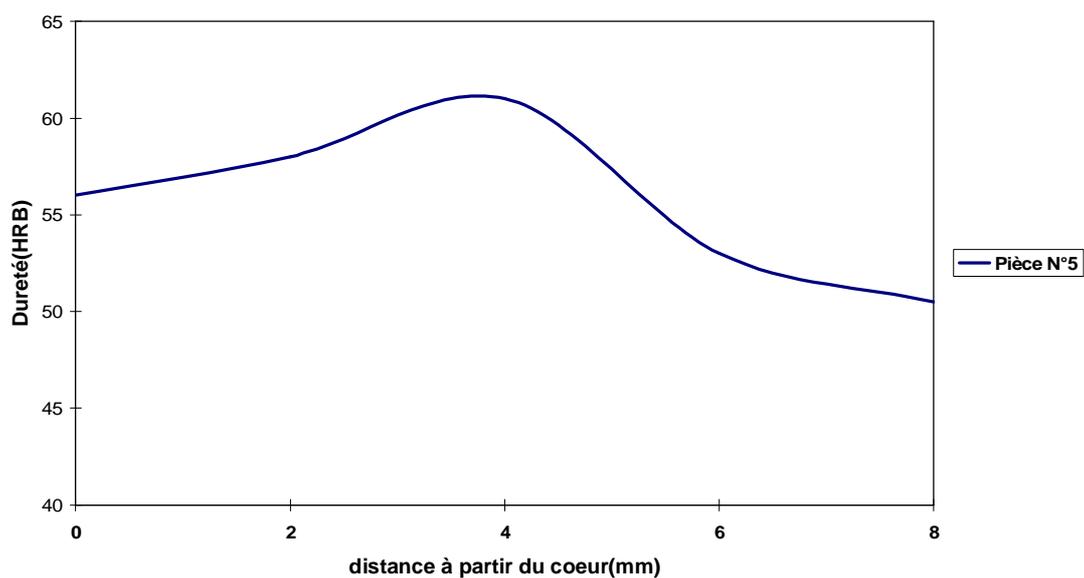


Figure.IV.10

IV.2 - Interprétations des résultats :

IV.2.1 - Analyse des résultats de traction :

la série de pièces (N° :3, 13, 20, 22, 10) est caractérisée par une bonne résistance ultime (entre 440MPa et 460MPa, voir figures IV.1, IV.2).

30% des éprouvettes souder présente un comportement fragile. La rupture se produit au niveau du joint. Ce comportement fragile des éprouvettes souder (N° : 6, 11, 14, 8⁽¹⁾) peut être probablement interpréter par le fait que la rupture se produit avant la striction (par la propagation de microfissure jusqu'à la surface de l'éprouvette).

Des résultats d'essais de traction (tableau IV.1, IV.3, IV.4), on relève que dans le cas ou la rupture est précédés par une striction les éprouvette sont toute rompues en dehors de l'interface du joint. Ce qui donne le caractère ductile de ces régions de rupture (tableauIV.1, IV.3, IV.4).

Après essai de traction on peut distingué au niveau de la zone du joint de soudure des bosses (striction au joint minimale tableauIV.1) ce qui nous mène à conclure que cette zone est la plus dure. Mais cette bosse disparaît après le traitement thermique de recuit et on remarque (pièce N° 10 figure.IV.1) une augmentation considérable de la striction au joint (tableauIV.3). toute ces observation nous mène à conclure que le durcissement du joint est dû au phénomène d'écrouissage.

IV.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. Les variations des phases dans la pièce soudée portant le numéro 5 montrent que pour la microstructure présente de fortes évolutions. Le joint obtenu est constitué de 3 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.

(1) éprouvette qui a subit un traitement thermique (recuit à 900°C)

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

-Une Zone Affectée Thermo-Mécaniquement 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.

IV.2.3 - Analyse des résultats de la dureté :

Sur la figure (IV.11) on remarque une variation de la dureté qui augmente puis diminue avec une pente plus élevée, cela s'explique par l'effet thermique engendré par la friction. L'augmentation de la valeur de la dureté en direction du joint indique la présence d'une précipitation de la cémentite. Ceci implique que la combinaison entre pression de friction et de forgeage n'est pas compatible, ce qui provoque la non régularité du refroidissement au cours de l'opération de soudage.

Au niveau de la zone du joint la dureté est maximale cela s'explique par la forte déformation vécues et le refroidissement rapide dans cette zone induisant un affinement de la microstructure.

IV.3 - Conclusion :

Les résultats obtenus montrent qu'à partir du cœur on relève une variation des valeurs de la dureté observée sur un intervalle de 0 à 8 mm, ceci peut être expliqué par l'effet thermique engendré par la friction.

Les effets d'un durcissement par déformation peuvent être adoucis par un traitement thermique de recuit, dans ce traitement les propriétés et les structures peuvent revenir aux états précédant le travail à froid, le matériau subit 3 processus distincts à ces températures élevées de recuit : restauration, recristallisation, et grossissement des grains.

Les graphes définissent les variations de la résistance ultime en fonction des paramètres de soudage, dont les résultats ne nous permettent de faire une comparaison qui aboutit à une optimisation, car les paramètres utilisés sont différents d'une éprouvette à une autre. Notre but est de réaliser de bonnes soudures résistantes ce qui explique la différenciation et la divergence des paramètres utilisés.

Conclusion Générale

Conclusion :

L'étude du comportement mécanique du joint soudé par friction directe d'un acier au carbone (XC10) nous a permis de définir quelques paramètres de soudage sur tour parallèle, nous donnant une soudure résistante.

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 résultats des essais de traction obtenues sont encourageants :

- 30% des éprouvettes soudées ont un comportement fragile (rupture au joint) ;
- 70% des éprouvettes sont rompues en dehors de l'interface du joint de soudure;
- le recuit améliore notablement la ductilité du matériau ;

L'utilisation de paramètres non optimisés peuvent conduire à :

- une liaison incomplète entre les deux pièces soudées, donc leur flambement,
- 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.

Enfin il est souhaitable que notre étude soit complétée par d'autre en effectuant :

Des essais de traction sur machine équipée d'un système d'enregistrement, des essais de micro dureté et examens métallographique Sur des présélection d'éprouvette présentant des caractéristique mécanique spécifique en utilisant les mêmes paramètres de soudage afin les optimiser, et de mettre en évidence le phénomène de fissuration qui, à nos jours reste le problème qui a une grande influence dans les assemblage soudés. Il en est de même pour l'étude de l'influence des différents paramètres de soudage.

Annexes

ANNEXES

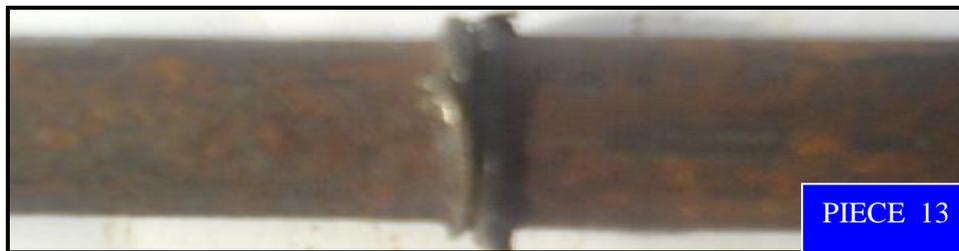
Annexe A1 : Image d'éprouvettes souder par friction directe avec leurs numéros correspondants.



ANNEXES

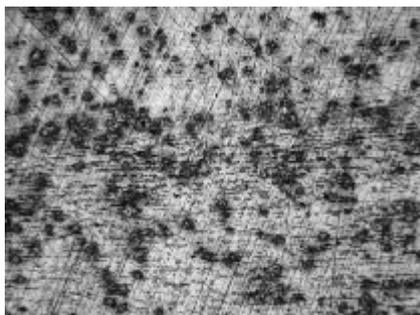


ANNEXES

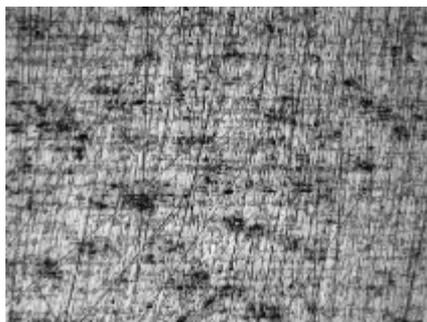


ANNEXES

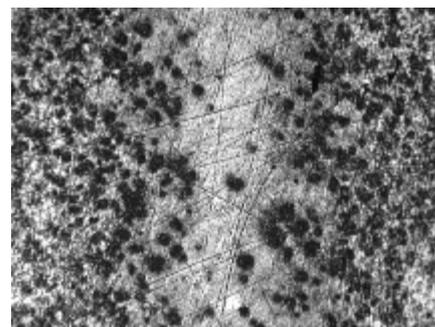
ANNEX A2 : photos micrographique à différente zones dans le plan de l'axe d'une éprouvette soudée.



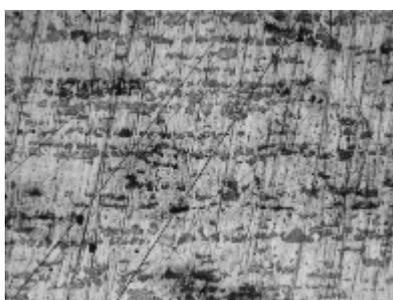
X 100B



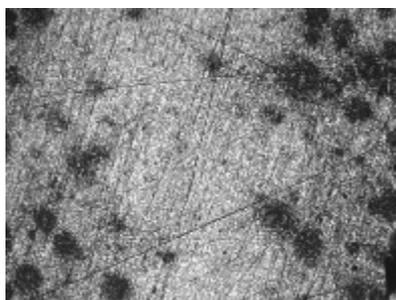
X 100B



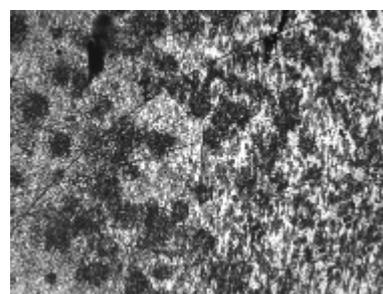
X 100ZAT+F



X 250B



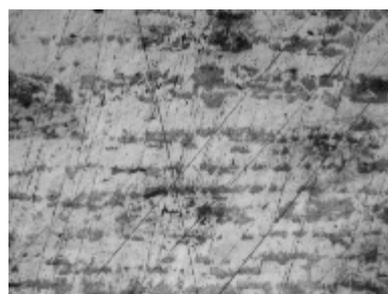
X 250B



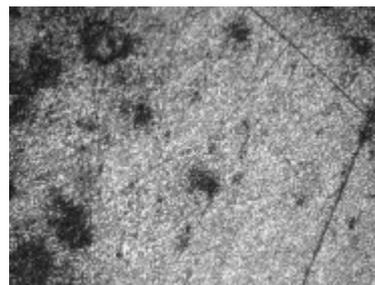
X 250ZAT



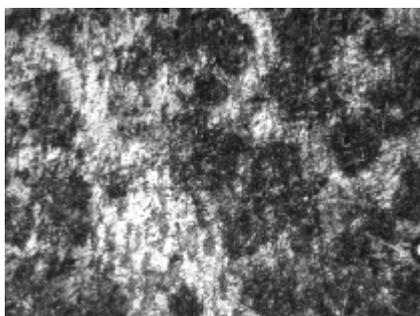
X 400B



X 400B



X 400F



X 400zat

X : agrandissement
B : matériau de base coté rompu,
B sain : coté sain
F : zone fondue,
ZAT : zone affectée thermiquement,

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique B (7745) (article Soudage par friction).
- [2] M. James et M. Mahoney. Proc. 1st International on Friction Stir Welding, Thousand Oaks, California, USA, June 1999
- [3] B. Skrotzki et J. Mucken. Proceedings from Materials Solutions Conference, Indianapolis, IN, ASM International, November 2001
- [4] O.T. Midling, J.S. Kvale et O. Dahl. Proc. 1st International on Friction Stir Welding, Thousand Oaks, California, USA, June 1999
- [5] J. Przydatek. Proc. 1st International on Friction Stir Welding, Thousand Oaks, California, USA, June 1999
- [6] R. Pedwell, H. Davies et A. Jefferson. Proc. 1st International on Friction Stir Welding, Thousand Oaks, California, USA, June 1999
- [7] ASM "Committee on friction welding", Welding Brazing and soldering, 9th edition, Vol.pp.719-728, U.S.A (1989).
- [8] E.D. NICHOLAS. "Friction welding", Metal Construction, Vol. 9, No. 1, pp. 23-25, Jan. (1977).
- [9] S.B. DUNKERTON. "Toughness properties of friction welds in steel", Welding Journal, Vol. 65, No.8, pp. 193S-202S, Aug. (1986).
- [10] L.M. GOURD. "Friction welding", Principle of Welding Technology, 2nd edition, pp 16-19, (1986).
- [11] D.L. KURUZAR "Joint design for the friction welding process", Welding Journal, Vol. 58, No. 6, PP.31-35, June, (1979).
- [12] E.D. NICHOLAS, et R.H. LILLY. "Radial friction welding", Process Conference Advances in Welding processes, paper No. 48, pp. 37-38, (1978).
- [13] W.H. VAN LEEUWEN, et S. FRICH. "Mechanised ultrasonic inspection of radial friction welds", 3rd Int. Lnt. Conf. The welding institute (London), pp. 303-311, Nov. (1986).

- [14] E.D. NICHOLAS, et THOMAS. "Metal Deposition by Friction Welding", Welding journal, Vol. 65, No. 8, pp.17-27, Aug. (1986).
- [15] K. E. KNIPSTROM et B. BEKKARI. "A novel joining process – Friction stir welding". Svetsaren, Esab, Sweden, No. 1-2; pp 49-52, (1997).
- [16] Thèse. P.G, “ Etude expérimentale en vue de l’optimisation des paramètres de soudage par friction inertiel ”, USTHB. 2001.
- [17] AWS "Welding hand book", 6th edition, sec. 3A, (1968).
- [18] K. Faes. Revue « Recherche » (Métallerie34avril2002).
- [20] H.R. Shercliff, et P.A Colegrove. Presented at sixth International Conference on Numerical Analysis of Weldability Graz-Seggau, Austria 2001.
- [21] G. SAYEGH, et R. CAZES. "Possibilités et perspectives du soudage par friction applications - évolution de la Technique et perspectives", soudage et techniques Connexes, pp. 152-160, Mai - Juin (1981).
- [22] S. ELLIOT, et E.R. WALLACH. "Joining aluminium to steel part 2- friction welding" Metal Construction, pp. 221-224, April (1981).
- [23] [S.N.E.C.M.A] « document ressource ».PDF : concours d’admission à l’école nationale polytechnique. 2001.
- [24] S.A. SEREGIN "The effect of the speed of rotation on the degree and rate of plastic deformation in the friction welding of metals", Welding Production, No. 11, pp. 30-32, (1979).
- [25] V.K. LEBEDEV, et al. "The inertia welding of low-carbon steel" Automatic Welding Vol. 33, No. 7, pp. 15-18, July (1980).
- [26] N.I. FOMICHEV and K.P. IMSHENNIK. "New program of for variation in friction welding", Doc. IIW, III, 640-80.
- [27] R. CAZES, G. SAYEGH, soudage par friction, soudage et techniques connexes, B 619.1-B619.14.
- [28] R.GAILLARD
« Recherche sur la soudabilité et le soudage par friction : cas des aciers », soudage et techniques connexes, pp.160-171, Mai-juin (1981).
- [29] B.HOLLANDER, C.J.CHENG et J.C WYMAN
« Friction welding parameter analysis. », Welding journal, Nov. (1963)
- [30] I.A.CHERNENKO
« Friction welding aluminium to steel », Welding International, No.7, pp.586-590, (1989).

- [31] K.P.Imshenik, V.L.Golovin
« Friction welding of high speed to structural steel.», Welding production, No. 1, pp31-34, (1966)
- [32] V.I.VILL, et A.N.POPANDOPLO
« Friction welding high speed steel 45 », Welding production No. 8, pp.32-35, (1970)
- [33] 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).
- [34] 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).
- [35] M.B. HOLLANDER et C.J.CHENG
« Friction welding parameter analysis », Welding journal, Vol.42, No-11, pp.495-501, Nov. (1983)
- [36] 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, Des. (1985).
- [37] J.RUGE, and K.THOMAS
« Joining of copper to titanium by friction welding », welding journal, Vol. 65, No.8, pp.28-31, Aug. (1986).
- [38] F.SASSANI, et J.R. NEELAM
« Friction welding of incompatible materials », Welding Journal, Vol ; 67, No. 11, pp.264S-270S, Nov. (1988)