

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

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER
DEPARTEMENT DE METALLURGIE



Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de

Master en génie des matériaux

Effet de recuit de détente sur les contraintes
résiduelles dans un acier inoxydable 316L soudé

Présenté par :

Mr DJELTIOUI Abdenour.

Sous la direction de : **Pr.M.LARIBI** Enseignant à l'école nationale polytechnique
d'Alger présentée et soutenue publiquement le (11/10/2016)

Composition du jury :

Président **Mr.A.M.KASSER**

Docteur à l'ENP

Examineur **Mr.M.A.DJEGHLAL**

Professeur à l'ENP

Promoteur **Mr.M.LARIBI**

Professeur à l'ENP

ENP 2016

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

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER
DEPARTEMENT DE METALLURGIE



Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de
Master en génie des matériaux

Effet de recuit de détente sur les contraintes
résiduelles dans un acier inoxydable 316L soudé

Présenté par :

Mr DJELTIOUI Abdenour.

Sous la direction de : **Pr.M.LARIBI** Enseignant à l'école nationale polytechnique
d'Alger présentée et soutenue publiquement le (11/10/2016)

Composition du jury :

Président **Mr.A.M.KASSER**

Docteur à l'ENP

Examineur **Mr.M.A.DJEGHLAL**

Professeur à l'ENP

Promoteur **Mr.M.LARIBI**

Professeur à l'ENP

ENP 2016

REMERCIEMENTS

Je remercie Dieu le Tout puissant de m'avoir donné patience, santé et volonté tout au long de mes études. On tient à remercier d'abord mon promoteur M.LARIBI d'avoir accepté de m'encadrer et de me soutenir durant les moments difficiles de ce parcours. Merci pour vos encouragements.

JE remercie également tous les membres du jury d'avoir accepté de juger mon travail : Messieurs Pr.M.A.DJEGHLAL, Dr.A.M.KASSER. C'est vraiment un grand honneur pour moi. Merci

J'exprime mes reconnaissances à tous les enseignants qui ont contribué de près ou de loin à ma formation.

DEDICACE

Pour

Mon père

Ma mère

Mon frère

Mes sœurs

Mes grands-pères

Ma famille

Tous Mes amis

Mes professeurs

Je dédie ce modeste travail...

الملخص:

الفولاذ الغير قابل للأكسدة (الأستينيّتي) يستعمل لحل المشاكل المتعلقة بالصدأ المتسبب به الخلائط الحديدية. ومنه فهذا الفولاذ مستعمل بشكل كبير في عدة مجالات صناعية. هذا النوع من الفولاذ تلحيمه يكون باستعمال التلحيم التنغستاني. تلحيم هذا الفولاذ يولد ضغوط متبقية في المادة. هذه الأخيرة مسؤولة عن إضطراب البنية للمادة مع حصول تشققات، التعب المادي، تآكل..... الخ

وعلى هذا الأساس تأتي دراستنا التي تسمح باستعمال تقنية نزع الطبقات، بتحديد الضغوط المتبقية في عدة طبقات من المادة، موضحة تأثير التلحيم على قيمتها.

الكلمات المفتاحية: الفولاذ الغير قابل للأكسدة الأستينيّتي 316L؛ التلحيم التنغستاني؛ الضغوط المتبقية؛ تقنية إزالة الطبقات المتتابة؛ النمذجة الرقمية.

Abstract:

The austenitic stainless steels were developed to solve the wet corrosion's problems caused by ferrous alloys. In addition, they are widely used in various industrial fields. They are welded using a conventional method (TIG welding). The welding of these steels generate residual stresses. These last are responsible of instability of the structure and may cause cracks, material fatigue, corrosion...etc

Beyond that, comes our study witch allowed us using the layers removal technique, to determinate the residual stresses in different layers of our material and view the impact of welding on their orders of magnitude.

Keywords: austenitic stainless steel 316L; TIG welding; residual stresses; layers removal technique; numerical modelisation.

Résumé:

Les aciers inoxydables austénitiques ont été mis au point pour résoudre les problèmes de corrosion humide posés par les alliages ferreux. Par ailleurs, ils sont largement utilisés dans plusieurs domaines de l'industrie. Ils sont soudables par un procédé conventionnel (soudage TIG). Le soudage de ces aciers génère des contraintes résiduelles. Ces dernières sont à l'origine de l'instabilité de la structure et peuvent causer des fissures, fatigue, corrosion...etc.

De là, vient notre étude qui a permis également, en utilisant la technique d'enlèvement de couches successif, de déterminer les contraintes résiduelles aux différentes couches de notre matériau et voir l'impact du soudage sur leurs ordres de grandeur.

Mot clé : acier inoxydable austénitique 316L ; soudage TIG ; contraintes résiduelles ; technique de l'enlèvement de couches ; modélisation numérique

Table des matières

Liste de figures

Liste de tableaux

Introduction Générale.....	9
Chapitre 1 : Contraintes résiduelles dues au soudage.....	10
1.1. Introduction.....	11
1.2. Définition.....	11
1.3. Origines des contraintes résiduelles.....	11
1.4. Contraintes résiduelles dues au soudage.....	14
Chapitre 2 : Traitements thermiques des aciers soudés.....	15
2.1. Définitions et procédés des traitements thermiques.....	16
2.2. Types des traitements thermiques.....	17
2.2.1. Trempe.....	17
2.2.2. Revenu.....	17
2.2.3. Recuits.....	17
Chapitre 3 : Procédure expérimentale.....	23
3.1. Matériaux d'étude.....	23
3.1.1. Le métal de base.....	23
3.1.2. Le métal d'apport.....	23
3.2. Réalisation de Soudage.....	24
3.3. Détermination expérimentale des contraintes résiduelles.....	25
3.3.1. Le dispositif.....	26
Chapitre 4 : Effet de recuit de détente sur les contraintes résiduelles.....	30
Conclusion Générale.....	35
Bibliographie.....	37

Liste des figures

Figure 1-1. Schéma de l'introduction des contraintes résiduelles par déformation plastique [5].	12
Figure 1-2. Origine des contraintes résiduelles. Interdépendance [6].	13
Figure 1-3. Contraintes résiduelles d'origine thermique et mécanique [6].	13
Figure 2-1. Procédé de traitement thermique	16
Figure 2-2. Les types de recuit	18
Figure 2-3. Domaines de températures de recuit de détente [10]	20
Figure 2-4. Cycle thermique de recuit de détente [9]	21
Figure 3-1. Réalisation des cordons de soudage.....	24
Figure 3-2. Jauge Extensométrique.	26
Figure 3-3. Dispositif expérimental de détermination des contraintes résiduelles par enlèvement de couche.....	27
Figure 3-4. Schéma explicite du dispositif d'enlèvement de couches et de mesure simultanée des déformations.....	28
Figure 4-1. Profil des contraintes résiduelles dans le matériau A	32
Figure 4-2. Profil des contraintes résiduelles dans le matériau A-Traité	32
Figure 4-3. Profil des contraintes résiduelles dans le matériau B.....	33
Figure 4-4. Profil des contraintes résiduelles dans le matériau B-Traité.....	33

Liste des tableaux

Tableau 3-1. Composition chimique du métal de base 316L.....	23
Tableau 3-2. Caractéristiques mécanique du métal de base 316L.....	23
Tableau 3-3. Composition chimique du métal d'apport 308L.....	24
Tableau 3-4. Propriétés mécaniques du métal d'apport 308L.....	24
Tableau 3-5. Types d'échantillons étudiés.....	25
Tableau 4-1. Contraintes longitudinales et transversales (échantillons sans intervalle de tempes entre les passes).....	30
Tableau 4-2. Valeur des contraintes longitudinales et transversales (échantillons avec intervalle de temps entre passes).....	31

Introduction générale

Les aciers inoxydables sont des matériaux qui occupent une place très importante dans le marché et ça grâce à leurs caractéristiques physiques, chimiques, mécaniques, et métallurgiques. Ils sont utilisés dans d'innombrables domaines : vie quotidienne, industrie, nucléaire, pétrolière, mécanique, hydraulique, agroalimentaire, chimie, transports, médecine et chirurgie.

Les aciers inoxydables austénitiques tel que le 316L, possèdent une bonne résistance à la corrosion, accompagnés de bonnes propriétés mécaniques et une forte capacité d'érouissage et de ductilité. Ils sont soudables par un procédé conventionnel. Ils constituent donc des matériaux de structure particulièrement intéressants et sont très largement employés dans l'industrie chimique et l'industrie de l'énergie.

Cependant, le soudage introduit des contraintes résiduelles qui par définition sont des tensions qui existent dans les systèmes au repos en l'absence de toute force extérieure. Elles interviennent, au même titre que les contraintes d'origine externe, dans tous les phénomènes mettant en jeu la stabilité des structures, la fatigue, la rupture fragile ou ductile, la corrosion.

Pour cela, Il est important de passer par un traitement thermique pour éliminer les contraintes résiduelles à fin d'éviter leurs influences sur l'utilisabilité de la pièce.

Ce travail est organisé selon le plan suivant :

- Le premier chapitre, portera sur les contraintes résiduelles, leurs types, leurs origines et les méthodes de détermination les plus répandues.
- Le deuxième chapitre consistera sur les traitements thermiques des aciers soudés, définition générale et énumération des procédés, puis leurs types.
- Le quatrième chapitre, est une présentation du procédé expérimental utilisé pour la détermination des contraintes résiduelles.
- Dans le dernier chapitre, on présentera ensuite les résultats obtenus et leurs interprétations.
- Le travail sera bien sûr clôturé par une conclusion générale.

Chapitre 1

Contraintes résiduelles dues au soudage

1. Contraintes résiduelles dues au soudage

1.1. Introduction

Dans l'industrie, on rencontre souvent des pièces rompues en services sous des sollicitations très inférieures aux prévisions, parce qu'il existe en leur sein des contraintes, avant même leur intégration dans les machines, sans qu'aucune sollicitation extérieure ne leur soit appliquée. Ces contraintes internes sont appelées « **contraintes résiduelles** ».

Les contraintes résiduelles se produisent suite à un déséquilibre de conditions extérieures et intérieures d'un matériau. Typiquement une déformation plastique ou un changement microstructural dans le matériau empêchant le déchargement des charges externes précédemment appliqués. Cela se produit généralement suite à trois principaux mécanismes à savoir : procédés mécaniques, traitements chimiques et traitements thermiques.

Les contraintes résiduelles peuvent affecter de manière significative les propriétés mécaniques des matériaux et des composantes structurales, notamment la durée de vie en fatigue, la distorsion, la stabilité dimensionnelle, résistance à la corrosion, et la rupture fragile. Ces effets s'accompagnent souvent avec des dépenses considérables en termes de réparations et de maintenance de pièces, d'équipements et de structures.

Pour cette raison, l'analyse des contraintes résiduelles s'avère une étape obligatoire pour la conception de pièces et éléments structurels ainsi que l'estimation de leur fiabilité dans les conditions réelles de service.

1.2. Définition

Les contraintes résiduelles peuvent être définies comme étant des tensions et compressions qui existent dans le matériau suite à un procédé de fabrication et /ou de transformation sans application de forces externes ou des gradients thermique [1].

Le champ de contraintes qui existe au sein d'un matériau lorsque celui-ci n'est soumis à aucune force ni moment extérieur est appelé champ de contraintes résiduelles. Il s'agit d'un champ de contraintes statistiques et multiaxiales dont la répartition est régie par l'équilibre mécanique des forces et des moments de la pièce au repos. Donc les contraintes résiduelles sont des tensions qui existent dans une structure en l'absence de toute force ou sollicitation mécanique extérieure [2].

1.3. Origines des contraintes résiduelles

L'état mécanique d'un matériau est entièrement défini par les sollicitations extérieures auxquelles elle a été soumise la pièce. On peut distinguer deux mécanismes de création des contraintes résiduelles [3]:

- La sollicitation hétérogène (par exemple une flexion) sur un matériau homogène (par exemple monophasé)
- La sollicitation homogène (par exemple une traction) sur un matériau hétérogène (par exemple polyphasé)

Mais généralement les deux sollicitations surviennent simultanément. Les contraintes induites dans le matériau doivent compenser les forces et les moments extérieurs en respectant les conditions d'équilibre.

En réalité, les matériaux ne sont jamais parfaitement homogènes. Ils présentent toujours des inhomogénéités telles que des joints de grain, des porosités ou des inclusions. A une échelle plus fine, à l'intérieur d'un grain, des discontinuités existent encore : précipités, dislocations, lacunes. Certains de ces défauts peuvent migrer, s'éliminer ou se multiplier au cours de la mise en charge.

Les discontinuités de structure, l'irréversibilité des mécanismes microstructuraux liés à la déformation plastique font que les déformations ne sont plus compatibles. Pour valider les équations classiques de la mécanique, on peut décomposer la déformation plastique (dilatation due aux sollicitations thermiques, changement de phase ou déformation plastique due aux sollicitations mécaniques) en deux parties selon que les déformations vérifient ou non les équations de compatibilité [4].

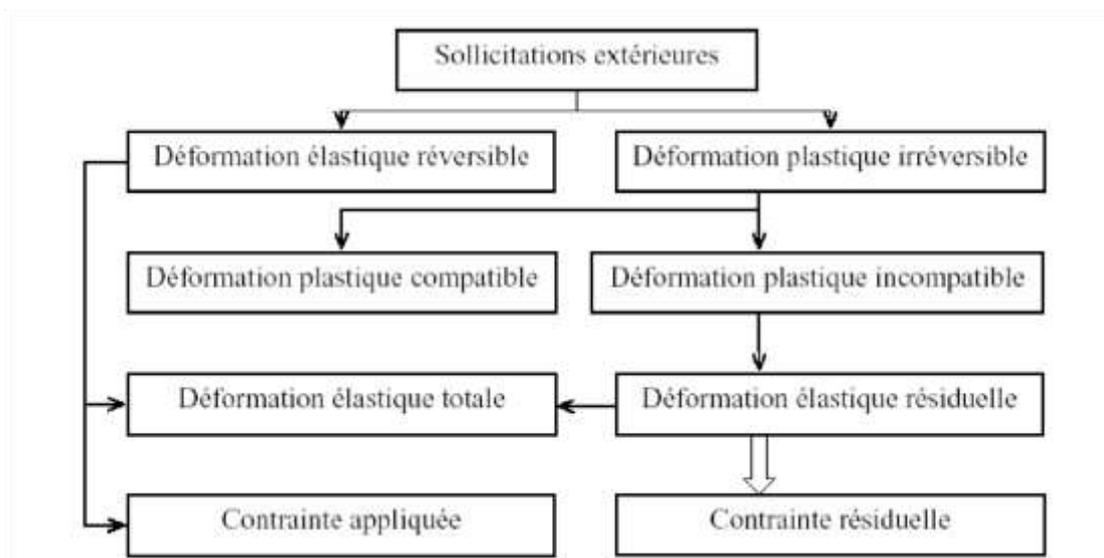


Figure 1-1. Schéma de l'introduction des contraintes résiduelles par déformation plastique [5].

La dernière partie de la déformation plastique est compensée par des déformations élastiques irréversibles, car elles subsistent même en l'absence de toutes sollicitations extérieures. On relie donc ces déformations élastiques irréversibles à des contraintes appelées « contraintes résiduelles» (**Figure 1-1**), qui s'ajoutent aux contraintes dues aux sollicitations extérieures de la pièce appelées « contraintes appliquées ».

Ces contraintes résiduelles (CR) expriment les tensions ou les compressions internes liées à la présence des discontinuités structurales du matériau. Il s'agit de contraintes multiaxiales statiques qui existent pour un système isolé non soumis à des forces extérieures et en équilibre mécanique et thermique [5].

Dans la réalité, les divers effets mécaniques, thermiques et métallurgiques sont le plus souvent interdépendants comme le montre la **Figure 1-2**, ce qui rend très complexe la prévision des contraintes résiduelles en fonction des divers traitements [6].

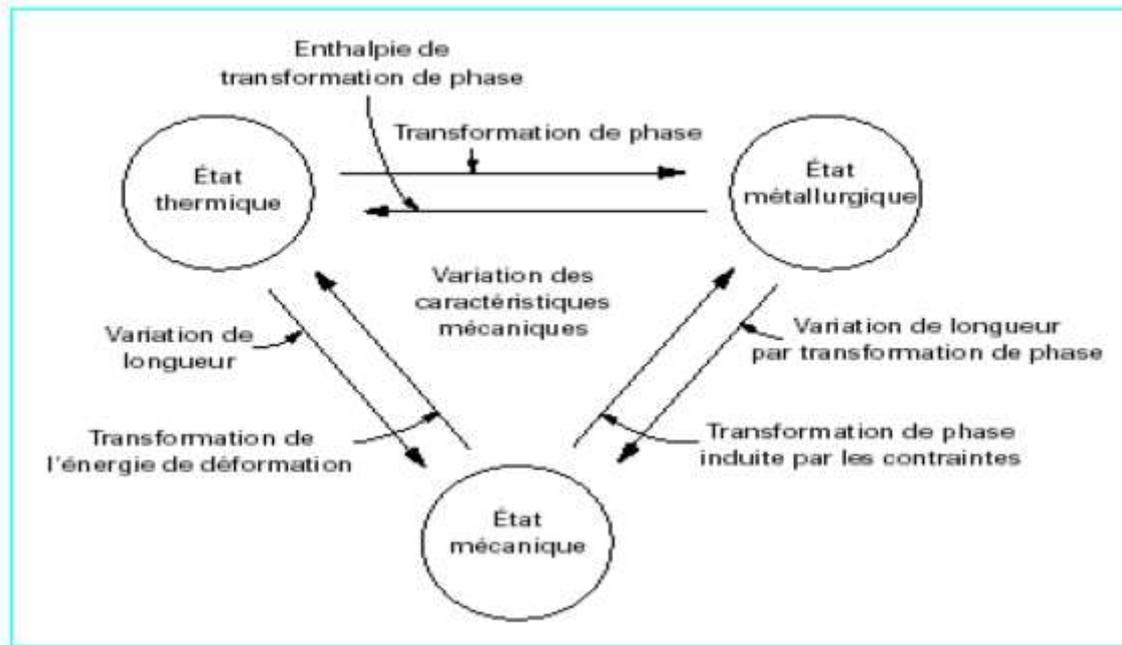


Figure 1-2. Origine des contraintes résiduelles. Interdépendance [6].

La **Figure 1-3** montre un exemple de superposition d'un effet mécanique et d'un effet thermique expliquant la forme de la répartition des contraintes résiduelles après rectification fine d'une pièce en acier non allié, pour trois vitesses d'avance de la meule [6].

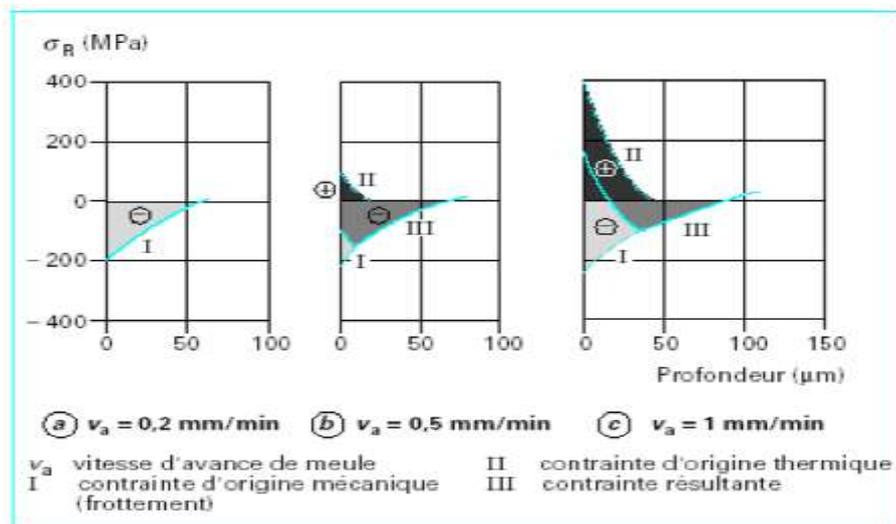


Figure 1-3. Contraintes résiduelles d'origine thermique et mécanique [6].

1.4. Contraintes résiduelles dues au soudage

Le soudage des aciers fait intervenir de nombreux phénomènes physiques, de l'ordre de la thermique (chauffage et refroidissement des matériaux), de la métallurgie (solidification et transformation de phases des matériaux), de la mécanique des fluides (fusion des matériaux) et de la mécanique des solides (apparition de contraintes et déformations résiduelles) [7].

Les contraintes résiduelles s'ajoutent aux sollicitations de service et peuvent, de ce fait, altérer le comportement mécanique d'une construction et notamment diminuer sa résistance à la rupture fragile, à la fatigue et à la corrosion sous tension [7].

L'origine des contraintes résiduelles de soudage est liée à la localisation de la source de chaleur et aux variations des propriétés mécaniques des matériaux en fonction de la température. Très schématiquement, on peut distinguer deux sources de contraintes résiduelles [8]:

Les contraintes résiduelles d'origine purement thermique, qui proviennent du fait suivant : soumis à une élévation de température, un élément de la zone centrale chauffée devrait se dilater. En réalité, cette expansion est très limitée puisque les parties froides avoisinantes jouent le rôle d'éléments de bridage « autobridage ».

L'élément est donc soumis à une compression de leur part. La limite d'écoulement étant très faible à haute température, toutes les déformations apparaissent correspondent à des déformations plastiques. Au refroidissement, la situation s'inverse : la zone centrale chauffée ne peut se rétracter librement, et est mis en tension par les zones avoisinantes.

Après refroidissement, les zones chauffées (métal fondu et ZAT) seront soumises à des contraintes résiduelles de traction, les zones avoisinantes étant, pour des raisons d'équilibre, en compression. Dans le métal fondu, les contraintes ainsi créées peuvent être très élevées, de l'ordre de grandeur de la limite d'élasticité du matériau à température ambiante.

Les contraintes résiduelles associées aux transformations allotropiques au refroidissement : la transformation de l'austénite s'accompagne toujours d'une expansion plus ou moins marquée. Si celle-ci intervient à température relativement basse (cas de matériaux trempant, de refroidissement rapide....), la déformation associée ne sera plus plastique, mais élastique. L'expansion, contrariée par les zones avoisinantes, se traduit par la formation de contraintes de compression résiduelles. Superposées aux contraintes thermiques, celles-ci peuvent diminuer le niveau des contraintes de traction, voire même conduire à des contraintes globales de compression en ZAT.

Chapitre 2

Traitements thermiques des aciers soudés

2. Traitements thermiques des aciers soudés

Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but [9]:

D'améliorer les caractéristiques des matériaux et rendre ceux-ci plus favorables à un emploi donné, à partir des modifications suivantes :

Augmentation de la résistance à la rupture et de la limite élastique R_m , R_e , $A\%$ en donnant une meilleure tenue de l'élément.

Augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs.

De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi le forgeage.

De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux avant subit une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage).

En dehors du recuit de recristallisation qui permet de supprimer l'écrouissage, les traitements thermiques ne s'appliquent pas aux métaux purs, mais seulement à quelques alliages pour lesquels on recherche principalement une augmentation de la limite élastique et une diminution de la fragilité. Les traitements thermiques sont appliqués surtout aux aciers XC et aciers alliés ZR alliages non ferreux. En général les traitements thermiques ne changent pas la composition chimique de l'alliage [10].

2.1. Définitions et procédés des traitements thermiques

Effectuer un traitement thermique sur une pièce, c'est faire subir à celle-ci une variation de la température en fonction du temps. Le procédé de traitement thermique se compose de :

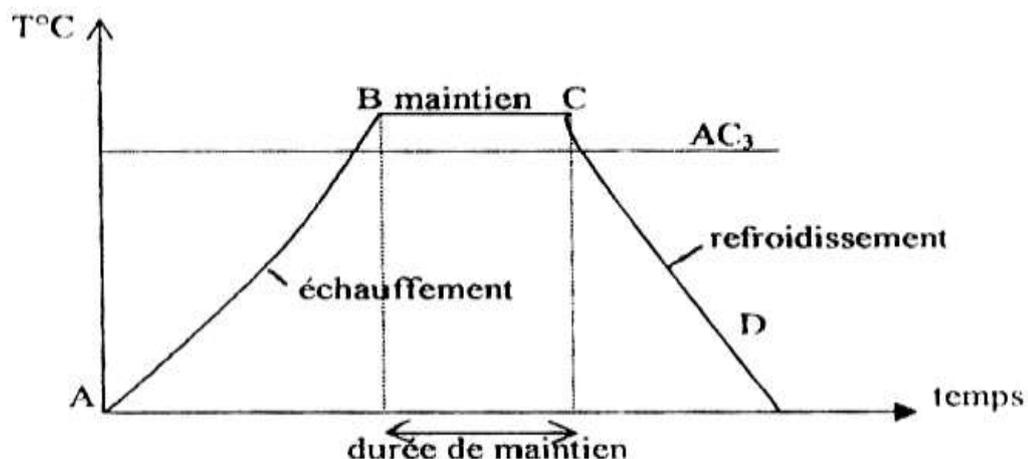


Figure 2-1. Procédé de traitement thermique

AB : L'échauffement à des températures supérieures aux températures de transformation (par exemple : AC₃).

BC : Maintient à une température définie.

CD : Refroidissement avec une vitesse donnée :

Lente (dans le four, à l'air).

Assez rapide (dans l'huile).

Très rapide (dans l'eau).

2.2. Types des traitements thermiques

2.2.1. Trempe

La trempe consiste en un refroidissement rapide d'un acier austénitisé et a pour but de donner à l'acier la plus grande dureté possible par formation de la martensite ou de la perlite fine. La température d'austénitisation, aussi appelée "température de trempe", dépend de la teneur en carbone de l'acier ; elle doit être située dans le domaine austénitique du diagramme Fe-C. La trempe s'effectue en général soit à l'eau, à l'huile ou à l'air. Le milieu de trempe est choisi surtout en fonction de la trempabilité de l'acier [8].

2.2.2. Revenu

Un acier trempé est dur, mais généralement beaucoup trop fragile pour être utilisé directement. Le revenu consiste à chauffer une pièce qui vient d'être trempée à une température inférieure au point de transformation, à la maintenir à cette température, puis à la refroidir généralement à l'air, parfois à l'eau. Le revenu a pour but d'éliminer les contraintes résiduelles provenant de la trempe et d'augmenter la ténacité.

L'augmentation de la ténacité s'obtient malheureusement toujours plus ou moins au détriment de la dureté et de la limite d'élasticité. Les contraintes résiduelles se forment en raison des grandes différences de température entre le cœur et la surface de la pièce lors de la trempe. La dilatation thermique provoque des contraintes qui dépassent la limite d'écoulement plastique et parfois même la résistance à la rupture (fissures de trempe).

D'autres contraintes résiduelles, qui varient fortement d'un grain à l'autre, prennent naissance lors de la transformation martensitique et ont pour origine le changement de la forme (cisaillement des atomes le long des plans cristallographiques) et le changement de volume qu'entraîne cette transformation.

Le revenu permet de transformer graduellement l'état martensitique - métastable - vers un état d'équilibre [9].

2.2.3. Recuits

Le recuit d'une pièce métallique ou d'un matériau est un procédé correspondant à un cycle de chauffage. Celui-ci consiste en une étape de montée graduelle en température suivie d'un refroidissement contrôlé. Cette procédure, courante en sciences des matériaux, permet de modifier les caractéristiques physiques du métal ou du matériau étudié.

Cette action est particulièrement employée pour faciliter la relaxation des contraintes pouvant s'accumuler au cœur de la matière, sous l'effet de contraintes mécaniques ou thermiques, intervenant dans les étapes de synthèse et de mise en forme des matériaux. À l'occasion d'un recuit, les grains (monocristaux) de matière se reforment et retrouvent en quelque sorte, leur « état d'équilibre » [9].

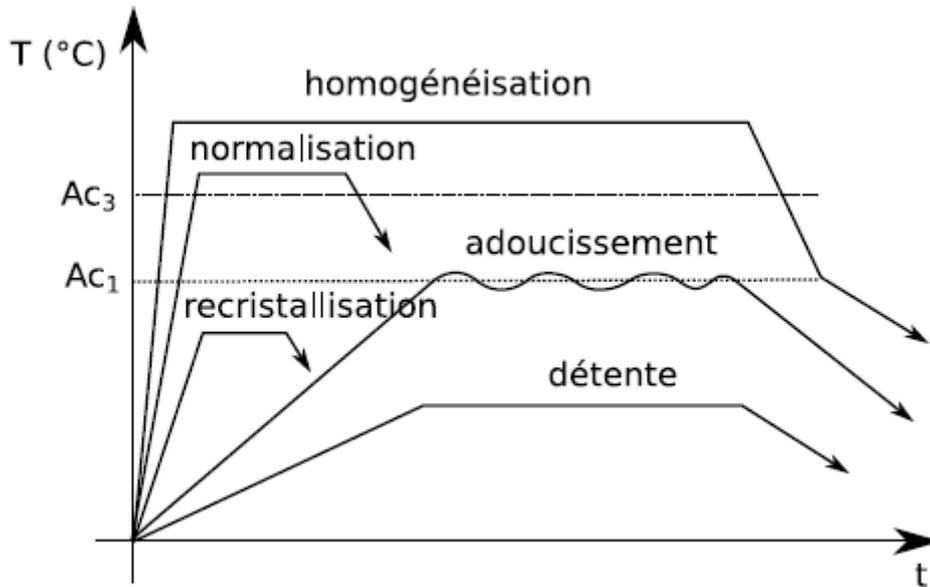


Figure 2-2. Les types de recuit

2.2.3.1. Recuit d'homogénéisation [10]

S'applique aux aciers bruts de coulée pour lesquels la solidification a entraîné l'hétérogénéité de composition chimique (ségrégation). Il s'obtient en maintenant l'acier dans le domaine austénitique (solution solide γ) à une température aux alentours de 1000°C afin d'accélérer la diffusion du carbone et celle des autres éléments d'alliage. Une température plus élevée risque d'engendrer un grossissement de grains excessifs.

2.2.3.2. Recuit de régénération ou normalisation [10]

Sert à affiner le grain (le rendre plus petit) pour les pièces qui ont subi un grossissement de grain parce qu'ils étaient exposés à une température élevée lors d'une opération de forgeage, moulage ou soudage. Le traitement s'effectue, pour une durée de quelques minutes, entre 50 à 100°C au-dessus de la limite inférieure du domaine austénitique.

Dans l'industrie on pratique parfois aussi un traitement thermique cyclique autour la ligne eutectoïde pour engendrer une structure encore plus fins grâce à des cycles de germination de ferrite et austénite multiple. Le refroidissement (normalement à l'air) ne doit pas être trop lent pour éviter un grossissement de grain de la ferrite. L'état de normalisation est souvent l'état de livraison pour les aciers susceptible à un traitement d'amélioration.

2.2.3.3. Recuit de recristallisation [11]

Le recuit de recristallisation sert à diminuer la fragilité d'un métal écroui et de lui redonner sa capacité de déformation. Pour un acier ordinaire, ce traitement s'effectue au-dessus de 600°C.

Il est clair qu'un de ces traitements mentionnés peut remédier à plusieurs défauts à la fois.

Ceci est évident puisque les domaines de température des différents traitements se recouvrent partiellement

2.2.3.4. Recuit de détente (relaxation ou stabilisation)

Est appliquée aux produits métalliques afin de minimiser les contraintes résiduelles dans la structure et réduire les risques de changement dimensionnel lors des opérations de fabrication ultérieures ou de l'utilisation finale du composant [8].

Le recuit de détente remet l'alliage en équilibre mécanique en diminuant les contraintes résiduelles (contraintes internes) résultant d'un travail à froid ou d'une opération de soudage. La température du traitement n'est pas liée à la transformation $\alpha-\gamma$ mais dépend fortement de l'acier.

La rectification, la coupe et la déformation plastique provoquent l'accumulation de contraintes dans un matériau. Ces dernières peuvent provoquer des changements de dimension non souhaités si elles sont libérées sans être contrôlées ; par exemple, lors d'un traitement thermique ultérieur. Afin de minimiser les contraintes après une rectification et les risques de changement dimensionnel, le composant peut être soumis à un processus de recuit de détente.

Le recuit de détente s'effectue normalement après un dégrossissage, mais avant la finition finale (tel qu'un polissage ou un meulage) [11].

Les pièces présentant des tolérances dimensionnelles étroites et destinées à subir un traitement ultérieur (par ex., une nitrocarburation) doivent être soumises à un processus de recuit de détente. Il est possible d'éliminer les tensions des structures soudées par détente des contraintes [10].

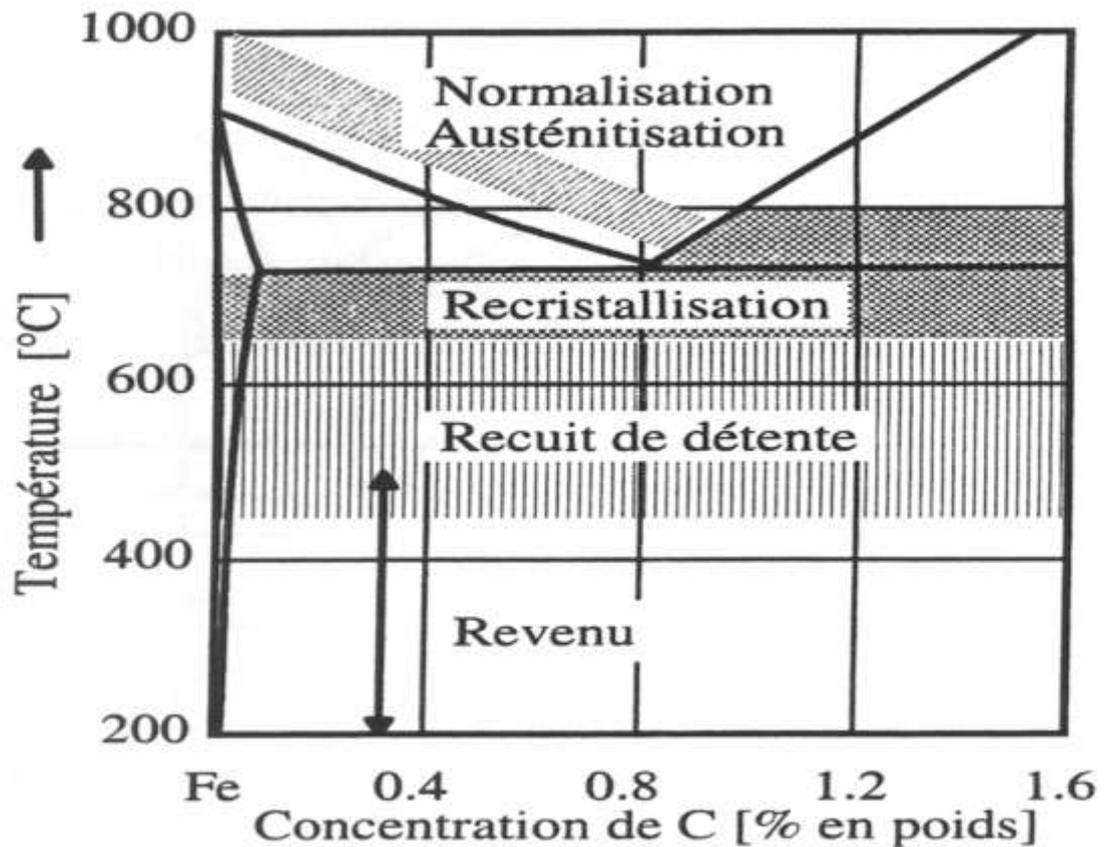


Figure 2-3. Domaines de températures de recuit de détente [10]

La température de ce recuit est choisie entre 450 à 650°C et s'effectue pendant quelques heures et suivie d'un refroidissement lent.

Les contraintes résiduelles sont également supprimées par d'autres formes de recuits. Par exemple, le recuit de recristallisation avec recristallisation de phase, ainsi que par le revenu, surtout par le revenu à haute température, de l'acier trempé. La **figure 2-3** représente le cycle thermique d'un tel recuit [9].

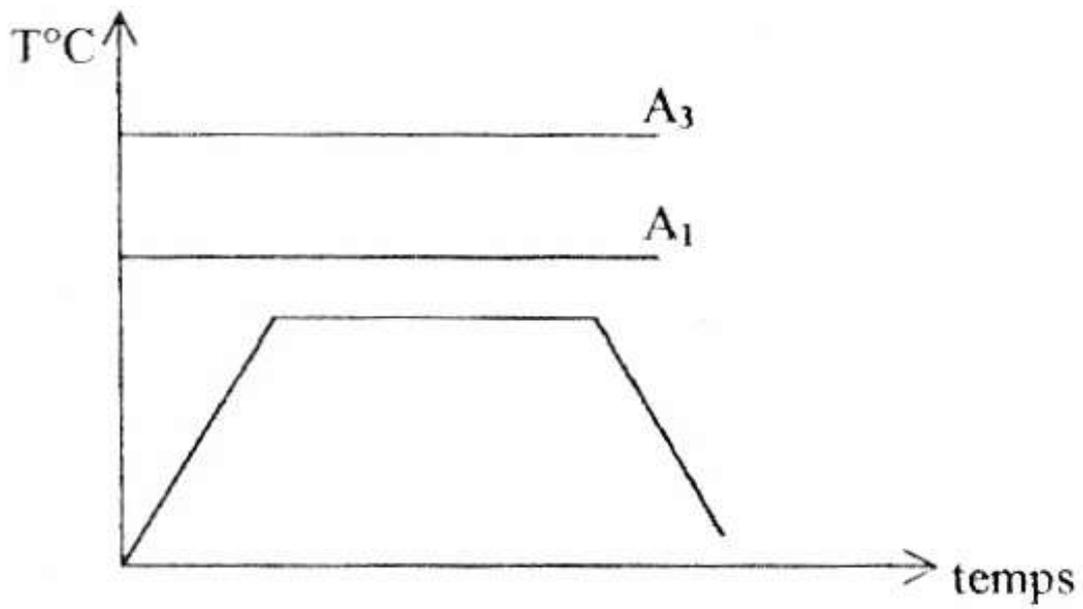


Figure 2-4. Cycle thermique de recuit de détente [9]

Chapitre 3

Traitements thermiques des aciers soudés

3. Procédure expérimentale

Afin de bien expliquer et simplifier la manipulation effectuée dans ce projet, on présentera dans ce qui suit, les techniques expérimentales effectuées pour la réalisation de cette étude ainsi que les résultats obtenus et leurs interprétations.

On commencera par la description du matériau étudié (le métal de base ainsi que le métal d'apport). On parlera de leurs caractéristiques mécaniques et leurs compositions chimiques ainsi que la technique du soudage utilisé pour la réalisation de l'assemblage. Aussi, le mode d'emploi suivi pour la détermination du profil des contraintes résiduelles par extensomètre et enlèvement de couches par voie électrolytique.

3.1. Matériaux d'étude

3.1.1. Le métal de base

Le matériau étudié dans ce travail, est le 316L. Un type d'acier inoxydable à matrice austénitique stable de la température ambiante jusqu'à sa température de fusion. Il n'y a donc pas lors du soudage de transformations structurales à l'état solide dans la zone affectée thermiquement (ZAT).

3.1.1.1. Composition chimique :

La composition chimique de notre matériau soudé est présentée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3-1. Composition chimique du métal de base 316L.

Elément	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Ti
(%)	0.022	0.46	0.87	0.031	0.001	16.67	10.22	2.0	0.06

3.1.1.2. Propriétés mécaniques :

Le métal de base possède les propriétés suivantes.

Tableau 3-2. Caractéristiques mécanique du métal de base 316L.

Rp (0.2) (N/mm ²)	Rp (1%) (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	A(%)	HRB
210	240	410	45	84 à 85

3.1.2. Le métal d'apport

Nous avons procédé au soudage TIG avec métal d'apport. Les métaux d'apport utilisables pour le soudage des aciers inoxydables austénitiques ne sont pas définis par une norme spécifique mais le métal d'apport que nous avons utilisé, a été choisi selon les critères suivants :

- La composition des baguettes d'apport qui a une influence directe sur la qualité de la homogène.
- L'alliage résultant de la fusion du métal d'apport et du métal de base doit contenir une proportion de ferrite.

La composition du mélange métal d'apport, métal de base, a une influence directe sur la qualité de la soudure. Il est donc nécessaire de bien nettoyer les baguettes et le métal de base afin qu'il n'y ait aucune contamination.

3.1.2.1. Composition chimique :

Tableau 3-3. Composition chimique du métal d'apport 308L

Eléments chimiques	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S
Pourcentage massique	0.013	2.0	1.0	18.28	12.76	0.003	0.01

3.1.2.2. Propriétés mécaniques :

Tableau 3-4. Propriétés mécaniques du métal d'apport 308L

Re (MPa)	Rm (MPa)	A (%)
400	560	42

3.2. Réalisation de Soudage

Le dépôt des cordons de soudure a été réalisé moyennant le soudage à l'arc électrique. Ce procédé consiste à faire fondre une baguette métallique (d'acier 308L, composition chimique proche du métal de base) qui représente l'électrode au moyen d'un arc électrique sur le métal de base.

Pour le but de cette étude, ce soudage consiste à faire déposer des cordons de soudure l'un à côté de l'autre sur la surface plane du métal de base. En raison des objectifs de l'étude et de la méthode de détermination des contraintes résiduelles utilisée, la forme des échantillons utilisés est parallélépipédique avec les dimensions (40 x 40 x 4) mm³ sans réalisation préalable de chanfrein.

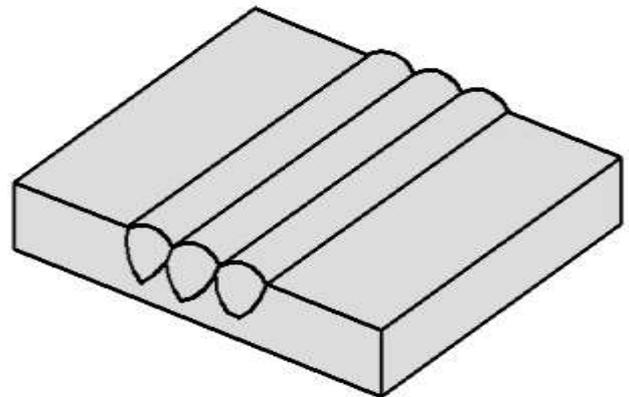


Figure 3-1. Réalisation des cordons de soudage

Deux paramètres essentiels ont été pris en compte lors de la détermination des contraintes résiduelles dans les matériaux réalisés. Il s'agit de l'influence :

- De l'intervalle de temps entre deux cordons consécutifs
- D'un post traitement thermique de relaxation à 870°C pendant ¾ d'heure suivi d'un refroidissement à l'air ambiant.

L'influence individuelle ou simultanée de ces deux paramètres permet de constater leurs effets sur le niveau des contraintes résiduelles ainsi que leur influence sur leur relaxation.

Il en découle ainsi l'obtention de quatre lots d'échantillons selon qu'il y'ait un temps entre les dépôts des cordons ou pas et selon que les échantillons soient post traités ou pas. Les quatre lots d'échantillons sont représentés sur le Tableau ci-dessous :

Tableau 3-5. Types d'échantillons étudiés

Echantillon	Soudage	Traitement thermique
Ech A	Dépôt de cordons sans intervalles de temps entre les passes	Sans traitement thermique
Ech A-Th	Dépôt de cordons sans intervalles de temps entre les passes	Avec traitement thermique
Ech B	Dépôt de cordons avec intervalles de temps entre les passes	Sans traitement thermique
Ech B-Th	Dépôt de cordons avec intervalles de temps entre les passes	Avec traitement thermique

3.3. Détermination expérimentale des contraintes résiduelles

En réalité, la détermination des contraintes résiduelles au sein des différents échantillons consiste à mesurer expérimentalement des déformations par la méthode extensométrique suivi pas des calculs mathématiques afin d'arriver à déterminer ces contraintes. Les déformations sont les résultats de la destruction (enlèvement des couches) contrôlée par voie électrochimique des échantillons.

Ces mesures seront déterminées à l'aide de jauges extensométriques bidirectionnelles placées sur la face opposée de la soudure (la face concernée par l'enlèvement de matière), du côté du substrat (Figure 3-3).



Figure 3-2. Jauge Extensométrique.

3.3.1. Le dispositif

Afin de déterminer les contraintes résiduelles par enlèvement de couche nécessite le dispositif suivant :

- **Un potentiostat** : qui est la source du courant d'électropolissage (enlèvement de couches).
- **Un pont d'extensométrie** : celui utilisé est un pont portatif de précision alimenté par piles et équipé d'un indicateur à cristaux liquides. D'un emploi simple, les différents réglages sont sélectionnés par un clavier à boutons poussoirs.
- **Un commutateur** : de commutation et de rééquilibrage pour le pont d'extensometrie qui comporte 10 voies de mesures commutables a des bornes a poussoir permettant un raccordement rapide et fiable des jauges.
- **Un micromètre** : de grande précision pour la mesure des couches enlevées.

- **Une cellule d'électropolissage** : alimentée en courant à partir du potentiostat, de l'eau de robinet qui sert au refroidissement pour garder une température basse et constante de la cellule et d'un électrolyte qui circule quand le procédé est en marche en assurant un mélange uniforme et une répartition de concentration homogène.

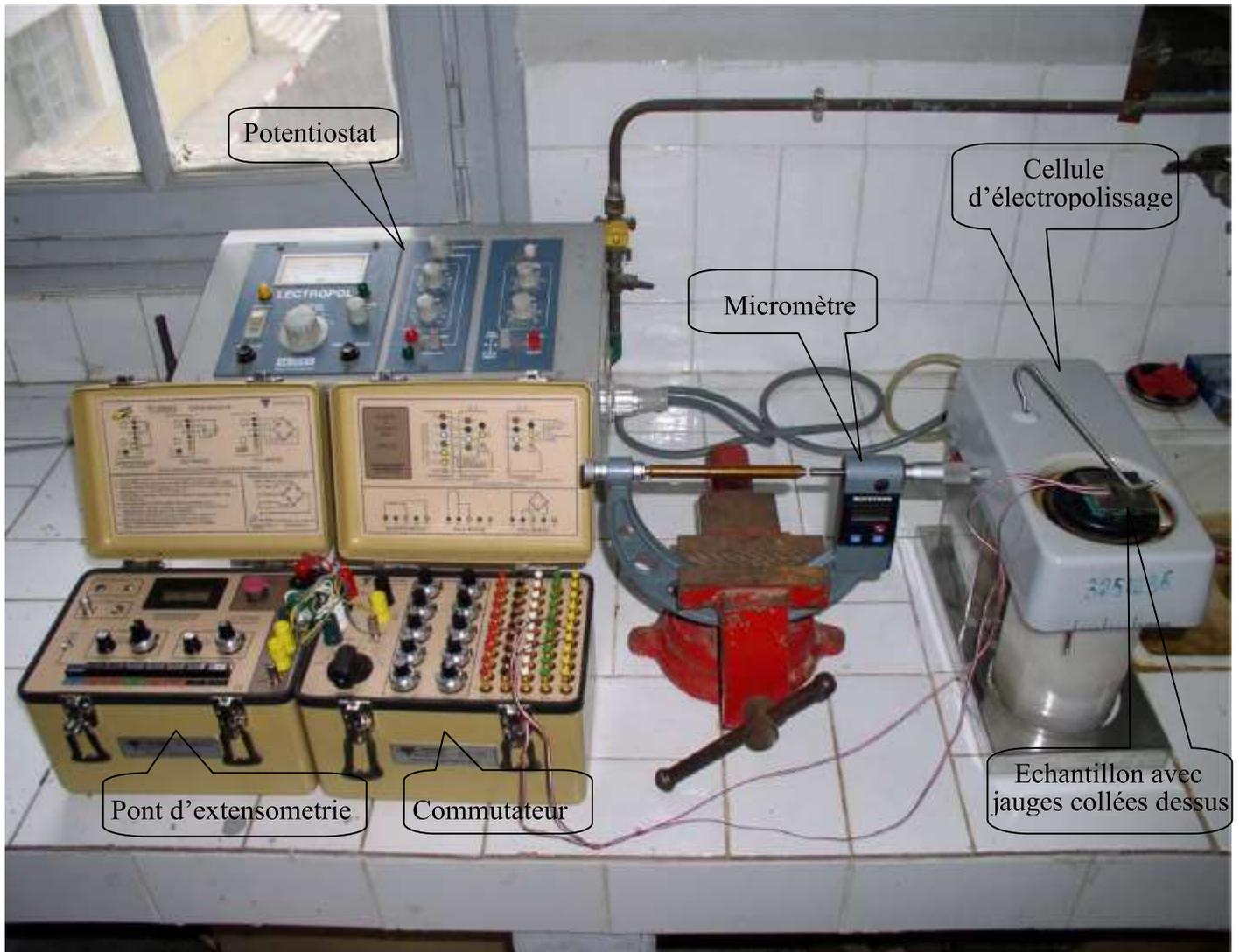


Figure 3-3. Dispositif expérimental de détermination des contraintes résiduelles par enlèvement de couche

La procédure consiste à faire enlever des couches très fines par polissage électrochimique du côté des cordons en basant sur le principe énoncé par ROSENTHAL et NORTON et repris par LE LUAN qui repose sur l'exploitation des réarrangements des contraintes qui se produit au sein du substrat lorsque l'on enlève une fine épaisseur en surface. En effet, ces réarrangements de contraintes causées par l'enlèvement des couches nous permettent de mesurer les déformations longitudinales ϵ_{long} et transversales ϵ_{trans} (en supposant que notre pièce parallélépipédique l'état des contraintes et quasi-plan en tout point) associées sur la face opposé à l'enlèvement à l'aide des jauges collées préalablement.

Pour ce faire, un usinage électrochimique a été effectué en utilisant une solution de NaCl à 50 grammes par litre dont la température est maintenue inférieure à 40°C, afin de ne pas générer de nouvelles contraintes d'origines mécanique ou thermique lors de l'usinage lui-même. Bien évidemment, et comme pour le cas de toute étude expérimentale ; les paramètres tel que la nature

de l'électrolyte ; sa concentration ainsi que les autres paramètres du polissage (intensité de courant, tension, vitesse...) ont fait l'objet d'une étude de détermination préalable.

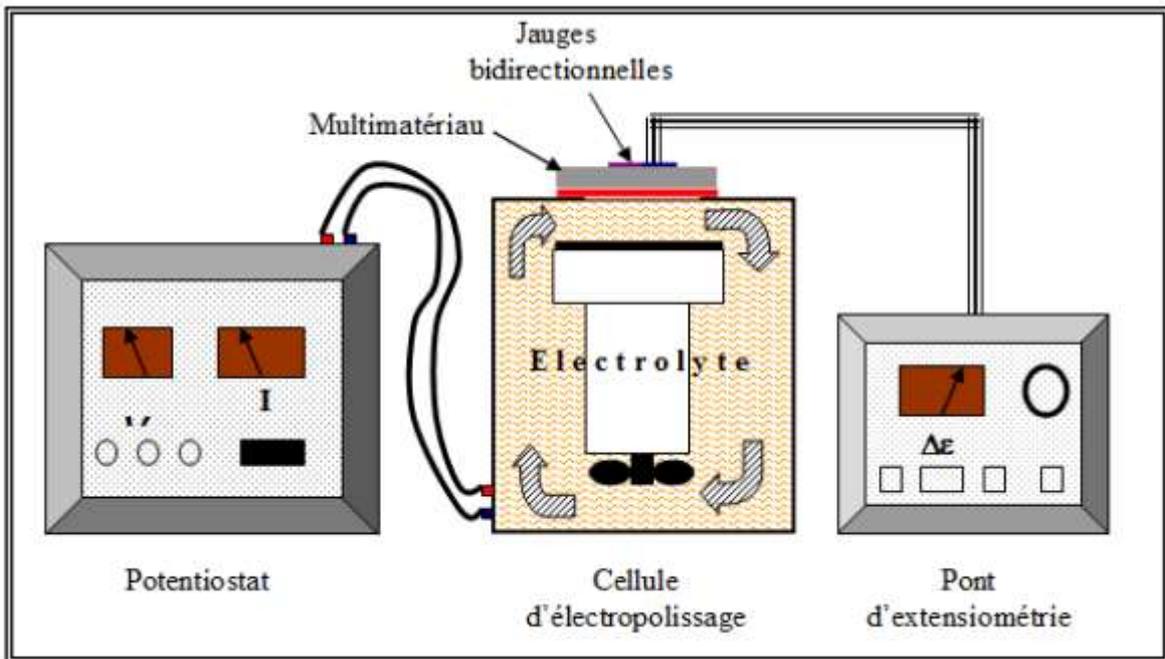


Figure 3-4. Schéma explicite du dispositif d'enlèvement de couches et de mesure simultanée des déformations

La figure montre la circulation continue de l'électrolyte qui assure un mélange uniforme, l'épaisseur des couches enlevées est d'environ $200 \pm 10 \mu\text{m}$ pour chaque passe. Celle-ci dépend de deux paramètres le temps et la vitesse de polissage qui est d'environ 15 à 20 $\mu\text{m}/\text{min}$. La mesure réelle de l'épaisseur usinée se fait à l'aide d'un micromètre à affichage digital.

Chapitre 4

Effet de recuit de détente sur les contraintes résiduelles

4. Effet de recuit de détente sur les contraintes résiduelles

Après introduction des données et paramètres relatifs au matériau étudié, les valeurs trouvées des contraintes transversales et longitudinales à différents niveaux sont présentées dans les tableaux suivants :

Tableau 4-1. Contraintes longitudinales et transversales (échantillons sans intervalle de temps entre les passes)

H (mm)	Contraintes longitudinales	Contraintes transversales	H (mm)	Contraintes longitudinales	Contraintes transversales
	σ_x (Mpa)	σ_y (Mpa)		σ_x (Mpa)	σ_y (Mpa)
0,17	410	523	0,42	111	211,23
0,43	380	537	0,69	96	194,83
0,62	380	586,3	0,91	83	141,59
0,8	290	490,2	1,12	76	161,53
1,04	190	532	1,29	45	125
1,14	90	462,7	1,51	34	75,7
1,35	5,5	276	1,7	78	36,18
1,5	-20	286,3	1,91	32	44,12
1,67	-36,3	296,6	2,09	34	35,3
1,81	-95	223,6	2,26	42	48,97
2,03	-180	210,6	2,48	51	62,04
2,15	-217	78,7	2,61	23	-170,3
2,29	-248,5	56,3	2,79	7	-124,81
2,48	-70,6	-3,2	3	-67	-112,14
2,79	-102,9	-32,8	3,15	-53	-142,85
2,91	-79,7	-26	3,34	-43	-72,52
3,05	-102,2	-51,4	3,53	-76	-57,35
3,22	-101,8	-69,8	3,69	-52	-74,42
3,33	-97,7	-77,7	3,82	-43	-71,85
3,6	-156,6	-119,1	4,04	13	-25,4
3,68	-303,9	-220,3	4,1	24	-45,27
3,89	-115,9	-119,7	4,3	3	-7,38
3,95	-92,2	-126,9	4,38	23	-35
4,07	-121,4	-167	4,51	11	11,34
4,23	-125,8	-193,4	4,63	2	7,07
4,37	-167,2	-207,2			

Contraintes pour Ech-A

Contraintes pour Ech-A-Th

Tableau 4-2. Valeur des contraintes longitudinales et transversales (échantillons avec intervalle de temps entre passes)

H (mm)	Contraintes longitudinales	Contraintes transversales	H (mm)	Contraintes longitudinales	Contraintes transversales
	σ_x (Mpa)	σ_y (Mpa)		σ_x (Mpa)	σ_y (Mpa)
0,22	456,1	782,7	0,22	77,24	300,79
0,39	526,6	710,5	0,44	95,32	252,47
0,53	338,4	735	0,63	45,42	230,97
0,7	267,2	669,9	0,85	84,76	248,94
0,89	333,9	697,5	1,1	62,9	205,67
1,06	229	570,9	1,35	67,88	191,4
1,28	225,6	676,8	1,52	38,84	159,97
1,5	258,9	534,4	1,72	113,12	197,15
1,73	205,2	468,7	1,92	98,72	184,68
1,92	-19,3	362,3	2,16	156,14	221,81
2,12	-93,8	262,6	2,38	109,22	195,47
2,31	-206,6	136,2	2,45	69,06	147,04
2,47	-345,4	-222	2,6	104,72	192,19
2,66	-319,2	-215,7	2,71	39	151,17
2,85	-285,1	-195,5	2,87	61,32	181,04
2,97	-224,5	-237,3	3,11	36,54	193,02
3,24	-248,7	-284,6	3,3	-15,08	159,53
3,34	-191,8	-147,5	3,42	-21,84	112,09
3,54	-54,3	-196,3	3,53	-47,47	40,91
3,67	-43,1	-153,9	3,73	-47,26	83,57
3,77	-16,7	-50,6	3,88	-46,37	93,65
3,86	0	0	4,07	24,39	43,2
3,98	56,5	16,9	4,21	20,28	39,16
4,13	87,2	26,2	4,37	-25,74	30,59
			4,56	-1,14	41,07
			4,87	-16,2	-20,2

Contraintes pour Ech-B

Contraintes pour Ech-B-Th

Afin d'illustrer les séries de résultats obtenus, nous avons réalisé les graphes de variations des contraintes résiduelles en fonction de la profondeur explorée des différents échantillons :

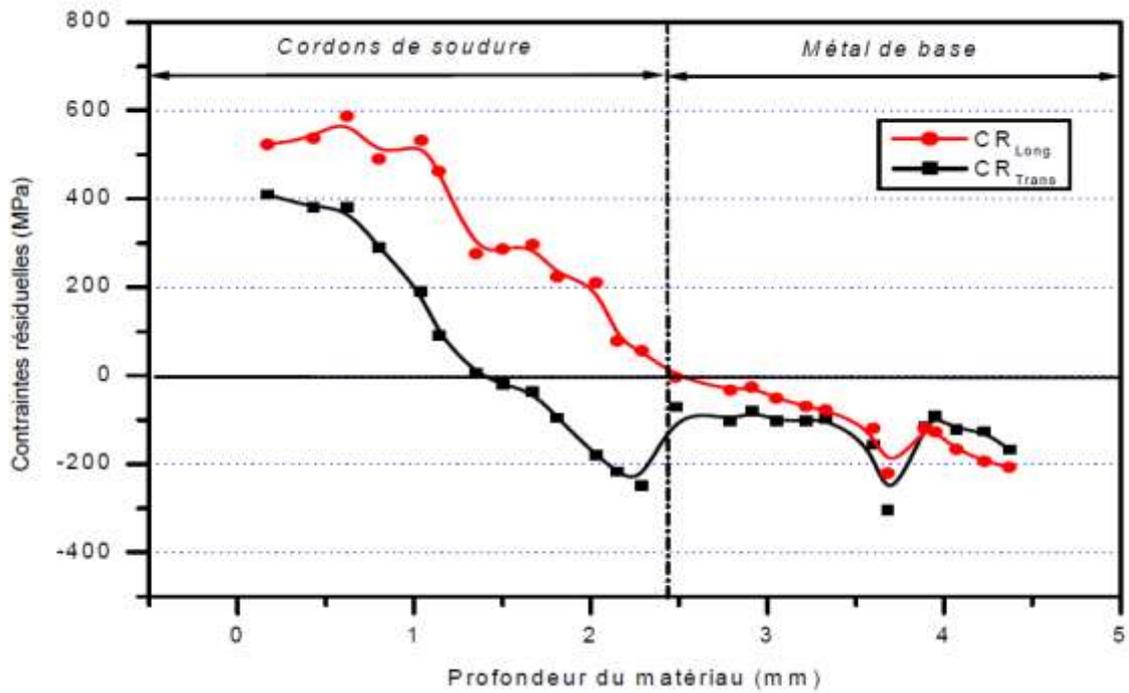


Figure 4-1. Profil des contraintes résiduelles dans le matériau A

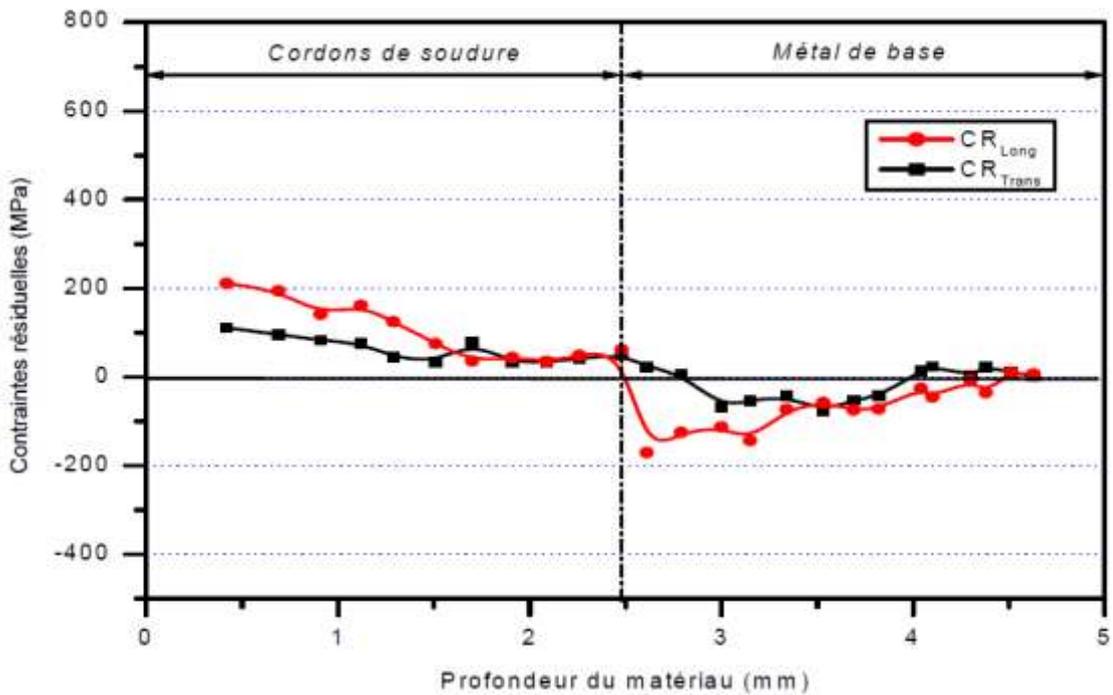


Figure 4-2. Profil des contraintes résiduelles dans le matériau A-Traité

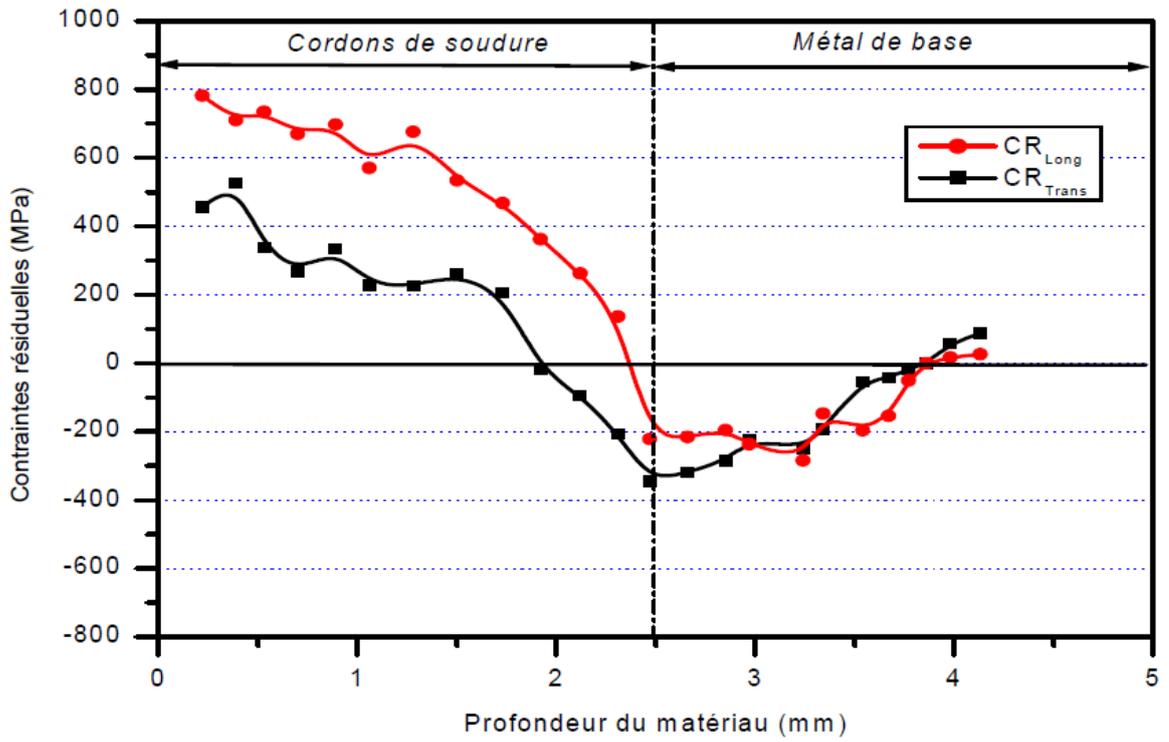


Figure 4-3. Profil des contraintes résiduelles dans le matériau B

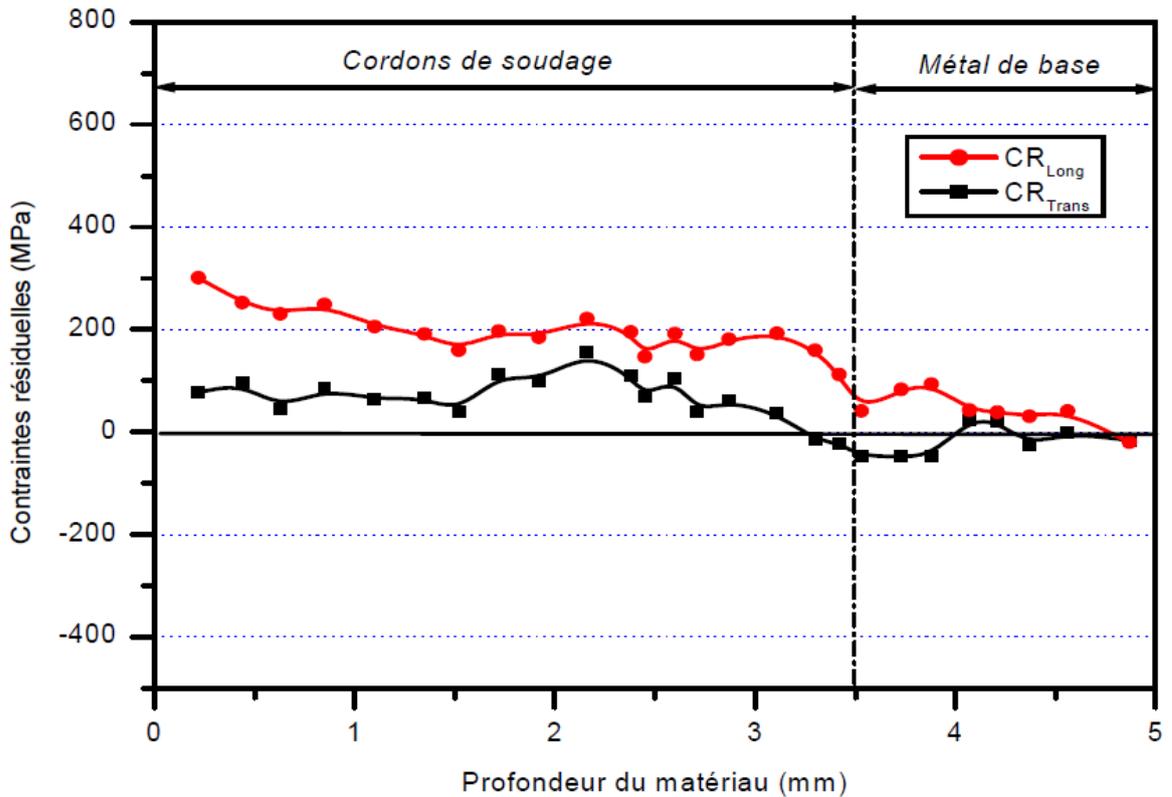


Figure 4-4. Profil des contraintes résiduelles dans le matériau B-Traité

D'après les courbes précédentes, on constate qu'en général les contraintes sont plutôt de tension dans la zone fondue et de compression dans la zone affectée thermiquement ainsi que dans le métal de base.

Le niveau des contraintes résiduelles longitudinales (selon le sens du soudage) est plus important que celui des contraintes résiduelles transversales (perpendiculairement au cordon).

La comparaison des courbes des **figures 3-1** et **3-3** montre que les contraintes résiduelles résultantes dans l'échantillon **Ech-B** dont le dépôt des cordons de soudure s'est fait avec un intervalle de temps d'une minute sont plus importantes que celles résultantes dans l'échantillon **Ech-A** ou le dépôt a été réalisé sans intervalle de temps entre les passes.

Cela s'explique par l'important gradient thermique qui se produit lors du soudage avec intervalle de temps entre les passes en provoquant des contraintes plus importantes.

Une importante relaxation des contraintes résiduelles dans les deux cas (avec et sans intervalle de temps entre les passes) s'est produite après le traitement thermique appliqué (**figures 3-2** et **3-4**).

Ce constat montre la nécessité d'appliquer un traitement thermique qui permettra de relaxer (diminuer considérablement) les contraintes résiduelles dues au soudage et ainsi de limiter les possibilités de création de zones sensibles pouvant conduire à des microfissures.

A la fin, On peut dire que l'application d'un traitement thermique (**Recuit de relaxation**) est très bénéfique car permettant de réduire considérablement le niveau des contraintes et limite par conséquent les endommagements possibles pouvant être dus à des concentrations localisées de contraintes.

Conclusion Générale

Ce travail nous a permis de résoudre le problème de la détermination des contraintes résiduelles dans les matériaux soudés. Ceci se fait en utilisant un modèle mathématique permettant le passage de la mesure des déformations à l'obtention des contraintes résiduelles. La mesure des déformations se fait en utilisant un appareillage constitué d'une polisseuse électrochimique, et une jauge extensométrique. Ces deux instruments sont utilisés simultanément afin de permettre la mesure des microdéformations préexistantes dans les couches successives du matériau.

Les résultats obtenus ont montré que la nature (compression ou tension) et l'ordre de grandeur des contraintes résiduelles ne sont pas uniformes dans les différentes zones des cordons de soudure.

Généralement, elles sont de tension (positives) dans la soudure et de compression (négatives) dans la zone thermiquement affectée voire même dans le métal de base où elles tendront à s'annuler.

Leur niveau est assez élevé dans la soudure surtout en surface. Pour les échantillons type A, le niveau en surface avoisine les 800 MPa puis diminue progressivement pour s'annuler à l'interface. Dans le métal de base, leur valeur est de - 200 MPa suivie d'un affaiblissement graduel.

Lorsqu'un temps de pause alterne les différentes passes, l'allure des contraintes est similaire à la première catégorie d'échantillons mais d'un niveau plus faible à cause du plus faible gradient thermique impliqué par les passes déposées successivement.

Après recuit de détente, les contraintes résiduelles diminuent jusqu'à trois fois moins que les valeurs initiales, pour cela l'effet du post traitement thermique est plus que bénéfique car il a permis de réduire considérablement le taux des contraintes à tous les niveaux des matériaux et par conséquent de relaxer globalement les matériaux et de les utiliser avec confiance.

5. Bibliographie

- [1] E. B. e. M. Z. Y. BOUISSA, techniques de mesures de contraintes résiduelles, 2014.
- [2] V.GUIPONT, Détermination Expérimentales de contraintes Résiduelles au sien d'assemblages Céramique/Métal réalisés par brasage : application au couple nitrure de silicium/acier doux, Ecole centrale de Lyon , 1994.
- [3] A. e. S. R.GAHLIN, The effect of compressive stresses on the abrasion of diamond coatings, 1996.
- [4] S. Y. e. Y. Y.NAKAMURA, Measurement of internal stresses in CVD Diamon Films, 1997.
- [5] J.PENG, Détermination des contraintes résiduelles dans des revêtements par diffraction des rayons X en faible incidence, CER de Paris: ENSAM , juillet 2006.
- [6] M1180, Technique de l'ingénieur.
- [7] Y.SPARFEL, Soudage et Techniques connexes, 1992.
- [8] R. BLONDEAU, Métallurgie et mécanique du soudage, lavoisier, 2001.
- [9] C. e. G.Hilly, Métallurgie, élaboration des métaux, édition Dunod Paris, 1972.
- [10] J. W. a. Sons, The structure and properties of materials., 1973.
- [11] I.Lakhtine, Métallographie et traitements thermiques des métaux, édition Mir Moscou, 1978.