

République algérienne démocratique et populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la
recherche scientifique

Université de M'sila

Faculté de Technologie



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة المسيلة

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Génie Industriel Et Maintenance

Thème :

Etude de l'effet des réparations successives sur l'état d'une construction soudée

Proposé et dirigé par :

Dr. ZAOUI MOUSSA

Présenté par :

BEN NAA SALIM

Année Universitaire : 2015 / 2016

N° d'ordre : GM/...../2016

Remerciements

Mes remerciements vont tout d'abord à notre Dieu pour la santé et le courage qu'il m'a donnés pour terminer ce modeste travail.

Je remercie mes très chère parent qui se sont donnée beaucoup de peine dans la vie pour la réussite de leurs enfants, je souhaite de dieux les protège et donne la santé et la vigueur.

J'adresse mes remerciements a monsieur Dr. ZAOUI MOUSSA mon encadreur, pour ses remarques et conseils qu'ils m'aidé moi beaucoup dans ce travail.

Je remercie Au fond de cœur, tous les enseignants au sein de faculté de technologie en générale et spécialement les enseignants de département génie mécanique d'université de M'sila qui ont contribué à mon formation.

Je remercie toute ma famille (mes frère NAFEA et ABD al Rahim et Amine et Hocine et AKRAM et mes sœurs, mes oncles, ma grand-mère)

Je remercie mes amis G.SOUFYANE et S.SAMIR et D.MOHAMMED et L.TAHER et T.MOHAMMED Amin et S.SAMI et O.MOUSSA et B.BOUHAFS.

Enfin, je remercie toute personne ayant contribué de près ou loin à la réalisation de ce travail.

Résumé

L'objet de cette étude consiste à mettre en évidence l'effet des réparations successives sur l'état d'une construction soudée, sachant que ces réparations constituent un problème dans le domaine de maintenance industriel. Il s'agit d'étudier les effets des cycles thermiques de soudage sur l'évolution structurale des joints soudés et la zone affectée thermiquement (Z.A.T) ainsi que l'étendue de cette dernière. Nous procédons au soudage et à la réparation, plusieurs fois de suite, d'une éprouvette en acier destiné a usage générale. Puis en a fait l'analyse métallographique et des essais mécaniques pour tester ses réparations , Nous décrivons les moyens, les techniques et les modes opératoires utilisés au cours de notre analyse.

Mots-clés : Soudage, Réparations successives, cycle thermique, joint soudée, ZAT, étendue.

الهدف من هذه الدراسة هو إظهار أثر التصليحات المتكررة على حالة بنية ملحمة، مع العلم أن هذه التصليحات تشكل عائقا في مجال الصيانة الصناعية، وللقيام بذلك ندرس آثار الدورات الحرارية للتلحيم على التطور البنيوي لوصلة التلحيم والمنطقة المتأثرة حراريا، وكذلك تمدها وذلك بتلحيم وتصليح أكثر من مرة لقطعة من الحديد اللين ذي الاستعمال العام، ثم نقوم بالتحليل المجهرى والعيانى للمعدن إضافة إلى التجارب الميكانيكية اللازمة لذلك، لقد بيننا الوسائل والتقنيات والطرق العملية المستخدمة خلال هذا التحليل.

الكلمات المفتاحية: التلحيم، التصليح المتتالي، الدورات الحرارية، وصلة التلحيم، م م ح، تمدد.

Sommaire

Remerciements

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale

Chapitre 1 : généralité sur le soudage

I.1	Introduction.....	1
I.2	Généralité sur le soudage.....	1
I.2.1	Historique de soudage.....	1
I.2.2	Le soudage de nos jours.....	2
I.3	Procédés de soudage.....	2
I.3.1	Soudage au gaz ou au chalumeau.....	2
I.3.2	Soudage a l'arc.....	3
I.3.3	Soudage a l'arc avec électrode enrobée.....	3
I.3.4	Soudage TIG	4
I.3.5	Soudage MIG/MAG.....	5
I.4	Soudage des aciers au carbone.....	6
I.4.1	Les aciers au carbone	6
I.4.2	Les aciers de construction.....	8
I.4.3	Soudage des aciers de construction.....	9
I.4.4	Notion de métallurgie de soudage.....	10
I.5	Les cycles thermiques de soudage.....	11
I.5.1	Soudage avec déplacement de la source.....	12
I.5.2	Solidification et transformations dans la soudure.....	15
I.6	Soudabilité et notion de carbone équivalent	16

Chapitre 2 : Défauts et contraintes de l'opération de soudage

Partie 1 défaut de l'opération de soudage

II.1	Introduction	17
II.1.2	Les principaux défauts de soudures	17
II.1.2.1	Les inclusions gazeuses	17
II.1.2.2	Les inclusions solides.....	17
II.1.2.3	Défauts de fusion (collage).....	18
II.1.2.4	Défauts de pénétration.....	18

II.1.2.5 Sillons aux caniveaux et morsures en surface.....	18
II.1.2.6 Retassures de cratère.....	18
II.1.2.7 Fissurations.....	19
II.1.3 Les fissures.....	19
II.1.3.1 Fissuration à chaud.....	19
II.1.3.1 Facteurs métallurgiques (Ségrégation).....	20
II.1.3.2 Facteurs géométriques et tenson-thermiques.....	20
II.1.3.3 Fissures par arrachement lamellaire.....	22
II.1.3.4 Fissures à froid.....	22
II.1.3.4.1 Les fissures transversales.....	22
II.1.3.4.2 Fissures de la ZAT.....	22
Partie 2 les contraintes résiduelles dans les assemblages soudés	
II-2. Déformations et contraintes induites par le soudage.....	30
II-2.1. Contraintes résiduelles dans les assemblages soudés.....	30
II-2.1.1 Contraintes résiduelles directes.....	30
II-2.1.2 Contraintes résiduelles indirectes, ou de bridage.....	30
II-2.1.3 contraintes parasites (extérieures à l'opération de soudage)	30
II-2.1.4 contraintes résiduelles directes longitudinales dans les assemblages bout à bout	30
II-2.2. Classification des contraintes résiduelles.....	31
II-2.2.1. Les contraintes d'ordre 1 ou macro-contraint.....	31
II-2.2.2. Les contraintes d'ordre 2 ou micro-contrainte.....	31
II-2.2.3. Les contraintes d'ordre 3.....	31
II-3. Influence des contraintes résiduelles sur le comportement mécanique d'un ensemble soudé	31
II-3.1. Résistance statique de l'ensemble.....	31
II-3.2. Risques dus aux contraintes résiduelles Structures soumises au flambement (ou flambage)	32
II-3.2.1. Structures soumises au risque de rupture fragile.....	32
II-4 Origine des contraintes résiduelles	32
II-4.1. Origine mécanique.....	33
II-4.2.1. Origine mécanique.....	33
II-4.2.2. Origine thermique liée à la trempe.....	33
II-4.2.3. Origine chimique.....	33

II-5. Contraintes résiduelles dans les joints soudés hétérogènes.....	34
II-5.1. Nature de ces contraintes résiduelles.....	34
II-5.2. Amélioration de la tenue des joints soudés	35
II-5.2.1. Modification de la géométrie du cordon.....	35
II-5.2.2. Modification du champ des contraintes résiduelles.....	36
II-5.2.2.1 Dimensionnement thermique.....	36
II-5.2.2.2 Préchargement statique.....	36
II-5.2.2.3 Grenailage de précontrainte	37
II-6. Contraintes et déformations résiduelles générées par le soudage	37
II-6.1 Système plan d'un assemblage bout à bout rectiligne situé sur un axe principal d'inertie.....	37
II-6.1.1 Contraintes résiduelles.....	37
II-6.1.2 Déformations résiduelles.....	39
Chapitre III : traitements thermiques et technique de contrôle	
III.1. Introduction	41
III.1.2. Cycle d'un traitement thermique	41
III.1.3. TRAITEMENTS THERMIQUES DES SOUDURES.....	42
III.1.3.1. Classification selon l'objet.....	42
III.1.3.2. Modes de mise en œuvre	43
III.1.3.2.1. Traitement global	43
III.1.3.2.2. Traitement local simultané.....	43
III.1.3.3. Traitement de relaxation.....	44
III.1.3.3.1. Objet de traitement de relaxation	44
III.1.3.3.2. Mécanisme de la relaxation	45
III.1.3.3.3. Effets métallurgiques du traitement	47
III.1.3.3.5. Traitement avant ou après refroidissement.....	48
III.2. Technique de contrôle des soudures.....	49
III.2.1. Contrôle avant le soudage.....	49
III.2.2. Contrôle au cours du soudage.....	49
III.2.3. Contrôle après le soudage.....	50
III.2.3.1 Contrôles destructifs.....	50
III.2.3.1.1 Essais de texture.....	50
III.2.3.1.2. Essais mécaniques.....	50
III.2.3.1.3. Examens macrographiques et micrographiques.....	51

III.2.3.2. Contrôles non destructifs.....	51
III.2.3.2.1. Examen visuel.....	51
III.2.3.2.2. Contrôles par ressuage.....	51
III.2.3.3. Contrôle par magnétoscopie.....	53
III.2.3.3.1. Indications des défauts par magnétoscopie.....	55
III.2.3.4. Examens radiographiques.....	56
III.2.3.5. Méthodes de contrôle des soudures par ultrason.....	56
Chapitre IV : Partie expérimentale	
IV.I. Essais et matériels utilisé	58
IV.I.1. Présentation de l'assemblage soudé.....	58
IV. I.1.2. Procédure de réparation	60
IV.I.2. Méthode de prélèvement des échantillons.....	61
IV.I.3. Essai de traction.....	63
IV.I.3.1 Préparation des éprouvettes de traction	64
IV.I.4. Mesure de la dureté sous cordon.....	65
IV.I.4.1. Méthode de mesures et filiations de dureté et micro dureté.....	67
IV.I.5. Examen macrographique.....	68
IV.I.5.1. Technique de macrographie.....	68
IV.I.5.2. Technique de micrographie.....	69
IV.I.6. Essai de pliage.....	69
IV.I.7. Evaluation de l'étendue de la ZAT et la ZF.....	70
IV.I.8. Méthode de prélèvement des cycles thermiques.....	71
Partie n°2	
IV.II. Résultats et Discussion.....	72
IV.II.1. Analyse des caractéristiques mécaniques.....	72
IV.II.1.1. Résultats d'essai de traction.....	72
IV.II.2. Résultats d'essai de dureté.....	73
IV.II.3 Essai de pliage	79
IV.II.4. Caractéristiques métallographiques.....	79
IV.II.4.1 Photographies des micrographies.....	79
IV.II.4.2. Etude des micrographies.....	81
IV.II.5. Photographies des macrographies.....	81
IV.II.5.1 Observations sur les macrographies.....	82
IV.II.5.2. Schématisation des sections des différents échantillons.....	83

IV.II.6 Analyse des cycles thermiques.....	85
Conclusion générale.....	84
Références bibliographiques	85

Liste des figures

Figure. 1.1. Soudage au chalumeau.....	3
Figure. 1.2. Principaux procédés de soudage à l'arc.....	3
Figure. 1.3. Schéma de principe du Soudage a l'arc électrique	4
Figure. 1.4. Soudage TIG sous argon	5
Figure. 1.5 : Evolution des températures suivant l'axe Y.....	10
Figure. 1.6. Présentation macrographique d'un joint soudé.....	11
Figure. 1.7. $\Theta = f(t)$	12
Figure. 1.8. $\Theta_m = f(x)$	12
Figure. 1.9. $\Theta_{Ai} = f(t)$	13
Figure. 1.10 : Les courbes température/temps.....	14
Figure. 1.11 : Influence du préchauffage sur la vitesse de refroidissement.....	15
Figure. II.1.- Fissure dans une Soudure en T	25
Figure. II.2. Fissure dans une Soudure en V double	25
Figure. II.3- Assemblage bout à bout voltage trop haut	26
Figure. II.4- Fissures à chaud ou de solidification.....	26
Figure. II.5- Forme du cordon lors d'un soudage rapide.....	26
Figure. II.6- Forme du cordon lors d'un soudage lent.....	27
Figure. II.7- Chanfrein trop fermé Avec	27
Figure. II.8 - Chanfrein ouvert.....	27
Figure. II.9 positions des fissures à froid couramment dans les soudures en T...	27
Figure. II.10 Figure représentant les positions des fissures à froid couramment observées dans les soudures bout à bout	27
Figure. II.11 - Positions des fissures à froid couramment observées dans les soudures en T	28
Figure. II.12 - fissure par arrachement lamellaire dans le métal de base	29
Figure. II.13-Fissures concaves et convexes	29
Figure. II.14 Distribution des contraintes résiduelles dans le sens longitudinal et transversal.	34
Figure. II.15 : Géométrie du joint	36
Figure. II.16: Répartition des contraintes résiduelles longitudinales de plasticité de dilatation. Cas d'un assemblage mono passe.	37

Figure. II.17 Répartition des contraintes résiduelles transversales de plasticité de dilatation. Cas d'un assemblage multi passe.	38
Figure. II.18 Les trois composantes de translation observables sur un assemblage bout à bout rectiligne multi passe.	39
Figure. II.19 Les trois composantes de rotation observables sur un assemblage bout à bout rectiligne multi passe.....	40
Figure.III.1. Mécanisme de la relaxation des contraintes	46
Figure.III.2.La variation de H en fonction de la température	47
Figure.III.3. a. application du pénétrant	52
Figure.III.3. b Enlèvement de l'excès de pénétrant	52
Figure.III.3. c application du pénétrant	52
Figure.III.3. d. Accentuation de l'indication quand le pénétrant s'accumule autour l'ouverture	52
Figure.III.4. Principe du contrôle par magnétoscopie	54
Figure.III.5.Particules magnétiques vues par un microscope optique	54
Figure.III.6. Principe du Photofluorimètre utilisé pour la mesure photoparticules (méthode sèche)	54
Figure.III.7 Principe du Photofluorimètre utilisé pour la mesure photoparticules (méthode humide)	55
Figure.III.8 Indication obtenue en UV	55
Figure.III.9. Indication obtenue en fluorescent.....	55
Figure. III.10. Principe de contrôle des soudures	57
Figure. III.11 Principe de contrôle par la méthode tandem.....	57
Figure IV.1 joint bout à bout normal avec un chanfrein en V.....	59
Figure IV.2 Répartition des passes successives dans le joint soudé.....	59
Figure IV.3 Soudure avant meulage de réparation.....	60
Figure IV.4 : Préparation du joint pour une première réparation.....	60
Figure IV.5 : Rechargement du joint lors de la première réparation.....	61
Figure IV.6 : Méthode de prélèvement des éprouvettes.....	61
Figure IV. 7 : tube soudé avant prélèvement d'éprouvettes.....	62
Figure IV. 8 : Prélèvement d'éprouvettes.....	62
Figure IV.9: courbe de traction.....	63
Figure. IV.10 machine universelle IBERTEST (a) pilotée par ordinateur (b).....	64
Figure IV.11. Forme géométrique d'éprouvette de traction.....	65

Figure IV.12. Machine de dureté universelle Vickers, Brinell et Rockwell.....	66
Figure. IV.13 Principe de l'essai de dureté Vickers.....	66
Figure IV.14 Eprouvette pour essai de dureté.....	66
Figure IV.15 : Filiations de dureté.....	68
Figure. IV.16 Microduromètre Zwick HV 10 piloté par l'ordinateur.....	69
Figure IV.17. Essai de pliage.....	70
Figure IV.18 Détails sur le maillage dans la ZAT.....	70
Figure IV.19 Méthode de prélèvement des cycles thermiques.....	71
Figure. IV.20 Equipements de mesure des cycles thermiques.....	71
Figure IV .21 : Courbes de traction des différents éprouvettes	73
Figure IV.22 Filiation de dureté de la soudure initiale	74
Figure IV. 23 Filiation de dureté de la 1ere réparation.....	75
Figure IV.24 Filiation de dureté de la 2eme réparation.....	76
Figure IV.25 Filiation de dureté de la 3eme réparation.....	77
Figure IV.26: Evolution de la micro-dureté pour les différent échantillons.....	78
Figure IV.27 : Evolution structural verticale.....	80
Figure IV.28 : Evolution structural horizontale.....	81
Figure IV.29 : Schéma explicatif des différents prélèvements micrographiques.	81
Figure IV.30 : Macrographie de la soudure initiale (non réparée) (S1).....	82
Figure IV.31 Macrographie de la soudure avec une 1ère réparation (R1).....	82
Figure IV.32 Macrographie de la soudure avec une 2ème réparation (R2).....	83
Figure IV.33 Macrographie de la soudure avec une 3ème réparation (R3).....	83
Figure IV.34 Maillage de la ZAT pour la soudure initiale (S1)	83
Figure IV.35 Maillage de la ZAT pour la 1 ^{er} réparation (R1)	84
Figure IV.36 Maillage de la ZAT pour la 2ème réparation (R2).....	84
Figure IV.37 Maillage de la ZAT pour la 3ème réparation (R3).....	84
Figure IV.38 Aire de la zone fondue en fonction des réparations.....	85
Figure IV.39 Aire de la ZAT en fonction des réparations.....	85
Figure IV.40 - Diagramme thermique de la soudure initiale.....	86
Figure IV.41 : Diagramme thermique de la première réparation.....	86

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Données sur la soudabilité en fonction du carbone équivalent ...	16
Tableau.VI.1 composition chimique d'acier S235JR	58
Tableau.VI.2. Caractéristiques mécaniques d'acier S235JR	58
Tableau VI.3 : Composition chimique du métal de base, des assemblages soudés et réparés	72
Tableau VI.4 : Détermination des aires de ZF et ZAT pour les différents échantillons.	85

INTRODUCTION GENERALE

La maîtrise du comportement des structures et des assemblages est une nécessité croissante pour les différents secteurs : aéronautique ; automobile ; marin ; transport pétrolier...etc.

La connaissance approfondie des phénomènes intervenants dans le matériau utilisé, et les facteurs influençant ont comportement permet de prévenir des anomalies et choisir des conditions adoptées à son utilisation, les métallurgistes et les physiciens découvrent et mettent au point, chaque jour, des méthodes et des moyens plus efficaces afin de concilier la technologie et l'économie.

Les opérations de soudage coûtent cher. La qualité des soudures n'est malheureusement pas toujours celle que l'on attend, les normes définissent les critères d'acceptabilité des défauts présents dans une soudure.

Cependant, des paramètres technico-économiques obligent le maître d'œuvre à éliminer localement les défauts afin d'éviter la coupe ou le rejet total du joint.

Nous proposons, par ce travail, d'étudier l'effet des réparations successives sur l'état d'une construction soudée, en exagérant leur nombre,

Dans la première partie Nous rappelons des généralités sur l'opération de soudage ainsi que les effets des cycles thermiques et l'influence des paramètres qui les caractérisent, sur l'évolution structurale des soudures.

Dans la partie expérimentale nous procédons au soudage et à la réparation, Plusieurs fois de suite, d'une éprouvette en acier utilisé pour l'usage général. Nous décrivons les moyens, les techniques et les modes opératoires ; Les résultats et leur interprétation constituent la quatrième partie de ce travail.

Chapitre I
Généralité
sur le
soudage

I.1 Introduction :

Le soudage est un processus qui consiste à assembler deux pièces métalliques pour les rendre solidaires l'une à l'autre, et cela en les rapprochant et en réchauffant l'endroit de leur contact jusqu'à l'état de fusion avec ou sans métal d'apport, cette opération est caractérisée par trois aspects ; thermique, chimique, et thermomécanique.

L'intérêt de la connaissance métallurgique de l'opération de soudage est de permettre l'interprétation aussi quantitative que possible des phénomènes métallurgiques que cette opération engendre, et par suite de prévoir ces phénomènes pour en tenir compte dans le choix du métal de base, des procédés et des modes opératoires.[1]

I.2 généralité sur le soudage :

I.2.1 Historique sur le soudage :

Les origines du soudage moderne datent de la fin du 19^{ème} siècle et du début de 20^{ème} siècle. A cette époque s'inventent :

- Le soudage par aluminothermie (procédé chimique) : Goldsmith, Allemagne
- Le soudage avec électrode de charbonne : Bernardo et Olszewski, Russie
- Le soudage avec électrode fusible fluë : Slavian, RUSSIE
- Le soudage avec électrode enrobée Keller, Suède
- Le soudage par résistance Thompson, USA
- Le soudage au gaz (chalumeau) : Picard, France

Le développement des procédés du soudage est devenu de plus en plus rapide avec l'invention du soudage avec les électrodes enrobées et le soudage au chalumeau Oxyacétylénique, ce dernier a rendu possible la réalisation des premiers ouvrages importants comme les bateaux, les ponts le bâtiment et les chaudières (surtout aux USA et en Angleterre).

L'introduction massive du soudage par résistance joua le rôle décisif dans le développement rapide de l'industrie automobile et parmi les nouveaux procédés nous pouvons nommer :

- Le soudage avec électrode de tungstène : 1924 à l'USA
- Les soudages sous flux en 1935 à l'USA
- Le soudage vertical sous laitier en 1950 en URSS
- Le soudage sous la protection gazeuse de 1950 à 1960
- Le soudage avec fils fourré de 1950 à 1960
- Le soudage explosion de 1950 à 1960
- Le soudage par bombardement électronique en 1956 en France
- Le soudage au laser en 1965. [2]

I.2.2 Le soudage de nos jours

Nous n'estimons aujourd'hui que (60 à 80) % de la production mondiale de l'acier soient destinés à la fabrication des produits soudés.

A noter que le soudage est particulièrement utilisé dans les domaines de la fabrication des assemblages métallique à partir de la microélectronique jusqu'à la fabrication de grands corps de presses hydraulique. Actuellement nous avons la possibilité de des éléments d'épaisseur de 0.01mm jusqu'à 1000 mm et même plus en bref, on soude presque tous les métaux et alliages utilisés dans les techniques modernes.

Les procédés de soudage appelés soudage de rechargement existent aussi et sont Largement utilisés pour la remise en état de pièces et assemblage usés ou endommagés.

Le développement actuel des procédés de soudage est axé vers le perfectionnement des techniques d'utilisation (procédures, métallurgie, et équipement), vers l'introduction des robots industriels et de la programmation, vers l'application des nouvelles sources d'énergie telle que le LASER [2].

I.3 Procédés de soudage

I.3.1 soudage au gaz ou au chalumeau

Le soudage au gaz ou à la flamme, consiste à assembler des pièces de métal à l'aide d'un métal d'apport amené à fusion par la chaleur de la flamme d'un chalumeau.

Selon le type de pièces à assembler et la résistance de l'assemblage que l'on souhaite obtenir, on utilise différentes techniques.[3]



Figure 1.1. Soudage au chalumeau

I.3.2 Soudage à l'arc

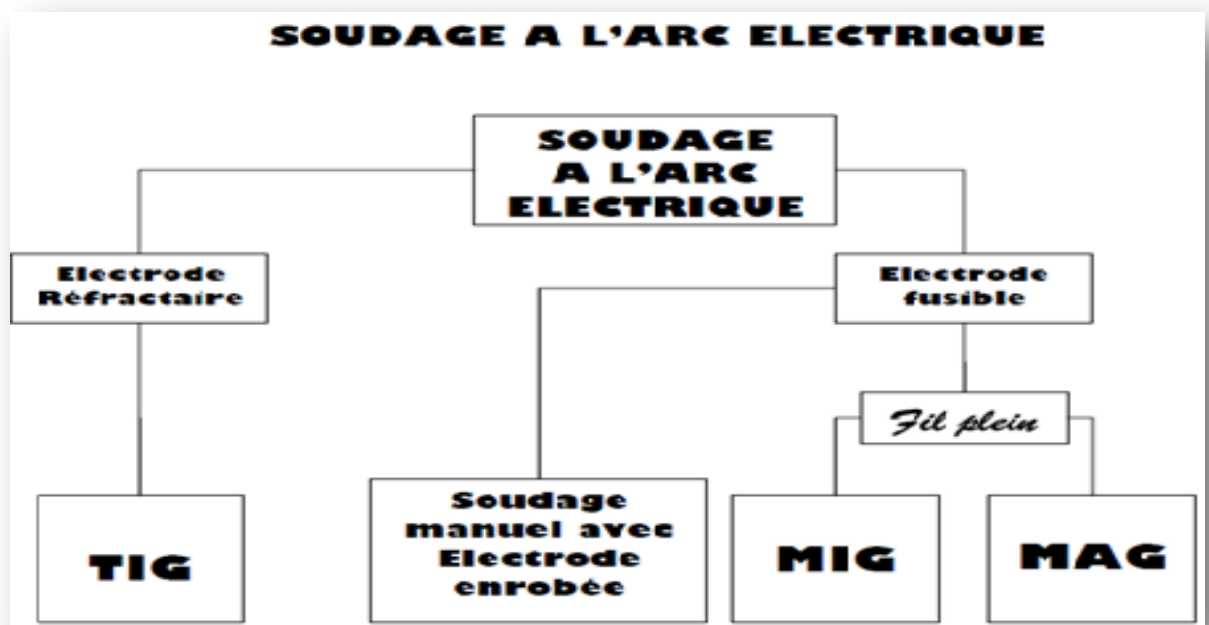


Figure 1.2. Principaux procédés de soudage à l'arc électrique

Les différentes techniques de soudage à l'arc utilisent l'énergie calorifique d'un arc électrique entretenu entre une électrode et le métal à assembler. [4]

I.3.3 soudage à l'arc avec électrode enrobée

Le soudage à l'arc électrique est le plus répandu comme procédé d'assemblage des pièces métalliques. Une fusion rapide localisée fait que les déformations des pièces soudées à l'arc sont peu importantes. Cette localisation de la chaleur implique une grande rapidité de soudage et un rendement important, avantages indéniables de ce procédé, même sur des tôles de faible épaisseur. Cette rapidité de soudage est encore accentuée par l'emploi d'électrode à haut rendement. [2]

Schéma de principe

Le schéma de principe du soudage à l'arc électrique avec électrode enrobée est présenté par la figure 1.3.

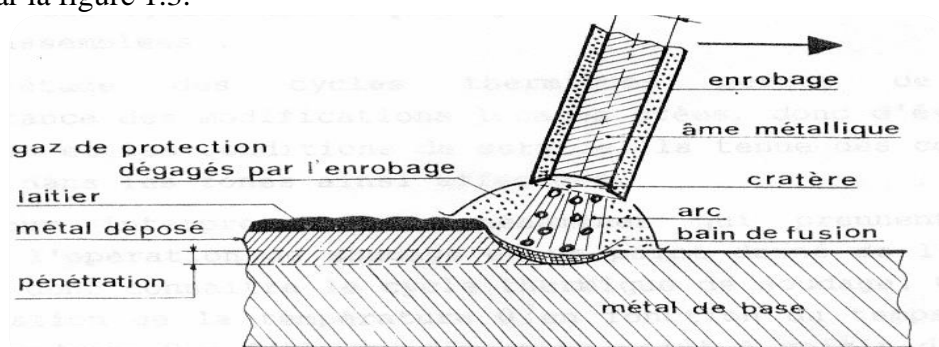


Figure 1.3. Schéma de principe du Soudage a l'arc électrique

Source d'énergie

Un générateur de courant électrique, alternatif ou continu, produit un arc électrique libre entre l'électrode métallique fusible et les deux pièces à assembler. [5]

Métal d'apport

Le métal d'apport se présente sous forme d'une électrode enrobée, caractérisée par le diamètre de l'âme métallique et la nature chimique de l'enrobage.

Elément de protection

La protection du bain de fusion contre la contamination atmosphérique est assurée par des gaz provenant de la dissociation de l'enrobage dans l'arc. La protection du métal déposé est assurée par la formation d'un laitier adhérent à la surface de ce métal. [5]

I.3.4 Soudage à l'arc électrique type TIG Tungstène Insert Gas

Procédé de soudage mis au point aux Etats-Unis. Il s'apparente au soudage à l'arc, mais en lui apportant des améliorations conséquentes en matière de facilité de mise en œuvre et de qualité de soudure. Après le soudage à l'arc électrique et électrode enrobée, c'est le procédé le plus répandu. La chaleur nécessaire à créer la soudure est apportée par un arc électrique. Cet arc électrique est transmis au métal de base par une électrode en tungstène et le bain de soudure est protégé par un flux de gaz inerte.

L'arc électrique généré est stable, précis, capable de souder des métaux très réactifs comme l'Aluminium ou le Titane.

Par exemple le soudage de l'inox, avec le procédé TIG, permet d'éviter la formation d'oxydes de chrome. Formation qui entraînerait localement une baisse de la concentration en chrome et diminuerait sa résistance à la corrosion.

La soudure se fait sous protection de gaz inerte (ne présentant pas de danger, pas de risque explosif) Différents types de gaz sont utilisés :

- Argon pour l'acier
- Argon- Hélium (mélange binaire) pour l'aluminium
- Argon- Hélium- Oxygène

Dans cette technique l'arc électrique et la soudure sont protégés par le gaz. Ce qui permet de se passer de l'enrobage de la baguette. Ceci amène une diminution substantielle des émissions de fumées.

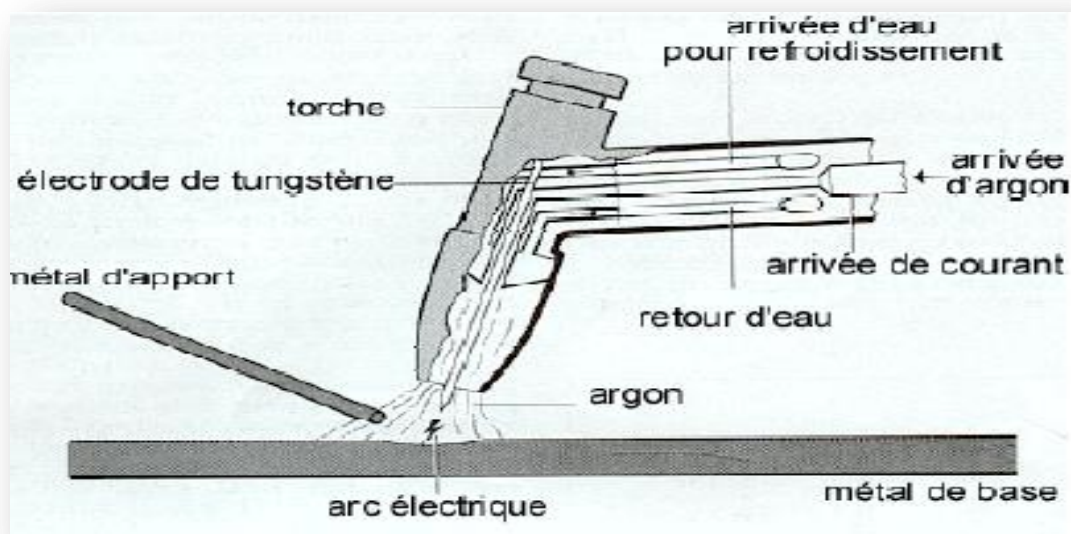


Figure.1.4. Soudage TIG sous argon

I.3.5 Soudage MIG/MAG

Soudage semi-automatique : MIG, MAG

Aussi appelé « kilomètre soudé ». Il s'agit d'un procédé de production en grande quantité. Dans les ateliers, la métallerie. Il est rapide, nécessitant moins de formation pour la mise en œuvre que le procédé TIG. Sans production de laitier comme dans le soudage à l'arc avec électrode enrobée.

L'arc électrique est véhiculé par un fil électrode fusible (à la fois métal d'apport et électrode), ceci jusqu'à l'extrémité de la torche de soudage, qui est munie d'une gâchette. Le fil est disposé sur le dévidoir d'une bobine. Ce dévidoir tourne pour faire avancer le fil à l'aide d'un moteur de 24 Volt. La vitesse du fil en m/min est réglée à l'aide d'un potentiomètre. Le soudeur appuie sur la gâchette pour débiter le gaz protecteur, alimenter l'arc électrique et dévider le fil électrode. [6]

Protection gazeuse inerte (MIG : Métal Inert Gas) le gaz s'écoule de façon continue et protège le métal en fusion contre l'oxygène et l'azote de l'air. En général de l'Argon ou du mélange Argon-Hélium.

Protection gazeuse active (MAG : Métal Active Gas) le plus souvent par CO₂ ou mélange Argon-CO₂ ou Argon-CO₂-O₂. Le gaz protecteur participe activement au processus en réagissant, dans l'arc, avec les métaux d'apport et de base.

I.4 SOUDAGE DES ACIERS AU CARBONE

I.4.1 Les aciers au carbone :

On définit comme aciers les alliages de fer et de carbone contenant jusqu'à 1.7% de C, se distinguant en hypoeutectoides et hypereutectoides selon que leur teneur en carbone soit supérieure ou inférieure à 0,8 %. L'appellation d'aciers de construction est donnée aux aciers employés dans la fabrication des éléments de machines, dans la construction des ouvrages d'art et des édifices. Les aciers de construction peuvent être des aciers alliés ou non alliés.

Les aciers pour les constructions soudées sont des hypoeutectoides et leur teneur en carbone ne dépasse pas la valeur de 0,40 %. A coté du carbone, nous trouvons toujours dans l'acier quelques éléments inévitables, dont la présence est due au processus de fabrication et qui sont le Manganèse, le Silicium, le Soufre et le Phosphore. Pour conférer à l'acier des propriétés particulières, on peut ajouter intentionnellement des éléments d'alliages tels que le Manganèse, le Chrome, le Nickel le Molybdène, etc....

L'acier est dit « courant ou ordinaire » quand il ne contient pas d'éléments d'alliages ajoutés spécialement. Il est dit « faiblement allié » quand il contient des éléments d'alliage pouvant atteindre au total 2 à 3 % environ. Il est dit « allié » quand il contient des éléments d'alliage en plus forte quantité ($> 8\%$).[7]

La composition chimique des aciers courants au carbone varie dans les limites suivantes :

- C = 0.05 – 0.40 %
- Mn = 0.40 – 0.80 %
- Si = 0.15 – 0.35 %
- P = 0.02 – 0.07 %
- S = 0.02 – 0.07 %
- Trace de gaz (Azote, oxygène et hydrogène).

Les aciers au carbone de construction forment deux classes : les aciers d'usage courant et les aciers de qualité. D'après les conditions d'élaboration et le degré de désoxydation, on distingue les groupes d'aciers suivants:

- les aciers effervescents

Si on ne prend pas de précautions particulières contre les gaz, c'est-à-dire si l'acier n'est pas calmé, la solidification du lingot s'accomplit d'une manière agitée et l'acier est dit ; « effervescent ».

- Les aciers calmés

Les aciers calmés s'obtiennent par désoxygénation complète du métal dans un four puis dans une poche de coulée. Ces aciers contiennent une quantité minimum de protoxyde de Fer qui assure ainsi une solidification « calmée » du métal dans la lingotière qui s'accompagne de diminution de volume.

Au cours de la coulée le silicium se combine avec l'oxygène en formant des oxydes légers qui viennent surnager à la surface et favorisent également du même coup la sortie des autres gaz. On dit de l'acier désoxydé au moyen du silicium qu'il est « calmé au silicium ». A la place de silicium on peut utiliser l'aluminium, qui est un désoxydant plus énergique et produit ainsi de l'acier « calmé à l'aluminium ».

I.4.2 Les aciers de construction

Les aciers de construction comme leur nom l'indique sont utilisés dans la construction et les bâtiments à structure légère. Ce sont des aciers au carbone et au manganèse caractérisés par une valeur minimale garantie de résistance et des valeurs de résilience très satisfaisantes. Ces aciers de construction présentent une bonne aptitude au soudage par tous les procédés conventionnels sans préchauffage ni recuit ultérieur de la soudure.

leurs dénominations comportent la lettre qui désigne leur usage :

- la lettre S (Structure) pour un usage général de construction métallique
- la lettre E (Engine) pour construction mécanique.

Cette lettre est suivie de la limite élastique (R_e) exprimée en méga-pascal (MPa). Cette limite élastique est une donnée caractérisant ses propriétés mécaniques puisque c'est cela qui importe quand on choisit un acier de construction. Les constructions exigeant toujours une certaine rigidité, les aciers sont toujours choisis avec une limite élastique minimale. Plus cette limite élastique est élevée, moins l'acier est déformable. Exemple : l'acier S235JR. Ce dernier est un acier de construction destiné à un usage général avec une limite élastique minimal de 235MPa. Le S235JR est la nuance la plus courante.

Cette dénomination est suivie d'un indice qui classe l'acier selon sa qualité : JR, J0 (J zéro), J2, J3... Cet indice est la résultante d'un test mesurant une caractéristique mécanique qu'est la ténacité (résilience). Il traduit le comportement d'un acier à qui l'on fait subir des chocs pour mesurer sa déformation et sa résistance avant sa rupture. Ce test, dit test de Charpy, est réalisé à différentes températures (20°, 0°, -20°, -40°) car l'acier se comporte différemment selon la température. C'est un indice important pour mesurer la qualité d'un acier de construction. C'est un indice de risque de propagation de fissure et donc de rupture.

Ainsi, l'acier S235JR a une énergie de rupture (résilience) minimale garantie de 27J à température ambiante. On complète ces indications par d'autres symboles pour bien définir les particularités des aciers : la lettre G indique qu'il y a d'autres caractéristiques à prendre en compte ici :

- G1=acier non calmé
- G2=acier calmé
- G3=acier ayant subi un recuit de normalisation
- G4=état de livraison libre, au choix du producteur

Dans la dénomination S235JRH, la lettre H indique qu'il s'agit d'un profil creux. Avec les anciennes normes, on classait les aciers de construction selon leur résistance à la rupture symbolisait par la lettre A suivi de la résistance à la rupture exprimée en daN/mm² : exemple A37. Puis on les classa selon leur limite élastique symbolisée par la lettre E suivie de la limite élastique exprimée en daN/mm² : exemples : E24 et E36.

L'acier A37 avait une résistance à la traction de 37 daN/mm² soit 370N/mm² soit 370MPa soit 37Kg. [8]

I.4.3 Soudage des aciers courants de construction au carbone

L'opération de soudage se distingue des opérations métallurgiques par le fait que les vitesses d'échauffement sont très élevées, que les températures maximales des différents points des pièces à assembler varient avec leurs distances au joint et que les durées de maintien de ces températures sont très faibles ; de plus, les transformations métallurgiques qui apparaissent au refroidissement, dans la zone fondue et dans la zone thermiquement affectée du joint soudé, s'accompagnent de traitements mécaniques.

Les structures métallurgiques obtenues dépendent principalement des températures maximales atteintes et des durées de refroidissement.

Dans le cas du soudage des aciers au carbone, on distingue quatre zones composant les joints soudés, suivant les températures maximales atteintes.[7]

La (figure.1.5) représente l'évolution des températures maximales, T_{max}, suivant l'axe Y perpendiculaire au joint soudé. Sur cette figure on a reporté les

températures T_f , A_{c3} et A_{c1} , ainsi que les isothermes correspondantes qui délimitent les quatre zones définies comme suit:

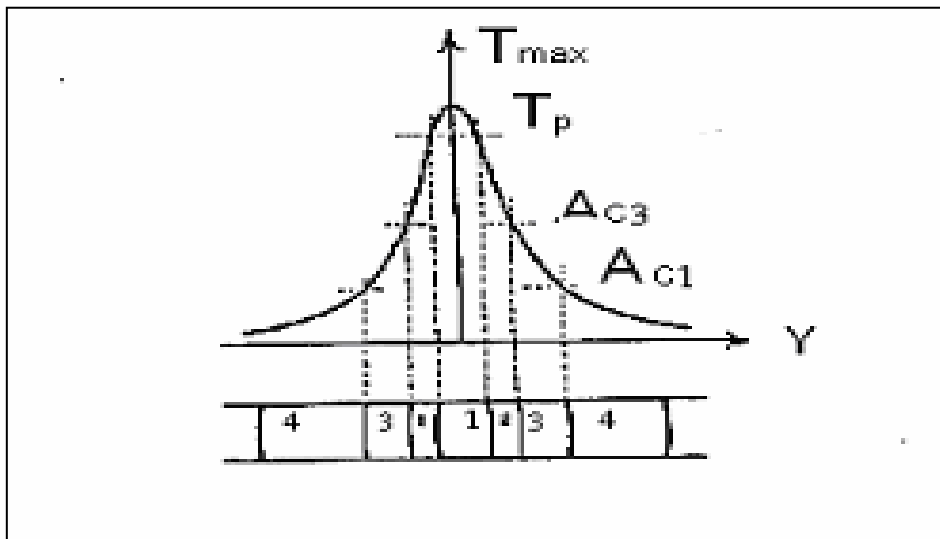


Figure 1.5 . Evolution des températures suivant l'axe Y

1. la zone fondue, pour laquelle la température maximale est supérieure ou égale à la température ambiante de fusion T_f .
2. la zone entièrement austénitisée, pour laquelle la température maximale est comprise entre la température de fusion T_f et la température A_{c3} .
3. la zone partiellement austénitisée, pour laquelle la température maximale est comprise entre les températures A_{c3} et A_{c1} .
4. la zone influente, non austénitisée, pour laquelle la température maximale est inférieure à A_{c1} .

I.4.4 Notion de métallurgie de soudage

La métallurgie du soudage renseigne sur les caractéristiques d'un acier, qui sont fonction de sa structure, de sa composition chimique, la structure étant elle-même liée à la composition de l'acier et du traitement thermique qu'il subit.

Au cours du soudage, une grande quantité de chaleur est apportée localement à la pièce soudée. Cet apport calorifique engendre une phase de chauffage très rapide, à laquelle succède une phase de refroidissement dont la cinétique dépend essentiellement des conditions de soudage.

On peut considérer quatre zones distinctes dans un joint soudé (figure.1.6) :

- Le métal de base (MB)
- La zone affectée thermiquement (ZAT)
- La zone de liaison (ZL)
- La zone fondue (ZF)

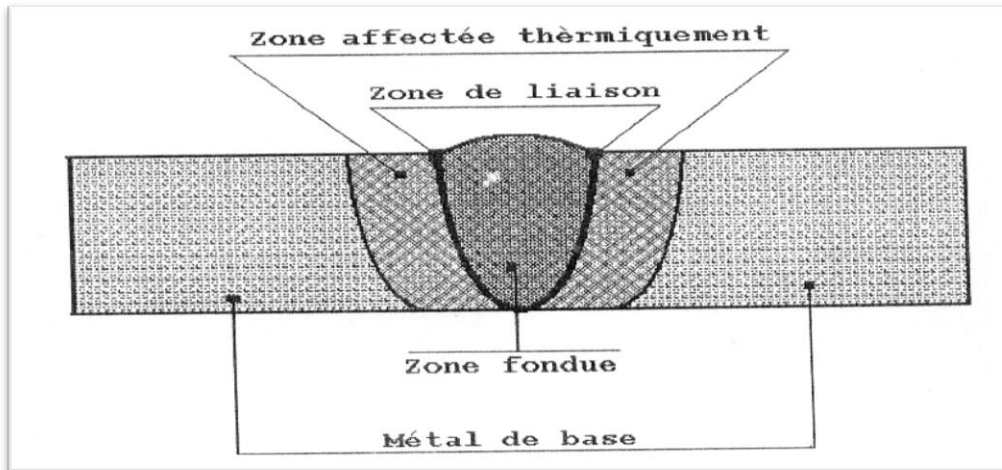


Figure 1.6. Présentation macrographique d'un joint soudé

- **Métal de base (MB) :** Le métal de base, est la partie de l'assemblage qui ne subit aucune action thermique.
- **Zone affectée thermiquement (ZAT):** La zone affectée thermiquement est la portion du métal de base immédiatement voisine de la zone de liaison ; c'est une région qui subit des transformations dues au soudage.
- **Zone de liaison (ZL) :** Cette zone correspond à la limite jusqu'à laquelle le métal de base est porté à la fusion.
- **Zone fondue (ZF) :** Elle est obtenue par la fusion du métal de base avec la participation d'un métal d'apport suivi d'une solidification. [7]

I.5 Les cycles thermiques de soudage

Pendant que la source de chaleur (arc ou flamme) se déplace le long des bords à souder, le matériau environnant s'échauffe, atteint une température maximale, puis se refroidit. L'apport localisé de la chaleur et l'écoulement de celle-ci engendrent des cycles thermiques qui permettent de connaître l'importance des modifications locales créées, donc d'évaluer selon le milieu et les conditions de service, la tenue des constructions soudées dans les zones ainsi affectées.

Pour interpréter les phénomènes qui prennent naissance pendant l'opération de soudage en un point donné de l'assemblage, il faut donc connaître le cycle thermique de soudage, c'est-à-dire la variation de la température Θ en fonction du temps.

La courbe correspondante $\Theta = f(t)$, tracée en un point A voisin d'une soudure (figure 1.7) nous renseigne sur les grandeurs associées au cycle thermique.

- La température maximale atteinte Θ_m
- Le temps de séjour T_s au dessus d'une température Θ_s
- Le temps de refroidissement entre deux température Θ_1 et Θ_2
- $TR(\Theta_1 \Theta_2)$, ou la vitesse de refroidissement V_r à une température Θ_r . [3]

Si on veut accéder à la répartition topographique des modifications de structure aux alentours de la soudure, il faut connaître les courbes qui traduisent la répartition thermique et en particulier la courbe $\Theta_m = f(x)$ (figure 1.8) donnant la variation de la distance x parcourue de part et d'autre de la zone fondue. Chaque phénomène étant caractérisé, comme première condition, par la température Θ atteinte, on peut situer grâce à la courbe $\Theta = f(x)$, la limite extérieure de la zone où ce phénomène est susceptible de se produire.

Ainsi se trouve définie d'une manière générale la zone affectée thermiquement (ZAT). La variation de la température en fonction du temps renseigne sur la nature des phénomènes qu'engendrent les cycles thermiques de soudage en chaque point voisin de la soudure, la répartition thermique pour une bonne interprétation de l'étendue et la topographie de ces phénomènes.

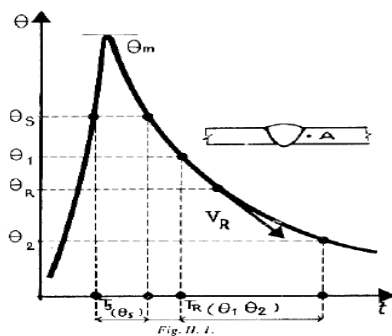


Figure 1.7. $\Theta = f(t)$

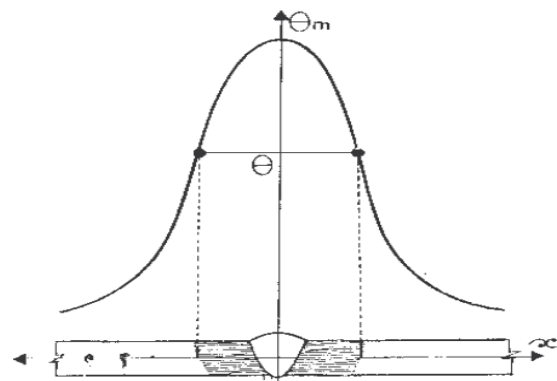


Figure 1.8. $\Theta_m = f(x)$

1.5.1 Soudage avec déplacement de la source

L'installation de thermocouples en des points A_i situés à la même distance d d'un cordon de soudure et à des distances croissantes de l'origine Θ de ce cordon nous permet après relevé des valeurs de tracer la courbe $\Theta_{A_i} = f(t)$ représentée par la figure 1.9.[1]

Cette courbe nous conduit à deux remarques bien spécifiques au soudage avec déplacement de la source de chaleur :

- Θ_m croît avec la distance jusqu'à atteindre une valeur limite avant de se stabiliser, vu que le régime thermique sera bien installé du fait que la vitesse et l'énergie de la source restent constantes.
- Tel Θ_m , les lois de refroidissement deviennent identiques et les courbes de refroidissement peuvent être superposées.

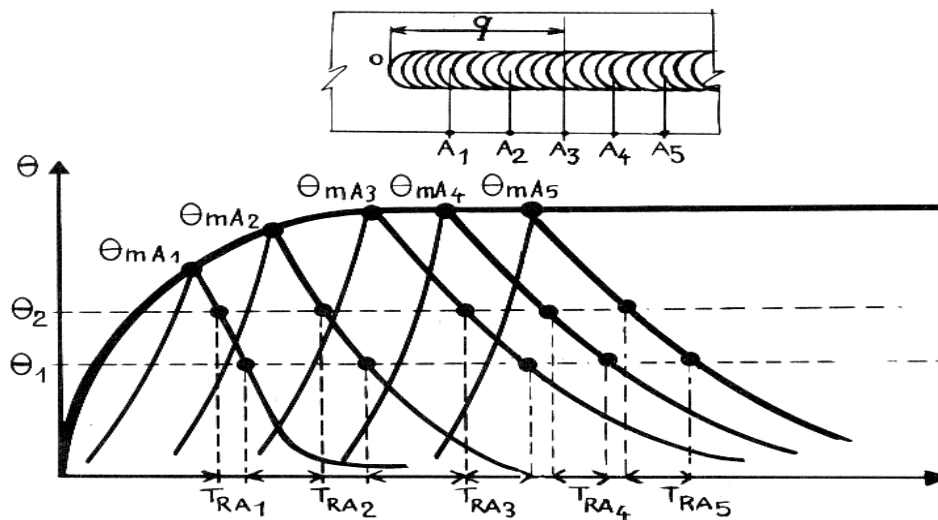


Figure 1.9. $\Theta_{A_i} = f(t)$

Les points A et B précédents s'expliquent par le fait que l'énergie dissipée par conductibilité de la pièce est à chaque instant compensée par l'énergie fournie au niveau de la source de chaleur. Ce régime thermique est dit quasi-stationnaire [13].

Du fait de cette quasi-stationnarité du régime lors du soudage avec déplacement de la source de chaleur, les cycles thermiques pour des points A,B,C... répartis sur une droite xy perpendiculaire à la ligne de soudure, seront identiques le long de cette dernière.

L'allure des courbes (figure. 1.10.) appelle trois remarques :

1. Les courbes température/temps se situent les unes en dessous des autres au fur et à mesure que l'on s'éloigne du cordon de soudure, donc de la source de chaleur.
2. De même, les températures maximales atteintes θ_{mB} sont décroissantes ; mais sont franchies pour des temps T_{mB} croissants.

$$[|T_{mB} - T_{mA}| < |T_{mC} - T_{mB}|] \dots \dots \dots (1)$$

Ceci explique le fait qu'au voisinage de la ligne de soudure les points les plus rapprochés sont entraînés de se refroidir alors que les points éloignés sont en phase d'échauffement.

Cette observation est très importante du fait qu'elle permet une explication à certains phénomènes tenso-thermiques et dans un degré moindre à certaines transformations métallurgiques.

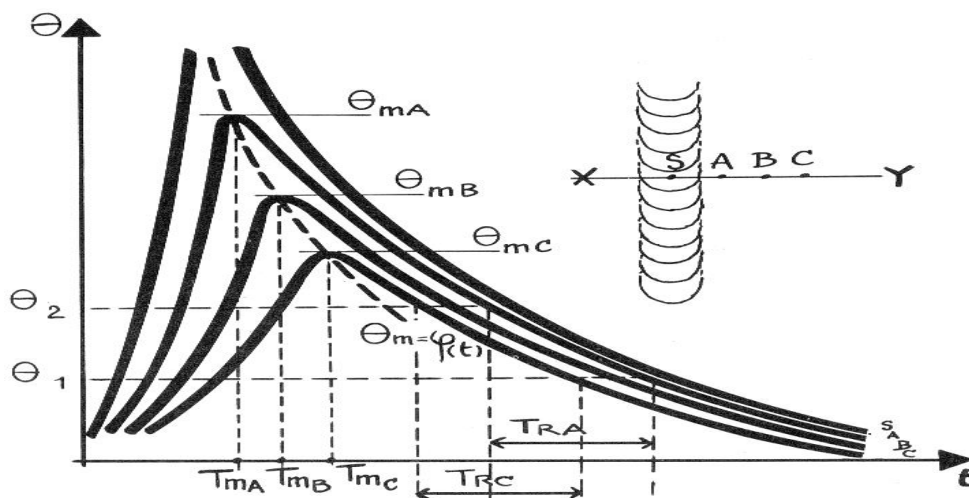


Figure 1.10. $\theta = f(t)$

3. La vitesse de refroidissement décroît au fur et à mesure que le temps croît, ce qui amène les courbes de refroidissement à former un fuseau assez serré, ceci permet de déterminer une vitesse ou un temps de refroidissement associés uniquement au procédé de soudage utilisé [3].

Ce temps de refroidissement ayant comme référence deux températures (800°C et 500°C) détermination du procédé le plus approprié pour une opération donnée. Pour

les aciers, car cet intervalle est particulièrement critique) permet là Il est évident que plus $t_{800-500}$ est long, plus le procédé est indiqué, néanmoins dans certains cas, le temps de refroidissement d'un procédé devient secondaire du fait qu'on procède à un préchauffage.

La température initiale du métal de base joue un rôle important vis à vis du cycle et de la répartition thermique en soudage. Au prix d'une augmentation de la température maximale atteinte et du temps de séjour à haute température, l'augmentation de la température initiale se traduit par un ralentissement du refroidissement : le temps de refroidissement est augmenté qu'il s'agisse du temps total de refroidissement ou $T_{800-500}$ (figure 1.11).

Néanmoins il faut veiller à ne pas exagérer le préchauffage, car cela peut provoquer une surchauffe du métal de base très néfaste sur la qualité du produit fini.

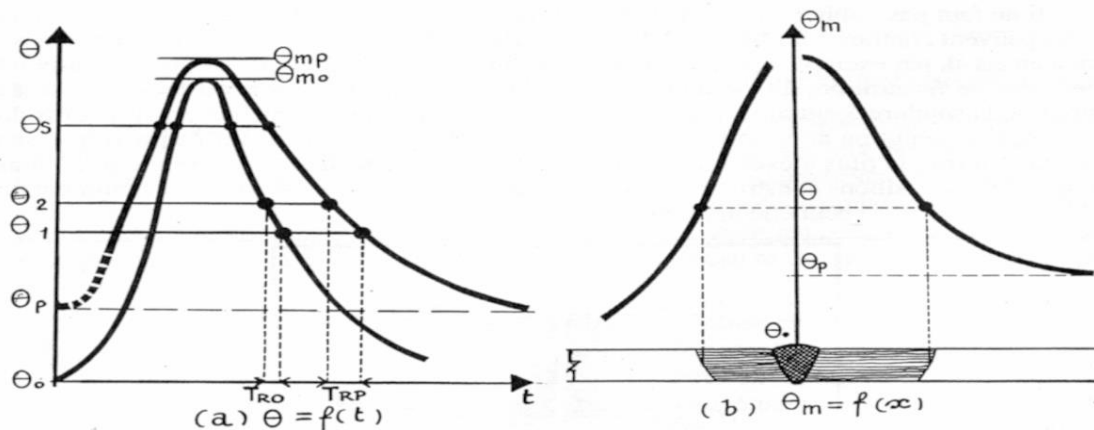


Figure 1.11. Influence du préchauffage sur la vitesse de refroidissement

En présence des soudures en multi passe, l'évolution de la température au cours du soudage dépend essentiellement :

- De la température initiale
- Du nombre, de la disposition des passes et de leurs conditions d'exécution
- De l'intervalle de temps écoulé entre passes.[13]

I.5.3 Solidification et transformations dans la soudure

L'opération de soudage induit une multitude de phénomènes métallurgiques du fait qu'elle couvre des domaines énergétiques élevés provoquant ainsi des variations importantes de la température du matériau. Ces phénomènes peuvent avoir lieu à

l'état liquide (bain de fusion) ou à l'état solide au cours de l'échauffement et du refroidissement. Les conséquences directes sont aussi importantes que les phénomènes générés car elles agissent sur le degré de faisabilité de l'opération, autrement dit sur la soudabilité du matériau.

I.6. Soudabilité et notion de carbone équivalent :

Le phénomène de trempe a pour facteur essentiel le carbone, néanmoins les éléments d'alliages favorisent eux aussi la trempabilité. Une formule exprimant le pouvoir trempant de l'acier en fonction de ses constituants a été établie. Elle tend à remplacer la teneur réelle en carbone par un nombre dit : carbone équivalent noté C_{éq} qui reflète mieux le pouvoir trempant de l'acier du fait qu'il tient compte de l'action des éléments alliés sur la trempabilité. [7]

$$C_{éq} = C + Mn/20 + Ni/15 + (Cr + Mo + V) / 10 \dots\dots\dots(2)$$

Le tableau suivant donne la soudabilité à l'arc à l'électrode enrobée basique :

TABLEAU 1.1 : Données sur la soudabilité en fonction du carbone équivalent

C _{éq} pour soudage à l'arc à l'électrode Enrobée basique	Soudabilité
C _{éq} < 0,25	Excellente
0,26 ≤ C _{éq} ≤ 0,30	Bonne
0,31 ≤ C _{éq} ≤ 0,35	Moyenne
0,36 ≤ C _{éq} ≤ 0,40	Mauvaise
0,41 ≤ C _{éq} ≤ 0,45	Très mauvaise
C _{éq} ≥ 0,46	Impossible

Chapitre II
Défauts et
contraintes

De

l'opération de

soudage

II.1 Introduction :

La majeure partie des discontinuités se produisent dans les joints ou dans la ZAT, les soudures comportent des porosités, des inclusions, scories d'impuretés ou des fissures. Parmi ces trois défauts, les fissures sont de loin les plus déterminantes. S'il y a des limites acceptables pour les inclusions et les porosités, les fissures restent inadmissibles. Pour les propos de ce paragraphe, la Fissure se distingue d'un autre défaut comme la cassure ; Les soudures casent à cause des contraintes, mauvaise conception du joint, ou fatigue, la fissure en cause ici est due à la solidification, le refroidissement des tensions dues au retrait du joint.

Les facteurs de défaillance des assemblages soudés sont de trois ordres différents [9]

- Facteur technologique : facteurs associés à l'exécution des soudures.
- Facteur métallurgique : facteurs associés à l'altération métallurgique due au soudage.
- Facteur mécanique : facteurs associés au dimensionnement des cordons et au tracé des ensembles soudés.

II.1.2 Les principaux défauts de soudures :

Les défauts les plus importants qui risquent de donner lieu à une reprise du joint ou à mise en cause de la résistance de ces derniers sont :

II.1.2.1 Les inclusions gazeuses :

Elles sont causées par la présence de gaz résultant des réactions chimiques dans le métal d'apport et dans les enrobages, par l'humidité des pièces ou des électrodes. Les moyens d'éviter ces défauts sont :

- Utilisation d'aciers calmés.
- Utilisation d'électrodes soumises à des tests d'agrégation.
- Séchage des pièces avant soudage.
- Séchage des électrodes à 400°C et conservation à 100°C avant soudage.

II.1.2.2 Les inclusions solides :

Ce sont les restes de laitier ou d'autres matières étrangères au joint, disposantes entre les passes ou au croisement de deux ou plusieurs soudures. Pour les éviter, il faut un nettoyage convenable des cordons, et un choix d'électrodes d'un diamètre correspond à l'épaisseur des pièces dessouder.

II.1.2.3 Défauts de fusion (collage) :

Elles sont causées par une intensité très faible du courant de soudure ; vitesse très rapide ne permettant pas la fusion du métal. Pour les éviter, il faut faire un choix judicieux de l'intensité du courant et la vitesse d'avancement de l'électrode.

II .1.2.4 Défauts de pénétration :

Ils sont dus à une absence de métal à la racine des chanfreins, à cause d'utilisation d'électrode de diamètre trop important, intensité trop faible du courant de soudage, mauvaise préparation des pièces à souder. Pour les éviter, il faut un bon choix de l'intensité du courant de la vitesse d'avancement, et une préparation adaptée aux conditions de soudage.

II.1.2.5 Sillons aux caniveaux et morsures en surface :

Ce sont, des rainures ou des gorges à la surface des pièces, le long des bords des joints soudés. Ils sont le fait d'une énergie de soudage trop importante ou d'une mauvaise position du fils de l'électrode. Pour les éviter, il faut un choix judicieux de l'énergie de soudage, de la position de l'électrode, et de la température des pièces pendant le soudage.

II.1.2.6 Retassures de cratère :

Ce sont des cavités à l'extrémité des cordons, souvent remplies de laitier et pouvant donner lieu à fissuration. Elles sont causes par une solidification rapide du métal après interruption de l'arc.

Pour les éviter, il faut un contrôle visuel pendant le soudage, interruption progressive de l'arc en fin d'exécution des cordons. [10]

II.1.2.7 Fissurations :

Elles sont définies par la présence de fissures dans le métal fondu ou dans la zone affectée thermiquement (ZAT), Ou dans la zone de liaisons à la jonction de la zone fondue (ZF) et du métal de base, on trouve trois types de fissuration :

- Dans le métal de base : l'arrachement lamellaire.
- Dans la ZAT :

La fissuration à froid survient après que le métal est refroidi (aussi appelée fissuration différée) et la fissuration au réchauffage.

- Dans la zone fondue :

Les fissurations à chaud, surviennent aux températures élevées sont relatifs à la solidification. Pour réduire ou écarter le risque de fissuration, le niveau de contraintes résiduelles doit être réduit au minimum en agissant sur les séquences de soudage, le taux d'hydrogène diffusible dans le bain de fusion aussi bas que possible et la durée de refroidissement (ΔT 800 - 500) suffisante pour l'obtention d'une structure favorable.

II.1.3 Les fissures :

II.1.3.1 Fissuration à chaud :

C'est une fissure qui se développe quand la soudure se refroidit, elle se situe généralement en plein centre du cordon. Caractérisé par une séparation au milieu du joint, cas des passes uniques, pour les passes multiples ou plusieurs joints sont effectués par bande, la fissure centrale est souvent au milieu de l'ensemble du cordon.

On sait que Toute solidification d'un métal ou d'énallage s'accompagne d'un retrait, la zone fondue des soudures n'y échappe pas, de telle sorte qu'immédiatement en arrière du bain de fusion le métal qui vient de se solidifier est soumis d'abord à ce retrait à la solidification, puis au retrait d'origine purement thermique qui s'y superpose la compensation de ce retrait par un déplacement du métal de base avoisinant n'est jamais complète (un bridage se produit alors), de telle sorte qu'une déformation plastique à haute température est imposée de proche en proche au métal fondu tant dans le sens transversal que dans le sens longitudinal. La fissuration à chaud affecte les soudures rapides à bain de fusion élançée surtout quand la ductilité à chaud du métal fondu est insuffisante. Les fissures à chaud sont dues à l'association de plusieurs facteurs :

- Facteurs métallurgiques (Ségrégation ou hétérogénéité).
- Facteurs géométriques et tenso-thermiques (Géométrie du cordon).

Ces phénomènes sont présents dans le même type de fissure, il est difficile d'identifier la cause, parfois ces phénomènes interagissent.

II.1.3.1 Facteurs métallurgiques (Ségrégation) :

Elle intervient quand le point de fusion des constituants tels que Phosphore, zinc, cuivre, composés sulfureux, est bas, dans le mélange séparé durant le processus de solidification. Et sont forcés vers le centre du joint, depuis ce sont les derniers à se solidifier et le joint tend à la séparation une fois le métal solidifié rétrécit depuis le centre et peut donner naissance à des fissures.

Si l'agent contaminant (entraînant la fissuration) provient du métal de base, la première considération est de limiter le pique du produit coupable, et ce par la limitation de la profondeur de soudage par l'application de courants faibles. La deuxième considération est de déposer un lit de métal d'apport par un soudage à basse énergie avant de souder, ce qui réduit le taux de matière contaminants.

Un autre type d'hétérogénéité que l'on peut observer tient au fait qu'au long de son déplacement, le bain de fusion collecte sur ses rives les impuretés ou inclusions diverses que peut composer le métal de base, si ces impuretés sont fusibles et solubles on les retrouvera à l'état ségréguées dans le métal solidifié, comme c'est le cas pour la calamine des aciers, qui peut ainsi provoquer la fissuration du métal fondu.

Si elles sont réfractaires elles se collectent dans le bain de fusion puis finissent sur les rives du cordon de soudure, dont elles peuvent modifier la forme par leur effet sur la tension superficielle du métal fondu.

La fissuration longitudinale, aisément visible sur une coupe transversale, toujours détectable par ultrasons, moins systématiquement par radiographie, peut ou non déboucher à la surface des cordons, selon qu'elle prend plus ou moins l'allure d'une retassure. La fissuration à chaud ne présente pas de délais d'apparition. [11]

II.1.3.2 Facteurs géométriques et tenso-thermiques :

Ce sont des facteurs liés aux conditions d'exécution et aux propriétés des matériaux de mise en œuvre à la fois. Il y a aussi d'autres intervenants on peut citer :

- La limite d'élasticité du métal d'apport.
- Le degré de bridage du joint soudé.
- Les contraintes dues à une structure de trompe dans la ZAT.
- Le volume du bain de fusion. (Cordon de soudure trop petit.
- Ouverture du : chanfreine, exemple : chanfrein inférieur à 60°.
- La vitesse d'exécution excessive.

La structure grossière que l'on obtient risque de conduire à une fissuration de la zone fondue si le rapport largeur du bain à la profondeur du bain n'a pas une valeur suffisante. Quand le joint soudé est au-dessus d'une forme qui est plus profonde que la largeur, le grain solidifié s'accroît perpendiculairement à la surface.

On remarque que pour les joints possédant une profondeur assez importante par rapport à la largeur et quand chaque passe est plus large que sa profondeur alors une fissure peut prendre naissance.

Il faut donc changer la largeur en fonction de la profondeur, ceci peut être accompli en utilisant de petits ampérages à gros diamètre, toutes ces approches tendent à réduire la densité du courant et de limiter la pénétration. Du point de vue du profil du joint, pour une soudure dont le profil présente une surface concave, des contraintes dues au retrait interne placent le métal en surface sous des tensions, inversement, si des surfaces convexes sont créés, les forces de retrait interne poussent la surface en compression, les soudures concaves sont le fruit d'un haut voltage, une légère baisse en voltage cause une légère tendance à une forme convexe et d'éliminer les tendances à la fissuration.

Les vitesses de passes élevées influent également dans le même sens. Une réduction de la vitesse de passe augmente le sommet du joint et permet le retour vers des profils convexes ; le soudage descendant a tendance à générer ce type de défauts (fissures concaves) par contre le soudage montant peut remédier à cette situation en attribuant plus de convexité. [11]

II.1.3.3 Fissures par arrachement lamellaire :

Les fissures de ce type sont conséquence d'une fissuration qui se produit parallèlement à la « peau » d'un produit laminé, au droit d'une soudure sollicitant le joint soudé dans la direction de l'épaisseur .

La fissure prend naissance par décollement suivant les plans d'inclusions le métal de base, pour des épaisseurs supérieures à 25 MM. Remèdes : Importance d'une bonne conception du joint soudé et le choix d'un acier ayant un minimum d'inclusions.

II.1.3.4 Fissures à froid :

C'est de loin, le défaut le plus redouté dans le soudage des aciers, les fissures à froid peuvent survenir dans la zone fondue ou dans la zone thermiquement affectée ou atteinte. L'apparition des fissures à froid est très souvent différée dans le temps, c'est à dire longtemps après soudage. Même après le refroidissement de la soudure à la température ambiante, un certain temps peut s'écouler avant que la fissuration n'arrive.

Il peut s'agir de quelques minutes à plusieurs heures. Dans certains cas extrêmes, on a même observé la formation des fissures de deux jours à plusieurs semaines après le soudage. Les fissures à froid dans la zone fondue peuvent se situer suivant une orientation quelconque par rapport à l'axe de la soudure, sont en général situés parallèlement à la ligne de fusion, c'est surtout lors de la première passe de soudage (passe de fond) que naissent les risques de fissuration et lors de la dernière passe pour les fissures au raccordement.

On rencontre les fissures à froid sous plusieurs aspects :

- Fissure à la racine
- Fissure au raccordement entre deux passes.
- Fissure au raccordement
- Fissure sous cordon

II.1.3.4.1 Les fissures transversales :

C'est le moins souvent rencontré parmi les soudures, il est généralement associé au soudage des métaux durs et alliés. Ce type de fissures peut aussi être assisté par l'hydrogène comme dans la ZAT déjà décrite, c'est aussi dû à la microstructure

sensible, contraintes résiduelles, la différence c'est que les fissures transversales sont dues aux contraintes résiduelles longitudinales.

Une fois le cordon de soudure rétrécis longitudinalement, le métal de base voisinant reste à cette force en se comprimant, la dureté entourant le métal en compression emprisonne (limite) le retrait exigé du métal déposé. A cause des contraintes du métal de base autour, le métal déposé développe des contraintes longitudinales, qui facilitent la fissuration dans la direction transversale.

Quand une fissure transversale est rencontrée, on pense à réduire le taux d'hydrogène par la révision des conditions de stockage des produits de soudage, une réduction de la dureté du métal déposé doit pouvoir résoudre le problème des fissures transversales, un préchauffage doit pouvoir alléger l'effet des fissures transversales, le préchauffage assiste l'hydrogène diffusé et rallonge la longueur du joint de soudure, réduit les contraintes appliquées par le retrait et lie le métal déposé au métal de contact.

II.1.3.5 Fissures de la ZAT :

Les fissures de la ZAT sont caractérisées par la séparation qui survient immédiatement à la zone adjacente au joint quoi qu'il soit relié au processus de soudage, la fissure survient au métal de base et non au produit du soudage. Ce type de fissures connu sous les noms de : fissure sous joint, fissure d'orteil, fissure différée, car ces fissures surviennent après que le métal est refroidi au voisinage de 400°C, on peut les appeler fissures froides, par ce que ces fissures sont associés à l'hydrogène, sont appelées aussi fissures assistées par l'hydrogène. [12]

Pour provoquer une fissure dans la ZAT, trois conditions doivent être respectées simultanément :

- Un taux d'hydrogène suffisant.
- Un taux suffisant de sensibilité du matériel (matériau) utilisé.
- Un taux suffisant de tensions résiduelles ou appliquées.

Pratiquement on peut contrôler deux conditions, notamment le niveau d'hydrogène et la sensibilité du matériel.

L'humidité et les composés organiques sont les sources essentielles de l'hydrogène, ils peuvent être dans l'atmosphère, présents sur l'électrode ou sur les matériaux de l'emballage, le flux protecteur de l'arc, tout dépend des conditions de stockage. Pour limiter la quantité d'hydrogène dans le métal déposé, les consommables doivent être proprement déposés et le soudage doit être pratiqué sur des surfaces propres et sèches.

La concentration de l'hydrogène après le soudage immédiatement est élevée, si l'hydrogène entraînant la fissuration doit intervenir, il doit généralement se produire après quelques jours de la fabrication, et prendra de même pour voir les fissures grandir à une taille suffisante pour leur détection.

Le taux de diffusion peut être approximé à :

- 450°F, l'hydrogène diffuse à un taux de 1 pouce/h.
- 220°F, l'hydrogène diffuse à un taux de 1 pouce/ 48 h.
- A l'ambiante, l'hydrogène diffuse à un taux de 1 pouce/ 2 semaines.

Il est possible d'appliquer un traitement post soudage couramment appelé (post-chauffage) qui consiste à chauffer la soudure à 400°F, conserver pendant 1h/pouce d'épaisseur, à cette température, l'hydrogène est convenablement redistribué par une diffusion ce qui permet d'éviter le risque de fissuration. Pour rendre efficace le post-chauffage, il doit être appliqué avant que la soudure soit laissée refroidir à l'ambiante.

Les conditions favorables au développement d'une microstructure sensible à la formation des fissures sont les (allures) vitesses de refroidissement et les taux de durcissabilité (trempabilité) élevées, ces courbes sont favorisées par des températures basses des processus de soudage, les épaisseurs du métal de base, la basse température du métal de base, tandis que le taux de durcissement est dû au taux de carbone et/ou les éléments d'addition. [12]

La manière effective pour réduire les courbes de refroidissement est de pratiquer un préchauffage ce qui réduit le gradient de température, et diminue le taux de refroidissement et limite la formation des structures sensibles. Les (Figures II. 9 et II.10) montrent quelques fissures à froid typiques et leurs emplacements les plus courants. Les fissures de cratère qui se produisent durant la solidification ont plus tendance à se former dans un cratère allongé, Figure (5) où la croissance des grains de

solidification se fait à partir de chaque côté du joint de soudure et perpendiculairement à l'axe de la soudure. Ceci crée, au centre là où les grains se rencontrent, un plan sujet au fendillement au moment du retrait du métal. Un petit cratère circulaire avec des lignes de solidification radiales .[13]



Fig. II.1.- Fissure dans une Soudure en T :

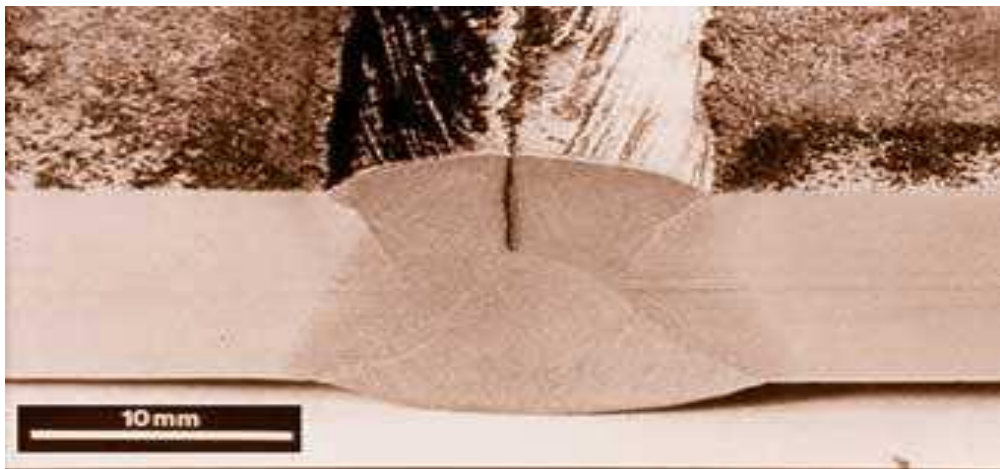


Fig. II.2.-Fissure dans une Soudure en V é double

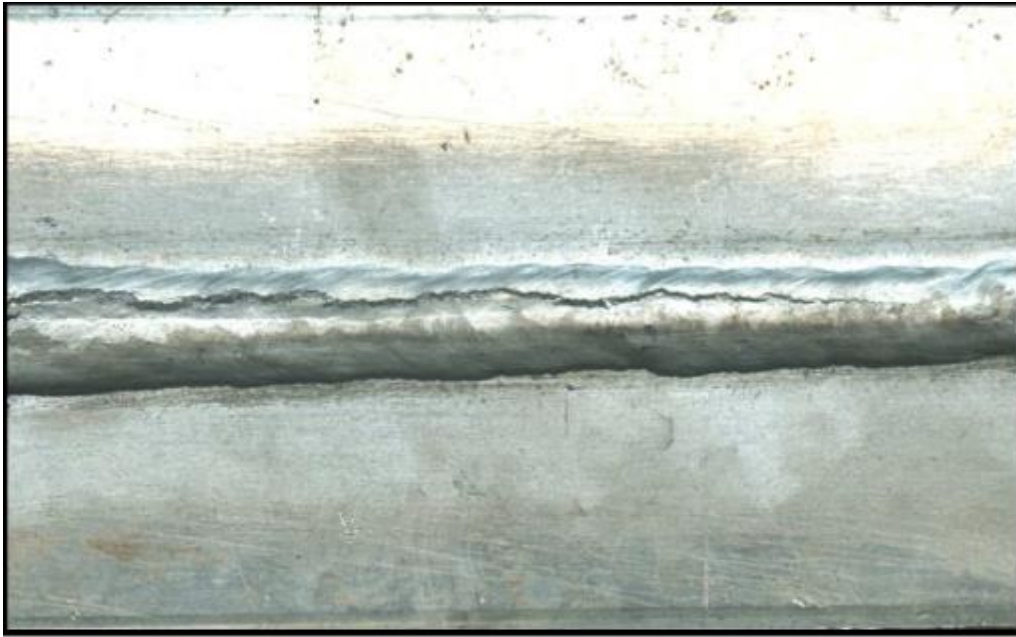


Fig. II.3- Assemblage en aluminium, bout à bout sur bords droits sans préparation Plaque 6.4mm x 75mm x 125mm, voltage trop haut (26 volts- 230 ampères).

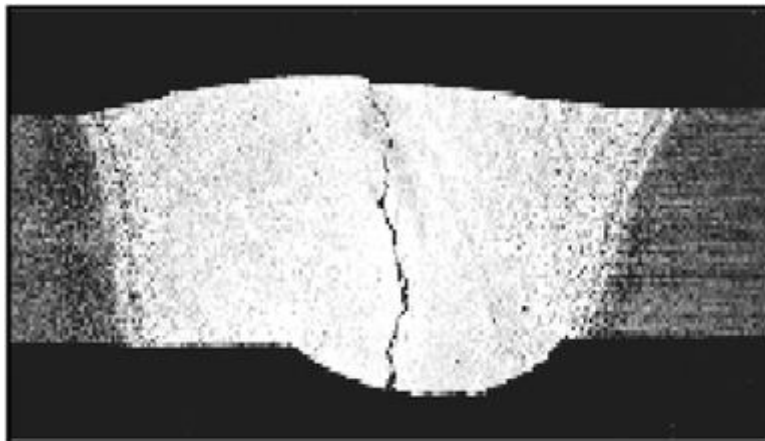


Fig. II.4- Fissures à chaud ou de solidification

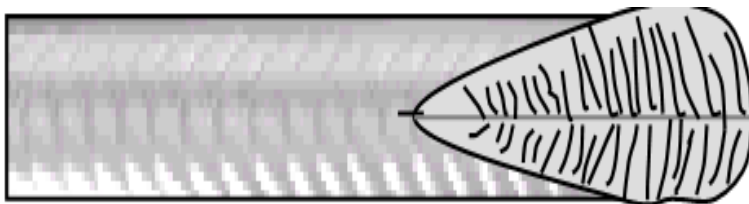
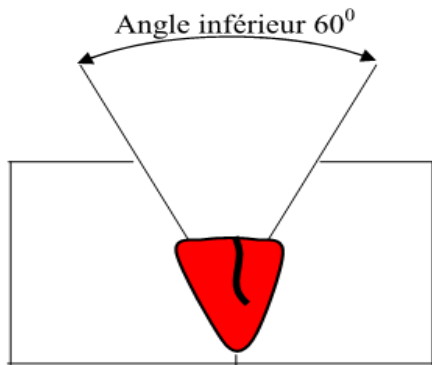


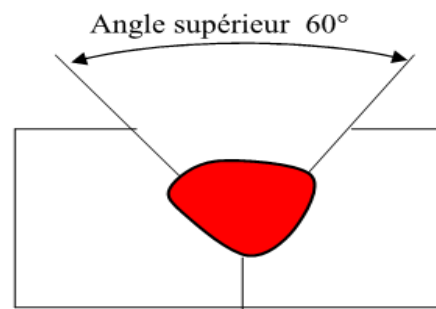
Fig. II.5- Forme du cordon lors d'un soudage rapide



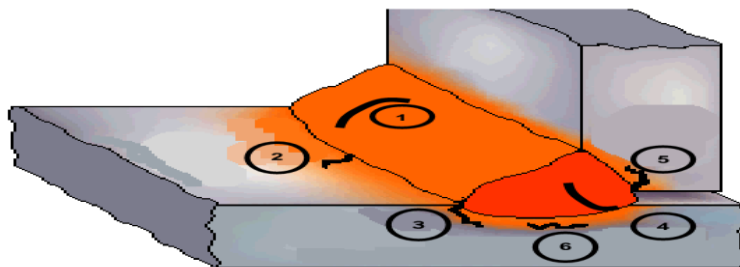
Fig. II.6- Forme du cordon lors d'un soudage lent



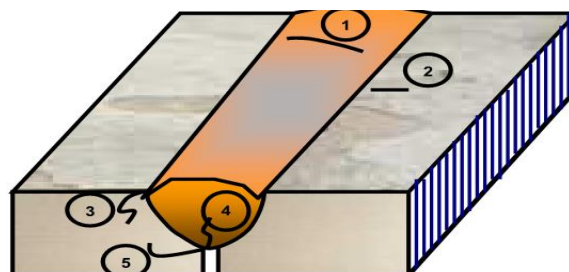
**Fig. II.7- Chanfrein trop fermé Avec
Courant de soudage excessif**



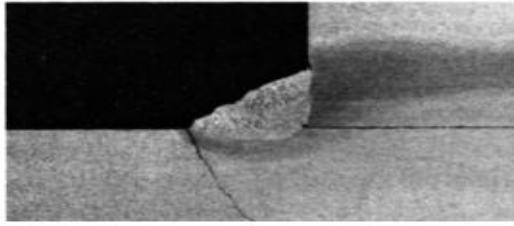
**Fig. II.8 - Chanfrein ouvert”
Avec courant de soudage faible**



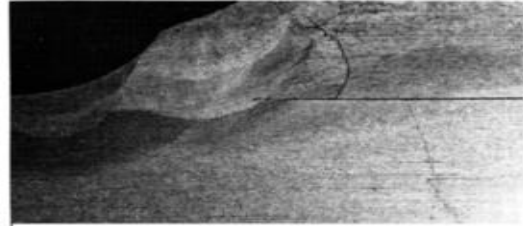
**fig. II.9 – Figure représentant les positions des fissures à froid couramment
observées dans les soudures en T :**



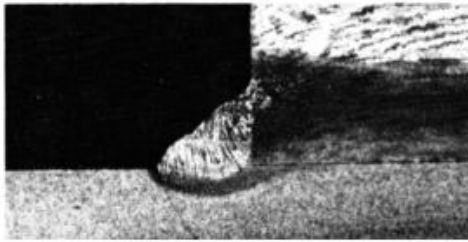
**Fig. II.10- Figure représentant les positions des fissures à froid couramment
observées dans les soudures bout à bout**



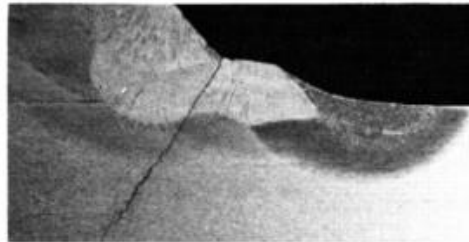
Fissure au raccordement



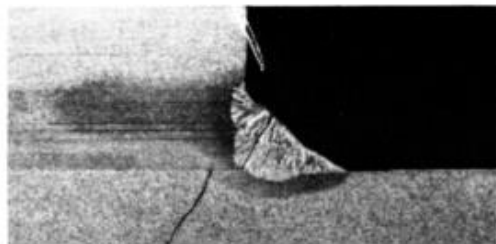
Fissure à la racine



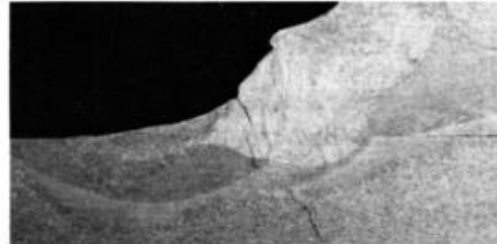
Fissure au raccordement après
Grenailage



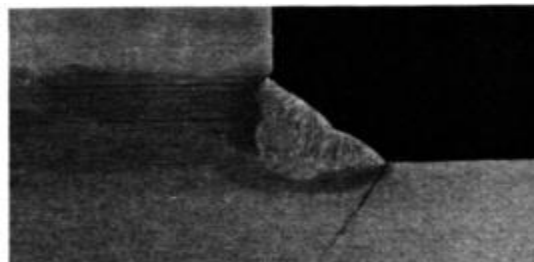
Fissure transversale dans la ZF et dans
la ZAT



Fissure transversale dans la ZF et
ZF et dans la ZAT



Fissure transversale dans la ZF et dans la ZAT
après refonte TIG



Fissure au raccordement après sablage

fig. II.11 - Positions des fissures à froid couramment observées dans les soudures en T

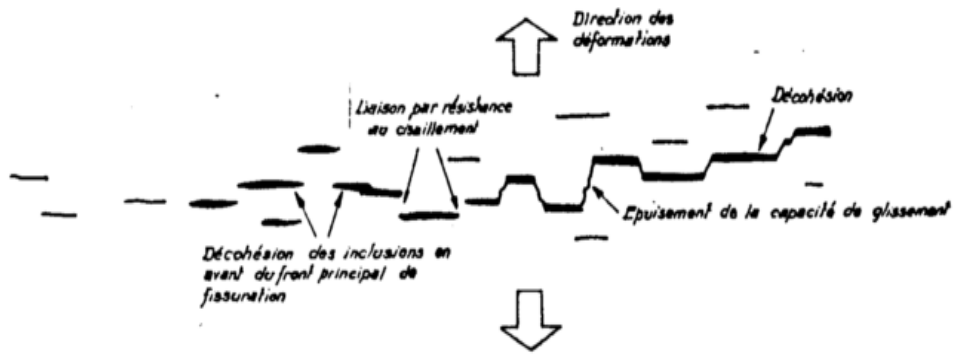


Fig. II.12 - fissure par arrachement lamellaire dans le métal de base

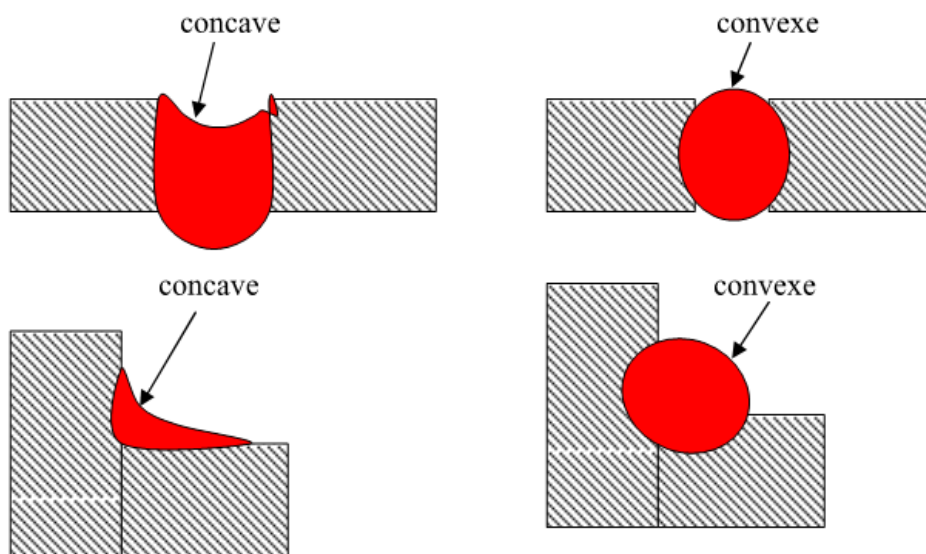


Fig. II.13-Fissures concaves et convexes

II-2. Déformations et contraintes induites par le soudage :

II-2.1. Contraintes résiduelles dans les assemblages soudés :

Les déformations de retrait n'étant pratiquement jamais libre, il existe dans tous les assemblages soudés des contraintes résiduelles soit de traction ou de compression, dont l'importance peut avoir des conséquences néfastes pour la sécurité d'un assemblage soudé. On peut distinguer quatre types de contraintes :

II-2.1.1 Contraintes résiduelles directes :

Elles sont dues aux déformations de retrait empêchées dans le joint soudé, ces contraintes n'affectent que la zone au voisinage immédiat du cordon de soudure. Il est impossible de les éviter ; elles résultent de la répartition non uniforme du flux thermique dans l'assemblage soudé.

II-2.1.2 Contraintes résiduelles indirectes, ou de bridage :

Elles sont dues au bridage de l'ensemble soudé, qui s'oppose aux dilatations et aux retraits. Ces contraintes affectent l'étendue de chaque élément de l'ensemble de manière uniforme.

II-2.1.3 Contraintes parasites (extérieures à l'opération de soudage)

Ce sont celles qui s'exercent sur le joint soudé pendant l'opération de soudage par exemple, masse de l'ensemble en porte à faux pendant le soudage. On peut les réduire considérablement, sinon les annuler, en adoptant des dispositions en conséquence. [14]

II-2.1.4 Contraintes résiduelles directes longitudinales dans les assemblages bout à bout

Dans le cas des soudures bout à bout on peut considérer que la valeur des contraintes longitudinales (σ_L) atteint la limite d'élasticité du matériau dans une zone égale environ à 6 fois celle du métal fondu.

Pendant le soudage, le métal de base qui se trouve dans la zone du cordon de soudure est portée à haute température, et sa dilatation est entravée par les zones où

le métal est pratiquement froid ; les fibres longitudinales sont refoulées à chaud et exercent, après refroidissement, une traction sur le métal de base.

Après soudage le joint se trouve tendu dans le sens longitudinal, ainsi dans le cordon de soudure et dans ses abords, [15]

II-2.2. Classification des contraintes résiduelles :

Suivant l'origine, l'amplitude et le volume de matière concernée, trois types de contraintes résiduelles sont distingués :

II-2.2.1. Les contraintes d'ordre 1 ou macro-contraint

Elles peuvent exister dans un matériau, non soumis à des chargements mécaniques extérieurs, par suite de la présence d'une déformation plastique hétérogène subie initialement ou d'une déformation d'origine interne due à l'existence de gradient thermique, variations locales de densité par apparition de phases métallurgiques nouvelles...

II-2.2.2. Les contraintes d'ordre 2 ou micro-contrainte.

Elles sont dues à la présence de dislocations dans le matériau. Elles intéressent un volume beaucoup plus petit que les contraintes précédentes et modifient les caractéristiques mécaniques du matériau (limite d'élasticité, résistance à la traction...).

II-2.2.3. Les contraintes d'ordre 3

Elles intéressent un volume de matière encore plus petit. Elles sont dues à la présence d'atomes étrangers, de diamètre différent que celui des atomes de la matrice, en substitution dans le réseau cristallin. Leur zone d'influence ne dépasse pas quelques distances inter atomiques. [16], [17]

II-3. Influence des contraintes résiduelles sur le comportement mécanique d'un ensemble soudé :

II-3.1. Résistance statique de l'ensemble :

Les contraintes résiduelles s'auto-équilibrent et l'on admet généralement qu'elles n'ont pas d'influences défavorable sur le comportement statique de

l'ensemble, à condition qu'une quantité suffisante de métal déposé assure une résistance convenable (sans fissure, ni amorce de rupture).

Il existera toujours à côté de contraintes résiduelles de même signe que la charge de service, d'autres contraintes résiduelles de signes opposés et qui agiront dans le sens favorable. Lorsque de légères déformations plastiques se produisent sous l'effet des charges de service dans les zones les plus sollicitées, les contraintes résiduelles tendent à disparaître.

II-3.2. Risques dus aux contraintes résiduelles Structures soumises au flambement (ou flambage) :

Les contraintes résiduelles, et surtout les déformations entraînent une diminution des charges admissibles sur les éléments soumis au flambement, les coefficients de flambement sont plus importants pour les ensembles soudés que pour les laminés ; les contraintes résiduelles peuvent donc réduire la valeur de la charge admissible, et se combiner avec les contraintes de service et, le cas échéant, avec des contraintes parasites dues à l'exécution ou au montage de l'ensemble.

II-3.2.1. Structures soumises au risque de rupture fragile :

Lorsqu'un élément d'une structure est soumis à des contraintes multidirectionnelles de traction, il ne peut se déformer plastiquement. Dans ce cas, si la rupture se produit elle a lieu brutalement par décohésion rupture fragile. Parmi les facteurs qui rendent un acier sensible au risque de rupture fragile on note entre autre le niveau des contraintes de traction auxquelles est soumis le métal.

Les contraintes résiduelles du soudage, qui sont très souvent multidirectionnelles viennent s'ajouter aux contraintes de service qui peuvent conduire à une rupture fragile. Il est donc très important, à chaque fois que cela est possible de diminuer au maximum l'importance des contraintes résiduelles, Surtout si le joint soudé doit travailler à la fatigue [14].

II-4. Origine des contraintes résiduelles :

Les contraintes résiduelles (d'ordre 1) apparaissent à la suite de déformations plastiques non uniformes qui peuvent être d'origine mécanique, thermique, chimique ou par une combinaison de ces traitements

II-4.1. Origine mécanique :

Les contraintes résiduelles (d'ordre 1) apparaissent à la suite de déformations plastiques non uniformes qui peuvent être d'origine mécanique, thermique, chimique ou par une combinaison de ces traitements [18].

II-4.2.1. Origine mécanique :

Lors des opérations mécaniques, comme l'usinage, le forgeage, le perçage, le soudage..., des contraintes résiduelles peuvent prendre naissance. Elles sont dues soit aux déformations plastiques hétérogènes induites par ces opérations soit aux gradients thermiques causés par ces mêmes opérations.

En effet, l'usinage et plus particulièrement la rectification qui est un mode d'usinage permettant d'effectuer la finition de nombreuses pièces mécaniques s'accompagne généralement d'un dégagement de chaleur susceptible d'engendrer un état de contraintes résiduelles [19].

II-4.2.2. Origine thermique liée à la trempe

Lors des traitements thermiques et notamment pendant la trempe, des contraintes résiduelles peuvent être induites par :

- les gradients de température provoqués par le refroidissement,
- les transformations structurales,
- les comportements différents de zones d'un matériau non homogène (ségrégation, textures.)

Le passage d'une phase à une autre s'accompagne d'une variation de volume liée à l'accommodation des systèmes cristallins, ce qui peut donner naissance aux contraintes résiduelles.

II-4.2.3. Origine chimique :

La formation de couches superficielles minces dans les métaux par nitruration, cémentation et oxydation, crée au sein même de ces couches et à l'interface métal de base - couche de contraintes résiduelles importantes [19].

Sous certaines conditions, le phénomène de diffusion de certains éléments conduit à l'apparition de zones à compositions chimiques différentes. Ces zones ne satisfont plus aux mêmes lois de dilatation et deviennent le siège de contraintes résiduelles.

II-5. Contraintes résiduelles dans les joints soudés hétérogènes :

Suivant leur nature, les contraintes résiduelles qui apparaissent surtout lors de l'opération du soudage du joint, peuvent avoir des effets bénéfiques ou non sur la qualité des joints réalisés. En effet, les contraintes de tension favorisent l'amorçage de fissures qui se propagent et finissent par provoquer la destruction du joint, alors que les contraintes de compression permettent d'en diminuer la vitesse de propagation.

II-5.1. Nature de ces contraintes résiduelles :

Dans la littérature il est mentionné que les contraintes résiduelles dans les joints soudés se distribuent comme l'indique la (figure II.14)

Les profils de ces contraintes montrent qu'il y a succession de zones en compression et de zones en traction. En l'absence de toute sollicitation extérieure, ces zones se compensent.

Plusieurs études montrent que le cordon de soudure ou plus précisément le pied du cordon est un lieu privilégié de concentrations de contraintes résiduelles qui peuvent atteindre des valeurs proches de la limite d'élasticité du matériau à la température considérée et réduire ainsi la résistance, notamment à la fatigue, du joint soudé hétérogène. [20], [21] et [22]

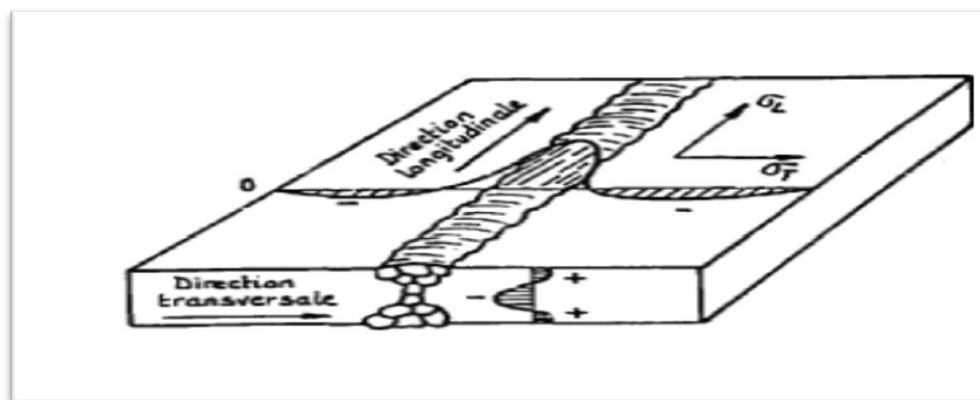


Fig. II.14 Distribution des contraintes résiduelles dans le sens longitudinal et transversal.

II-5.2. Amélioration de la tenue des joints soudés :

Deux démarches sont à considérer pour permettre une amélioration de la tenue des joints soudés :

- Améliorer la forme du pied du cordon de soudure et soigner les conditions de soudage pour éviter l'apparition de défauts au cours du soudage,
- Modifier le champ de contraintes locales par relaxation des contraintes résiduelles de tension et par l'introduction de contraintes résiduelles de compression.

II-5.2.1. Modification de la géométrie du cordon :

Dans la littérature on montre que le facteur de concentration de contraintes dans le pied de cordon est donné par la relation suivante dont les symboles sont explicités sur (figure. II.15). [23]

$$K_t = \frac{1 - \exp(-0.90 * 20 \sqrt{1 + \frac{t}{2h}})}{1 - \exp(-0.90 * \pi \sqrt{1 + \frac{t}{2h}})} * \left(\frac{4}{2.8 \left(1 + \frac{2h}{t}\right) - 2} * \frac{4}{P} \right)$$

L'application de cette formule permet une estimation rapide de la valeur maximale, en pied de cordon, de ce facteur KT. Cette relation est intéressante car elle prend en compte les différents paramètres géométriques du cordon de soudure. Ceux-ci jouent un rôle amplificateur local de contraintes, par conséquent toute modification de cette géométrie dans le sens d'un abaissement du facteur de concentration de contraintes KT doit permettre une amélioration de la tenue du joint. Une diminution du facteur KT en pied de cordon est rendue possible par l'arasage du cordon ; toutefois, si les défauts initiaux sont importants, l'effet bénéfique de l'application de cette technique est alors limité.

KT : Facteur de concentration de contraintes, **h** : Hauteur du défaut , **p** : rayon en pied de cordon.

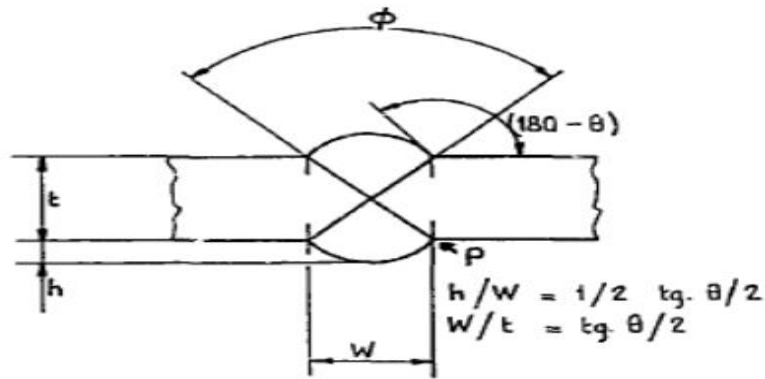


Fig. II.15 : Géométrie du joint

II-5.2.2. Modification du champ des contraintes résiduelles :

Plusieurs traitements permettent une modification notable du champ de contraintes résiduelles, les plus usuels sont les suivants :

- Un dimensionnement thermique,
- Un pré chargement statique,
- Un grenailage de précontrainte du pied du cordon,
- Une combinaison d'un dimensionnement thermique suivi d'un traitement de grenailage.

II-5.2.2.1 Dimensionnement thermique :

Le traitement thermique ne doit pas être réalisé à des températures trop élevées afin d'éviter toute dégradation des caractéristiques mécaniques. Un autre mode de relaxation thermique consiste à effectuer une trempe inverse qui, partant de la température de l'azote liquide, porte les pièces à la température de la vapeur d'eau. Cette technique s'applique plutôt pour les petites pièces.

Les conséquences des traitements thermiques effectués après soudage sont souvent complexes et n'apportent que des solutions partielles, cependant ils sont souvent nécessaires pour diminuer l'amplitude des contraintes résiduelles.

II-5.2.2.2 Préchargement statique :

Cette méthode consiste à relaxer par application d'un chargement mécanique judicieux les contraintes résiduelles. En effet, il se produit une redistribution de contraintes résiduelles par création dans la pièce d'une zone de déformation plastique limitée de telle façon que les variations dimensionnelles ne soient pas trop importantes.

II-5.2.2.3 Grenailage de précontrainte :

Cette méthode consiste à créer des contraintes de compression par bombardement de la surface de la pièce avec des billes appelées grenailles. Cependant, pour avoir des résultats reproductibles, il convient de contrôler les différents paramètres du grenailage et notamment : [24]

- La dimension, la forme et la nature de la grenaille,
- La vitesse de projection de la grenaille,
- L'angle de projection,
- Le temps d'exposition.

Le grenailage de précontrainte, se révèle d'autant plus efficace que le joint est initialement de bonne qualité.

II-6. Contraintes et déformations résiduelles générées par le soudage :

II-6.1 Système plan d'un assemblage bout à bout rectiligne situé sur un axe principal d'inertie :

II-6.1.1 Contraintes résiduelles :

La (figure II.16) représente schématiquement la répartition des CR longitudinales de plasticité de dilatation (σ_x parallèle au cordon de soudure) en fonction d'un axe transversal quelconque situé en région ouvrante d'un assemblage mono passe. En l'absence d'un préchauffage, il y a lieu d'observer que la zone plastifiée (qui s'étend sur la ZF, a ZAT et le métal de base) est le siège d'une traction dont le niveau est au moins égal à la limite d'élasticité du métal (ou alliage) de base.

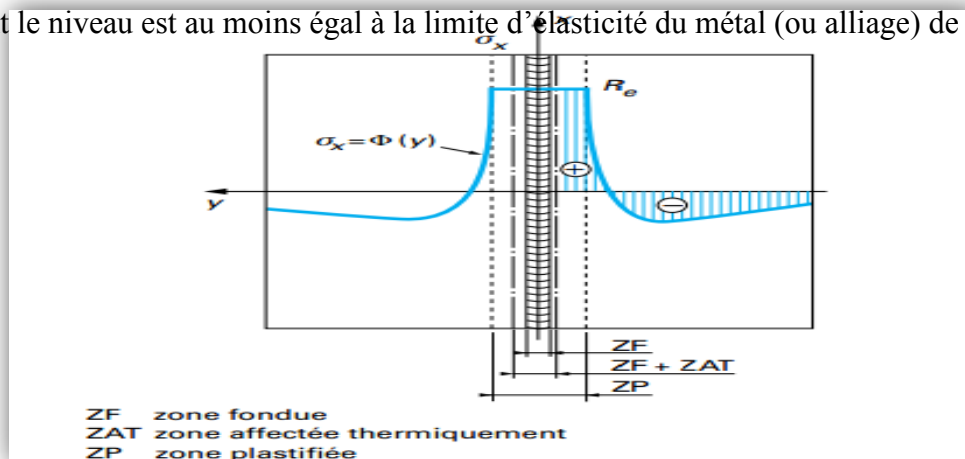


Fig. II.16: Répartition des contraintes résiduelles longitudinales de plasticité de dilatation. Cas d'un assemblage mono passe.

Il convient également d'observer l'important gradient de contrainte séparant la zone plastifiée (ZP) tendue des zones comprimées qui la bordent et qui produisent,

dans le cas de pièce minces, un phénomène de voilement dont les ondes constituent à l'évidence un facteur aggravant sur le plan de résistance de l'ensemble au flambement sous effort de compression extérieur. [25]

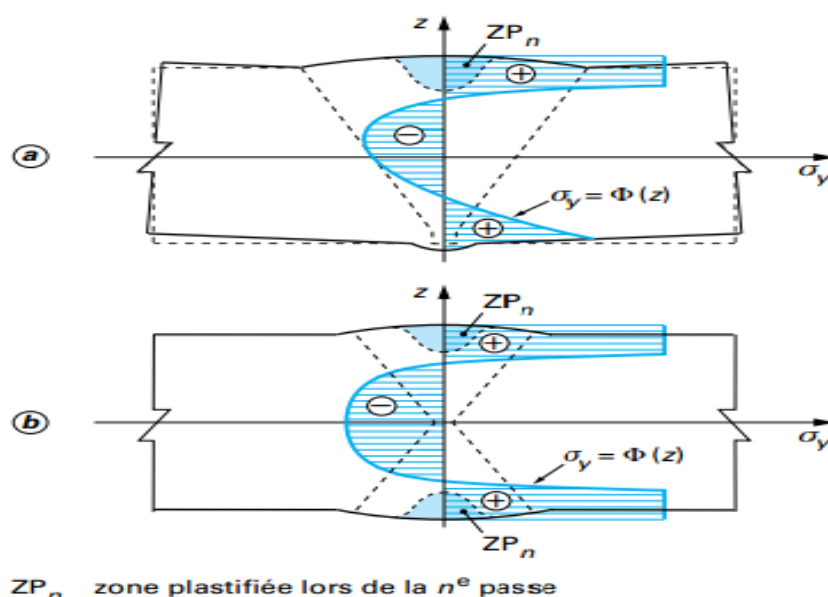


Fig. II.17: Répartition des contraintes résiduelles transversales de plasticité de dilatation. Cas d'un assemblage multi passe.

Les (figure II-14 a et b) représentent, de leur côté, la répartition des CR transversales de plasticité de dilatation (σ_y perpendiculaire au cordon de soudure) en fonction de l'épaisseur et en région courante d'un assemblage multi passe. Quelle que soit la préparation retenue en vue de l'exécution (chanfrein à simple ou à double ouverture), il est remarquable qu'un MOS multi passe conduise à la création de CR de traction sur chacune des peaux des pièces soudées.

Le niveau de contrainte obtenu dépend logiquement de l'auto bridage dû à l'épaisseur, lequel inclut la répartition spatiale des températures, générée par chacune des passes, qui demeure l'élément déterminant dans la création des zones plastifiées élémentaires. Il est important de noter qu'à l'inverse d'une préparation à simple ouverture (chanfrein V) qui est génératrice d'une traction dans la région de défauts potentiels qu'est la racine, la préparation à double ouverture (chanfrein X) tend à comprimer cet endroit, minimisant de la sorte la nocivité de ces mêmes défauts qui se situent par ailleurs au voisinage de la fibre neutre des éléments.

II-6.1.2 Déformations résiduelles :

La (figure.II.18) représente schématiquement les trois composantes de translation observables sur une soudure bout à bout rectiligne multi passe, à savoir : [36]

- Retrait longitudinal (translation RL) de faible amplitude, puis qu'auto bridé ;
- Retrait transversal (translation RT) dont l'amplitude est fonction du MOS (les dépôts nombreux, en passes étroites sont particulièrement déformants de ce point de vue) ;
- Retrait dans l'épaisseur (Rz) d'amplitude variable (très souvent négative, c'est-à-dire traduisant un épaissement au voisinage du joint), sans conséquence notable sur la fabrication.

Les (figure II-19 a, b et c) représentent de leur côté chacune des trois composantes de rotation visibles sur ce même assemblage multiplace : [25]

- Effet de pliage (rotation P) de forte amplitude sur préparation à simple ouverture (les dépôts nombreux, en passes étroites sont particulièrement déformants de ce point de vue) ;
- Effet de serrage (rotation S) d'amplitude positive ou négative selon la vitesse de soudage (effet particulièrement gênant lors du soudage mono passe sur pièces minces) ;
- Effet de cintrage (rotation C) conduisant en principe à un gau- chagement de la plaque soudée par suite de l'inversion du cintrage en cours de soudage et du voilement dans le cas de pièces minces.

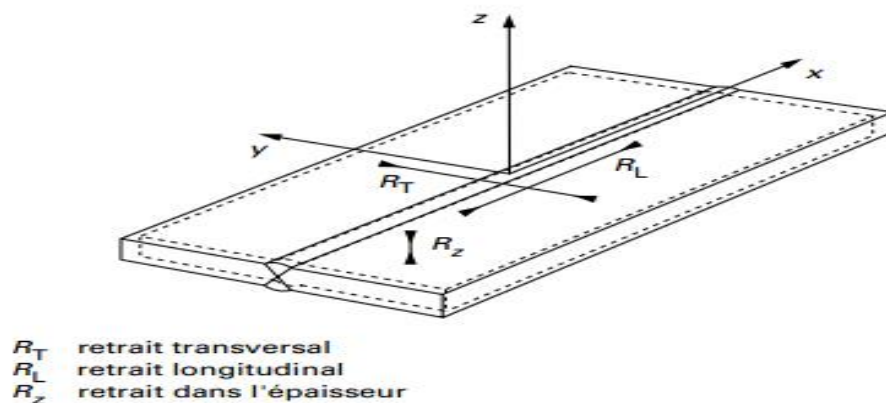


Fig. II.18 : Les trois composantes de translation observables sur un assemblage bout à bout rectiligne multi passe.

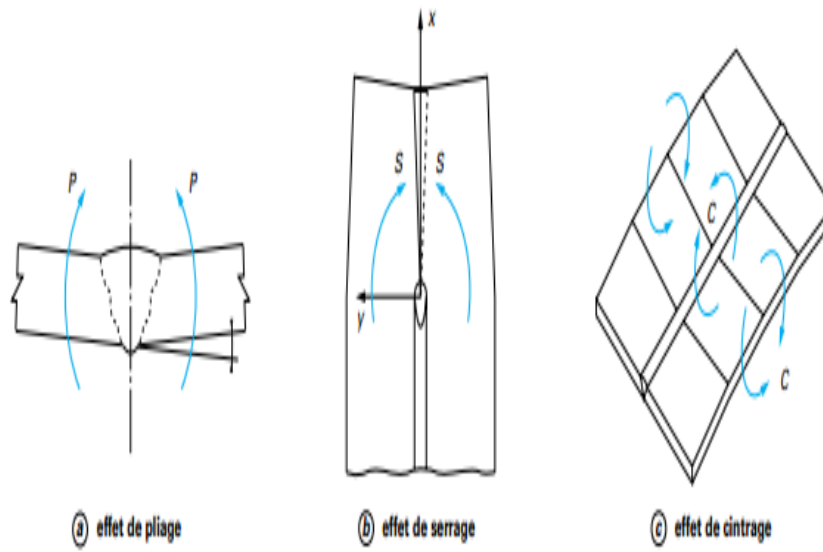


Fig. II.19: Les trois composantes de rotation observables sur un assemblage bout à bout rectiligne multi passe

Chapitre III
traitements
thermiques et
technique de
contrôle

III.1. Introduction :

Ce chapitre est divisé en deux parties la première partie concerne les traitements thermiques de la soudure et la deuxième concerne les techniques de contrôle des défauts d'une construction soudée, on a expliqué brièvement ces méthodes et techniques.

Sur le plan technologique, les aciers et alliages à base de fer sont toujours d'un grand intérêt, puisque on les retrouve sous une forme ou sous une autre dans presque tout le domaine, on peut leur faire acquérir des propriétés très variées notamment en recourant au traitement thermique. Ce qui permet de les adapter aux exigences d'utilisations les plus diverses.

Les traitements thermiques sont des opérations de chauffage suivi de refroidissement qui ont pour but de donner à une pièce métallique les propriétés les plus convenables pour son emploi ou sa mise en forme.

Ils permettent d'améliorer dans une large mesure les caractéristiques mécaniques tel que ; l'augmentation de la limite élastique et la diminution de la fragilité.

Toute utilisation rationnelle d'un alliage implique dans la plupart des cas, un traitement thermique approprié.

D'une manière générale, un traitement thermique ne modifie pas la composition chimique mais apporte des modifications de point de vue :

- Constitution (état de carbone, forme allotropique de fer)
- Structure (taille de grain, répartition des constituants)
- Etat mécanique (gradient de température au divers point de la pièce) [1]

III.1.2. Cycle d'un traitement thermique :

En général le traitement thermique comprend 3 étapes :

- Un chauffage jusqu'à une température qui dépend du type de traitement voulu.
- Maintien isotherme à cette température de traitement.
- Un refroidissement dans un milieu préalablement défini.

Toute fois le choix du traitement thermique le plus approprié est en lui-même d'une grande difficulté plus particulièrement dans le choix de ces paramètres, et ce en fonction des structures et des propriétés physiques et mécaniques souhaitées.

III.1.3. TRAITEMENTS THERMIQUES DES SOUDURES :

III.1.3.1. Classification selon l'objet :

L'opération de soudage se traduit par des modifications métallurgiques locales de métal de base et, selon les procédés les modes opératoires, par la création d'une zone fondue dont la structure et les propriétés sont plus ou moins différente de celles de métal de base. D'autre part, l'opération de soudage établit un état de contraintes résiduelles dont la répartition et l'amplitude sont, elles aussi, fonctions de procédés et des modes opératoires.

Qu'elles soient à caractère métallurgique et thermomécanique, ces modifications sont souvent tolérables vis-à-vis du comportement de service et les ensembles soudés sont utilisés à l'état brut de soudage. Dans certains cas, cependant, il est jugé préférable ou nécessaire, ou bien encore il est obligatoire d'intervenir par un traitement thermique après soudage, dont l'objet principal peut être d'améliorer ou d'obtenir les propriétés jugées importantes vis-à-vis des conditions de service, ou d'éliminer ou simplement de réduire les contraintes résiduelles.

En réalité, compte tenu des rôles multiples que joue tout cycle d'échauffement et de refroidissement, le premier type de traitement destiné à jouer un rôle métallurgique, agit aussi sur l'état de contraintes.

Le second à finalité mécanique, a cependant des conséquences métallurgiques. C'est donc en gardant à l'esprit cette interaction que l'on étudiera successivement, ci –dessous, dans le cas des aciers, les types de

traitement suivants, sans entrer dans le détail de la nature des sources d'énergie mise en œuvre :

- Traitement de relaxation (ou de détente) et de revenu.
- Traitement de normalisation.
- Traitement de trempe et revenu. [26]

III.1.3.2. Modes de mise en œuvre :

On peut classer et décrire comme suit la façon dont les traitements thermiques concernant des soudures ou des ensembles soudés sont pratiqués.

III.1.3.2.1. Traitement global :

Le traitement peut être global, c'est à dire affecter la ou les soudures constitutives de l'ensemble, en même temps que la totalité du métal de base. Une telle action peut être simultanée, c'est à dire que tout l'ensemble soudé est soumis en même temps, au même cycle de traitement ; ou bien le traitement à lieu de proche en proche, mais pour chaque position qu'elle occupe, la source de chaleur agit simultanément et selon le même cycle sur la soudure et le métal de base non affecté.

Le traitement global de proche en proche est illustré par un schéma emprunté à la fabrication des tubes soudés par résistance ou par induction, la source de chaleur, immobile, traite une source entière du tube qui défile, aussi bien le métal de base que la soudure qui vient d'être faite.

Dans la pratique, le traitement global simultané peut être appliqué à tous les objectifs de traitement mentionnés plus haut et à toutes les formes et encombrement d'ensembles soudés compatibles avec les capacités des sources de chaleur mise en œuvre. Le traitement global de proche en proche, qui requiert un profil constant du produit à traiter, est essentiellement pratiqué pour la fabrication des tubes, pour la normalisation ou l'hypertrempe, selon qu'il s'agit d'acier « noir » ou d'acier inoxydable.

III.1.3.2.2. Traitement local simultané :

Le traitement local simultané consiste à opérer en même temps sur la totalité d'une soudure et de ses abords et donc sur une partie seulement de métal de base encadrant la zone affectée. Le traitement se distingue du traitement local de proche en proche en ce sens que ce dernier est pratiqué au moyen d'une source de chaleur se déplacent par rapport à la soudure ou l'inverse (l'une immobile, l'autre mobile), pour assurer ce proche en proche l'effet recherché dans le métal fondu est une partie de métal de base incluant la zone affectée.

Le traitement local simultané est essentiellement destiné à des soudures circulaires, pour lesquelles il assure un effet métallurgique (normalisation ou revenu), ainsi que de relaxation, en raison de symétrie qu'il assure. Tel n'est pas le cas de traitement local de proche en proche qui, s'il assure une action métallurgique (essentiellement de normalisation), n'est pas à conseiller pour obtenir la relaxation, car qu'il ne fait que remplacer un état de contrainte du au soudage, par un autre, du au traitement lui-même.

En ce qui concerne les traitements thermiques locaux, qu'ils soient simultanés au de proche en proche, ils ne peuvent être pratiqués sans inconvénient que moyennant deux conditions, toutes deux relatives au métal de base.

Lors du traitement thermique de normalisation, la vitesse de refroidissement, donc l'éloignement de la source de chaleur, doit être réglée de sorte que la zone traitée, qui est momentanément austénitisée, ne prenne pas la trempe.

Tout traitement thermique local crée sa propre zone affectée qui remplace la ZAT de la soudure que l'on traite. Du fait de l'inévitable gradient de température qui y règne, cette zone comporte sur ses bords. Une bande où le traitement appliqué n'a pas complètement été réalisé, mais où il a créé une modification du métal de base par rapport à son état initial, en particulier un adoucissement si le métal de base est lui-même à l'état initial trempé et revenu.
[26]

III.1.3.3. Traitement de relaxation :

III.1.3.3.1. Objet :

Le traitement thermique de relaxation, ou encore de détente a pour objet d'annuler ou d'atténuer les contraintes résiduelles présentes dans un ensemble soudé après son achèvement, ou en cours de construction s'il apparaît nécessaire d'intervenir sur l'état des contraintes avant de poursuivre les opérations de soudage en toute sécurité. Compte tenu de domaine de température, en tous cas inférieurs à celle du point (A1), dans lequel se pratique le traitement de relaxation, il entraîne aussi un effet de revenu, lorsque les soudures contiennent des constituants de trempe, dans la zone fondue comme dans la zone affectée.

Cet effet est parfois l'objet principal du traitement qui reste alors pratiqué selon les mêmes techniques. Malheureusement, ce rôle métallurgique supplémentaire n'est pas toujours bénéfique, car des effets défavorables peuvent intervenir, en affectent les propriétés mécaniques ou en provoquant le phénomène de fissuration dit " au réchauffage".

III.1.3.3.2. Mécanisme de la relaxation :

On a déjà indiqué, à propos de l'étude thermique et thermomécanique du soudage, que la relaxation thermique des contraintes résiduelles est obtenue grâce à la diminution de la limite d'élasticité provoquée par l'élévation de la température il résulte de cette diminution que toute région d'une pièce ainsi réchauffée qui était le signe d'une contrainte résiduelle à l'ambiante (contrainte évidemment élastique) se plastifie au fur et à mesure de l'échauffement, ce qui fournit l'allongement nécessaire à l'obtention d'un taux de relaxation croissant avec la température du traitement.

Une représentation simplifiée de ce mécanisme peut être obtenu en confrontant sur un même graphique (figure.III.1) le cycle thermique $\theta = f(t)$ du traitement, la variation $Re=f(\theta)$ de la limite d'élasticité en fonction de la température et en fin la courbe $\sigma = f(t)$ donnant la variation de la contrainte résiduelle durant le cycle du traitement. [26]

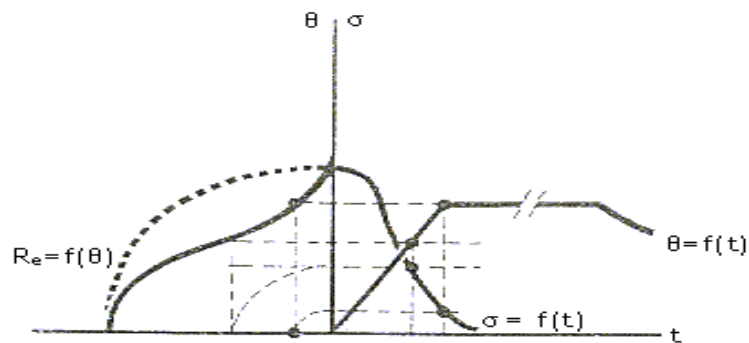


Fig.III.1. Mécanisme de la relaxation des contraintes

Le taux de relaxation, en première approximation fonction de la seule température de traitement est très faible jusqu'à 200 °c, atteint 50 à 60 % à 500 °c, 70 à 85 % à 575 °c, et 90 à 95 % pour une température de 625 °c, le résultat étant obtenu dès que la température maximale est atteinte. Il n'en reste pas moins que tout traitement thermique doit être spécifié non seulement en termes de température, mais aussi en termes de durée, pour tenir compte, en fonction de l'énergie disponible pour assurer le traitement, de la masse du produit traité et de la nécessité d'homogénéiser la température pour éviter la création de nouvelles contraintes au refroidissement.

D'autre part, un certain temps de maintien de la température fixée pour le traitement assure un pourcentage complémentaire de relaxation dans les régions où existent initialement des points de contraintes. [27] [28]

Finalement pour définir un traitement thermique en fonction de la température et du temps, et pour en évaluer les effets, du point de vue des contraintes ou Surtout de celui des propriétés mécaniques, on fait appel à un paramètre dit de HOLLOMON. [28]

$$H = T (20 + \log t) 10^{-3}$$

Où T est la température de traitement (en degrés K) et t la durée du traitement (en heures). Ce paramètre est utilisé dans la norme précitée pour rendre compte de l'effet du traitement sur les propriétés mécaniques, dont il est

fait état dans le paragraphe suivant. La norme indique à cet effet les valeurs de H. figure.III.2. Correspondant aux diverses combinaisons température / temps.

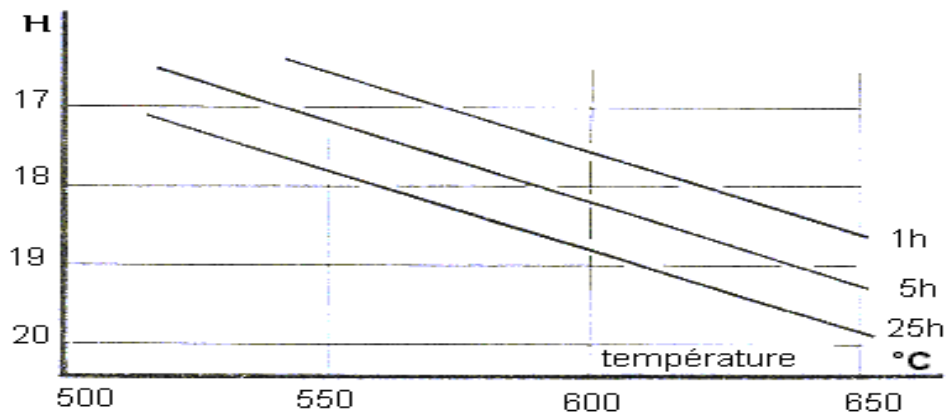


Fig.III.2. La variation de H en fonction de la température

III.1.3.3.3. Effets métallurgiques du traitement :

Le cycle thermique d'un traitement de relaxation étant assimilable à celui d'un traitement de revenu, il n'y a dans l'ensemble pas d'effet sur le métal de base lorsque ce dernier est lui-même mise en œuvre à l'état normalisé et revenu et trempé et revenu, sauf si le traitement a lieu à une température supérieure à celle de revenu initial ; à cet effet on se tient à une température inférieure d'une trentaine de degrés au-dessous. Il faut cependant signaler que certains aciers alliés (au Mn-Mo, au Mn-Ni-Mo, ou encore au Cr-Mo) peuvent être sensibles au phénomène dit de fragilité de revenu, qui se produit au cours d'un traitement à 450 – 550 °C ou durant le refroidissement au cours d'une traversée trop lente de cet intervalle de température ce phénomène, qui semble être associé à l'effet des impuretés, est moins sensible en présence de vanadium. [30] [15]

Par contre pour les aciers utilisés à l'état normalisé, le traitement thermique de relaxation a une action à la fois sur les caractéristiques de traction (à l'ambiante ou à chaud) et sur la température de transition de résilience ; cette action est fonction de paramètre H du traitement, défini comme indiqué ci-dessus. Ce comportement se produit par les aciers au C, au Mn, au C-Mn additionnés de Ni et pour les aciers à haut limite d'élasticité [30].

En ce qui concerne l'effet de traitement de relaxation sur les propriétés mécaniques du métal fondu, il est bénéfique en ce qui concerne la restauration à

partir de l'état vieilli par l'effet tenso-thermique que l'on peut rencontrer dans les soudures multi passes surproduits épais. Il peut par contre avoir un effet fragilisant pour certaines compositions sensibles à la fragilité de revenu, essentiellement au cours d'un refroidissement trop lent ; la température maximale atteinte et la durée du séjour ne sont pas en cause dans ce phénomène [28].

En conclusion, il apparaît en toute état de cause, on doit, au moment du calcul d'une construction devant être soumise à un traitement thermique de relaxation, tenir compte des propriétés mécaniques réelles, telles qu'elles résultent de l'effet métallurgique de ce traitement [32].

Pour ce faire, la valeur H du paramètre de ce traitement doit être fixée au minimum compatible d'une part avec les conditions technologiques indiquées plus haut, d'autre part avec le taux de relaxation recherché ou imposé, cependant que la vitesse de refroidissement doit être réglée au maximum possible, tout en maintenant l'homogénéité thermique des pièces traitées [28].

III.1.3.3.5. Traitement avant ou après refroidissement :

Normalement, il n'y a pas d'inconvénient à procéder au traitement de relaxation d'un ensemble soudé aussitôt après l'exécution de la dernière soudure, avant refroidissement complet, même si le programme prescrit un post chauffage ; en effet, le traitement de relaxation se pratique à une température supérieure aux température usuelles du post chauffage, dont il ne peut que compléter les effets. Cependant, si on est en présence de plusieurs pièces identiques à souder et à traiter, on peut avoir intérêt à les stocker après refroidissement pour leur faire subir ultérieurement et simultanément le traitement thermique prescrit.

Mais il faut, pour opérer ainsi en toute sécurité, veiller à ce que la température et le temps de post chauffage permettent un refroidissement complet sans risque de fissuration à froid, de même, lorsqu'une opération, de chauffage de longue durée doit être interrompue, par exemple aux fins de contrôle, la température de préchauffage doit être maintenue pendant un temps suffisant pour assurer un refroidissement sans risque, ou alors il faut procéder à un traitement intermédiaire de relaxation.

Une autre solution consiste à procéder au contrôle non destructif à chaud, mais cela indique des difficultés techniques non négligeables.

III.2. Technique de contrôle des soudures :

Une soudure normalement exécutée doit être au moins plus solide que les pièces de métaux qu'elle unit, elle doit pouvoir résister aux sollicitations auxquelles elle a été calculée dans les conditions de service prévues. Cela suppose qu'elle est exempte de défauts graves, qui rendraient la structure dont elle fait partie, impropre à l'usage pour lequel elle est destinée. Certaines soudures ne peuvent pas être mises en service prévu, car elles comportent des défauts plus au moins graves provenant de leur exécution. Il est donc important de définir ces différents défauts ainsi que leurs principales causes d'apparition et les moyens à mettre en œuvre pour les éviter.

Il y a lieu de distinguer entre contrôles à la fabrication et contrôles en service. Les premiers ont pour objet de rejeter ou d'accepter (après éventuelles réparations) les pièces contrôlées. Les seconds visent à s'assurer que la structure reste apte à fonctionner après un certain temps de service. La réalisation d'une telle soudure, demande différentes sortes de contrôles, avant, pendant et après l'opération de soudage :

III.2.1. Contrôle avant le soudage :

Le contrôle avant le soudage a pour but de prévenir des défauts. Il portera sur :

- La qualité du métal.
- La préparation des pièces à souder.
- Les traitements thermiques (post et préchauffage, maintien en température).
- Le matériel de soudage (état, puissance, réglage).
- La qualification du soudeur.

III.2.2. Contrôle au cours du soudage :

Le contrôle au cours de soudage a pour but de s'assurer que les règles d'une bonne exécution du joint sont bien respectées. Il portera sur :

- La nature et la dimension du métal d'apport.
- Le réglage de l'appareil du soudage.

- L'état du joint réalisé.
- La disposition des passes nombre et sens de réalisation.
- Les déformations.
- Le maintien en température.

III.2.3. Contrôle après le soudage :

Ces contrôles ont un double but, soit la vérification de la soudabilité à partir des essais qui doivent être exécutés dans les mêmes conditions que l'ensemble à réaliser (procédés, matériaux, épaisseurs, paramètres, séquences et main-d'œuvre), soit la vérification de la qualité des joints par un contrôle effectué soit sur la totalité des soudures, soit localement dans les zones les plus propices à l'apparition des défauts ou, si cela est possible par des essais sur pièces témoins placées par exemple à l'extrémité du joint, comme s'il était une partie intégrale de l'ensemble. Il y a deux groupes principaux de méthodes de contrôle :

- **Contrôle destructif** : (essai de texture, essais mécaniques : pliage, résilience).
- **Contrôles non destructifs** : (examen visuel, ressuage, rayons X, rayon gamma, courants de faculté, ultrason)

III.2.3.1 Contrôles destructifs :

Les principaux essais utilisés sont les essais de texture, les essais mécaniques, les essais de corrosion, les essais macro et micrographiques.

III.2.3.1.1. Essais de texture :

Ce sont des essais simples d'ateliers destinés à vérifier que la soudure est compacte et bien pénétrée, il consiste à rompre l'éprouvette dans la soudure et on examine les défauts apparents sur la section rompue.

III.2.3.1.2. Essais mécaniques :

Ils ont pour but le contrôle des assemblages du point de vue de la résistance et des caractéristiques mécaniques et la vérification que les conditions de soudage mises en œuvre ne mettent pas en cause la résistance globale de l'ensemble. Les différents essais mécaniques sont : la traction, la dureté Vickers, le pliage, la résilience, ces essais sont parfois complétés par des

examens macrographiques (fissuration, pénétration) ou micrographiques (structure de la zone fondue, et de la zone affectée par la chaleur).

III.2.3.1.3. Examens macrographiques et micrographiques :

Consistent à examiner une section du joint longitudinalement ou transversalement, après polissage et attaque par un produit chimique. L'examen se fait à l'œil (macro) ou au microscope (micro). Ces essais sont indispensables pour l'étude des phénomènes métallurgiques qui se produisent en cours de soudage. [34] [33]

III.2.3.2. Contrôles non destructifs :

III.2.3.2.1. Examen visuel :

C'est un examen rudimentaire, simple d'atelier et qui a pour but l'observation attentive du joint à l'œil nu ou à l'aide d'une loupe, permet de vérifier que la soudure est compacte, et bien pénétrée, de déceler les criques débouchant en surface, les manques ou les excès de métal d'apport, le manque de pénétration, les caniveaux, les morsures et la forme du cordon. Ce contrôle porte souvent de fruits, malgré qu'il se limite aux défauts apparents relatifs à la structure et aux fissures apparentes.

III.2.3.2.2. Contrôles par ressuage :

L'examen par ressuage a pour but de rechercher les fissures débouchant en surface, par application sur la surface à contrôler d'un liquide d'une composition spéciale en spray, capable de s'infiltrer dans crevasses et fissures, laissé pendant un temps de 1 à 30 min. selon le cas, généralement les temps sont longs pour localiser les petites fissures, la prolongation du temps de pénétration n'affecte pas le résultat. Après enlèvement du liquide en excès par nettoyage, On dépose une poudre absorbante détectrice qui agit comme un buvard ; le développeur faisant apparaître le liquide pénétrant précédemment absorbé par les défauts et permet ainsi de déceler, par mouillage, la présence et la forme des défauts par une indication rouge et profonde. Fig.III.3. (A-b-c-d). [35].

Il faut remarquer qu'avant d'appliquer le produit pénétrant, on doit s'assurer que les surfaces à contrôler sont exemptes de produits étrangers ; graisses, peintures, huiles, ...etc. On procède alors à un nettoyage par application des solvants qu'on leur donne assez de temps pour dissoudre tout dépôt et impuretés et qu'on essuie après à l'aide d'un chiffon sec et propre, on laisse sécher à l'air pour que le produit de nettoyage puisse sécher. Il faut que le nettoyage soit pratiqué au même jour que l'inspection. La couche du développeur déposé ne doit être ni épaisse masquant les indications, ni fine non révélatrice.

Le ressuage est efficace sur les défauts et fissures de taille suffisamment faible pour que le liquide pénétrant ne soit pas enlevé lors du nettoyage superficiel précédent l'application du liquide développeur. Il est destiné aux métaux tels que l'aluminium, magnésium, cuivre, laiton, fonte, acier carbures, stellites, plastiques et céramiques. Applications : Pour le contrôle des fissures débouchant en surface, fissures dues aux retassures de cratères, recouvrement, éclat de forge ou fermeture froide apparaissent toutes comme des écorchures rouges par contre les porosités, retraits, manque de lien, apparaissent comme des points colorés.

On peut accroître la sensibilité de la méthode en utilisant un liquide pénétrant fluorescent et une poudre non fluorescente de 2 à 10 microns de dimension, on examine alors le ressuage avec une lampe de WOOD, de 75 à 100 watts, fournissant une lumière ultra-violette ou violette. [36].

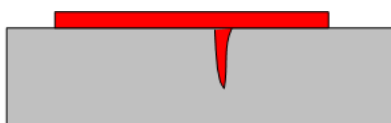


Fig.III.3. a. application du pénétrant

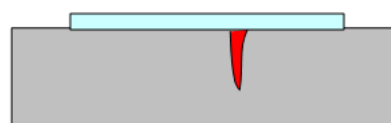


Fig.III.3.c application du pénétrant

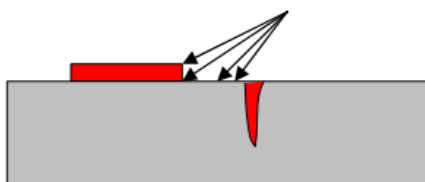


Fig.III.3. b Enlèvement de l'excès de pénétrant

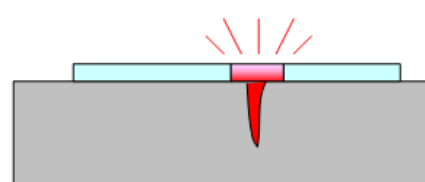


Fig.III.3. d. Accentuation de l'indication quand le pénétrant s'accumule autour l'ouverture

III.2.3.3. Contrôle par magnétoscopie :

La magnétoscopie est une méthode de détection des défauts applicable aux matériaux ferromagnétiques. Elle permet de détecter les défauts situés en surface ou au voisinage immédiat. La méthode consiste à soumettre le matériau à l'action du champ magnétique d'une intensité suffisante (enroulements de câbles ou présentation entre les pôles d'un électro-aimant), pour dépasser légèrement le coude de saturation de la courbe induction champ (norme NF A04-101).

Les fissures, soufflures, défaut de pénétration, aboutissants ou non en surface créent des discontinuités de champ magnétique qu'il est possible de mettre en évidence par une poudre ferromagnétique très fine peuvent être de la limaille de fer ou des oxydes de l'ordre de 20 à 30 microns de couleur rouge ou noir oxyde, ou peuvent être enduits d'une substance qui les rend fluorescents brillants sous une lumière UV (lumière noire), cette poudre peut être aussi en suspension dans un liquide qui leur procure une certaine mobilité à la surface de la pièce testée, cette mobilité assiste leur migration aux bords de la fissure, qui forme sur la surface une image correspondante aux lignes du flux dévié grâce au contraste le plus fort possible entre la fissure et le matériau de base. Voir fig.III.4

Il y a plusieurs techniques de contrôle par magnétoscopie, voir fig.III.5, fig. III.6, fig.III.7. [35] [15]

La magnétisation se fait par un aimant permanent ou par un courant électrique généralement on utilise le courant alternatif car il donne une certaine mobilité aux particules, mais hélas manque de pénétration. Le courant continu n'est pas indiqué car il pose le problème de démagnétisation. L'ampérage indiqué pour le contrôle est de 2000A pour un kit portable et 10000A pour une unité. L'équipement est composé d'un photo-fluor mètre et d'un luxmètre. On expose les pièces à une intensité de 1000 micro watts /cm² pendant 24 à 400h, on mesure l'intensité de la fluorescence à l'aide d'un photo-fluor mètre.

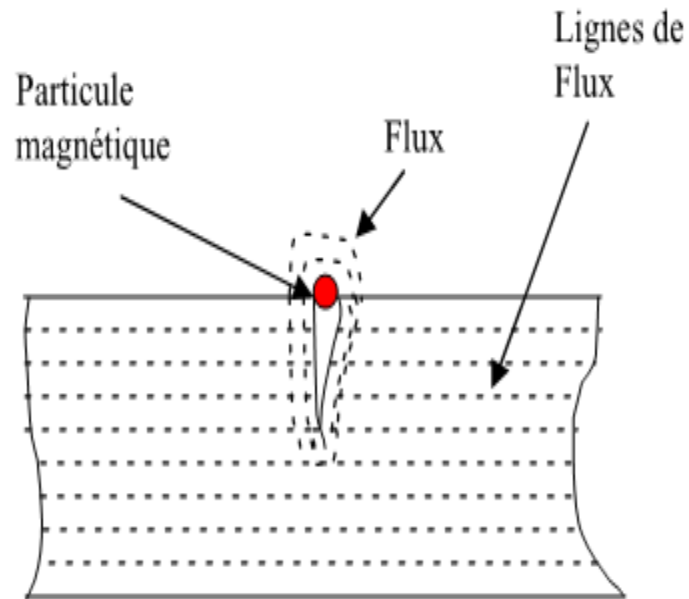


Fig.III.4. Principe du contrôle par magnétoscopie

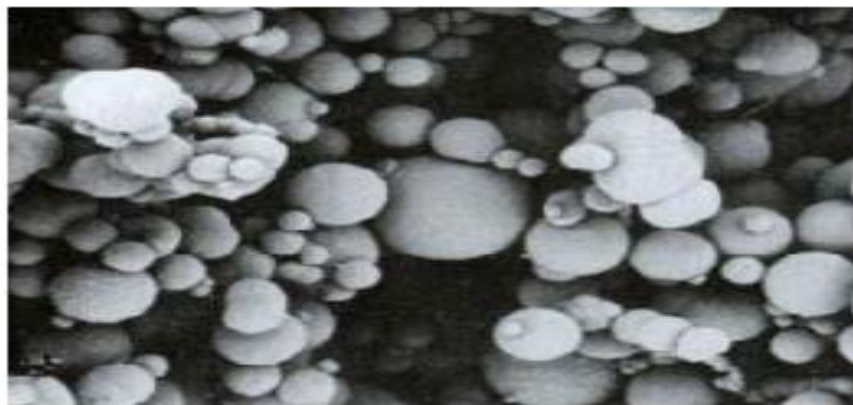


Fig.III.5. Particules magnétiques vues par un microscope optique

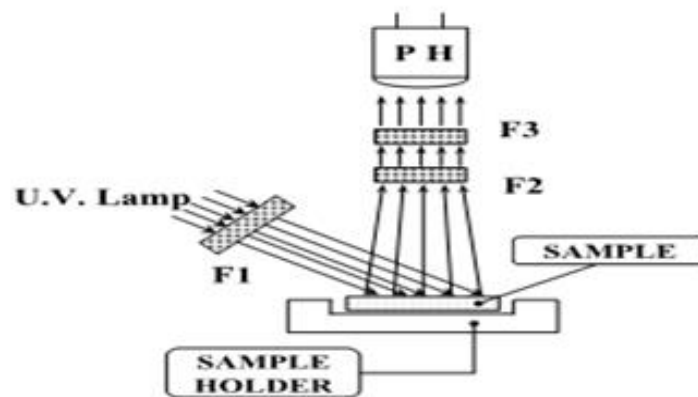


Fig.III.6. Principe du Photofluorimètre utilisé pour la mesure photoparticules (méthode sèche)

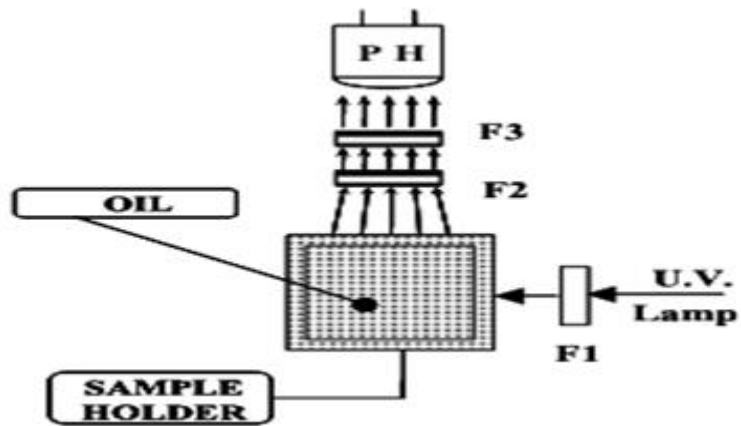


Fig.III.7 Principe du Photofluorimètre utilisé pour la mesure photoparticules (méthode humide)

III.2.3.3.1. Indications des défauts par magnétoscopie :

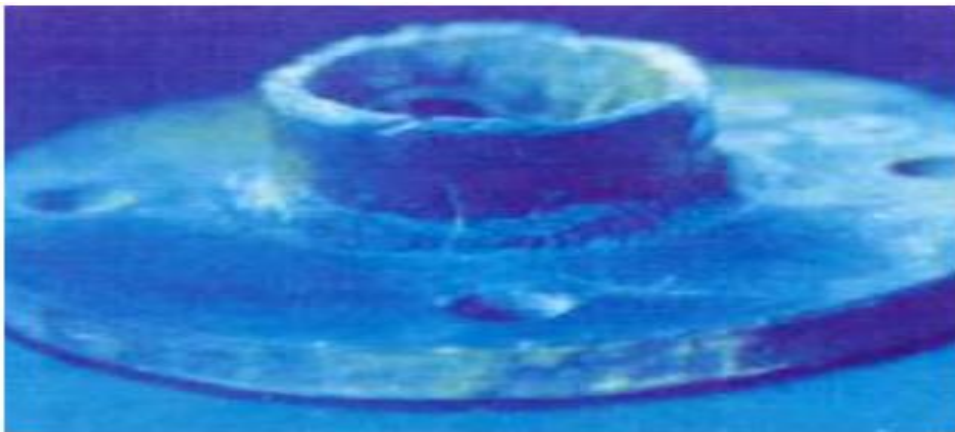


Fig.III.8 Indication obtenue en UV

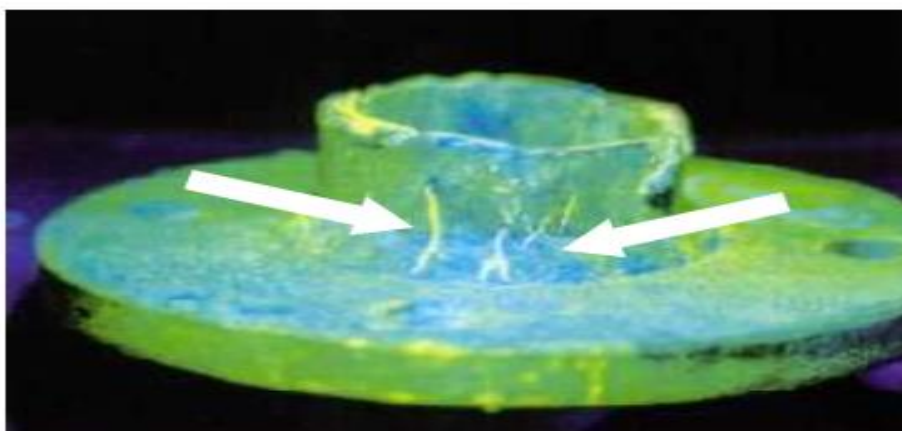


Fig.III.9. Indication obtenue en fluorescent.

III.2.3.4. Examens radiographiques :

Le contrôle radiographique par rayonnements ionisants (X ou γ) permet de détecter des défauts de compacité internes souvent très fins (fissures, soufflures, inclusions, manque de liaison, manque de fusion) dans les parois des matériaux métalliques. Ce contrôle est réalisé à l'aide d'un tube générateur à rayons X ou d'une source radioactive gamma γ qui émettent des rayonnements ionisants, de films radiographiques ou d'une caméra pour l'acquisition numérique de l'image transmise placés sur la face inverse au rayonnement.

Les rayons électromagnétiques de faible longueur d'onde sont partiellement absorbés par les hétérogénéités du milieu en traversant la paroi du matériau irradié. Le faisceau impressionne le film radiosensible en fonction des rayonnements transmis à travers la pièce contrôlée pour donner naissance à l'image radiographique. La présence d'un défaut se traduit par une variation de l'absorption du rayonnement émis et donc à une variation de la densité optique du film au droit de l'image du défaut. [26]

III.2.3.5. Méthodes de contrôle des soudures par ultrason :

Le contrôle ultrasonore des soudures constitue une partie extrêmement importante du contrôle ultrasonore figure.(III.10); compte tenu des positions très variées des soudures, il est nécessaire de disposer de palpeurs variés, en dimension, en fréquence, en angle d'incidence, même dans le cas d'une interprétation faite avec un seul type de contrôle, plusieurs passages sur le défaut sont nécessaires ; en particulier, une rotation autour du défaut peut renseigner sur le caractère plan (cas de fissure) ou volumique (cas d'une inclusion) du défaut. Le contrôle nécessite alors de mesurer l'angle du palpeur au moyen de cales normalisées NFA 04-311 puis d'étalonner l'échelle du temps. Le contrôle d'une soudure peut nécessiter plusieurs passages avec des positions différentes pour examiner l'ensemble de la soudure et de la zone affectée par la chaleur. L'accessibilité des soudures peut obliger à utiliser deux palpeurs, l'un émetteur, l'autre récepteur, selon la technique tandem fig. (III.11).

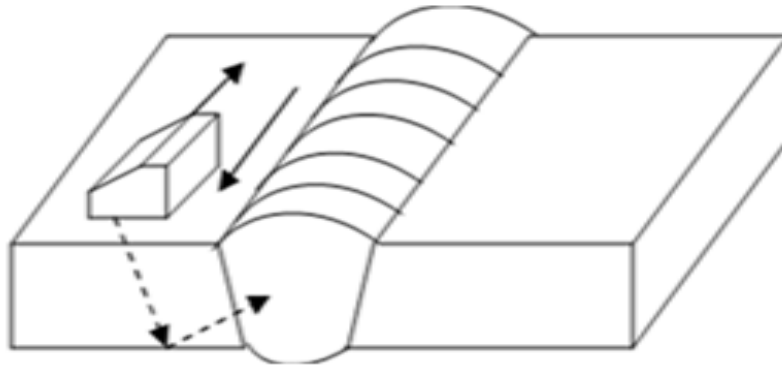


Fig.III.10. Principe de contrôle des soudures

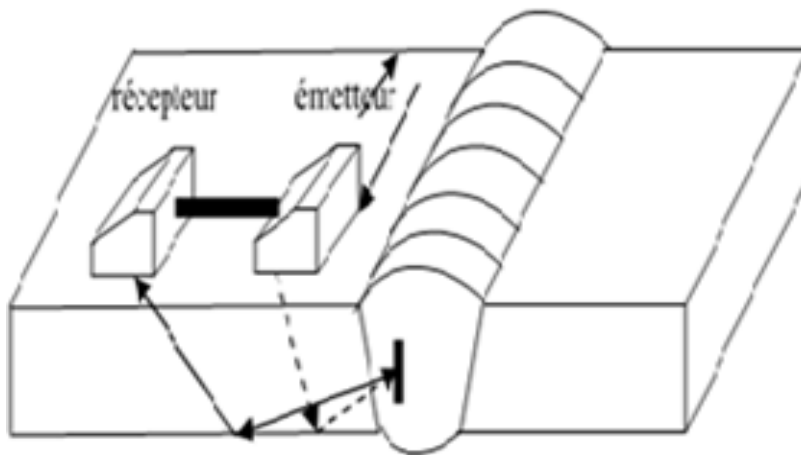


Fig.III.11. Principe de contrôle par la méthode tandem

Chapitre IV
partie
expérimentale

IV.II. RESULTATS ET DISCUSSION

Le but recherché est d'estimer en priorité la sensibilité des soudures vis-à-vis des réparations successives en fonction des informations recueillies par les méthodes expérimentales suivantes :

- l'essai de traction
- les mesures de dureté
- l'essai de pliage
- la macrographie et la micrographie de structure
- les cycles thermiques pour chaque soudure

La composition chimique est obtenue par analyse spectrométrique du métal de base et de la zone fondue pour chaque échantillon, partant du métal de base jusqu'à la troisième réparation. Ces résultats sont regroupés dans le tableau IV.3.

Tableau .IV.3 : Composition chimique du métal de base, des assemblages soudés et réparés

	C%	Al%	S%	N%	Cu%	P%	S%	Cr%	Co%	Mo%	Mn%	Nb%
MB	0,15	0,001	0.016	0,007	0,43	0,027	0,001	0,022	0,002	0,01	1,33	0,030
S1	0,17	0.003	0.021	0,006	0,45	0,010	0,002	0,030	0,001	0,02	1,22	0,031
R1	0,16	0.008	0,022	0,007	0,47	0,020	0,001	0,03	0,002	0,023	1,30	0,028
R2	0,16	0.009	0,028	0,007	0,46	0,037	0,001	0,02	0,003	0,03	1,36	0,029
R3	0,17	0,007	0,030	0,008	0,43	0,033	0,001	0,02	0,002	0,03	1,39	0,025

IV.II.1 Analyse des caractéristiques mécaniques

IV.II.1.1 Essai de traction

Les différentes courbes de traction ont une allure de courbe de traction typique des aciers et ce mis à part celle de la troisième réparation.

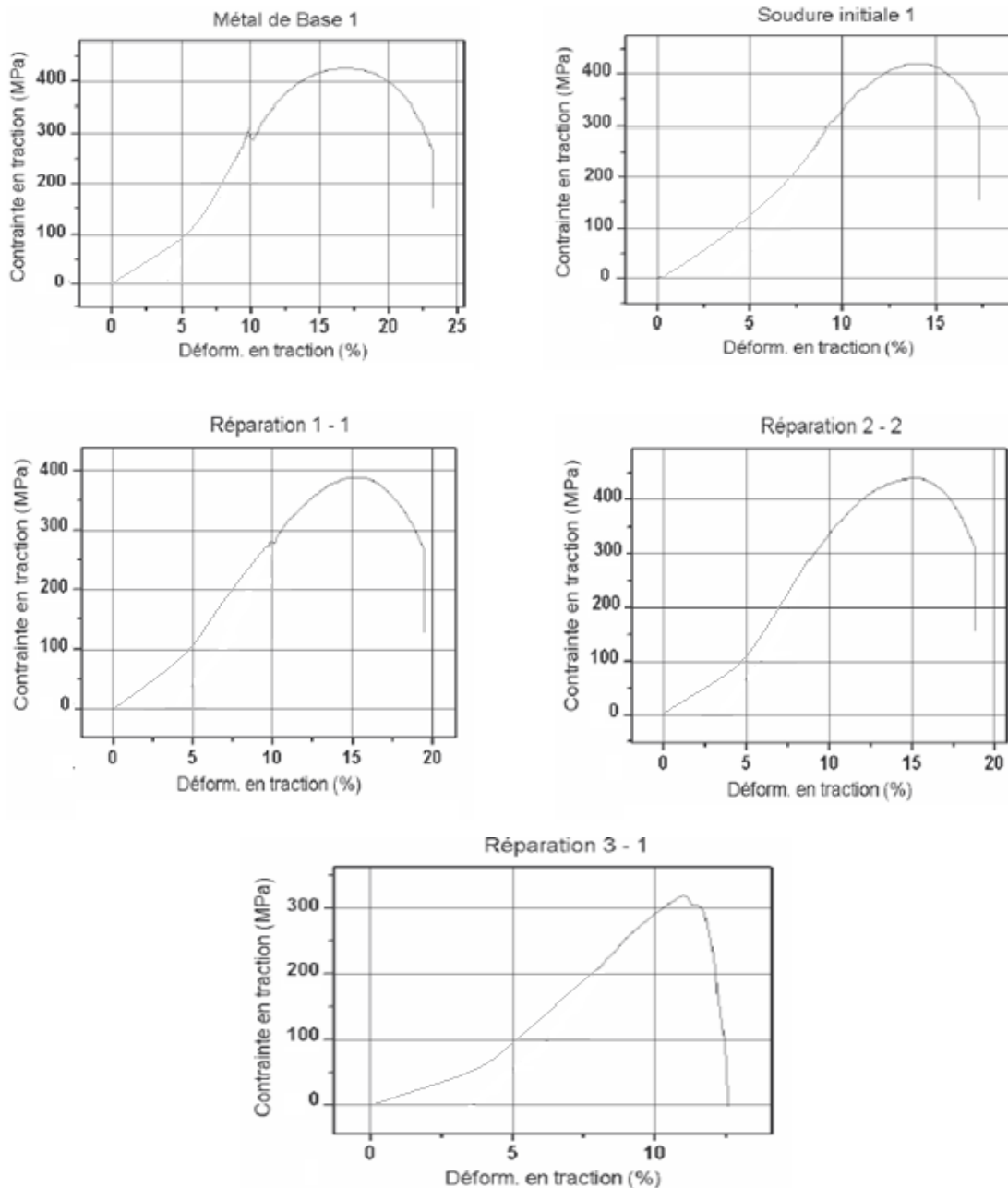


Figure IV .21 : Courbes de traction des différents éprouvettes

IV.II.2 Résultats des essais de dureté

Après avoir effectué des filiations de dureté sur les sections transversales des soudures, conformément à la norme AFNOR , On constate une variation de la dureté dans les différentes zones du joint soudé (Zone fondue, Zone affectée thermiquement et métal de base) et ce pour toutes les soudures (initiales et réparées). La dureté dans la ZAT est élevée par rapport au M.B à cause de la forte densité de joints de grains, due au processus de l'affinement du grain dans cette région, provoqué par la succession des cycles thermiques répétitifs de soudage. Voir Figures IV. 22 à IV. 24.

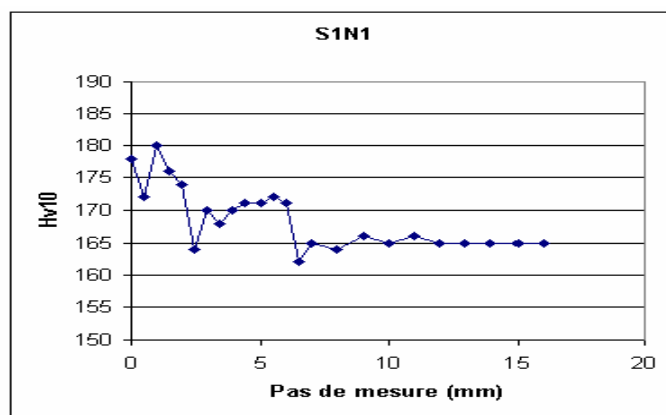
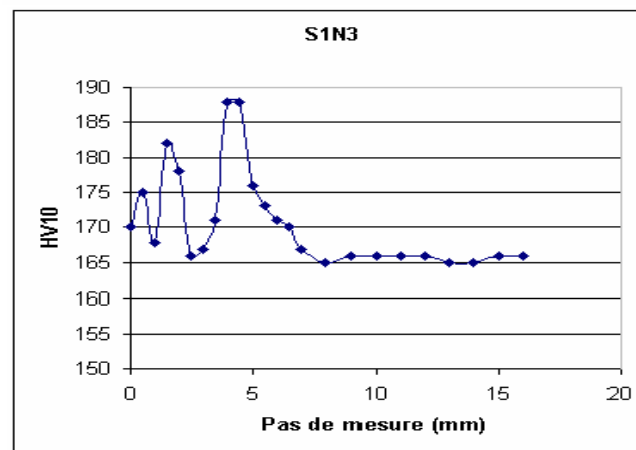
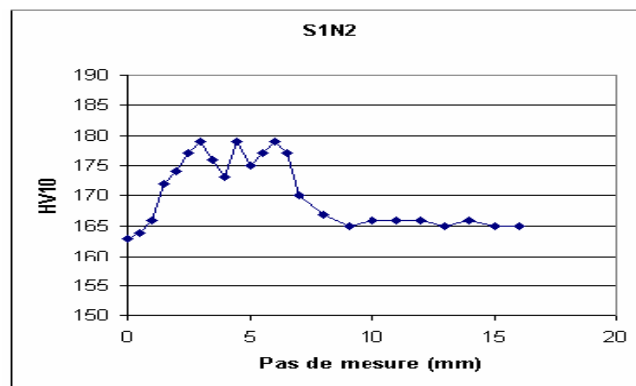
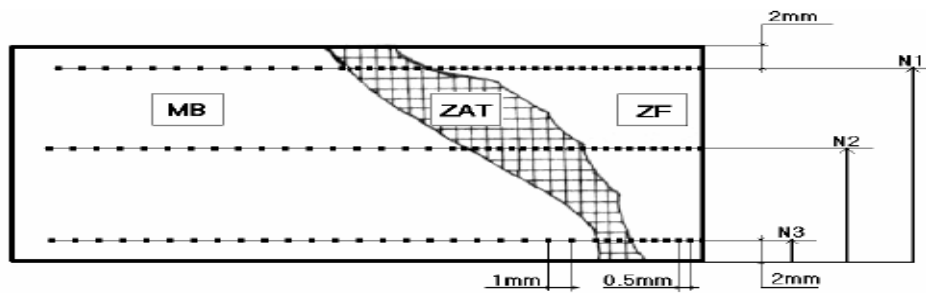


Figure IV.22 Filiation de dureté de la soudure initiale

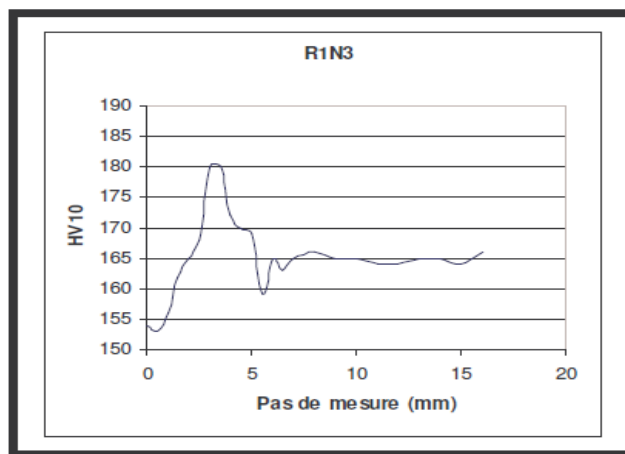
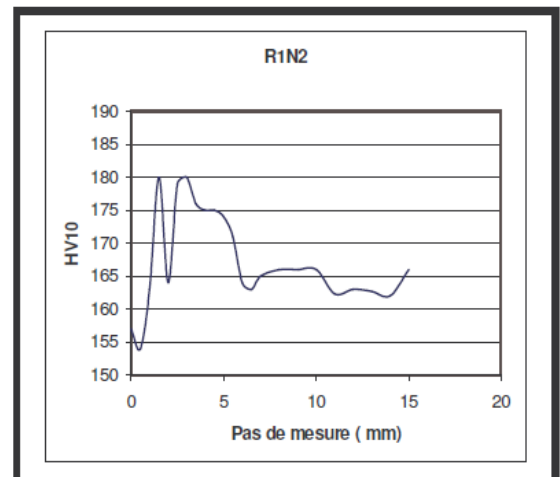
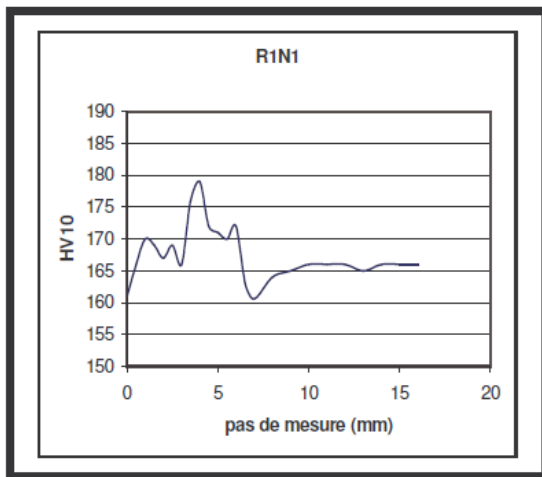
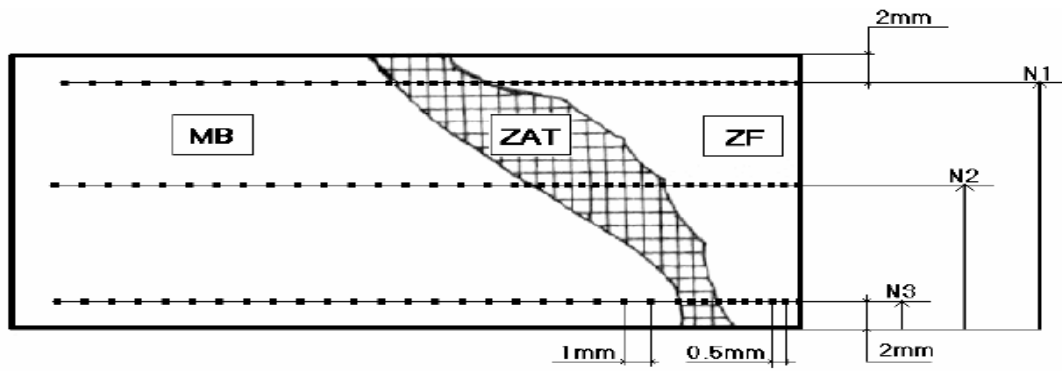


Figure IV. 23 Filiation de dureté de la 1ere réparation

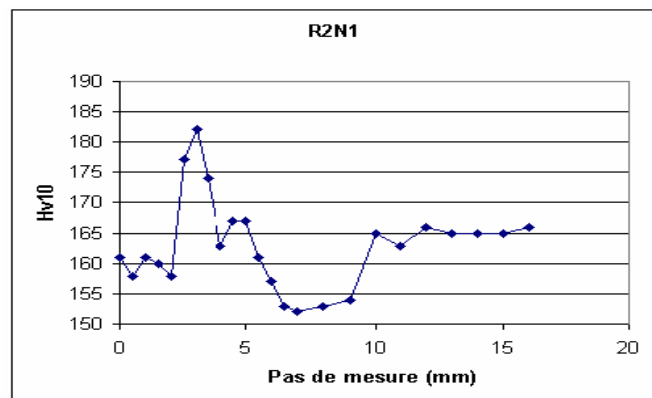
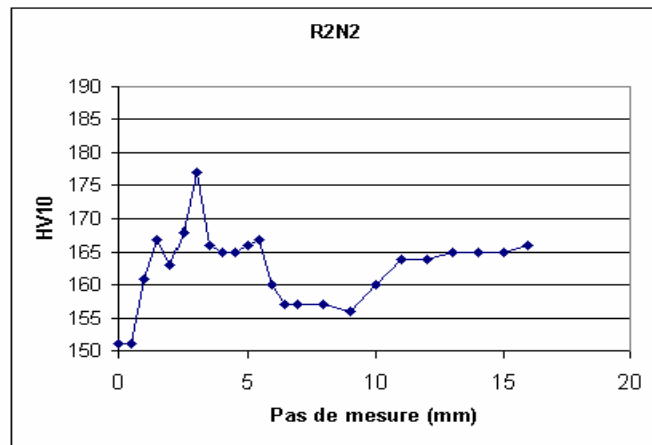
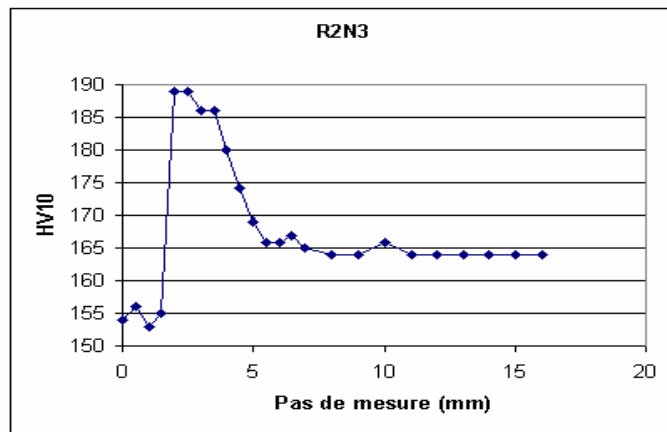
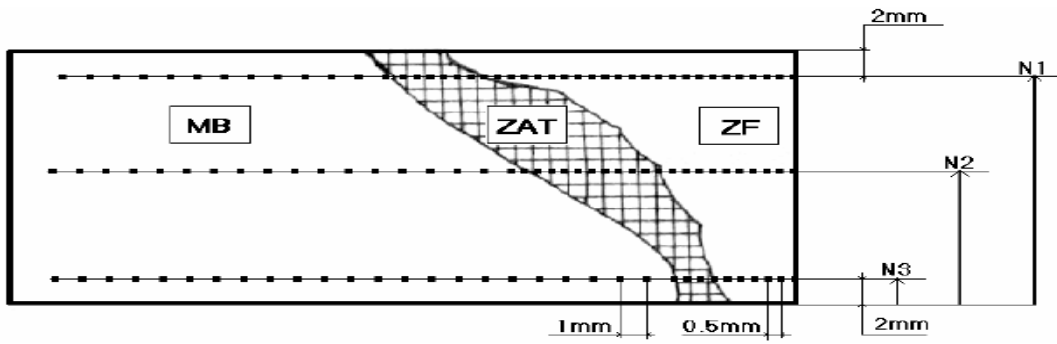
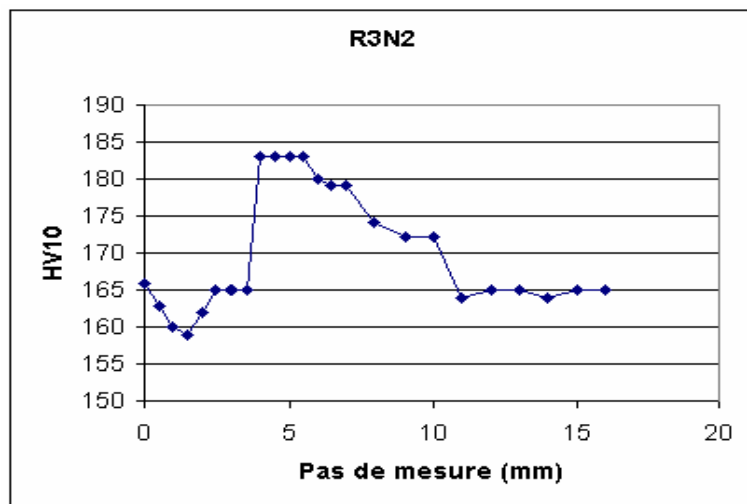
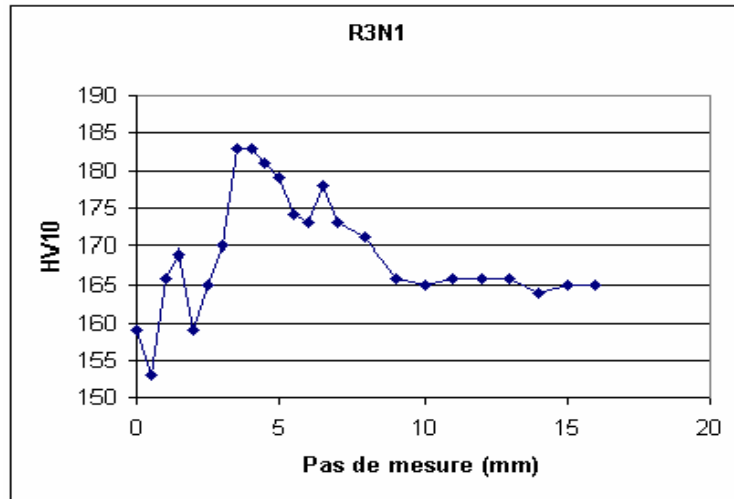
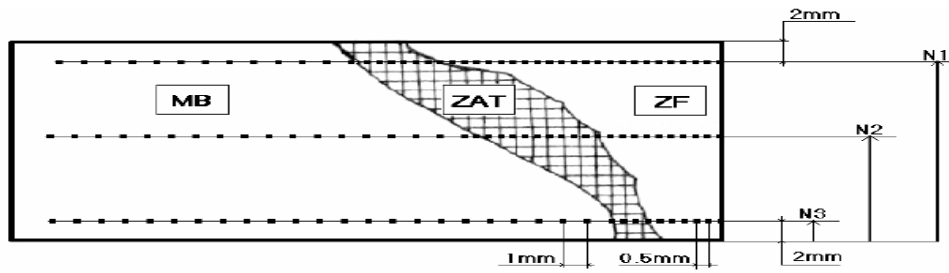


Figure IV.24 Filiation de dureté de la 2eme réparation



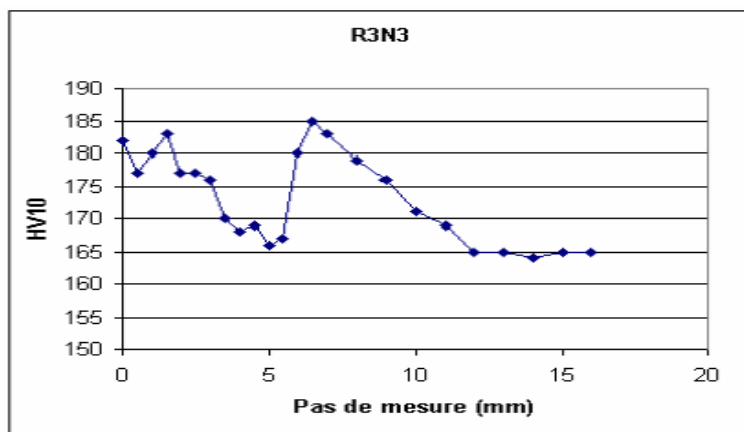
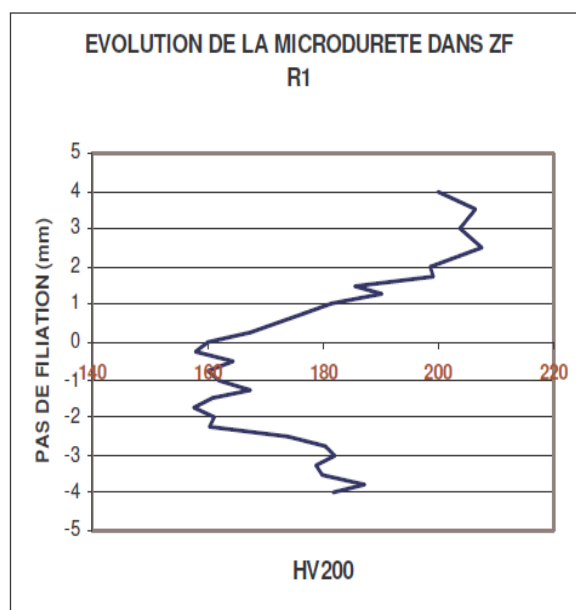
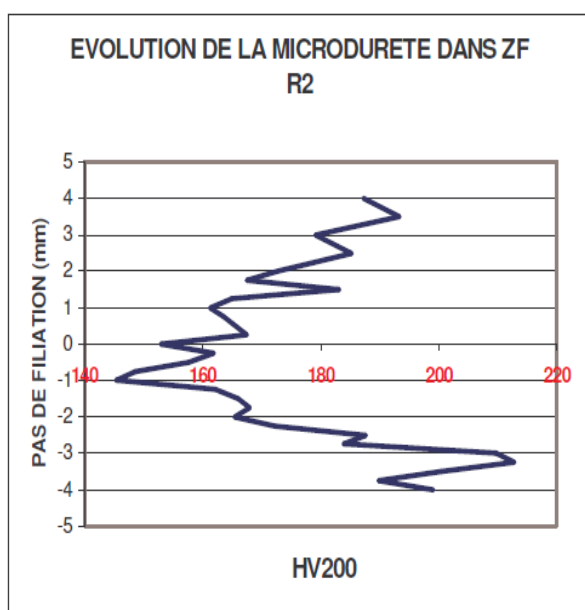


Figure IV.25 Filiation de dureté de la 3eme réparation

La partie centrale de la zone fondue est caractérisée par une dureté relativement faible comparée aux faces inférieure et supérieure du cordon correspondant respectivement aux passes de fond et de finition de la soudure. Cette constatation a pu être confirmée par une filiation de microduretés effectuée dans le sens de l'épaisseur dans l'axe de symétrie du cordon (ZF) (voir figure IV.26) et peut être expliquée par l'effet du soudage multi passe où les passes antérieures subissent un adoucissement de la structure (dureté faible) en excluant bien entendu la passe de fond qui subit une trempe à l'air, de ce comportement. Ce phénomène est similaire à celui observé dans l'essai Jominy où la dureté au coeur de l'échantillon traité est inférieure à celle relevée à son extrémité.



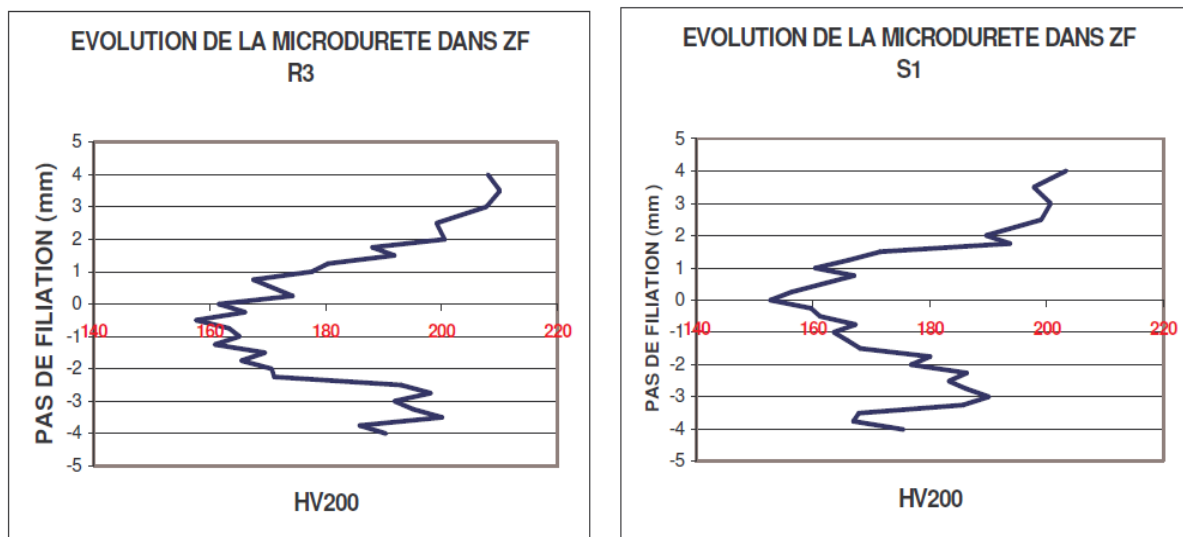


Figure IV.26: Evolution de la microdureté pour les différents échantillons

Concernant les courbes de filiations de duretés telles que schématisées dans les figures IV.23 à IV.26, et en prenant comme référence la valeur (165 Hv) de la dureté du métal de base, relevée sur la soudure suffisamment loin de la zone fondue, toutes les courbes à une exception près, présentent une même allure, commençant par la plus faible valeur du côté de la zone fondue, celle-ci augmente dans la région de la ZAT en prenant la forme d'une cloche dont la valeur moyenne est supérieure à celle du MB. A l'extrémité de la ZAT (côté MB) la courbe décroît pour reprendre la valeur de référence suscitée. Il y a lieu de constater que la largeur de la cloche que présente les différentes courbes de dureté, croît au fil des réparations, vu que l'étendue de la ZAT se trouve à chaque réparation élargie comme nous l'ont montré les macrographies .

IV.II.3 Essai de pliage

L'essai de pliage a été effectué sur 04 éprouvettes extraites de chaque pièce. Toutes les éprouvettes ont réagi positivement à l'essai, sans aucun signe de fissuration ni dans le joint ni dans la zone de liaison.

La bonne tenue à l'essai de pliage nous informe sur la bonne qualité du soudage et du comportement de l'assemblage en compression.

IV.II.4. Caractéristiques métallographiques

IV.II.4.1 Photographies des micrographies

Des micrographies représentatives prises dans les différentes zones du cordon de soudure d'une part verticalement, et horizontalement d'autre part sont présentées ci-dessous :

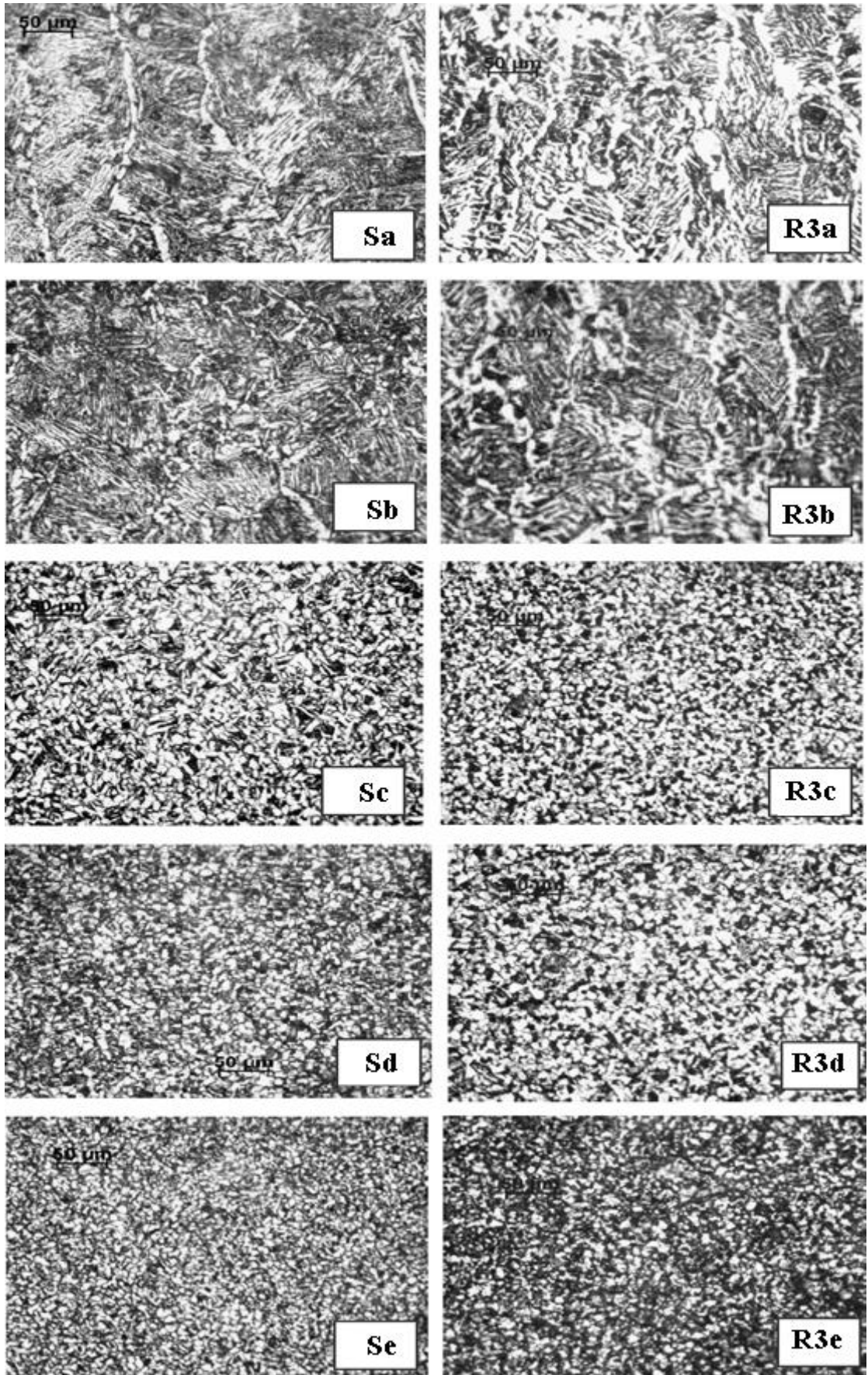


Figure IV.27 : Evolution structural verticale

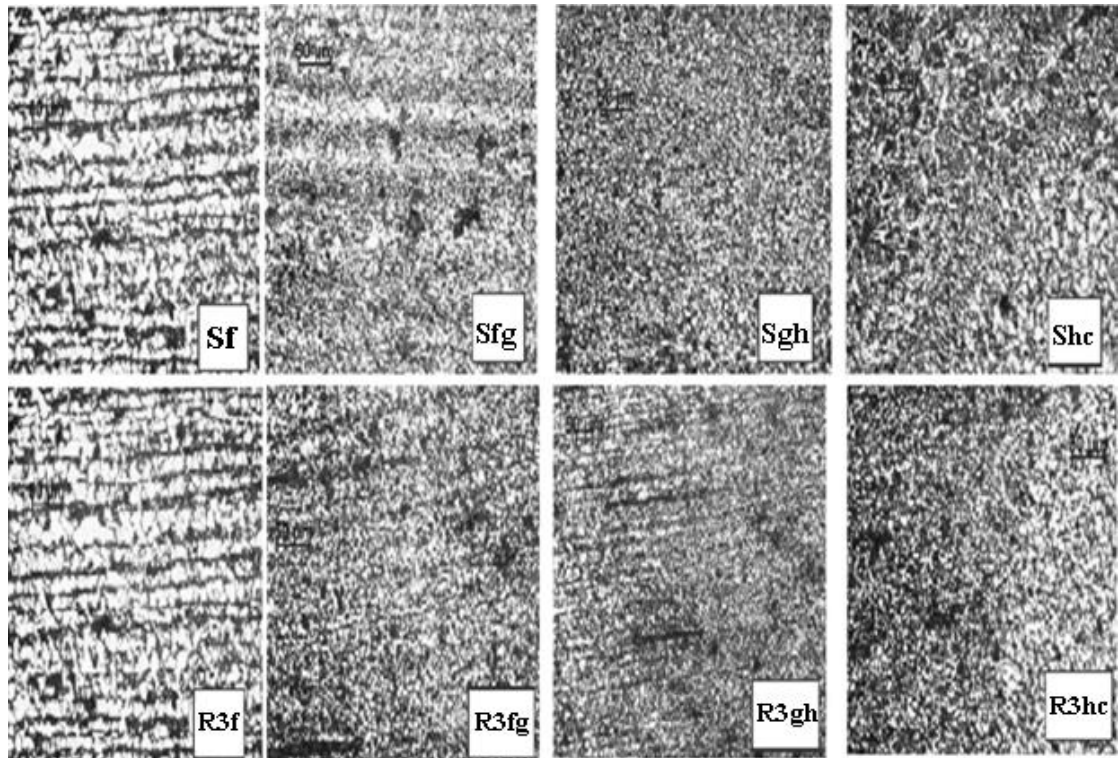


Figure IV.28 : Evolution structural horizontale

IV.II.4.2. Etude des micrographies

Par le biais des micrographies obtenues sur les différents échantillons des soudures exécutées, nous allons essayer d'analyser l'évolution structurale sur deux directions différentes :

- Evolution transversale
- Evolution en profondeur

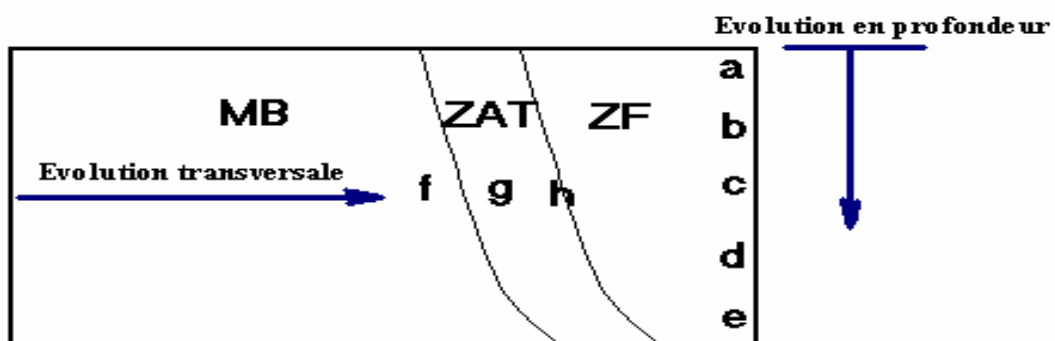


Figure IV.29 : Schéma explicatif des différents prélèvements micrographiques

IV.II.5. Photographies des macrographies

Les observations macroscopiques permettent d'avoir des macrographies (Figures IV.30 à IV.33) qui révèlent les différentes zones du joint soudé. Nous avons procédé à un agrandissement de quatre fois et demi pour une meilleure lisibilité.

IV.5.1 Observations sur les macrographies

L'observation des macrographies permet de faire le point sur l'évolution de l'étendue de la ZAT et de la zone fondue en prenant comme référence la soudure initiale. C'est ainsi que l'on constate que l'étendue des différentes zones croît au fur et à mesure que l'échantillon subit des réparations successives.

Les histogrammes représentant l'évolution des aires des différentes zones, mettent en évidence l'augmentation continue de celles-ci d'une réparation à une autre.

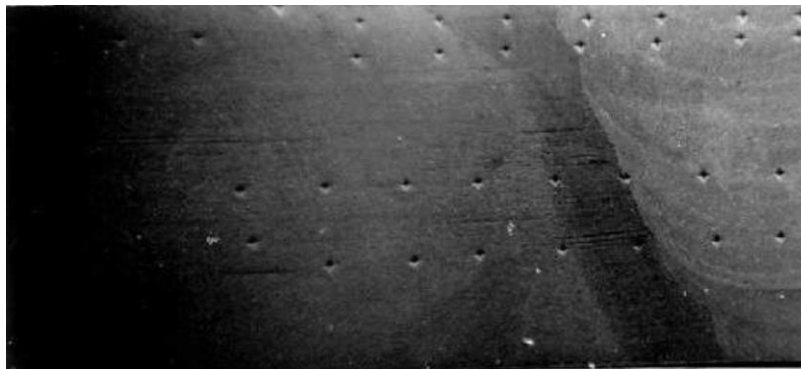


Figure IV.30 : macrographie de la soudure initiale (non réparée) (S1)



Figure IV.31 macrographie de la soudure avec une 1ère réparation (R1)



Figure IV.32 macrographie de la soudure avec une 2ème réparation (R2)

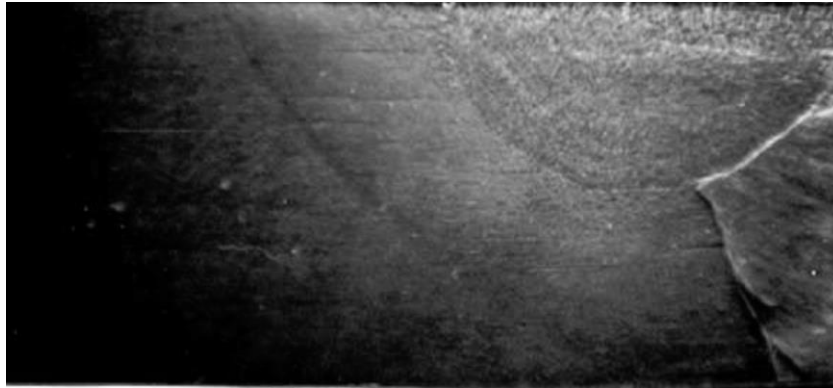


Figure IV.33 macrographie de la soudure avec une 3ème réparation (R3)

IV.II.5.2. Schématisation des sections des différents échantillons (évaluation des aires)

Pour indiquer l'évolution de l'étendue de la ZAT des réparations successives, on a schématiser les figures précédents donc on aura :

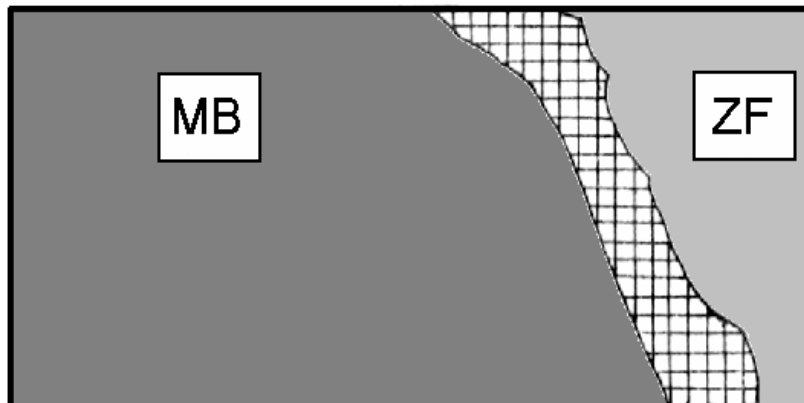


Figure IV.34 Maillage de la ZAT pour la soudure initiale (S1)

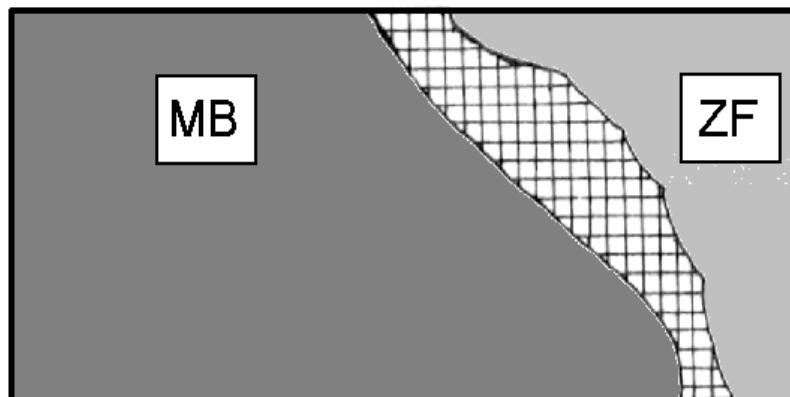


Figure IV.35 Maillage de la ZAT pour la 1^{er} réparation (R1)

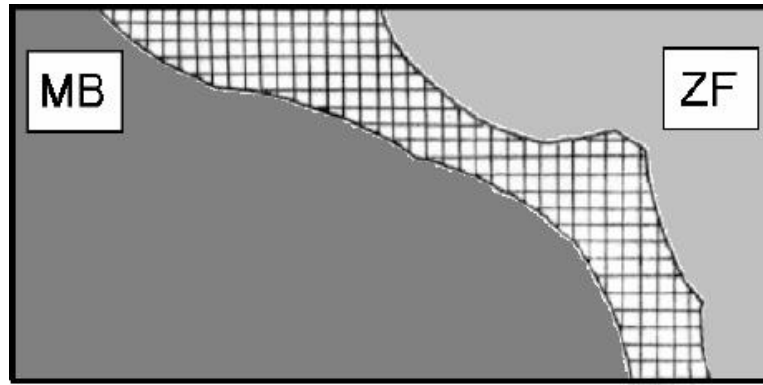


Figure IV.36 Maillage de la ZAT pour la 2ème réparation (R2)

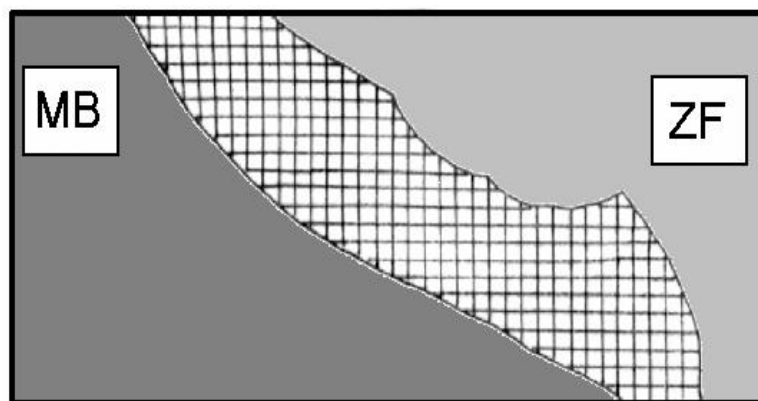


Figure IV.37 Maillage de la ZAT pour la 3ème réparation (R3)

Le tableau IV.4 donne les valeurs des aires des différentes zones, ces valeurs sont obtenues, reposant essentiellement sur les résultats de l'examen macrographique. Ce dernier donne la topographie des joints soudés (figures IV.34 à IV.37), délimitant les différentes zones par des isothermes clairement observables.

TABLEAU IV.4 : Détermination des aires de ZF et ZAT pour les différents échantillons.

Aire (mm ²)	S1	R1	R2	R3
ZAT	25.2	29.3	53.02	68.80
ZF	41.51	45,13	48.85	69.2

En se basant sur les valeurs de ce tableau les histogrammes (figures IV.38 et IV.39) mettent en évidence l'augmentation en volume de la zone fondue et de la ZAT en fonction du nombre de réparations.

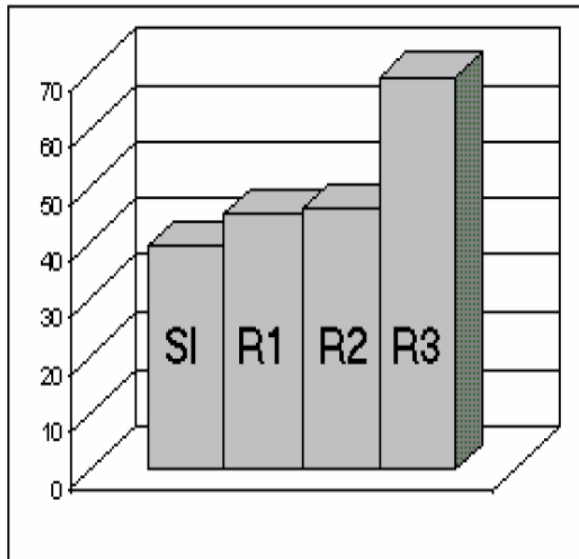


Figure IV.38 Aire de la zone fondue en fonction des réparations

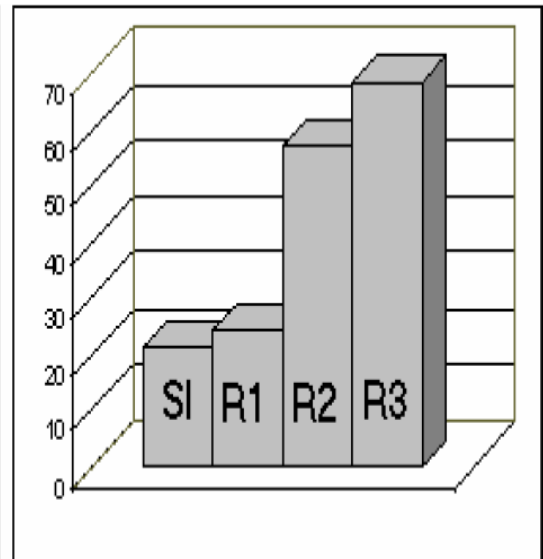


Figure IV.39 Aire de la ZAT en fonction des réparations

IV.II.6 Analyse des cycles thermiques

Le prélèvement des températures aux alentours des joints soudés ont donné les cycles thermiques suivants

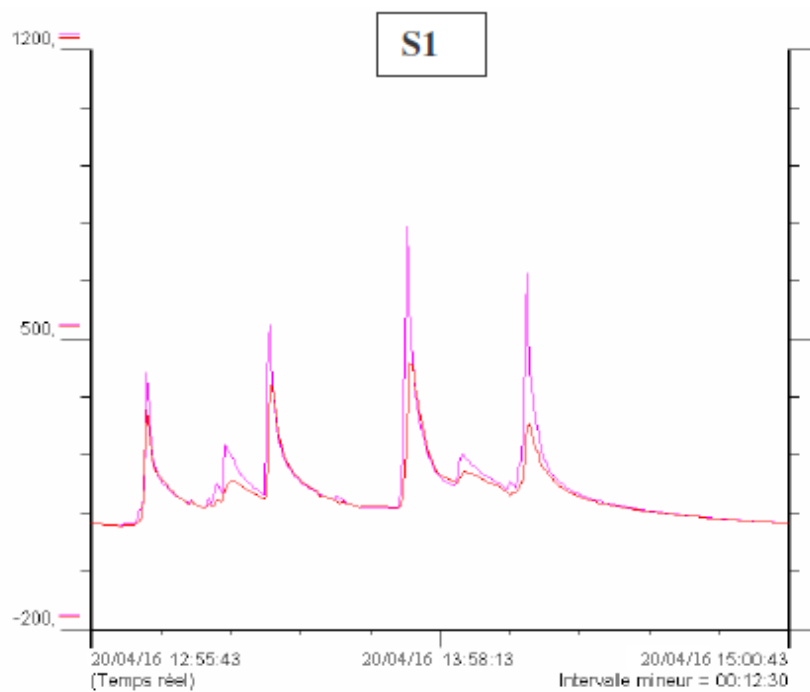


Figure IV.40 - Diagramme thermique de la soudure initiale

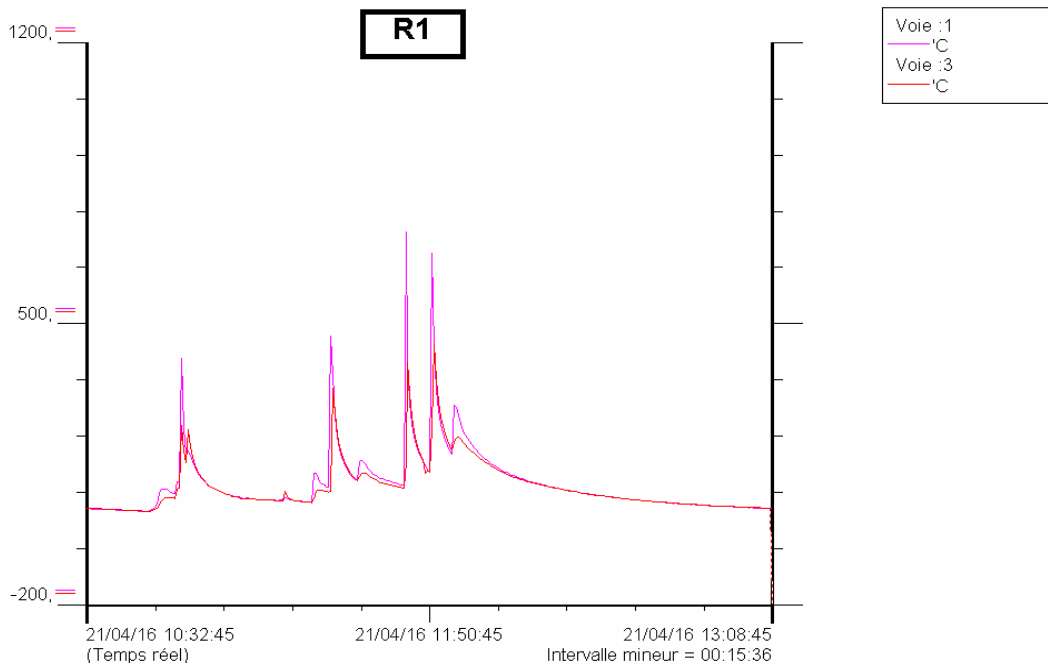


Figure IV.41 : Diagramme thermique de la première réparation

Les cycles thermiques enregistrés durant l'opération initiale de soudage ainsi que ceux des différentes réparations successives ne peuvent faire l'objet que d'une exploitation qualitative ; ceci est dû aux positions d'implantation des deux thermocouples d'une part et d'une autre part, les durées relativement longues des opérations de soudage et de réparation.

Ce qui est certain c'est que les régions devant être explorées atteignent des températures supérieures au maximum de température enregistré par la station d'acquisition (700°C), lui même suffisant pour obtenir des transformations microstructurales.

Les cycles thermiques relevés par le thermocouple interne ne sont pas aussi remarquables que ceux du thermocouple externe, à cause de la première passe (existant pour toutes les réparations effectuées) qui constitue un obstacle empêchant un rapprochement important de la source d'énergie du thermocouple. L'effet du préchauffage des passes successives de réparation évite une évolution monotone des pics de température enregistrés pour ce même thermocouple.

Conclusion générale

Ce modeste travail consisté à l'analyse et la compréhension de l'effet des réparations successives sur l'état d'une construction soudée.

Nous nous sommes limités aux principales propriétés mécaniques pour constater l'effet de ces réparations, il se confirmé que l'on ne peut réparer indéfiniment par ce que à chaque réparation effectuée, elle rapporte à un grandissement de la zone affectée thermiquement qui est la région la plus vulnérable d'un assemblage soudé.

Le nombre des essais effectués ne permet pas de se prononcer sur le nombre de réparations possibles, mais il est clair que le nombre ne peut être important du fait de l'altération, de plus en plus importante de la qualité de la soudure et du coût de revient de l'assemblage de plus en plus élevé sans donner de certitude sur sa qualité.

Donc en conclusion en constate de cet étude qu'un grand nombre des réparations sur les mêmes sections augmentent la fragilité et diminuent les propriétés mécaniques d'acier ce qui influe négativement à son efficacité et son bon fonctionnement.

Références bibliographiques

- [1] - MOUSSAI A. TOUFIK « Thèse MAGISTER 2004 »
- [2] - B. HICHEM « Optimisation de la vitesse de soudage à l'arc électrique des aciers », Juin 2013
- [3] - Soudage et coupage au chalumeau. Conseils d'utilisation. Edition INRS ED 742. 2000
- [4] - Opérations de soudage à l'arc. Guide pratique de ventilation n° 7. Editions INRS ED 668. (INRS) (1996)
- [5] - Soudage à l'arc, C.E.R. ENSAM Angers-Laboratoire Industriel de Déformation Plastique ; www.angers.ensam.fr
- [6] - DRUI M, HENNI A, HEUGEL M, MARTIN C, SIMON C. Les différents procédés manuels de soudage, leurs risques et leur prévention ; 2003
www.ast67.org
- [7] -R. VARISELLAZ Soudage : Eléments de conception de réalisation (Duodi 1987).
- [8] - de site web <http://www.aciersspeciaux.fr/propriétés-mécaniques-des-métaux/>
- [9] - CSMOFMI : Soudage et assemblage-soudage « Défauts de soudure • Chapitre 6 »
- [10] - S. LAROZE Résistance des matériaux et structures, (Eyrolles, Masson 1982)
- [11] - D. SEFERIAN Métallurgie de la soudure - DUNOD - 1959.
- [12] - Jean-Michel VIGO OTUA le soudage appliqué à la construction de ponts métalliques « 30/01/03 »
- [13] - B. CATOT Traitement thermique, revue de métallurgie 124-78, p. 81-88, 1978.
- [14] L.DE RYCK, L. LEGUYADER, Essai de traction pur, Mai 2002
- [15] - C. CHAUSSIN, Manuel pratique des aciers et de leurs traitements thermiques, Dunod 1981.

- [16]- E. MACHERAUCH and V. HAUKE Residual stresses in science and technology - ICRS 1987, Volume 1.
- [17]- E. OROWAN Symposium on internal stresses in metals and alloys. 16 October 1947 p. 47-61. London
- [18]- J.O. ALMEN, P.H. BLACK Residual stresses and fatigue in metals - McGRAW-HILL BOOK COMPANY,
- [19] - R. CASTRO Métallurgie du soudage des aciers inoxydables et résistant à chaud.
- [20]- T.R. GURNEY, Fatigue of welded structures. Cambridge University Press, 1968.
- [21]- G.E. NORDMARK and al. ASTM-STP 776, pp. 44-62, May 1981.
- [22]- E. HACHERAUCH and V. Residual stresses in science and technology - ICRS 1987, Volume 2.
- [23] - Journées de printemps de la S.F.M. 4 et 5 juin 1985, Fatigue des assemblages soudés
- [24] - A. LARI CETIM - Information n° 62, p. 69-73, CETIM Senlis.
- [25] - Alain MICHEL. "Traitements thermiques et mécaniques". Ingénieur CNAM et ESSA Professeur à l'École supérieure du soudage et de ses applications (ESSA)
- [26] - B. BARTHELEMY, Notions pratiques de mécanique de la rupture - Editions EYROLLES -Paris 1980
- [27] - C. LEYMONIE, R. BOUVEROT, Contribution à l'étude des traitements thermiques après soudage d'aciers faiblement alliés, Soudage et techniques connexes N°1/2 1970
- [28] - C. BOUHELIER, Traitements thermiques des constructions chaudronnées Note technique de CETIM N°21, Décembre 1981
- [29] - H. GRANJON. Bases métallurgiques de soudage, publications de soudage et de ses applications 1995
- [30] - P. GROSTABUSSIAT SOPHIE. Conséquences mécaniques des transformations structurales dans les alliages ferreux, thèse de doctorat, INSA Lyon, Déc.2000)
- [32] - B. CHASSIGNOLE, Influence de la structure métallographique des soudures en acier inoxydable sur Le contrôle non destructif par ultrasons, thèse de doctorat, INSA, Lyon, Décembre 2000

- [33] - Techniques de l'ingénieur traité Génie mécanique B (7745) (article Soudage par friction).
- [34] - AMAR TAIBI, étude de l'influence des paramètres de soudage par laser continu sur l'émission spectrale et temporelle du plasma de soudage. Application à l'acier inoxydable 304L, le titane TI40, et l'aluminium.
- [35] - A. LELUAN, Mécanique n° 289, p. 29-34, Janvier 1974.
- [36] - MAKRI HOCINE « Thèse MAGISTER »
- [37] DEBRUNNER ACIFER, Tôles en acier, Programme de stock et de livraison Informations techniques. 07 / 2014