

UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA

Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Département de Mécanique

MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : Construction Mécanique

**INFLUENCE DES REPARATIONS SUCCESSIVES SUR LA
QUALITE D'UN JOINT DE SOUDURE EN ACIER
H.L.E A.P.I 5 L X52**

Par

Bouzid MAAMACHE

Devant le jury composé de :

M. Hadji	Professeur. U. de Blida	Président
A. Benchaala	Professeur. U.S.T HB /CSC	Examineur
M. Bouabdalah	Professeur. E.N.P. El Harrach	Examineur
A. Brahim	Chargé de cours. U. de Blida	Rapporteur

Blida, 2005

RESUME

L'objet de la présente étude consiste à mettre en évidence l'influence des réparations successives sur la qualité d'un joint soudé, sachant que ces réparations constituent un problème majeur dans l'industrie des transports des hydrocarbures.

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 au transport d'hydrocarbures. Les résultats de l'analyse métallographique et des essais mécaniques montrent l'effet néfaste des réparations, qui portent préjudice à la durée de vie de l'ouvrage concerné. Nous décrivons les moyens, les techniques et les modes opératoires utilisés au cours de notre analyse.

ملخص

نهدف من خلات هذه الدراسة ابراز تأثير عمليات التصليح المتتالية على جودة التركيب

الملحم؛ علما بأن هذه الأصلاحات تشكل عائق صناعي في ميدان نقل المحروقات.

نقوم بدراسة تأثير الدورات الحرارية للتلحيم على تغيرات البنية المجهرية في المناطق

المنصهرة و المتأثرة حراريا و كذا امتداد كلا من هذه المناطق.

نقوم بتلحيم و عمليات تصليح متكررة لقطعة مستخرجة من أنبوب فولادي مستعمل في نقل

المحروقات. نتاج التحليل المجهري و التجارب الميكانيكية تبين التأثير السلبي لعمليات

التصليح التي من شأنها تقليص مدة صلاحية المنشأ.

REMERCIEMENTS

Que mon directeur de thèse m'en excuse, mais je tiens en premier lieu à exprimer ma profonde gratitude à feu professeur A.BENCHAALA., Directeur du CSC, pour sa gentillesse, sa bonté et surtout son soutien permanent qui m'a énormément encouragé à achever mon travail.

Je tiens à remercier M. A. H. BRAHIMI mon directeur de thèse et chargé de cours au département de génie mécanique et ce pour m'avoir dirigé dans mon travail et fait profiter de ses connaissances qui m'ont été d'une aide appréciable.

Mes vifs remerciements sont adressés MM. HADJI. M. Professeur à l'IGM de l'USTB et président du CS, qui a bien voulu présider le jury, BOUABDALLAH. M. professeur à l'ENP et chercheur associé au CSC, pour avoir accepté de faire partie du jury et également pour son aide et son soutien inconditionnels.

Je tiens également à remercier mes amis et collègues H. MAZA, M. E. FAHSSI et R. RABAH-OTMANI pour leurs aides et soutiens permanents.

Je remercie profondément mes collègues, MM. Y. DJEDOU et R. ISSAAD pour m'avoir procurer les tubes d'acier qui ont été la pièce maîtresse de la partie expérimentale de mon travail. Que MM. M. BELAROUÏ, S. A. AHMED AISSA, M. BOURAHLA soient assurés de ma totale gratitude, pour leur disponibilité et dévouement.

Je dois ma totale reconnaissance à, MM. BACHA, AIAD, AIT MESSAOUDENE et OUALI, mes enseignants qui m'ont tant donné sur le plan scientifique durant l'année théorique.

Mes remerciements sont aussi adressés à Lamine de l'école de soudage d'ETTERKIB pour sa gentillesse et sa générosité.

Que tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans la concrétisation de mon travail, soient vivement remerciés, en particulier, mon ami Y. MEGNOUCHE et M. B. BOUYOUSSEFI, Chef de département de génie mécanique de l'USTB.

TABLE DES MATIERES

RESUME	
REMERCIEMENTS	
TABLE DES MATIERES	
LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX	
INTRODUCTION	7
1. SOUDAGE DES ACIERS AU CARBONE	8
1.1. Les aciers au carbone	8
1.2. Soudage des aciers courants de construction au carbone	9
1.3. Procédure de soudage à l'arc avec électrode enrobée	11
1.4. Notion de métallurgie de soudage	12
1.5. Les cycles thermiques de soudage	13
1.6. Soudage avec déplacement de la source	14
1.7. Solidification et transformations dans la soudure	19
2. LES ACIERS A DISPERSOIDES H.L.E	25
2.1. Elément et aciers a dispersoïdes	25
2.2. Propriétés des aciers H.L.E	27
2.3. Rôles des éléments d'alliages	28
2.4. Soudage des aciers HLE	29
3. INVESTIGATIONS EXPERIMENTALES	30
3.1. Notions sommaires sur les essais mécaniques d'un assemblage soudé	30
3.1.1. Essai de traction	30
3.2. Mesure de la dureté sous cordon	32
3.3. Présentation de l'assemblage soude	32
3.3.1. Forme du joint	33
3.3.2. Procédure de réparation	34
3.4. Méthode de prélèvement des échantillons	35
3.4.1. Pour les essais de traction et de pliage	35

3.4.2. Essai de dureté	38
3.4.3. Mesures et filiations de dureté et micro dureté	39
3.5. Examen macrographique	39
3.5.1. Technique de macrographie	40
3.5.2. Technique de micrographie	40
3.6. Evaluation de l'étendue de la ZAT et la ZF	40
3.7. Méthode de prélèvement des cycles thermiques	41
4. RESULTATS EXPÉRIMENTAUX ET DISCUSSION	42
4.1. Caractéristiques chimiques	42
4.2. Caractéristiques métallographiques	43
4.2.1. Photographies des macrographies	44
4.3.2. Schématisation des sections des différents échantillons ; évaluation des aires	44
4.4. Observations sur les macrographies	46
4.4.1 Photographies des micrographies	46
4.4.2. Etude des micrographies	49
4.5. Analyse des caractéristiques mécaniques	51
4.5.1. Essai de traction	51
4.5.2. Essais de pliage	54
4.6. Analyse des cycles thermiques	54
4.7. Résultats des essais de dureté	56
CONCLUSION	64
APENDICE	
A : PROCEDURE DE SOUDAGE ET DE REPARATION	65
B : MICROGRAPHIES DES REPARATIONS	67
REFERENCE	71

LISTE DES ILLUSTRATIONS GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure 1.1 : Evolution des températures suivant l'axe Y	10
Figure 1.2 : Schéma de principe du Soudage a l'arc électrique	11
Figure 1.3 : Présentation macrographique d'un joint soudé	12
Figure 1.4 : $\theta = f(t)$	14
Figure 1.5 : $\theta_m = f(x)$	14
Figure 1.6 : $\theta_{Ai} = f(t)$	15
Figure 1.7 : $\theta = f(t)$	16
Figure 1.8 : Influence du préchauffage sur la vitesse de refroidissement	17
Figure 1.9 : Effet thermiques du soudage en plusieurs passes	17
Figure 1.10 : La recristallisation lors du soudage	22
Figure 1.11: Transformation à l'état solide de la microstructure lors du soudage	22
Figure 3.1 : courbe de traction	31
Figure 3.2 : joint bout à bout normal avec un chanfrein en V	33
Figure 3.3 : Répartition des passes successives dans le joint soudé	34
Figure 3.4 : Soudure avant meulage de réparation	34
Figure 3.5 : Préparation du joint pour une première	35
Figure 3.6 : Rechargement du joint lors de la première réparation	35
Figure 3.7 : Méthode de prélèvement des éprouvettes	36
Figure 3.8 : tube soudé avant prélèvement d'éprouvettes	36
Figure 3.9 : Prélèvement d'éprouvettes	37
Figure 3.10 : Dimension de l'éprouvette de traction	37
Figure 3.11 : Dimension réel de l'éprouvette de traction et de pliage	37
Figure 3.12 Eprouvettes de traction	38
Figure 3.13 : Eprouvettes de pliage	38
Figure 3.14 : Eprouvette pour essai de dureté	38
Figure 3.15 : Filiation de dureté	39
Figure 3.16 : Détails sur le maillage dans la ZAT	41
Figure 3.17 : Méthode de prélèvement des cycles thermiques	41

Figure 4.1 macrographie de la soudure initiale (non réparée) (S1)	43
Figure 4.2 : macrographie de la soudure avec une 1 ^{ère} réparation (R1)	43
Figure 4.3 : macrographie de la soudure avec une 2 ^{ème} réparation (R2)	43
Figure 4.4 : macrographie de la soudure avec une 3 ^{ème} réparation (R3)	44
Figure 4.5 : Maillage de la ZAT pour la soudure initiale (S1)	44
Figure 4.6 : Maillage de la ZAT pour la 1 ^{ère} réparation (R1)	44
Figure 4.7 : Maillage de la ZAT pour la 2 ^{ème} réparation (R2)	44
Figure 4.8 : Maillage de la ZAT pour la 3 ^{ème} réparation (R3)	45
Figure 4.9 : Aire de la zone fondue en fonction des réparations	45
Figure 4.10 : Aire de la ZAT en fonction des réparations	45
Figure 4.11 : Evolution structural verticale	47
Figure 4.12 : Evolution structural horizontale	48
Figure 4.13 : Schéma explicatif des différents prélèvements micrographies	49
Figure 4.14 : Courbes de traction des différents éprouvettes	53
Figure 4.15 : Diagramme thermique de la soudure initiale	54
Figure 4.16 : Diagramme thermique de la première réparation	55
Figure 4.17 : Filiation de dureté de la soudure initiale	57
Figure 4.18 : Filiation de dureté de la 1ere réparation	58
Figure 4.19 : Filiation de dureté de la 2eme réparation	59
Figure 4.20 : Filiation de dureté de la 3eme réparation	60
Figure 4.21 : Evolution de la microdureté pour les différent échantillons	62
TABLEAU N° 1.1 : Données sur la soudabilité en fonction du carbone équivalent	19
TABLEAU N° 4.1 : Composition chimique du métal de base, des assemblages soudés et réparés	42
TABLEAU N° 4.2 : Détermination du rapport Mn/Si pour les différent échantillons	43
TABLEAU N° 4.3 : Détermination des aires de ZF et ZAT pour les différent Echantillons	45
TABLEAU N° 4.4 : Caractéristiques de l'essai de traction des éprouvettes étudiées	52

INTRODUCTION

Dans la construction métallique les techniques d'assemblage sont en continuelle évolution, 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'influence des réparations, en exagérant leur nombre, dans l'espoir de mettre en évidence leurs effets.

Dans une première partie nous évoquons les effets des cycles thermiques et l'influence des paramètres qui les caractérisent, sur l'évolution structurale des soudures. Nous rappelons le rôle des différents éléments de la composition chimique des différents matériaux intéressés par l'opération de soudage.

Dans la partie expérimentale nous procédons au soudage et à la réparation, plusieurs fois de suite, d'une éprouvette en acier utilisé dans le transport des hydrocarbures. Nous décrivons les moyens, les techniques et les modes opératoires.

Les résultats et leur interprétation constituent la troisième partie de ce travail.

CHAPITRE 1

1. SOUDAGE SES ACIERS AU CARBONE

1. 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 côté 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 %).[1]

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 ».

1.2. 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.[1]

La figure 1.1 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 qu'les isothermes correspondantes qui délimitent les quatre zones définies comme suit

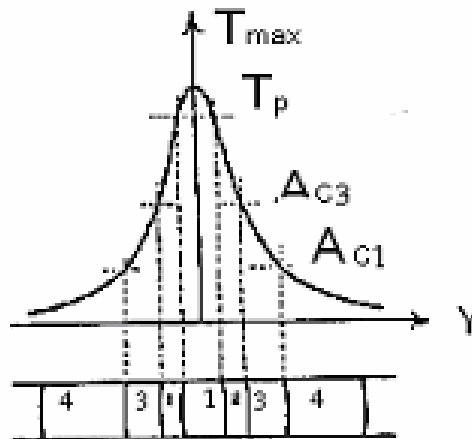


Figure 1.1 : Evolution des températures suivant l'axe Y

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} .

1.3. Procédure de soudage à l'arc avec électrode enrobée

Introduction

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 1.2.

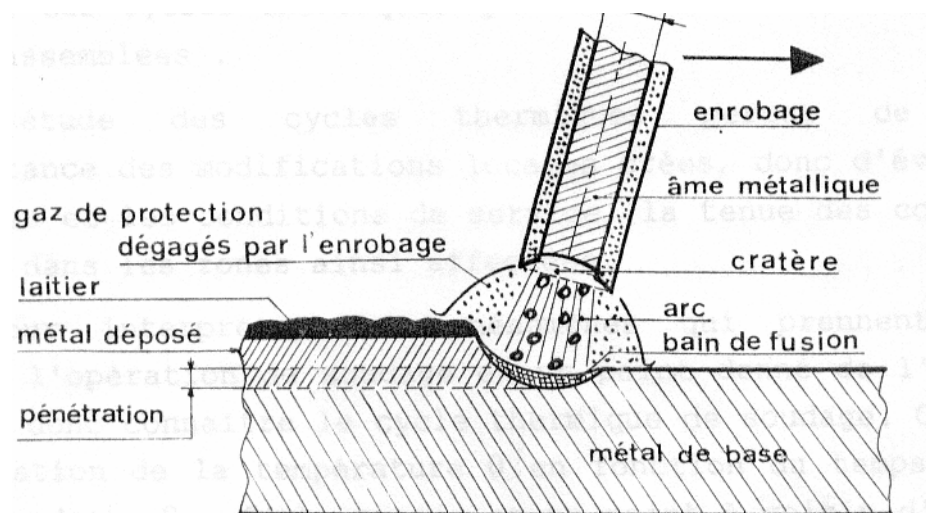


Figure 1.2 : Schéma de principe du Soudage a l'arc électrique

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. [10]

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. [10]

1.4. 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.1.3) :

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

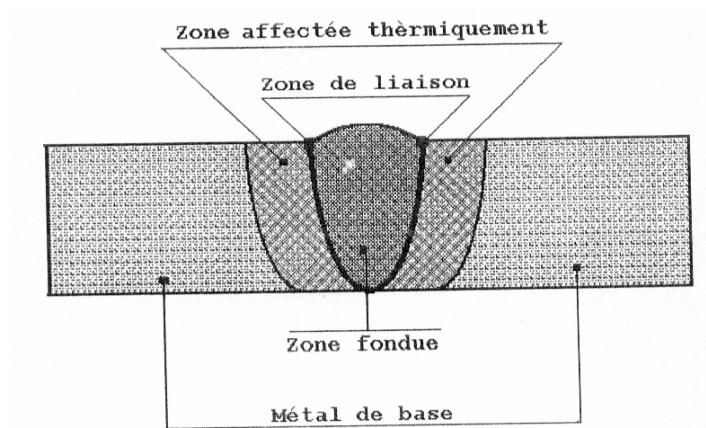


Figure 1.3 : Présentation macrographique d'un joint soudé

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. [4]

1.5. 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 engendre 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 1.4) 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 1.5) 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.

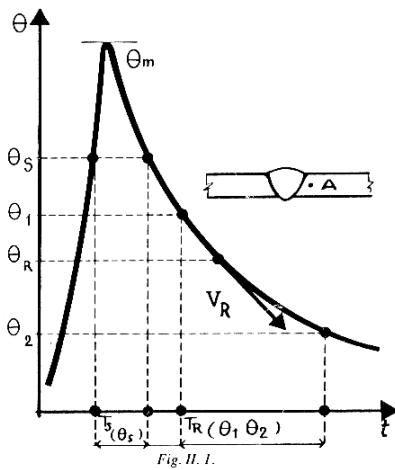


Figure 1.4 : $\theta = f(t)$

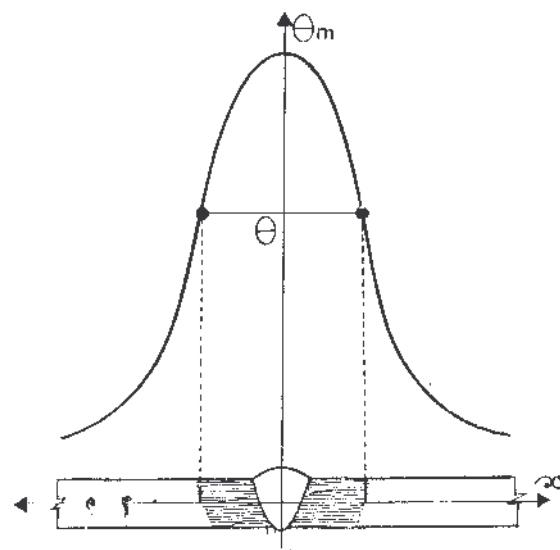


Figure 1.5 : $\theta_m = f(x)$

1.6. Soudage avec déplacement de la source

L'installation de thermocouples en des points A_i situés à la même distance 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 1.6 [1]. Cette courbe nous conduit à deux remarques bien spécifiques au soudage avec déplacement de la source de chaleur :

A) 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.

B) Tel θ_m , les lois de refroidissement deviennent identiques et les courbes de refroidissement peuvent être superposées.

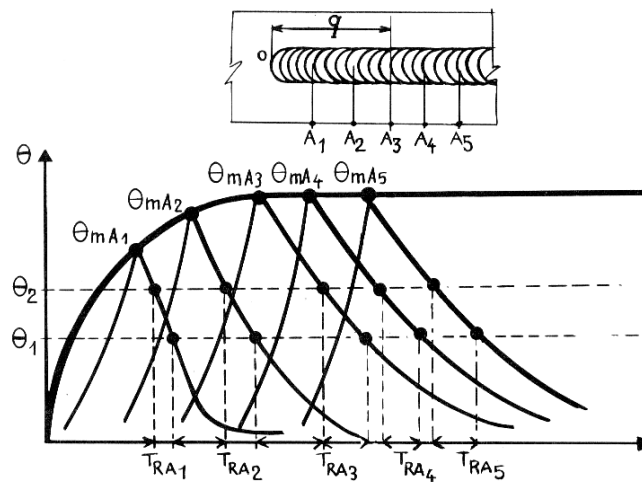


Figure 1. 6 : $\theta_{Ai} = f(t)$

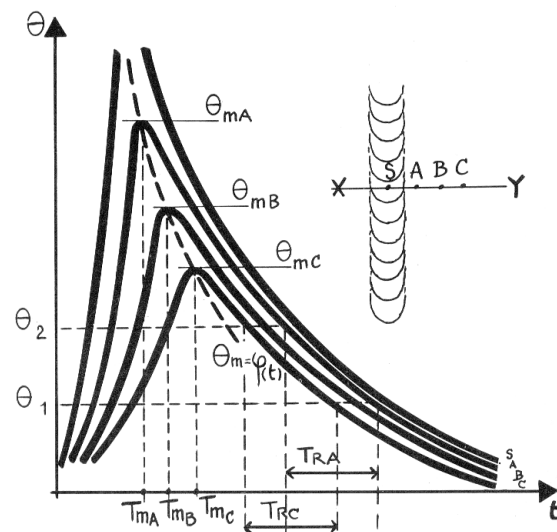
Les points A et B précédents s'expliquent par le fait que l'énergie dissipée par conductibilité de la pièce est à chaque instant compensée par l'énergie fournie au niveau de la source de chaleur. Ce régime thermique est dit quasi-stationnaire [1].

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 $\theta = f(t)$ –fig 1.7- 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.

$$[|T_{mB} - T_{mA}| < |T_{mC} - T_{mB}|]$$

Ceci explique le fait qu'au voisinage de la ligne de soudure les points les plus rapprochés sont entrain 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 1.7 : $\theta = f(t)$

- 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 la

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 1.8).

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. [1][3][4]

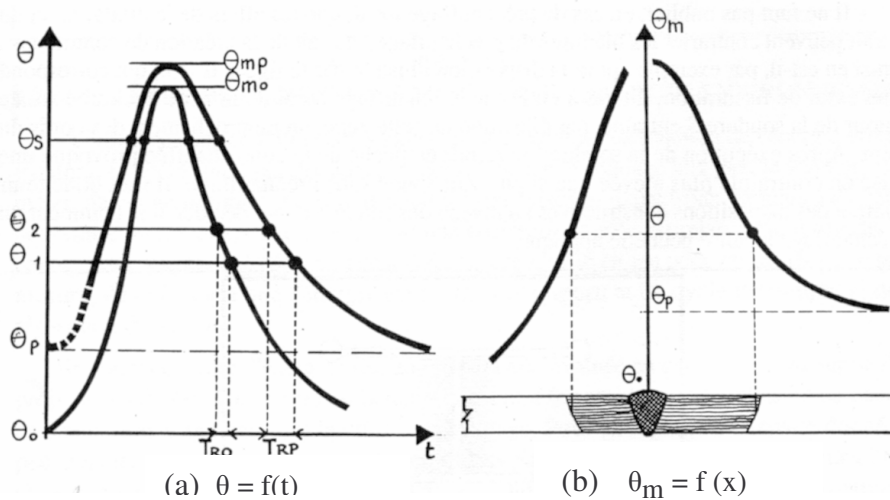


Figure 1.8 : Influence du préchauffage sur la vitesse de refroidissement

En présence des soudures en multipasse, 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.

La figure 1.9 montre les effets thermiques du soudage en plusieurs passes, d'un cas de soudure sur bords chanfreinés en V, dont la courbe température-temps est déterminé en un point A affecté dès la première passe. [1]

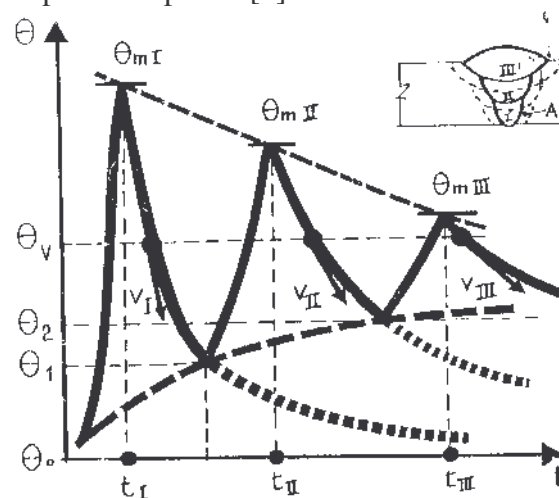


Figure 1.9 : Effet thermiques du soudage en plusieurs passes

L'exécution de cette première passe se traduit par une première montée en température jusqu'à la valeur maximale θ_{mI} , suivie d'un refroidissement caractérisé par la vitesse de refroidissement V_r . Avant que la température n'ait rejoint la température initiale θ_0 , un nouveau cycle thermique intervient. Ce dernier est caractérisé par une température maximale θ_{mII} et une vitesse de refroidissement V_{rII} . Ce cycle diffère du premier du fait que l'on s'éloigne du point de mesure A, avec la température θ_{mII} inférieure à θ_{mI} et V_{rII} inférieure à V_r . Cette deuxième passe est influencée par un effet analogue à celui du préchauffage, car ce cycle part de θ_I plus grande que θ_0 . Ce raisonnement est applicable pour toutes les passes suivantes pour les mêmes raisons. [1]

Quand la soudure est exécutée en plusieurs passes, la chaleur des passes successives exerce une action bienfaisante de traitement thermique pour les passes déjà exécutées.

Après le dépôt, la première passe présente la structure dendritique typique de fusion. Lors du dépôt de la seconde passe, une partie de la première fond pour être englobée dans la zone fondue de la seconde passe. C'est donc comme si la première passe subissait un cycle thermique assimilable à un traitement de normalisation qui fait disparaître la structure dendritique primitive pour la remplacer par une autre plus fine.

Dans le cas du soudage multipasse, les effets de chaque passe sont analogues à ceux décrits dans ce qui précède mais la zone de surchauffe d'une passe quelconque est partiellement normalisée par la passe suivante. Par ailleurs les régions qui subissent successivement le même phénomène irréversible à chaque passe, sont plus sensibilisées à cause de la multiplication des temps de passage. De ce fait, dans toute soudure exécutée en plusieurs passes, la structure dendritique de solidification ne subsiste plus que dans la dernière passe.

I.7. 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. [6]

1.7.1. 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_{eq} qui reflète mieux le pouvoir trempant de l'acier du fait qu'il tient compte de l'action des éléments alliés sur la trempabilité.

$$C_{eq} = C + Mn/20 + Ni/15 + (Cr+Mo+V)/10 \quad [5]$$

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_{eq} pour soudage à l'arc à l'électrode enrobée basique	Soudabilité
$C_{eq} < 0,25$	Excellente
$0,26 \leq C_{eq} < 0,30$	Bonne
$0,31 \leq C_{eq} < 0,35$	Moyenne
$0,36 \leq C_{eq} < 0,40$	Mauvaise
$0,41 \leq C_{eq} < 0,45$	Très mauvaise
$C_{eq} \geq 0,46$	Impossible

Plus C_{eq} devient important en valeur plus le soudage devient difficile, ce pouvoir trempant induit aussi une fragilisation de plus en plus importante des structures dans le joint et la ZAT.

1.7.2. Bain de fusion et orientation cristalline

Le bain de fusion est défini comme étant l'emplacement d'un volume de métal à l'état liquide produit par la fusion du métal de base et éventuellement du métal d'apport.

Compte tenu de la forme et du déplacement du bain, la solidification s'amorce sur l'interface métal fondu/métal de base. Cette interface est dite zone de liaison. Dans cette zone, la cristallisation du métal en cours de solidification se fait selon le mode hypitaxique i.e. que les cristaux du solide en formation adoptent l'orientation des cristaux du métal de base sur lesquels ils reposent, et par conséquent la taille des grains de solidification est au départ déterminée par celle des grains du métal de base qui jouxtent cette zone. A partir de là, on peut dire que chaque facteur qui affine la structure de transformation (composition chimique ou cycle thermique) affine la structure de solidification [4].

Hormis les phénomènes de cristallisation et de solidification, le bain de fusion est le siège de deux phénomènes d'ordre physico-chimique : la volatilisation et la ségrégation.

La volatilisation : lorsqu'un élément est porté en phase liquide à une température à laquelle sa tension de vapeur atteint une valeur critique, il se volatilise et s'échappe sous forme de gaz et de vapeur ou de fumée. C'est le cas du Zinc qui peut se volatiliser à partir de 900°C, le Fer sous forme de fumée composée de Fe_3O_4 , le Chrome qui est très sensible à la volatilisation, le Nickel et le Titane ainsi que le Manganèse mais dans un degré moindre.

La ségrégation : ce phénomène d'hétérogénéité locale de composition chimique très connu en sidérurgie et en fonderie, peut affecter la solidification des soudures. La ségrégation peut être de type dendritique, intergranulaire ou majeure quoique cette dernière est très rarement rencontrée du fait qu'elle concerne seulement la solidification d'une masse liquide immobile, or en soudage le bain de fusion est toujours mobile. [4]

Quant aux ségrégations dendritique et intergranulaire, elles sont fréquemment rencontrées du fait de la brièveté du séjour à haute température et des conditions de refroidissement. La ségrégation dendritique intervient pour les éléments d'alliages et les impuretés ; l'hétérogénéité résulte d'une part du mode de croissance des cristaux et d'autre part du

phénomène de surfusion constitutionnelle ; le gradient de la composition chimique se trouve entre les branches des dendrites.

La ségrégation intergranulaire intervient au stade final de la formation des grains, l'hétérogénéité est locale et le gradient de composition chimique est entre le cœur du grain et le joint de grain ; elle affecte surtout la zone de liaison, ce qui accroît les risques de fissuration à chaud, conséquence directe de la fragilisation des joints de grains.

1.7.3. Transformation en phase solide : l'échauffement.

Les phénomènes thermiques de soudage diffèrent de ceux d'un traitement thermique par le fait que

- Les vitesses d'échauffement sont très élevées,
- Les temps de maintien brefs,
- Les températures maximales atteintes diffèrent d'un point à un autre.

Ces phénomènes concernent aussi bien les grains (structure), les phases (constituant) que les phénomènes de précipitation.

Parmi tous ces phénomènes on commencera par citer

- A) La recristallisation : le phénomène de recristallisation après écrouissage trouve une application directe dans le cas du soudage sur produit écroui : toute opération de soudage entraîne dans ce cas un adoucissement du métal de base ; néanmoins cet adoucissement ne concerne qu'une zone réduite de la ZAT à cause du fait de l'intervention de la transformation $\alpha \rightarrow \gamma$ qui a lieu à la température du point A_3 c'est à dire peu au-dessus de T_R et vu l'allure de $\theta=f(x)$, la zone adoucie par écrouissage ne peut être que réduite. (figure1.10) [1]
- B) La surchauffe : dite aussi recristallisation secondaire dans la mesure où elle se produit à des températures supérieures à celle de la recristallisation. Elle diffère par le fait qu'elle donne lieu à partir d'une température T_{RS} à un grossissement de certains grains associés au déplacement de certains joints de grains, ce qui aboutit à une structure grossière.

Vu que la taille du grain est fonction de la température et du temps de séjour à cette température; les grains les plus grossiers sont plus près de la zone de liaison. [3]

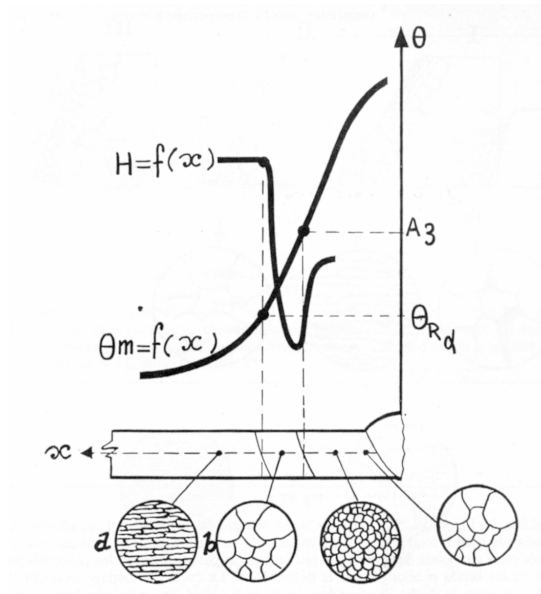


Figure 1.10 : La recristallisation lors du soudage

C) Transformation allotropique : cas de l'acier.

L'acier possède les variétés allotropiques du fer (austénite, ferrite) et le passage de l'une à l'autre dépend de la température à laquelle est portée la pièce. Une simple confrontation de la courbe $\theta_m=f(x)$, avec le diagramme d'équilibre permet de délimiter les zones en fonction de la constitution pour l'acier à x % C soumis au soudage. (Figure 1. 11) [3]

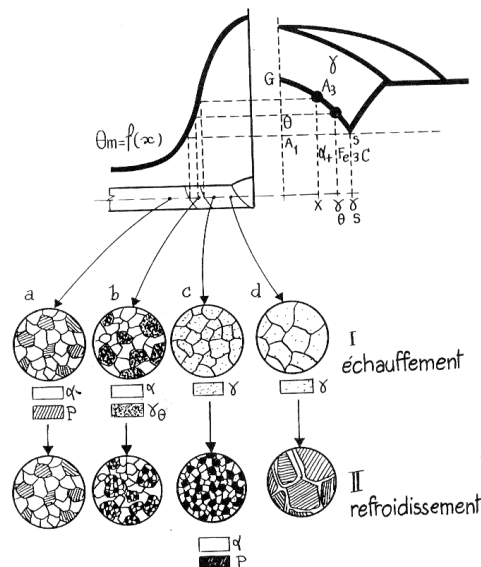


Figure 1.11: Transformation à l'état solide de la microstructure lors du soudage

Dans la zone (a), le métal de base garde sa constitution initiale avec une légère variation de sa structure dans les régions proches du joint (apparition de nouveaux grains dans le cas des aciers écrouis – grossissement modéré des grains dans le cas des aciers recuits).

La zone (b) est portée à des températures comprises entre A_1 et A_3 ce qui donne lieu à une structure biphasée $\alpha + \gamma$ avec une variation de la teneur en carbone de la phase γ (de $x\%$ \rightarrow $0,8\%$) ; cette zone est dite zone partiellement austénisée.

La zone (c) est dite zone entièrement austénisée ; la température atteinte est supérieure à A_3 . Le cycle thermique joue le même rôle qu'un traitement de normalisation dans la mesure où un refroidissement permet le retour à l'état d'équilibre quelque soit l'historique de la pièce.

La zone (d) est dite surchauffée, il n'y a plus d'évolution à l'état solide mais de structure car la surchauffe se manifeste plus en se rapprochant du joint.

1.7.4. Transformation en phase solide : refroidissement

Du fait de la différence entre le cycle thermique de soudage et un traitement thermique classique, l'exploitation des courbes TTT et du diagramme Fe-C devient hasardeuse. Pour cela on établit des diagrammes qui rendent compte de la loi de refroidissement à partir de l'état austénitique et son influence sur les températures de début et de fin de transformation ainsi que sur la nature et la proportion des constituants qui apparaissent au cours et à la fin du refroidissement.

Ces diagrammes sont dits TRC (Transformation en Refroidissement Continu) et sont tracés, pour chaque famille d'aciers et pour les nuances les plus utilisées en soudage, à partir de simulation (traitements thermiques imitant les cycles de soudage appliqués à des éprouvettes). [1]

Les diagrammes TRC sont généralement établis dans les conditions suivantes :

- Durées de chauffage et d'austénisation variables et généralement assez longues (5 \rightarrow 30 min)
- Températures d'austénisation souvent comprises entre $A_3+30^\circ\text{C}$ et $A_3+60^\circ\text{C}$,
- Durées de refroidissement $\Delta t_{800-500}$ variant entre quelques secondes et plusieurs heures,

or le soudage est caractérisé par

- des durées de chauffage quasi-instantanées,
- des durées d'austénisation brèves, voir nulles,
- des durées de refroidissement comprises entre 3 et 20 secondes.[1]

De part ces différences, les courbes TRC se trouvent complètement changées pour devenir TRCS caractérisées par

- La disparition de la transformation ferritique,
- La prédominance de la transformation bainitique,
- Une dureté plus élevée des constituants.

CHAPITRE 2

LES ACIERS A DISPERSOIDES H.L.E

Dès les débuts de la construction soudée, on a vu apparaître dans la littérature technique, comme un adage, l'affirmation selon laquelle « le carbone est l'ennemi du soudeur ». En effet, qu'il s'agisse de la fragilisation due à la surchauffe ou de celle qui, aggravée par l'hydrogène, motive la fissuration à froid, les problèmes de soudabilité s'amplifient lorsque la teneur en carbone de l'acier augmente, c'est à dire en fait lorsque la limite d'élasticité et la résistance du produit concerné s'élèvent. En effet, cette corrélation résistance /teneur en carbone/soudabilité est inéluctable si on s'en tient à ce qu'indique le diagramme Fer-Carbone, puisque pour un même état, généralement l'état recuit, une augmentation de la résistance est obtenue au prix d'une élévation de la teneur en carbone, donc une aggravation des problèmes de soudabilité. Au fur et à mesure du développement de la construction soudée, qui allait de pair avec des spécifications de plus en plus exigeantes concernant la résistance et la ductilité, il a fallu que les producteurs d'acier recherchent des solutions compatibles à la fois avec ces spécifications et avec des caractéristiques acceptables de soudabilité. [9]

2.1. Elément et aciers a dispersoïdes

2.1.1. Introduction

Historiquement la recherche de produits qui, à résistance égale, a une teneur en carbone plus faible que celle des produits où n'intervient que le carbone, s'est traduite par l'apparition des aciers au C-Mn ou C-Mn-Si. Pour de tel aciers, livrés à l'état normalisé (c'est à dire refroidis à l'air après laminage), l'influence des éléments Mn et Si s'exerce d'une part sur la transformation de l'austénite au refroidissement, et d'autre part sur la résistance des constituants, de sorte que l'addition de ces éléments en quantité modérée permet, à résistance égale, d'abaisser la teneur en carbone. Mais l'influence du manganèse

sur le pouvoir trempant de ces aciers se manifeste aussi lors de leur soudage, ce qui a motivé le coefficient attribué à cet élément dans la formulation du carbone équivalent. Pour contourner l'obstacle ainsi rencontré, il fallait faire intervenir un mécanisme de renforcement de l'acier qui remplace partiellement celui que permet le diagramme Fe-C, tout en n'agissant pas sensiblement sur le pouvoir trempant. Une solution a été trouvée sous la forme des aciers dits « à dispersoïdes » ou « micro alliés ». [11]

2.1.2. Eléments et aciers à Dispersoïdes

On désigne par aciers à dispersoïdes ceux qui comportent en très faible proportion, des éléments d'additions (Al, Nb, V, Ti) dont le plus utilisé est le niobium. Ces éléments interviennent à des teneurs de quelques centièmes pour cent. Le mécanisme de l'action de ces éléments s'explique par leur affinité pour le carbone ou l'azote, avec lesquels ils forment des composés de type carbures, nitrures ou carbonitrures ; composés qui sont insolubles dans l'austénite en dessous de 900°C. Ainsi la présence d'éléments dispersoïdes permet-elle, à limite d'élasticité égale, une moindre teneur en carbone, d'où une meilleure soudabilité, ou bien à teneur en carbone égale, une limite d'élasticité plus élevée.

Les aciers H.L.E. peuvent être divisés en six catégories [5]

1. Aciers résistant à la corrosion :

Ils contiennent du cuivre et d'autres éléments qui augmentent la résistance à la corrosion, le durcissement par solution solide et l'affinement du grain. Ce sont les premiers aciers à dispersoïdes à avoir été développés.

2. Aciers à dispersoïdes à structure ferrito-perlitique :

Ce sont des aciers types C-Mn qui contiennent de faibles quantités d'éléments susceptibles de former des carbures et carbonitrures tels que le V et Nb. Ils peuvent contenir aussi d'autres éléments pour améliorer la résistance à la corrosion et le durcissement par solution solide.

3. Aciers laminés à structure perlitique :

Ils sont le résultat de l'addition de quantités modérées d'un ou de plusieurs éléments autres que le carbone qui augmentent les propriétés mécaniques ainsi que la soudabilité.

4. Aciers à ferrite acciculaire :

A la différence de la structure ferritique polygonale, la ferrite acciculaire est caractérisée par une haute densité de dislocation et de grains fins très déformés, ce qui confère à l'acier une limite d'élasticité très élevée, une très bonne ténacité combinée à une bonne soudabilité.

5. Aciers Dual-Phase :

Ils ont une microstructure composée entre 80 à 90% de ferrite et 10 à 20% de martensite. Actuellement ils sont de plus en plus délaissés au profit des autres types d'aciers H.L.E

6. Aciers à forme d'inclusion contrôlée :

Le contrôle de la forme des inclusions qui détermine la plasticité de ces derniers, s'exécute par des petites additions d'éléments de terres rares (Pr, Ce), de Zr, de Ca ou de Ti.

2.2. Propriétés des aciers H.L.E

Depuis une vingtaine d'années, la tendance aux aciers à grains très fins s'est développée avec les aciers thermomécaniques. Des combinaisons adéquates de déformation et de température ont conduit à la formation de grains très fins. Ceci permet d'obtenir une limite d'élasticité la plus élevée et une température de transition ductile-fragile la plus basse.

2.2.1. Mode de Durcissement dans la ferrite

Mis à part par solution solide, l'affinage du grain ferritique permet un durcissement très appréciable des aciers HLE tout en maintenant un niveau de ténacité élevée.

L'affinage du grain ferritique est favorisé par l'addition d'éléments tels que : le Titane, l'Aluminium et le Niobium. Ainsi par une vitesse de refroidissement adaptée, le manganèse forme des carbures de type MC qui apparaissent lors du refroidissement, et qui peuvent avoir un rôle significatif dans le durcissement.

Le Vanadium, dont les carbures et les nitrures ont une très bonne soudabilité, précipite quant à lui, lors de la transformation allotropique. C'est l'élément le mieux indiqué pour l'obtention d'un durcissement par précipitation. [12]

Le Niobium peut être utilisé en vue d'un durcissement par précipitation, malgré le fait qu'il soit difficile à mettre en solution d'une part, et qu'il a tendance à précipiter dans l'austénite, donc sous forme de précipités de taille moyenne peu durcissants d'autre part. Enfin l'addition du titane savamment dosé associé à d'autres éléments peut donner lieu à un durcissement plus appréciable tout en conférant à l'acier une ténacité et une plasticité meilleures.

2.3. Rôles des éléments d'alliages

Au moment de l'élaboration des aciers ces derniers ont une certaine composition chimique qui implique une certaine aptitude au soudage. En raison du phénomène de dilution, la composition chimique du joint soudé peut varier par rapport à celle du métal de base, par l'utilisation d'un métal d'apport ayant des caractéristiques chimiques et mécaniques qui se rapprochent de celle du métal de base, pour assurer une bonne continuité de la matière entre les pièces à assembler. La connaissance de tous les éléments caractérisant la composition chimique de l'acier de base ou du joint soudé est nécessaire pour l'obtention de certaines caractéristiques. Mis à part les éléments à dispersoïdes, ces éléments peuvent avoir un effet plus ou moins défavorable sur la soudabilité. [8]

CARBONE (C) : il permet d'accroître la résistance à la rupture et la dureté.

MANGANESE (Mn) : il augmente de manière sensible les caractéristiques mécaniques de l'acier et du métal déposé par son rôle désoxydant.

MOLYBDENE (Mo) : élément noble, il accroît la résistance à chaud ou diminue la fragilité des aciers.

CHROME (Cr) : élément trempant, il augmente la résistance à la rupture.

NICKEL (Ni) : il améliore les caractéristiques générales des aciers et augmente la résistance à la corrosion.

CUIVRE (Cu) : Durcissement par solution solide

SILICIUM (Si) : agent désoxydant dans les aciers calmes.

ALUMINIUM (Al) : il permet un affinage des grains.

SOUFRE (S) et PHOSPHORE (P) : Impuretés très nocives aux joints soudés, ils augmentent la fragilité des aciers et les risques de soufflures ou de criques.

2.4. Soudage des aciers HLE

Grâce à leur carbone équivalent assez bas, les aciers HLE présentent une très bonne soudabilité pour peu que quelques précautions soient prises pour remédier à la complication de leur opération de soudage.

Les difficultés lors de l'opération de soudage peuvent être :

2.4.1. Les risques de fissuration à chaud

Ils sont très faibles pour ces aciers. Lorsque cette fissuration se produit, c'est généralement dans la zone du métal fondu sous l'effet des importantes contraintes résiduelles. La teneur du Mn dans le métal déposé est primordiale quant à ses caractéristiques mécaniques, ces derniers dépendent essentiellement du rapport Mn/ S et Mn/ Si du métal déposé.[13]

$Mn/S \geq 20$: apporte une sécurité contre l'effet nocif du soufre,

$Mn/Si < 3.5$: donne un risque de fissuration due à la formation d'un silicate de fer et de manganèse.

2.4.2. Les risques de fissuration à froid

Cette fissuration, lorsqu'elle se produit, est due à l'un de ces trois facteurs

- Fragilisation par l'hydrogène,
- Formation de structures fragiles,
- Contraintes subies par la soudure.

Pour se prémunir contre la fissuration à froid, il est primordial de respecter les recommandations suivantes :

Utiliser une électrode de type basique (très basse teneur en hydrogène),

Procéder à un étuvage afin d'éliminer toute humidité susceptible de se trouver dans l'enrobage.

CHAPITRE 3

INVESTIGATIONS EXPERIMENTALES

3.1. Notions sommaires sur les essais mécaniques d'un assemblage soudé

Les essais mécaniques ont pour but de s'assurer que l'assemblage a conservé, après soudage, les mêmes caractéristiques mécaniques que celle du métal initial.

Les essais mécaniques sont conduits dans le respect des procédures opératoires, prévues par les normes tels que : API 1104, ASME section IV.

Les caractéristiques mécaniques d'un assemblage soudé obtenues à partir des essais mécaniques sont influencées directement par la nature du métal de base. Ceci est attribué à l'impact du phénomène de dilution. [6].

3.1.1. Essai de traction

L'essai consiste à soumettre une éprouvette à un effort croissant et régulier de traction. Celle-ci s'allonge uniformément jusqu'à une valeur caractéristique. Cette valeur où la charge appliquée demeure stationnaire, est le point de la limite élastique (OA). Si la charge est supprimée, l'éprouvette revient approximativement à sa longueur initiale. Au contraire, si la charge continue de s'accroître, les allongements augmentent plus rapidement et deviennent permanent, car la réversibilité n'a plus lieu ; la rupture intervient, c'est ce qu'on appelle le point de rupture (figure 3.1).

OA : domaine élastique à déformation réversible

A limite du domaine élastique

AB : domaine de déformation permanente homogène ou de déformation plastique répartie

B point de charge maximale ou début de la striction.

BC : domaine de striction ou de déformation plastique localisée

C point de rupture de l'éprouvette.

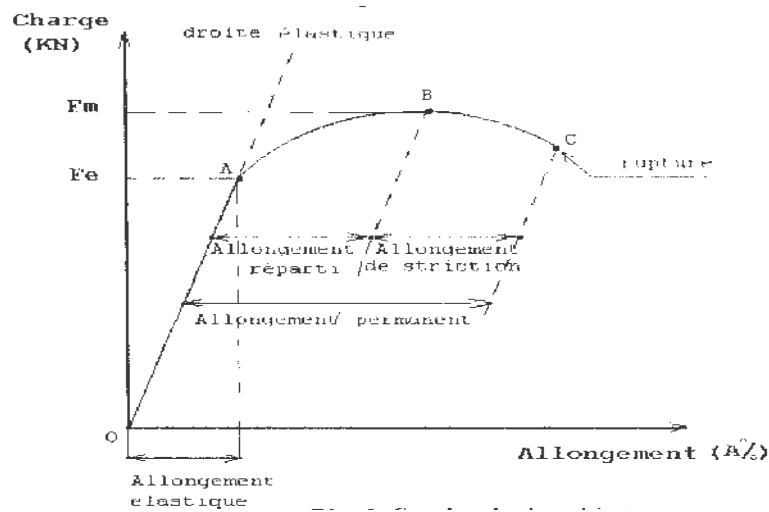


Figure 3.1 : courbe de traction

L'essai de traction est basé sur la détermination de trois caractéristiques essentielles, sur éprouvette de dimensions normalisées, à savoir :

- La contrainte de rupture σ_r
- La contrainte d'élasticité σ_e
- L'allongement $A\%$

Contrainte de rupture (σ_r)

La charge de rupture est une caractéristique mécanique simple, exprimant la résistance d'un matériau à se rompre. C'est l'effort de traction maximum (F), capable de provoquer la rupture d'une éprouvette de section S (mm²).

La contrainte de rupture est le rapport de cet effort sur la section de l'éprouvette

$$\sigma_r = \frac{F}{S} \text{ KN/mm}^2$$

Contrainte d'élasticité (σ_e)

C'est l'effort correspondant au point de limite d'élasticité (F') ramené à une section S de l'éprouvette.

$$\sigma_e = \frac{F'}{S} \text{ KN/mm}^2$$

Allongement A %

C'est la capacité d'un matériau de se déformer, de s'allonger sans rupture et plus spécialement, c'est la valeur de l'allongement d'un matériau ramené en % et mesuré après rupture d'une éprouvette de traction.

3.2. Mesure de la dureté sous cordon

La mesure de la dureté sous cordon est d'un emploi général pour caractériser un matériau, qu'il s'agisse de s'assurer de sa résistance mécanique ou de vérifier l'absence de fragilité ou de fragilisant par suite des différents traitements mécaniques ou thermiques qu'il a pu subir. Une augmentation de dureté observée dans les zones thermiques affectées par le soudage peut être l'indice d'un risque de fissuration à froid sous cordon ou de corrosion sous tension, d'où l'intérêt de la détermination de cette dureté. L'intérêt de cet essai prend toute sa valeur lors de l'exécution de la filiation de dureté sur une partie de l'assemblage soudé, préalablement découpé à froid, puis poli. Il est alors possible de comparer l'homogénéité du joint par comparaison des duretés respectives.

- Du métal déposé
- Des zones de transformation
- Du métal de base

3.3. Présentation de l'assemblage soude

Le matériau de base étudié se présente sous la forme d'un tube de 9 mm d'épaisseur, soudé à l'arc électrique en 05 passes avec des électrodes de type : E6010 et 7010.

L'acier utilisé pour les conduites de transport d'hydrocarbure et de gaz, répond au critère de la spécification technique API 5LX ; la signification de ces désignations sont :

- API : Institut américain du pétrole
- 5 L : Spécification pour les conduites de transport d'hydrocarbure et de gaz
- X : Désignation de qualité.

Dans notre cas, le pipe répond au critère de la spécification API 5L de grade X52.

3.3.1. Forme du joint

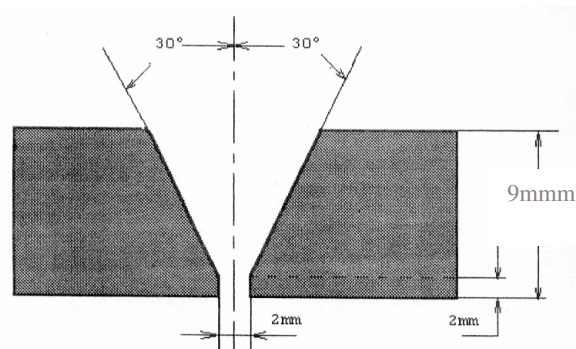


Figure 3.2 : joint bout à bout normal avec un chanfrein en V.

Les assemblages soudés, objet de cette étude sont exécutés par un soudeur qualifié. Les surfaces à assembler sont lisses, uniformes, exemptes de bavures, de défaut de laminage, de traces de peinture, de graisse ou d'autres matières nuisibles qui pourraient avoir un effet préjudiciable sur le soudage. Le type de joint et l'écartement entre les extrémités à souder sont conformes aux termes de la spécification concernant le procédé de soudage à appliquer. (Voir appendice A relative à la spécification de soudage). L'alignement des extrémités est réglé de façon à minimiser les dénivellations entre les éléments du tube. L'utilisation des cavaliers s'avère nécessaire afin de brider l'éprouvette.

Une fois l'opération de soudage achevée un examen radiographique est effectué afin de détecter tout les défauts pouvant exister dans la soudure (inclusions, soufflures, manque de fusion, etc...) ainsi, la validité ou non de la soudure est prononcée suivant les critères d'acceptabilité de la norme. Cette dernière peut exiger une réparation du joint soudé dans la partie de la soudure où le défaut est localisé. (Voir appendice B relative à la spécification de réparation).

Les différentes étapes de préparation sont illustrées par les figures 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 et 3.7.

3.3.2. Procédure de réparation

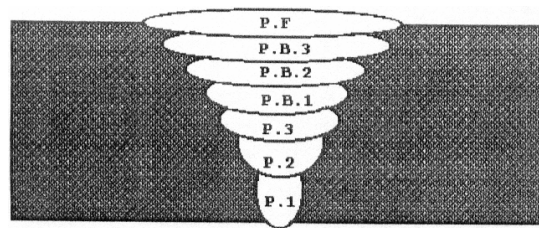


Figure 3.3 : Répartition des passes successives dans le joint soudé.

En général une procédure de réparation consiste à :

- Localiser la partie à réparer,
- Meuler le cordon de soudure jusqu'à atteindre le défaut à éliminer.
- Recharger le cordon tout en respectant les prescriptions définies dans le mode opératoire de réparation.
- S'assurer de la qualité du joint soudé par un autre examen radiographique.

Dans notre cas, la procédure de réparation est une action répétitive. Elle consiste à meuler le joint soudé à une certaine profondeur, en épousant la forme précédente du chanfrein, tout en gardant une partie de ce joint (figure 3.4 à 3.6). Cette opération est répétée jusqu'à la troisième réparation. Elle nécessite à chaque opération un examen radiographique.

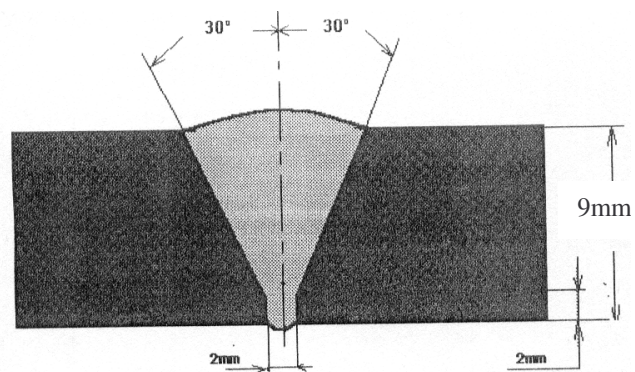


Figure 3.4 : Soudure avant meulage de réparation

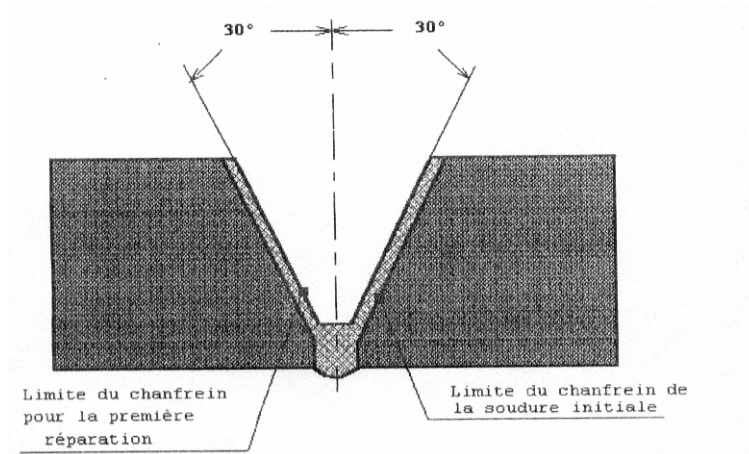


Figure 3.5 : Préparation du joint pour une première

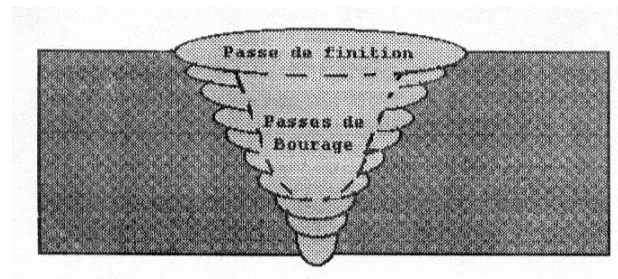


Figure 3.6 : Rechargement du joint lors de la première réparation

3.4. Méthode de prélèvement des échantillons

3.4.1. Pour les essais de traction et de pliage

La méthode de prélèvement des échantillons pour les essais est définie par différentes normes et spécifications. Dans notre cas, nous avons pris en compte les recommandations de la spécification ASME section IV. (Voir figure 3.7, 3.8 et 3.9 ci-dessous)

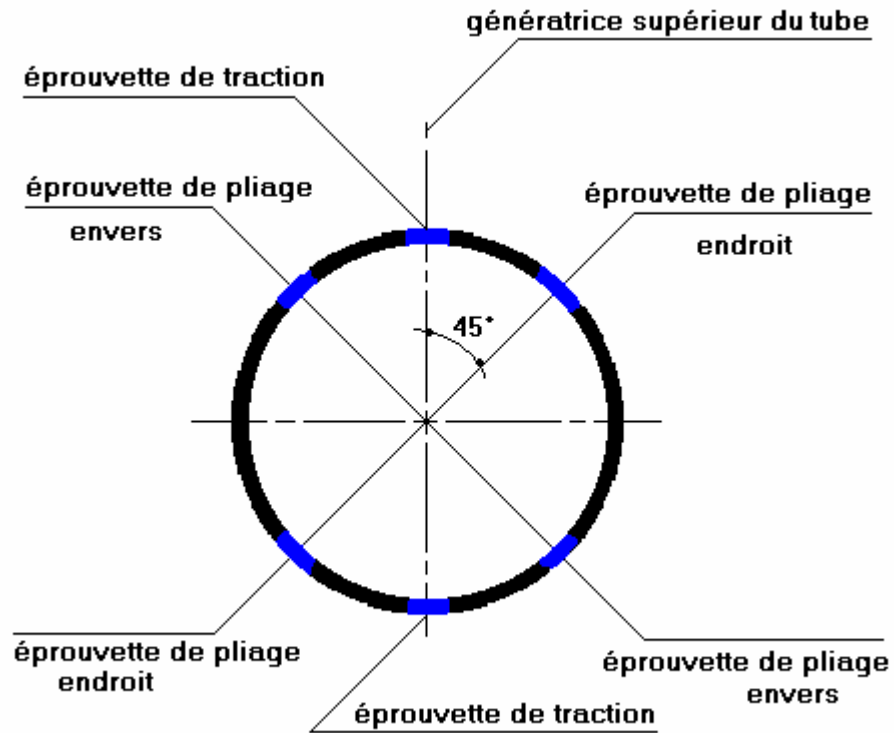


Figure 3.7 : Méthode de prélèvement des éprouvettes

Les éprouvettes sont découpées dans le tube soudé aux emplacements indiqués sur la figure 3. 8 ; les découpes sont prismatiques et perpendiculaires au cordon de soudure. La partie du cordon de soudure prélevée avec l'éprouvette se situe au milieu de la partie calibrée.



Figure 3. 8 : tube soudé avant prélèvement d'éprouvettes



Figure 3. 9 : Prélèvement d'éprouvettes

Pour les essais de traction, une fois le prélèvement effectué, les éprouvettes sont découpées à la scie mécanique et subissent une opération d'usinage à froid pour les amener aux côtes indiquées par la spécification ASME prise en compte (figure 3.10-3.11-3.12). Les éprouvettes seront soumises par la suite à une machine de traction apte à donner la charge à laquelle la rupture à lieu.

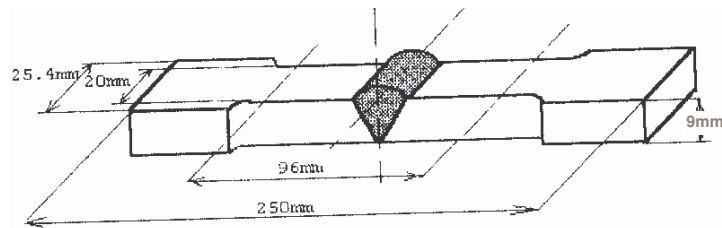


Figure 3.10 : Dimension de l'éprouvette de traction



Figure 3.11 : Dimension réel de l'éprouvette de traction et de pliage

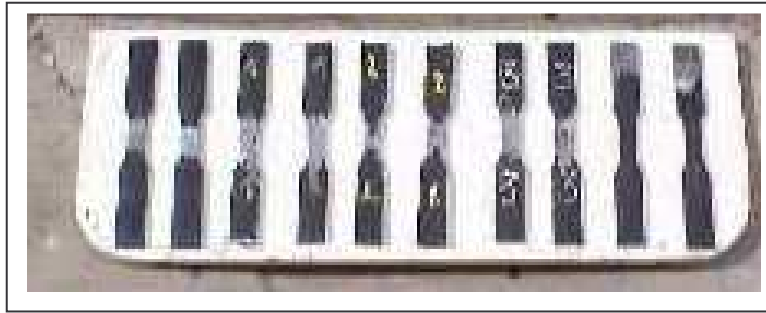


Figure 3.12 : Epreuves de traction

Pour les essais de pliage, les éprouvettes sont finies par usinage à froid aux côtes requises par la spécification (figure 3. 11 et 3.13)

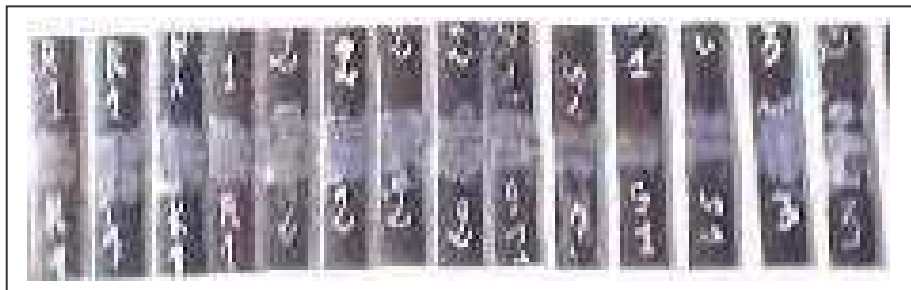


Figure 3.13 : Epreuves de pliage

3.4.2. Essai de dureté

Les éprouvettes destinées aux mesures de dureté sont prélevées après les éprouvettes de traction et de pliage sur le reste du tube soudé de la même manière que celles-ci (voir figure 3.14).

La partie sur laquelle les mesures de dureté seront prises va de l'axe du cordon de soudure jusqu'à environ 30 mm dans le métal de base.

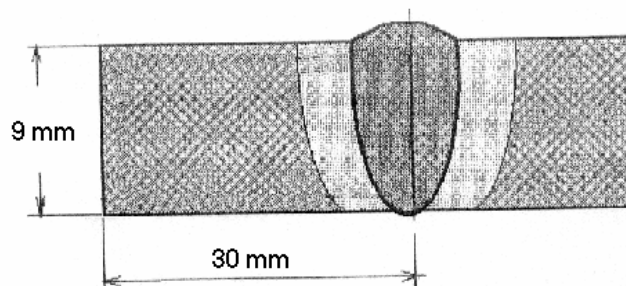


Figure 3.14 : Epreuve pour essai de dureté

Les surfaces seront finies afin de permettre une mesure précise des dimensions des empreintes de dureté.

3.4.3. Mesures et filiations de dureté et micro dureté

Les mesures et filiations de dureté et microdureté sont prises sous des charges respectives de HV10, HV200; elles permettent de suivre l'évolution de la dureté dans la soudure.

Les filiations de la dureté sont effectuées sur des coupes transversales de la soudure. Pour permettre une meilleure appréciation des zones à explorer nous avons opté pour la méthode tangentielle, qui, en présence d'une soudure en multi-passes, permet de mesurer les duretés dans les zones de transformations. La prise de ces mesures est effectuée sur trois lignes parallèles à trois profondeurs différentes de l'échantillon et selon la spécification ASME adoptée. (Figure 3.15).

Le pas des filiations est fixé à 0.5mm dans la ZAT (zone affectée thermiquement) et dans la ZF (zone fondue) et à 1 mm dans le MB (métal de base).

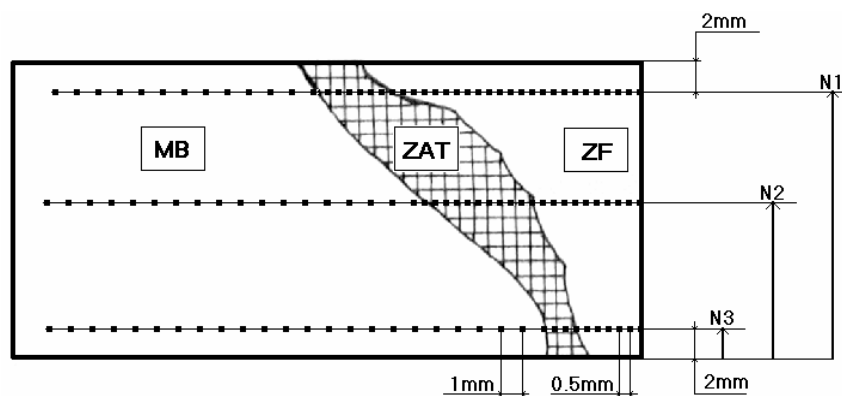


Figure 3.15 : Filiation de dureté

3.5. Examen macrographique

L'examen macrographique est un examen d'ensemble ; il met en évidence les hétérogénéités qui existent dans le métal ; il est donc particulièrement bien appliqué en soudage car cette opération entraîne, dans l'espace métallique, de nombreuses modifications structurales.

Cet examen rend compte de la répartition thermique, c'est-à-dire qu'il localise et délimite les différentes zones où se sont produits des phénomènes particuliers : la fusion, les évolutions des zones du cordon portées à des températures plus ou moins élevées.

3.5.1. Technique de macrographie

La préparation d'un échantillon pour un examen macrographique comprend :

- un sciage
- un dégrossissage à la meule,
- un polissage,
- une attaque chimique

Les coupes sont faites par une scie mécanique munie d'un système de refroidissement évitant ainsi les phénomènes d'écrouissage et l'échauffement des pièces. Le polissage est poussé jusqu'à l'obtention d'une surface aux qualités de réflexion du miroir. L'attaque chimique permettra enfin de révéler la microstructure.

3.5.2. Technique de micrographie

Une telle étude micrographique s'impose afin de déceler une éventuelle influence des cycles thermiques sur les propriétés micro structurales du métal de base, de la ZAT et de la zone fondue.

L'utilisation d'un microscope doté d'une caméra numérique a permis la prise de vues photographiques de chaque passe, du métal de base, de la ZAT et de la zone fondue en bas, au milieu et en haut du cordon.

3.6. Evaluation de l'étendue de la ZAT et la ZF

Pour évaluer l'aire de la ZAT et la ZF, nous avons opté pour une méthode utilisant un maillage carré d'un pas de 2mm, assimilant ainsi l'allure des isothermes à des petits segments de droite représentant la diagonale de la maille élémentaire. Ce choix est dicté par le fait que l'examen macrographique a révélé des régions d'étendue et de coloration différentes (figure 3.16).

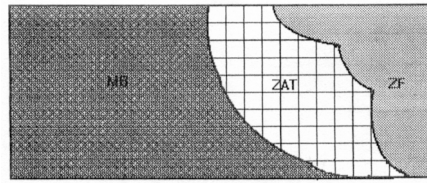


Figure 3.16 : Détails sur le maillage dans la ZAT

3.7. Méthode de prélèvement des cycles thermiques

Le prélèvement des températures pendant l'opération de soudage est effectué par des thermocouples de type K (Chromel-Alumel), placés à l'intérieur et à l'extérieur du tube à des distances respectives de 3 mm et de 5 mm. L'enregistrement des températures effectué à des intervalles de 30s permettra de déduire les cycles thermiques subits par le cordon de soudure. (Figure 3. 17)

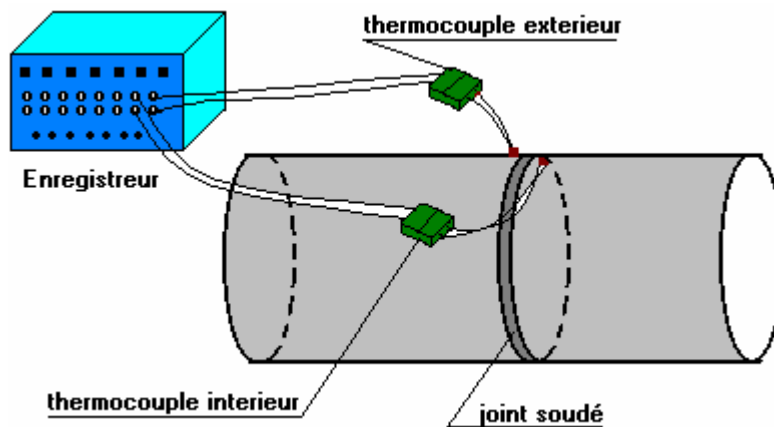


Figure 3.17 : Méthode de prélèvement des cycles thermiques

Chapitre 4

RESULTATS EXPERIMENTAUX 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 :

- les essais de traction et de pliage
- les mesures de dureté
- les macrographies
- les cycles thermiques pour chaque soudeure
- l'analyse des compositions chimiques de chaque échantillon.

4.1. Caractéristiques chimiques

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 N°4.1

TABLEAU N°4.1 : Composition chimique du métal de base, des assemblages soudés et réparés

	C%	Al%	Si%	Ni%	Cu%	P%	S%	Cr%	Co%	Mo%	Mn%	Nb%
MB	0.11	0.027	0.31	0.113	0.137	0.028	0.004	0.03	0.002	0.17	0.58	0.025
S1	0.11	0.01	0.21	0.071	0.100	0.010	0.002	0.03	0.001	0.41	0.52	0.020
R1	0.10	0.008	0.22	0.071	0.110	0.020	0.001	0.03	0.001	0.41	0.40	0.018
R2	0.10	0.009	0.28	0.068	0.090	0.037	0.001	0.02	0.000	0.40	0.46	0.009
R3	0.11	0.007	0.30	0.068	0.098	0.033	0.001	0.02	0.000	0.11	0.59	0.015

Pour vérifier les recommandations du paragraphe 2.4.1 traitant le risque de fissuration des aciers, nous avons établi les rapports de Mn/Si pour chaque échantillon. Les résultats sont présentés dans le tableau N°4.2.

TABLEAU N°4.2 : Détermination du rapport Mn/Si pour les différent échantillons.

	MB	S1	R1	R2	R3
Mn/Si	1.87	2.47	1.81	1.64	1.96

4.2. Caractéristiques métallographiques

4.2.1. Photographies des macrographies

Les observations macroscopiques permettent d'avoir des macrographies (Figures 4.1 à 4.4) qui révèlent les différentes zones du joint soudé. Nous avons procédé à un agrandissement de quatre fois et demi pour une meilleure lisibilité.



Figure 4.1 : macrographie de la soudure initiale (non réparée) (S1)

Figure 4.2 : macrographie de la soudure avec une 1^{ère} réparation (R1)Figure 4.3 : macrographie de la soudure avec une 2^{ème} réparation (R2)



Figure 4.4 : macrographie de la soudure avec une 3^{ème} réparation (R3)

4.3.2. Schématisation des sections des différents échantillons ; évaluation des aires

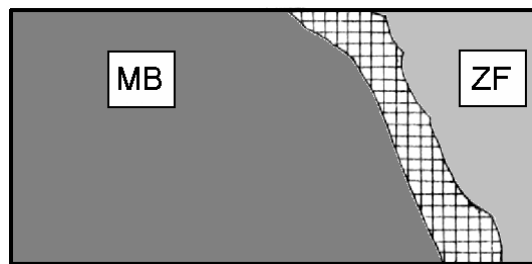


Figure 4.5: Maillage de la ZAT pour la soudure initiale (S1)

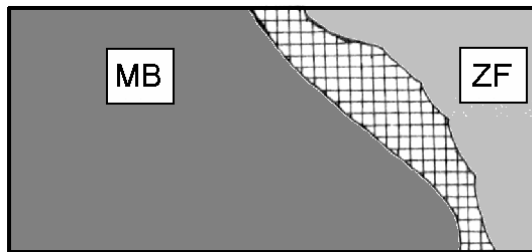


Figure 4.6 : Maillage de la ZAT pour la 1^{ère} réparation (R1)

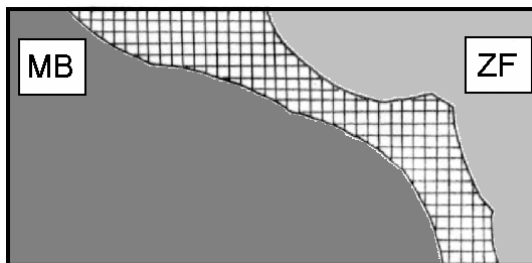


Figure 4.7 : Maillage de la ZAT pour la 2^{ème} réparation (R2)

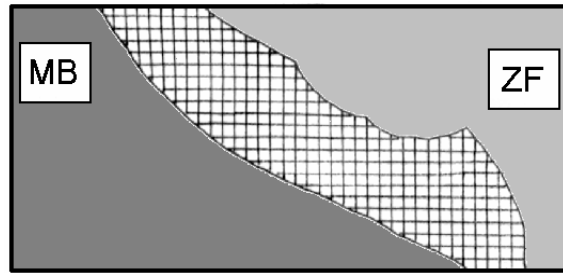


Figure 4.8: Maillage de la ZAT pour la 3^{ème} réparation (R3)

Le tableau n°3 donne les valeurs des aires des différentes zones, ces valeurs sont obtenues grâce à la méthode de calcul citée au paragraphe 2.4, reposant essentiellement sur les résultats de l'examen macrographique. Ce dernier donne la topographie des joints soudés (figures 4.5 à 4.8), délimitant les différentes zones par des isothermes clairement observables.

TABLEAU N° 4.3 : Détermination des aires de ZF et ZAT pour les différents échantillons.

Aire (mm ²)	S1	R1	R2	R3
ZAT	21.2	24.3	57.02	68.80
ZF	39.51	45	45.85	69.2

En se basant sur les valeurs du tableau n°4.3, les histogrammes (figures 4.9 et 4.10) mettent en évidence l'augmentation en volume de la zone fondue et de la ZAT en fonction du nombre de réparations.

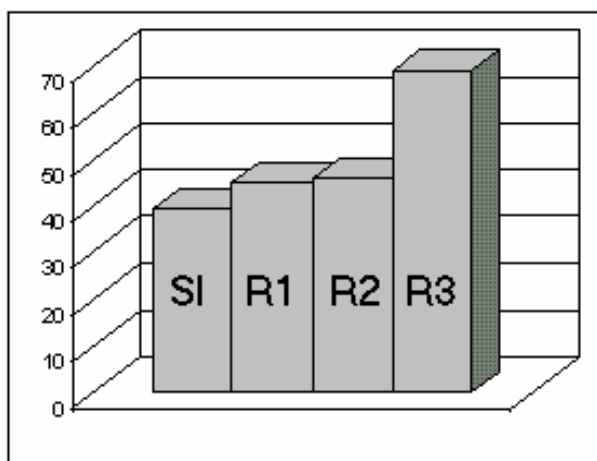


Figure 4.9 : Aire de la zone fondue en fonction des réparations

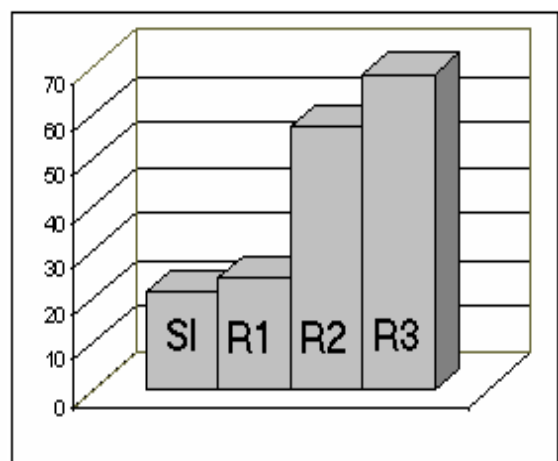


Figure 4.10 : Aire de la ZAT en fonction des réparations

4.4. 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.

4.4.1 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 ; les micrographies à différents grossissements de toutes les réparations sont présentées en appendice B.

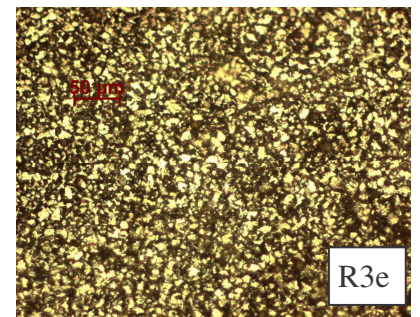
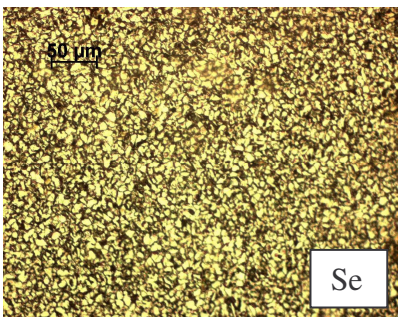
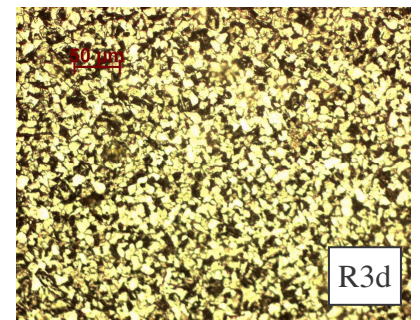
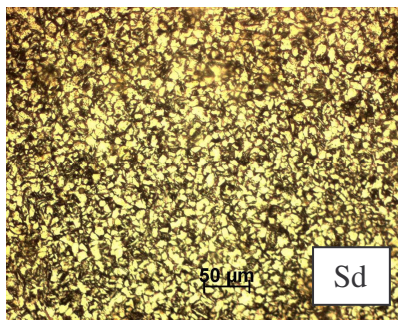
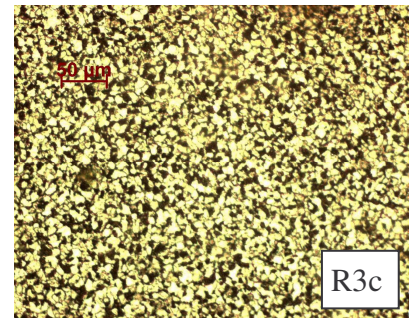
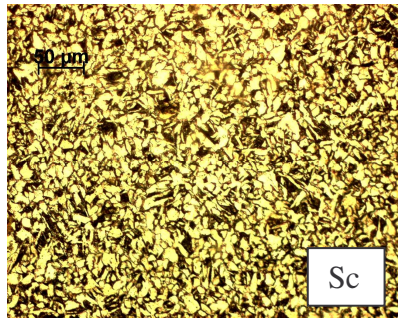
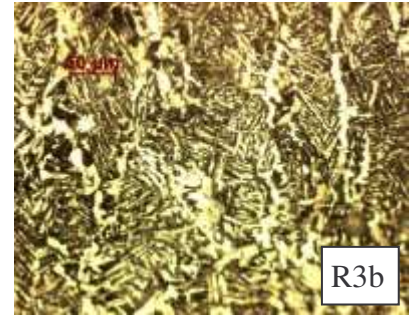
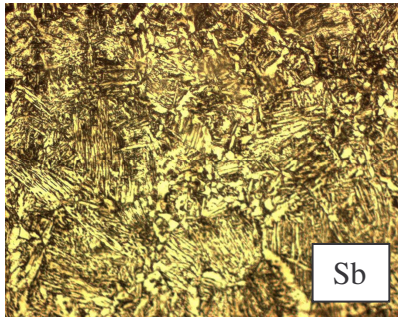
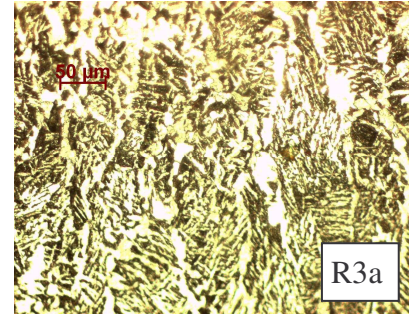
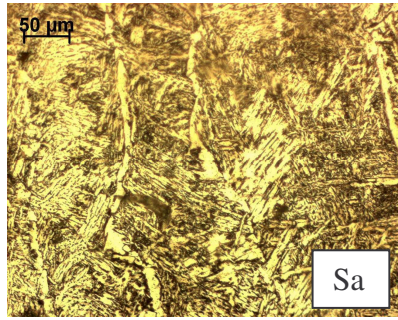


Figure 4.11 : Evolution structural verticale

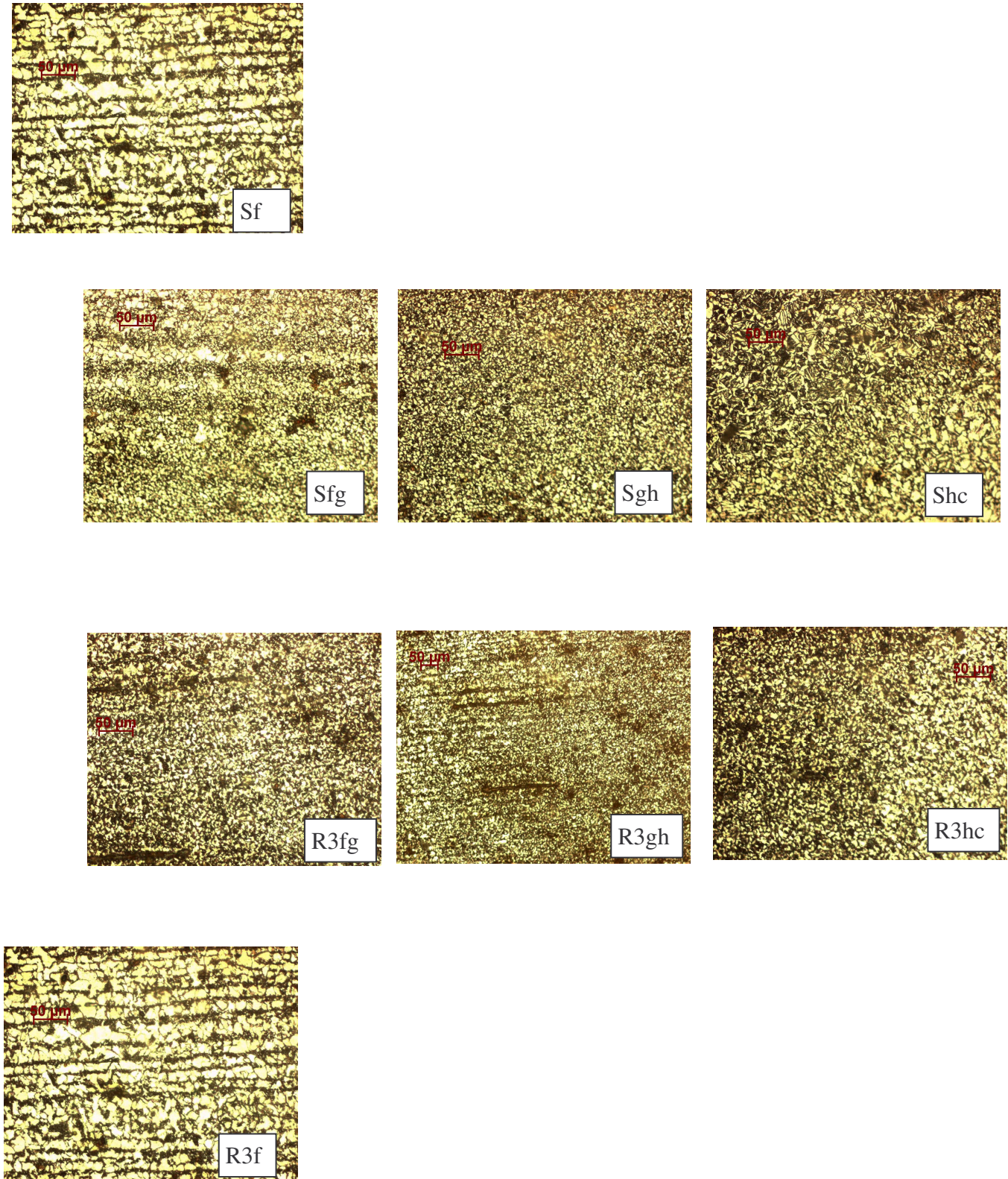


Figure 4.12 : Evolution structurale horizontale

4.4.2. 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

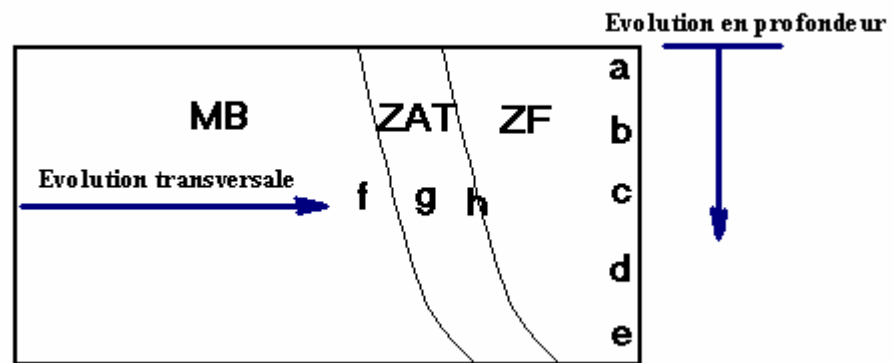


Figure 4.13 : Schéma explicatif des différents prélèvements micrographies

a) Evolution transversale de la structure

Le métal de base présente une structure alternée de ferrite et de perlite caractéristique des bandes de laminage (voir figure 4.11.Sa). La forme de la ferrite est globulaire de même que celle de la perlite ; notre équipement ne nous à malheureusement pas permis d'observer les lamelles de ferrite et de cémentite.

On constate que la structure change graduellement au fur et à mesure que l'on se rapproche de la ZAT ; on observe ainsi :

- une destruction progressive des bandes de laminage
- un affinement de plus en plus important du grain
- Le fait de réparer (c'est à dire meuler et ressouder) fait apparaître un phénomène de dédoublement de la ZAT qui se distingue par une différenciation dans la grosseur des grains avec une nette discontinuité aux frontières, les plus fins se trouvant dans la partie de la ZAT située du côté de la zone fondue ; dans chaque partie de cette ZAT l'uniformité de la grosseur des grains est très remarquable. Ce phénomène vient du fait que lors de la préparation du cordon pour la réparation la zone fondue initialement n'a pas été entièrement éliminée et donc l'effet des cycles successifs de chauffage et de refroidissement conduit à la formation de plusieurs zones affectées thermiquement sur une étendue du métal de plus en plus large à mesure que le nombre de réparations augmente avec des frontières de moins en moins nettes.

b) Evolution de la structure en profondeur

En profondeur, la structure évolue également depuis la première passe jusqu'à la passe de finition.

La structure de la dernière passe est le type de la passe de finition

- forme allongée des grains dans le sens du gradient de température
- évolution progressive de la forme de la ferrite en fonction de la vitesse de refroidissement structure de Widmanstätten.
- présence éventuelle de la bainite proche de la surface mais non visualisée du fait de l'impossibilité de grossir davantage.

La chaleur de la dernière passe affecte en décroissant la structure des passes précédentes; on y observe ainsi :

- la destruction de la structure type de solidification.

- la formation de nouveaux grains de phase d'équilibre en l'occurrence la ferrite et la perlite dont la forme devient plus au moins globulaire avec une coalescence des grains de ferrite (voir figure 4.12. Sc, R3c).

Au cœur du cordon, après chaque réparation, la structure ressemble à celle d'un soudage classique en plusieurs passes. L'influence des dernières passes est très visible sur la structure des premières passes (voir figure 4.11. Sd, R3d).

La première passe se comporte différemment car n'ayant pas été enlevée par réparation ; sa structure est devenue globulaire mais la taille des grains est restée faible comparée à celle des passes ultérieures. (Voir figure 4.11. Se, R3e)

Le profil de microdureté (figure 4.13) sous forme de cloche montre bien que la zone ayant subi une succession de cycles thermiques devient moins dure que les extrémités inférieure et supérieure du cordon.

4.5. Analyse des caractéristiques mécaniques

4.5.1. 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. Du point de vue de la norme et vu que cette dernière accorde une importance toute particulière à la contrainte de rupture quant aux critères d'acceptation, que ce soit pour la soudure initiale ou même pour les deux premières réparations, les contraintes de rupture restent supérieures à celles préconisées par la spécification ASME et sont par conséquent satisfaisantes (voir tableau 4.4). Il en est de même pour le taux de déformation qui reste acceptable par rapport à ce qui est donné par la spécification :

$$\epsilon (\%) = 19.4257 S / \sigma_{\min}$$

$$\sigma_{\min} : 455 \text{ Mpa}$$

$$\epsilon (\%) : \text{Taux de déformation pour une longueur de } 50.8 \text{ mm}$$

Les observations et remarques sus-citées ne sont pas du tout valables pour la troisième réparation, la contrainte maximale de rupture est inférieure au minimum préconisé par la

spécification (433.08 MPa contre 455 MPa). La même remarque est à émettre concernant le taux de déformation qui se voit diminuer de plus de 5 %.

D'un point de vue purement mécanique une troisième réparation est à éviter pour les tubes de nuance X52 ; on serait tenté de vouloir généraliser ces observations aux aciers HLE.

TABLEAU N°4.4 : Caractéristiques de l'essai de traction des éprouvettes étudiées.

	MB	S1	R1	R2	R3
σ_r (MPa)	525.13	498.70	488.33	539.61	433.08
Charge max (KN)	88.25	87.06	84.80	85.44	69.06
Taux de déformation ϵ (%)	23.18	15.85	19.54	18.85	12.98

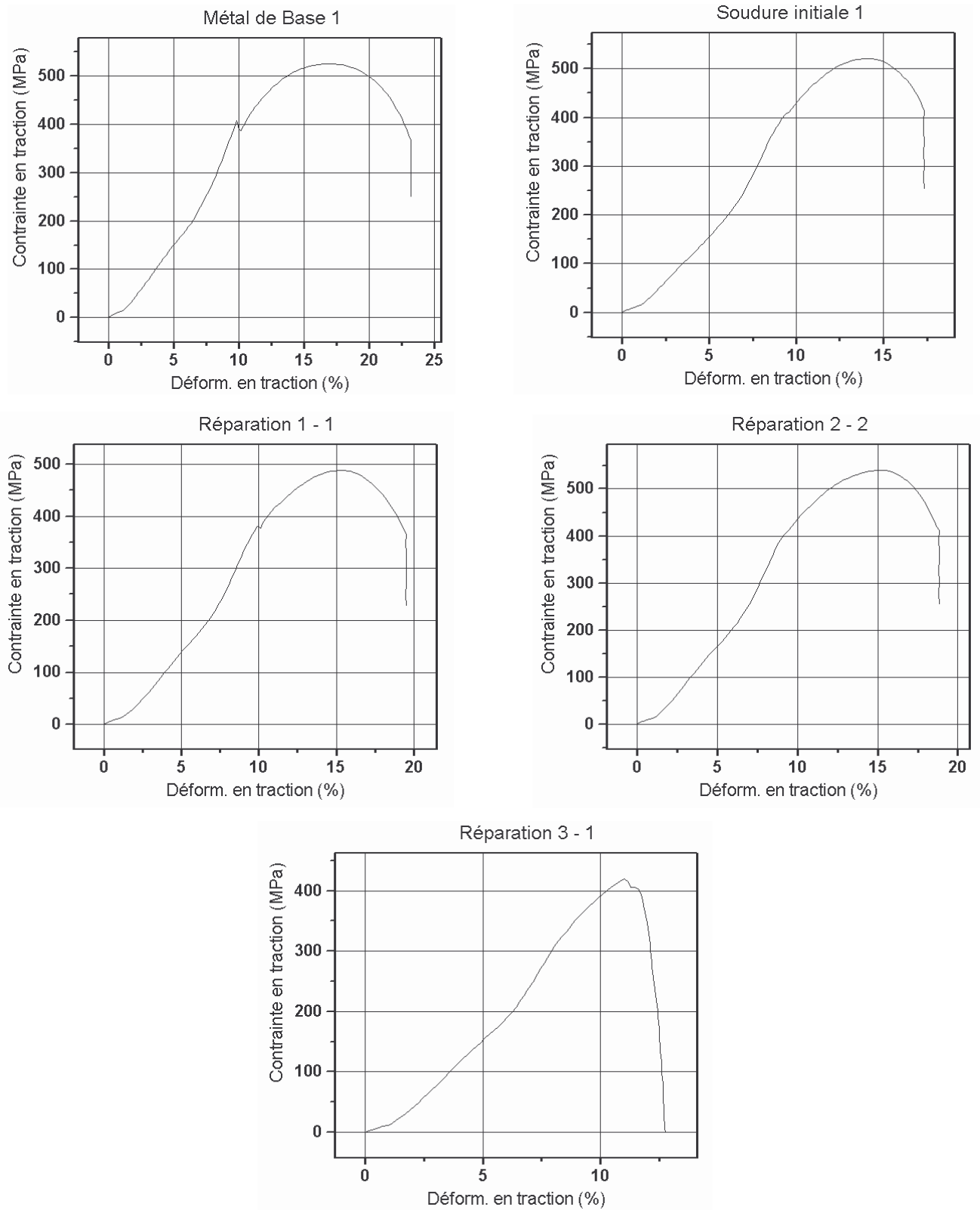


Figure 4 .14 : Courbes de traction des différents éprouvettes

4.5.2. Essais de pliage

L'essai de pliage à 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.

4.6. Analyse des cycles thermiques

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

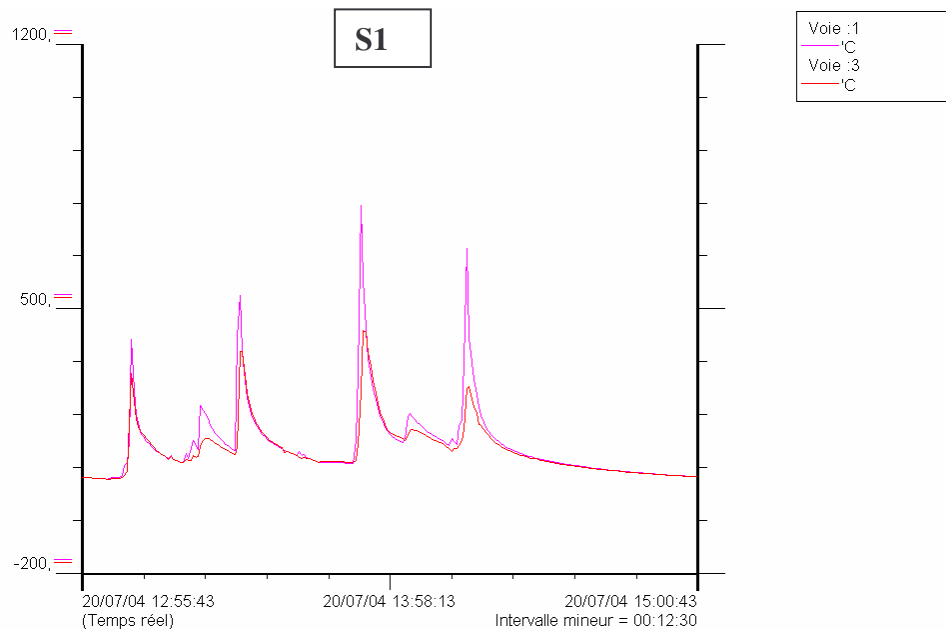


Figure 4.15 - Diagramme thermique de la soudure initiale

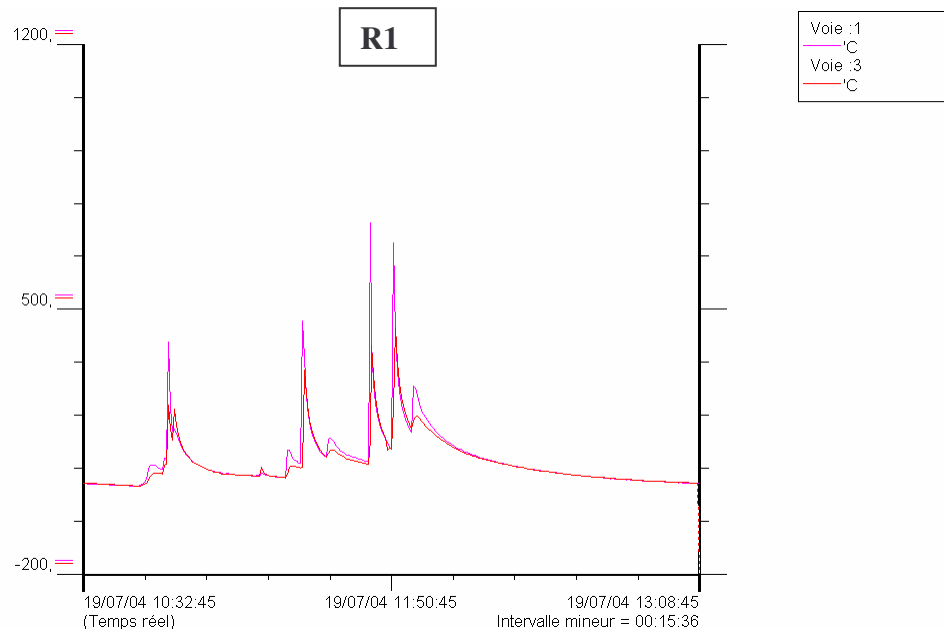


Figure 4.16 : Diagramme thermique de la première réparation

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.

Le nombre de pics de température correspond au nombre de passes exécutées. Sur le diagramme 2 (voir figure 4.16) on observe un dédoublement du dernier pic de température dû à une reprise de remplissage final de la soudure. Un comportement prévisible croissant des cycles est à noter pour le thermocouple extérieur, ceci s'explique par le rapprochement progressif de la source d'énergie (l'arc électrique) du thermocouple au fur et à mesure des passes.

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.

4.7. Résultats des essais de dureté

Après avoir effectué des filiations de dureté sur les sections transversales des soudures, conformément à la norme AFNOR (Voir figure 3.16), 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 4. 17 à 4. 20.

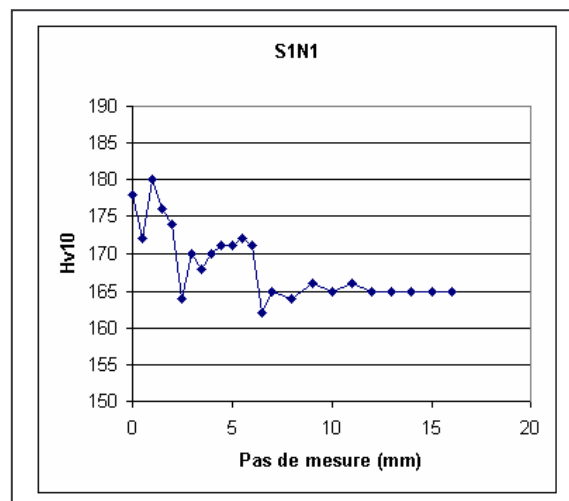
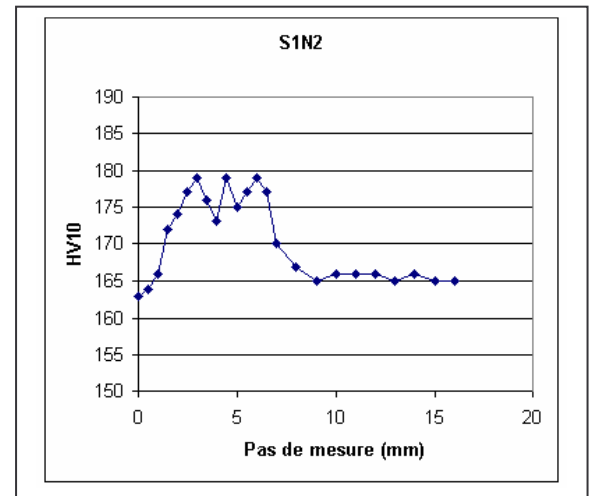
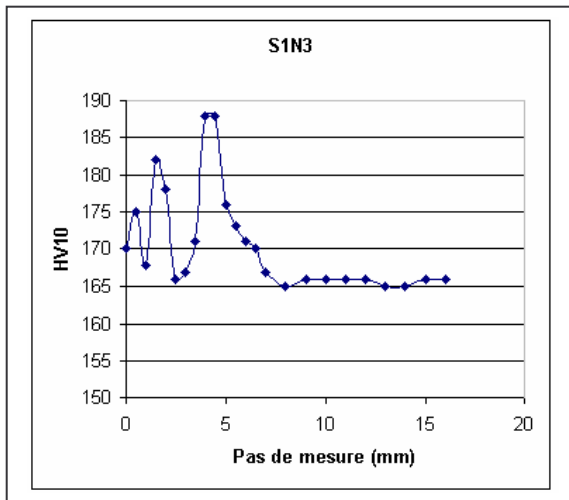
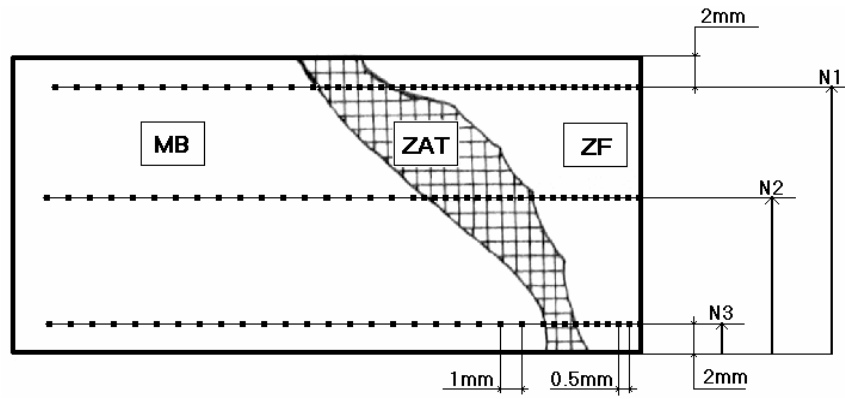


Figure 4.17 Filiation de dureté de la soudure initiale

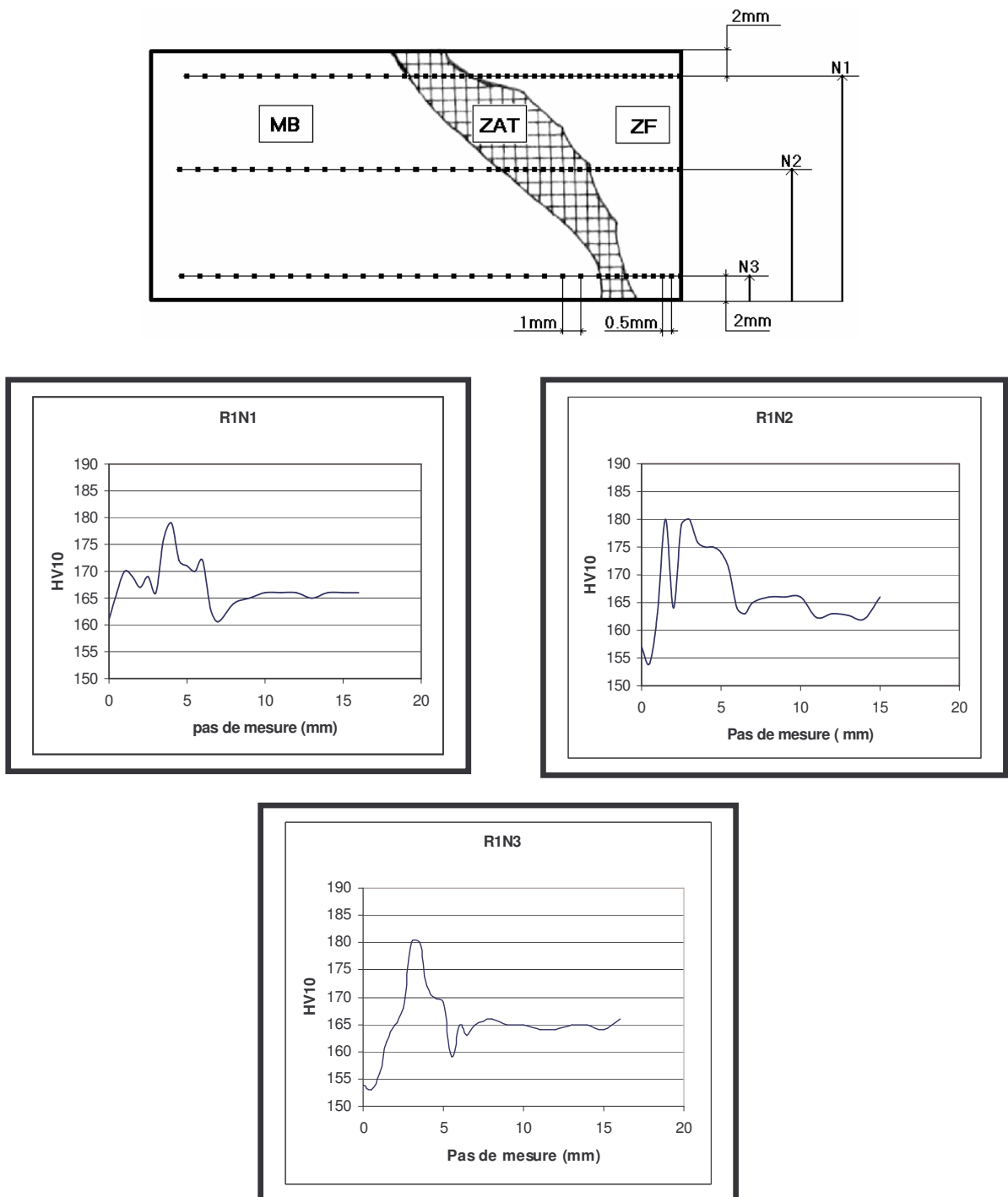


Figure 4.18 Filiation de dureté de la 1ere réparation

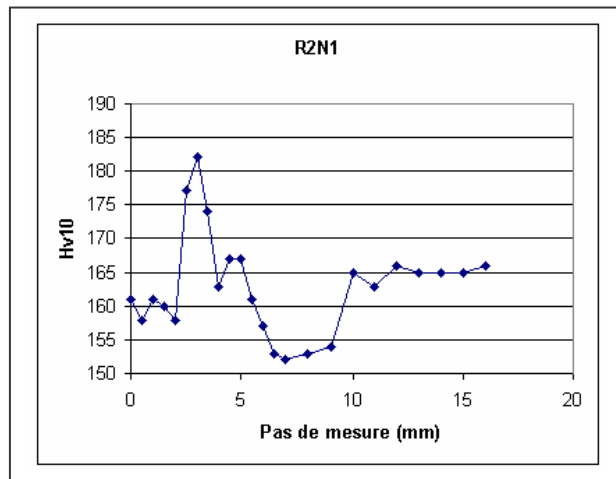
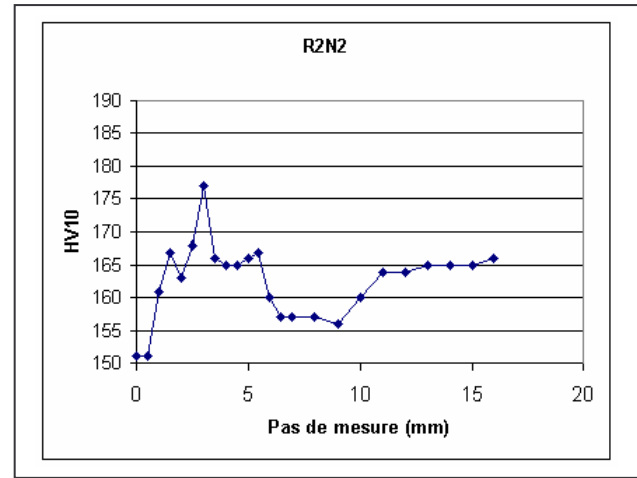
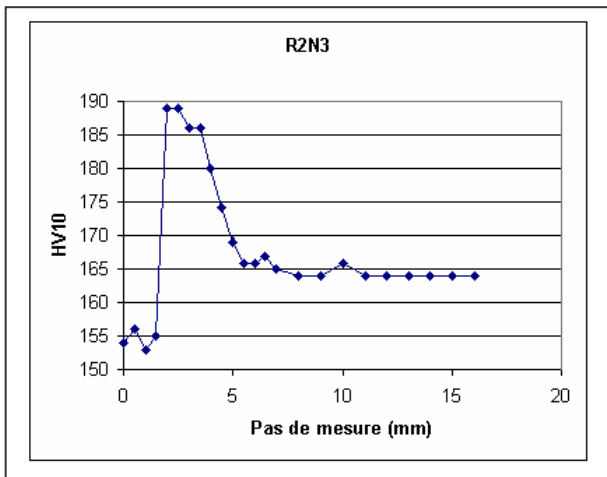
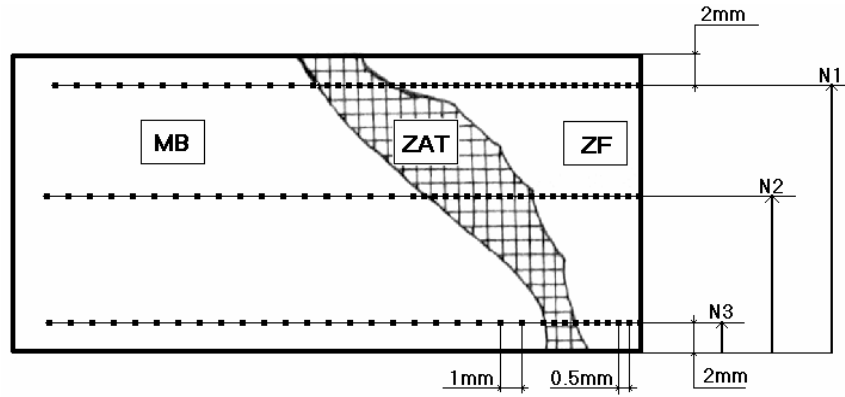


Figure 4.19 Filiation de dureté de la 2eme réparation

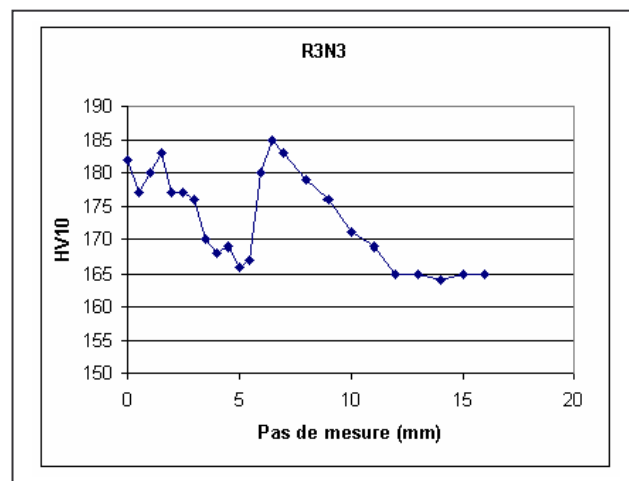
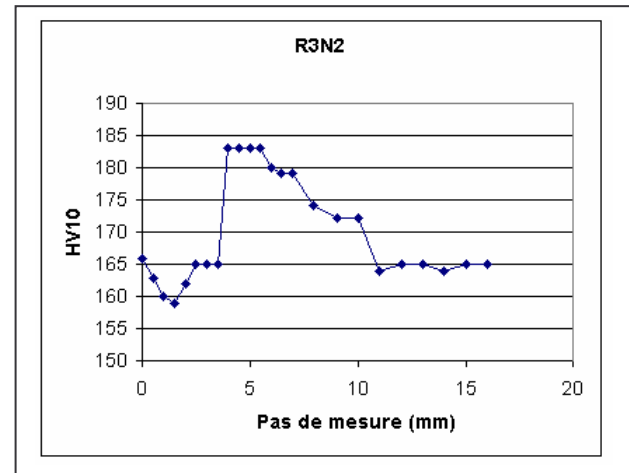
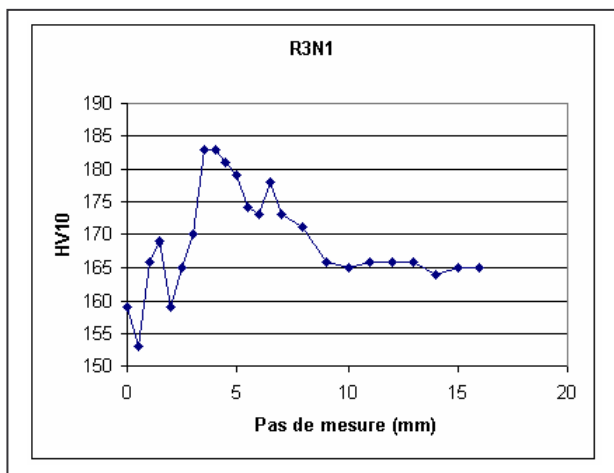
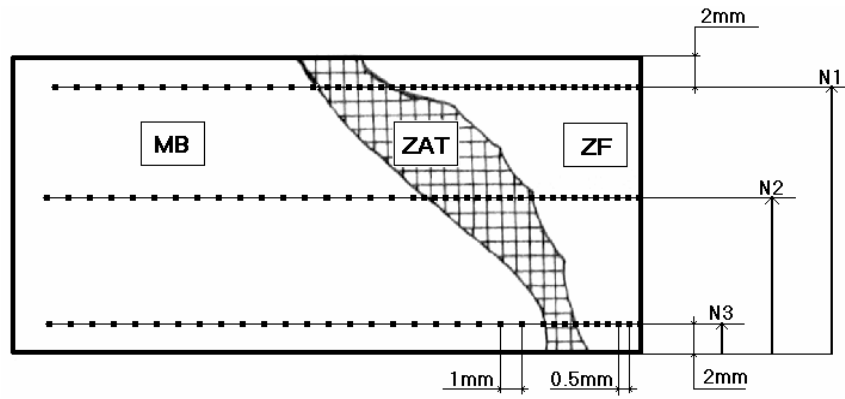


Figure 4.20 Filiation de dureté de la 3eme réparation

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 4.21) 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 cœur de l'échantillon traité est inférieure à celle relevée à son extrémité.

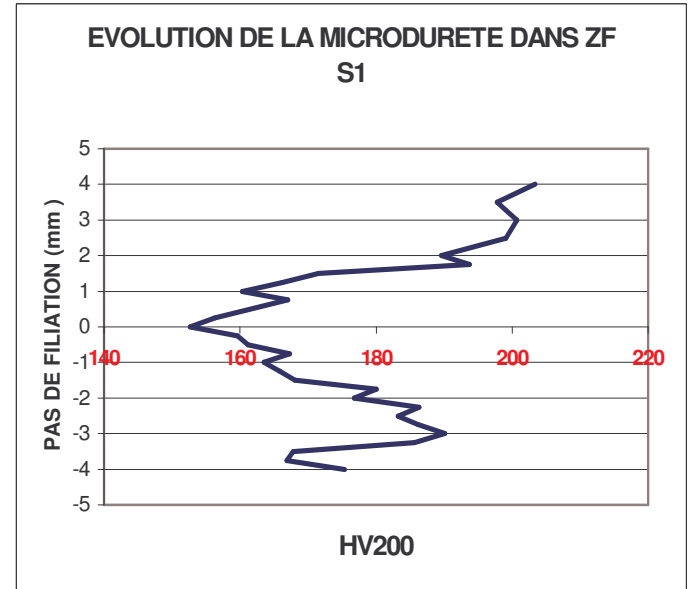
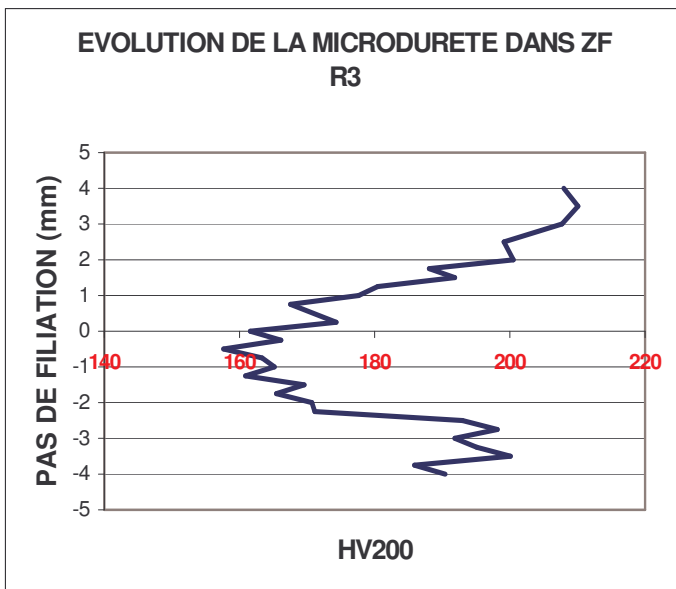
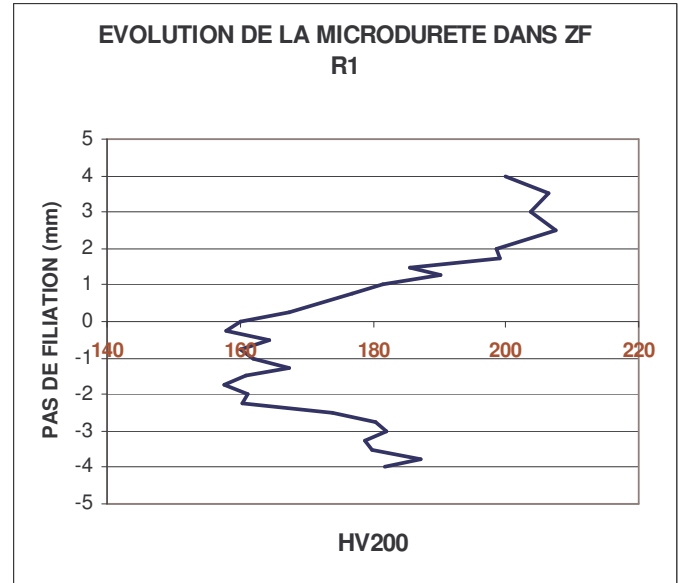
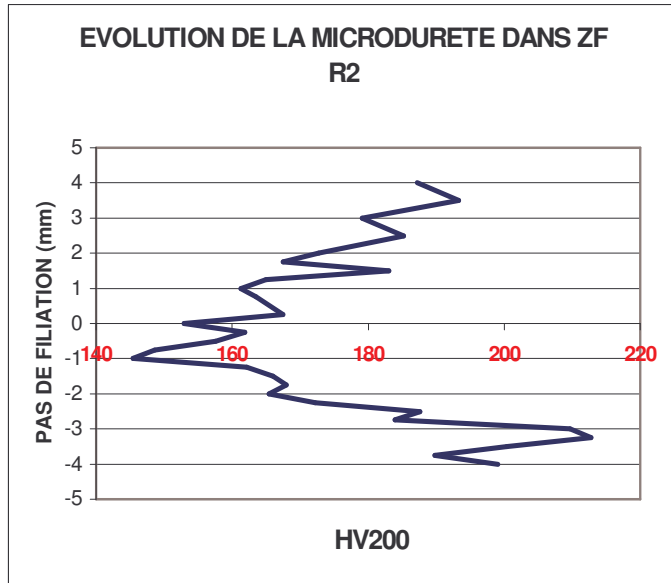


Figure 4 .21: Evolution de la microdureté pour les différent échantillons

Concernant les courbes de filiations de duretés telles que schématisées dans les figures 4.17 à 4.20, 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 (voir figure 4.1 à 4. 4).

CONCLUSION

Ce travail est une modeste tentative d'analyse et de compréhension de l'influence des réparations successives sur la qualité d'un joint soudé. Nous nous sommes limités aux principales propriétés mécaniques pour constater l'effet de ces réparations, il s'avère que l'on ne peut réparer indéfiniment car à chaque réparation effectuée correspond un élargissement 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. Un plus grand nombre d'éprouvettes et des essais de fatigue et de résilience nous auraient donné plus d'arguments pour nous prononcer avec plus de conviction.

On tâchera, quand les conditions nous le permettront, de compléter ce travail par d'autres essais pour circoncire et affiner nos observations et nos conclusions.

		Sheet / Feuille :
	Welding Specification Specification de soudage	PQR No :
	Welding of carbon steels Soudage des aciers au carbone	

Welding process(es)
Procédé de Soudage

SMAW

Métal de base

Type Nuance	Grade Grade	Φ (in)		Th /Ep (mm)		PN°
		Min	Max	Min	Max	
X52	5L	8"	/	9	/	1

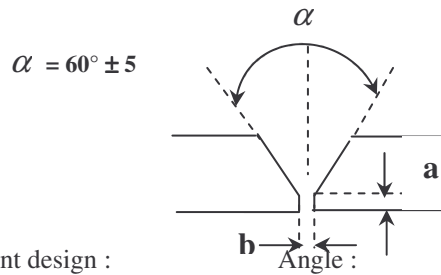
Métal d'apport

Layer/passe	Root/pén.	Fill/Bour	Cap/Fin.
Class/Type	E6010	E7010	E7010
AWS-SFA	5.1	5.1	5.1
F	4	4	4
A	1	1	1
Φ (mm)	3.25	4	4

Position de Soudage:

Layer/passe	Root / Pén.	Fill / Bour	Cap / Fin.
Position	5G	5G	5G
Rot./ou Fix.	Fix	Fix	Fix
Prog./Prog.	Donn hill/Desc	Up hill/Mont	Up hill/Mont

Joint préparation :
Conception du joint:



Joint design :

Type de chanfrein :

V

Strink :

Talon :

Gap: $b = 1.6 - 2(\text{mm})$

Ecartement

$a = 1.6 \pm 0.8 (\text{mm})$

Preparation: Ends to be welded are prepared from origin or by cutting or bevelling and grinding. They are cleaned from all excess of oxide, rust, grease or paint.

Préparation: Les bords à souder sont préparés d'origine ou par découpage ou chanfreinage et meulage. Ils sont débarrassés de tout excès d'oxyde, rouille, graisse ou peinture.

Technique d'exécution du joint et caractéristiques électriques

Layers / Passes	Root / pénétration	Fill / Bourrage	Cap / Finition
Welding Process / procédé de soudage	SMAW	SMAW	SMAW
Welding position / position de soudage	5G	5G	5G
Current & polarity / courant & polarité	(+)	(+)	(+)
Filer métal / métal d'apport	E6010	E7010	E7010
Φ Electrode / Electrode (mm)	3.25	4	4
Φ Rod / Fil (mm)	/	/	/
Amp.Range / Gamme d'intensités (A)	90 - 110	120 - 130	120 - 130
Volt.Range / Gamme de tension (V)	25-35	25-38	25-38
Gas / Gaz	/	/	/
Folw Rate / Débit (l/min)	/	/	/

The number of passes in filling and cap depends on the thickness to be welded

Le nombre de passes en bourrage et finition dépend de l'épaisseur à souder.

In filling and cap, passes can be done by juxtaposed beads.

En bourrage et finition, les passes peuvent être faites par cordons juxtaposés

		Sheet / Feuille :
Welding Specification Specification de soudage		PQR No :

Welding of carbon steels Soudage des aciers au carbone	
---	--

Welding process(es) Procédé de RepARATION	SMAW
--	------

Métal de base

Type Nuance	Grade Grade	Φ (in)		Th /Ep (mm)		PN°
		Min	Max	Min	Max	
X52	5L	8"	/	9	/	1

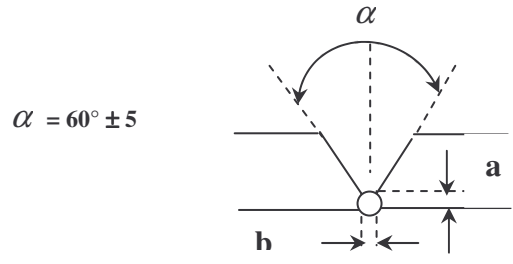
Métal d'apport :

Layer/passe	Root/pén.	Fill/Bour	Cap/Fin.
Class/Type	E6010	E7010	E7010
AWS-SFA	5.1	5.1	5.1
F	4	4	4
A	1	1	1
Φ (mm)	3.25	4	4

Position de Soudage:

Layer/passe	Root / Pén.	Fill / Bour	Cap / Fin.
	5G	5G	5G
Position			
Rot./ou Fix.	Fix	Fix	Fix
Prog./Prog.	Up hill/Desc	Up hill/Mont	Up hill/Mont

Joint préparation :
Conception du joint:



Joint design :
Type de chanfrei V Angle :
Angle :

Strink :
Talon : a = 1.6 ± 0.8 (mm) Gap : b = 1.6 -2(mm)
Ecartement

Preparation : Ends to be welded are prepared from origin or by cutting or bevelling and grinding. They are cleaned from all excess of oxide, rust, grasse or paint.

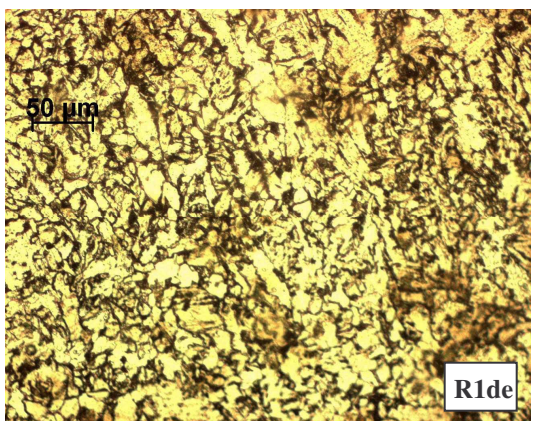
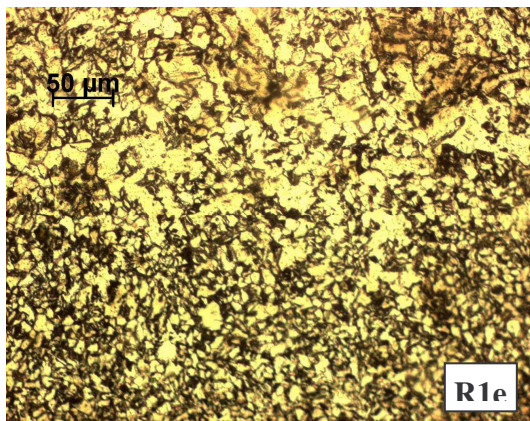
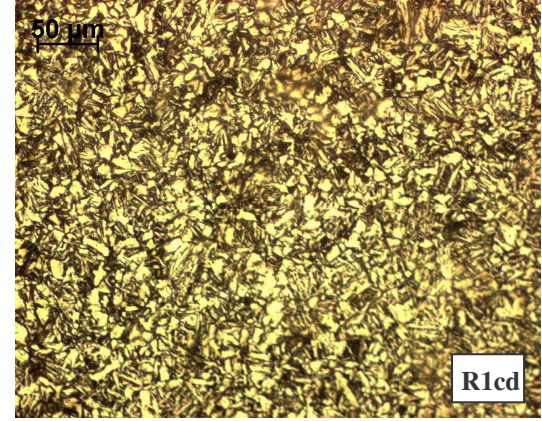
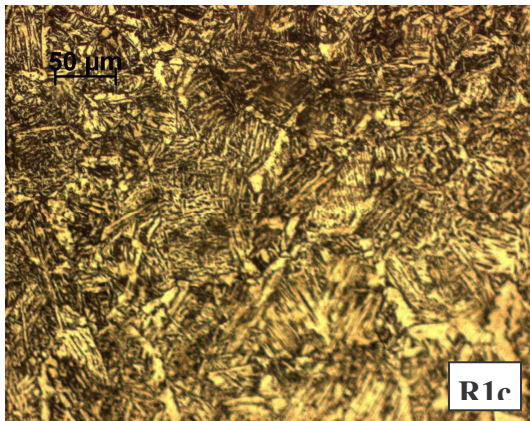
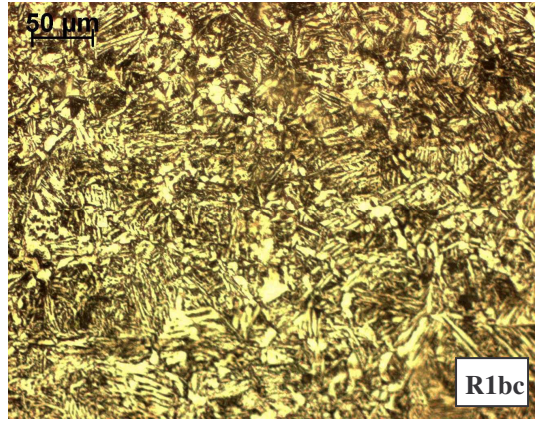
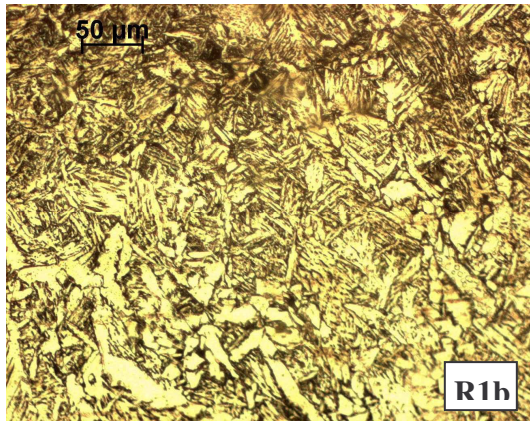
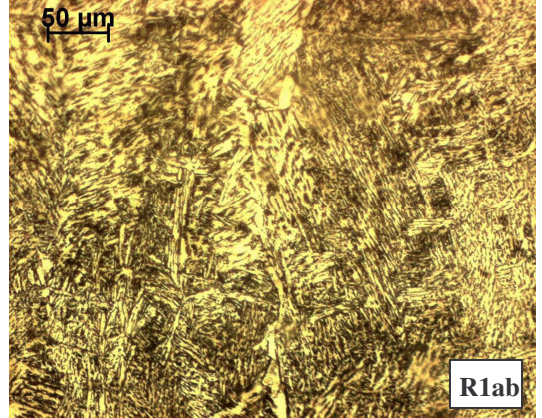
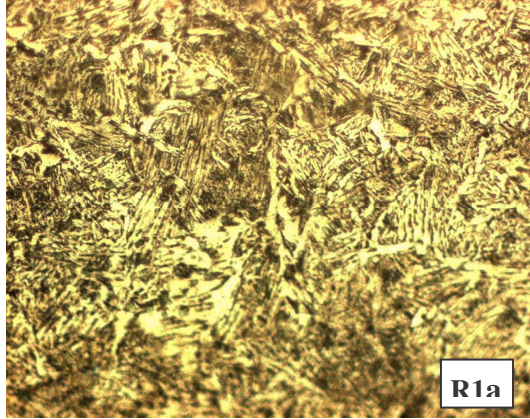
Préparation: Les bords à souder sont préparés d'origine ou par découpage ou chanfreinage et meulage. Ils sont débarrassés de tout excès d'oxyde, rouille, graisse ou peinture.

Technique d'exécution du joint et caractéristiques électriques

Layers / Passes	Root / pénétration	Fill / Bourrage	Cap / Finition
Welding Process / procédé de sondage	SMAW	SMAW	SMAW
Welding position / position de soudage	5G	5G	5G
Current & polarity / courant & polarité	(+)	(+)	(+)
Filer métal / métal d'apport	E6010	E7010	E7010
Φ Electrode / Electrode (mm)	3.25	4	4
Φ Rod / Fil (mm)	/	/	/
Amp.Range / Gamme d'intensités (A)	90 - 110	120 -130	120 - 130
Volt.Range / Gamme de tension (V)	25-35	25-38	25-38
Gas / Gaz	/	/	/
Folw Rate / Débit (l/min)	/	/	/

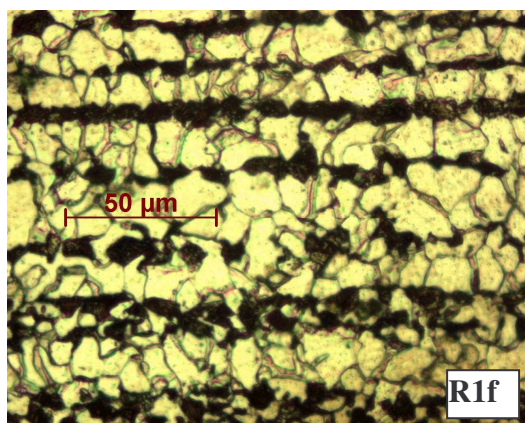
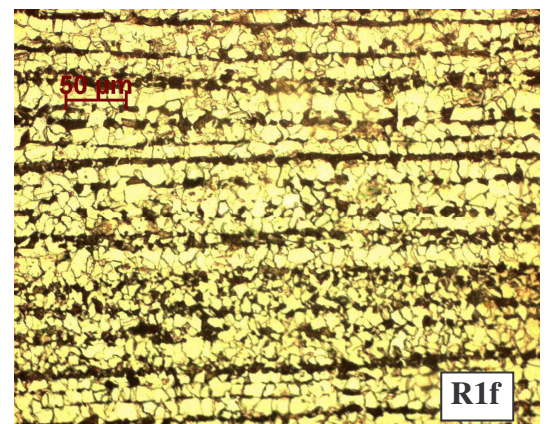
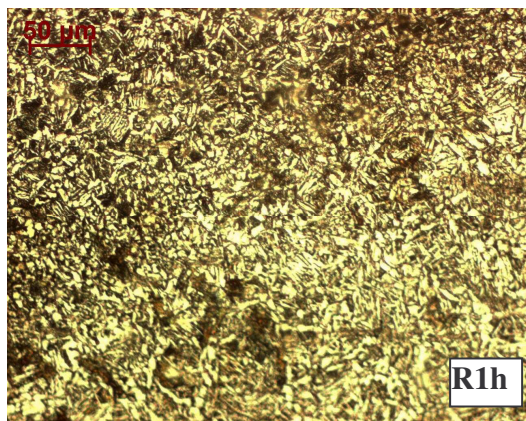
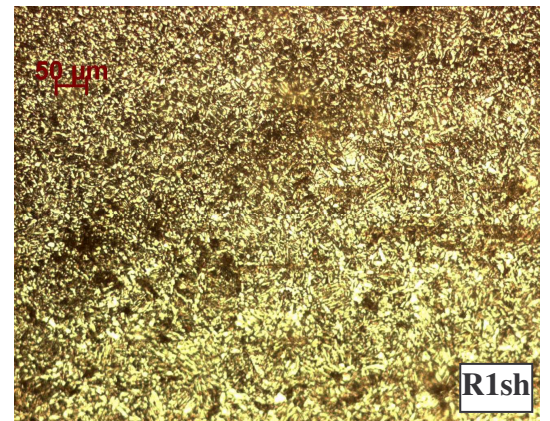
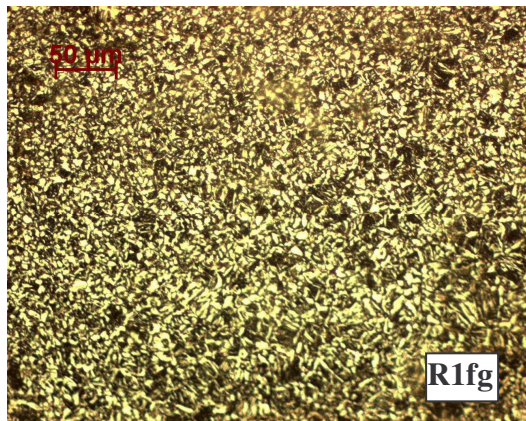
Le nombre de passes en bourrage et finition dépend de l'épaisseur à souder.
In filling and cap, passes can be done by juxtaposed beads.
En bourrage et finition, les passes peuvent être faites par cordons juxtaposés.

APPENDICE B



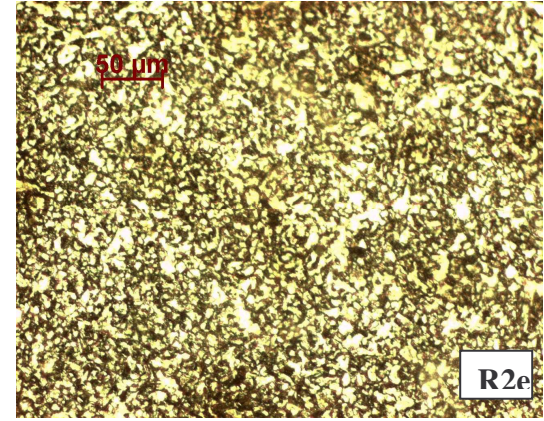
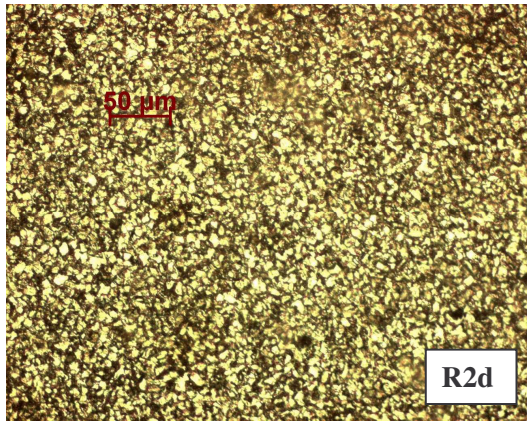
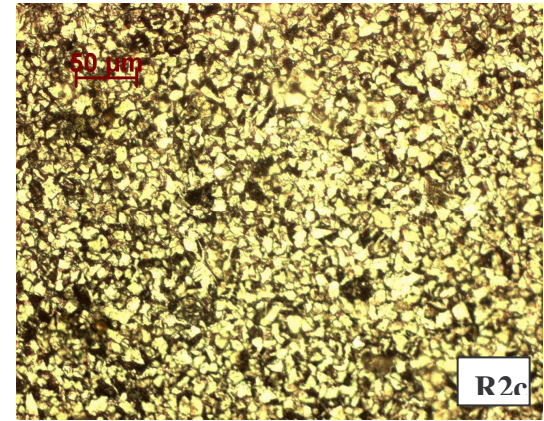
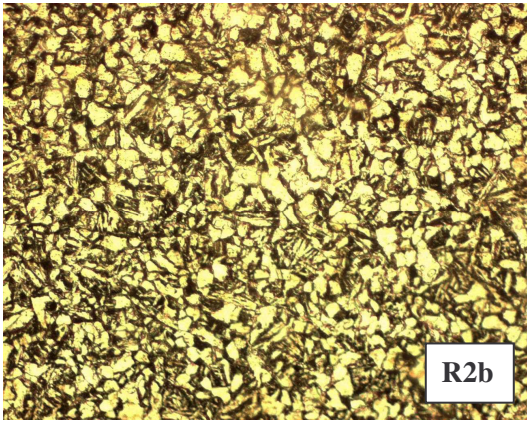
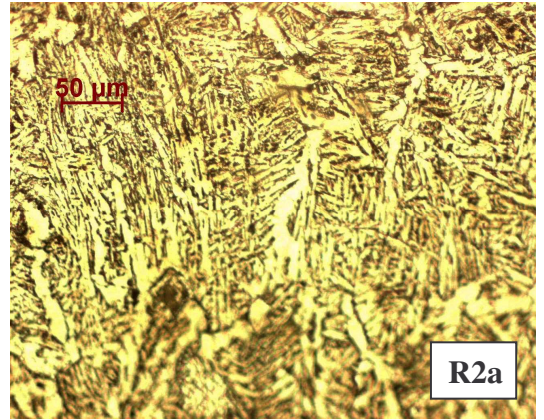
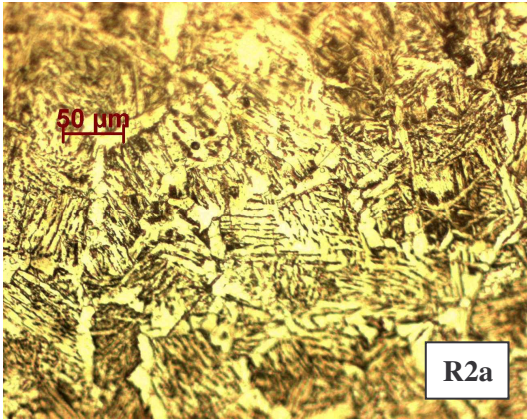
Micrographies de la première réparation R1

APPENDICE B



Micrographies de la première réparation R1

APPENDICE B



Micrographies de la deuxième réparation R2