

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

7/03

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE METALLURGIE

المدونة الوطنية المتعددة التكنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

THEME

CARACTERISATION STRUCTURALE
ET MECANIQUE DES JOINTS
HETEROGENES SOUDES
D'UN ACIER INOXYDABLE
DUPLEX 2205

Encadré par Mr M.E. DJEGHLAL
Et Mr BAQJI

ETUDIE PAR LEMDANI ADAM

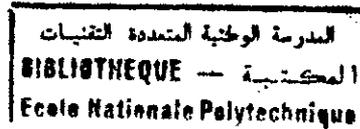
Année universitaire 2002/2003

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

*MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE*

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE METALLURGIE



PROJET DE FIN D'ETUDES

THEME

**CARACTERISATION STRUCTURALE
ET MECANIQUE DES JOINTS
HETEROGENES SOUDES
D'UN ACIER INOXYDABLE
DUPLEX 2205**

*Encadré par Mr M.E. DJEGHLAL
Et Mr BADJI*

ETUDIE PAR LEMDANI ADAM

Année universitaire 2002/2003

الفولاذ الغير قابل للأكسدة خاصيات ميكانيكية معتبرة زيادة على مقاومة فعالة ضد التآكل و هذا ما يفسر الاستعمالات العديدة في أجنحة مختلفة من الصناعة التي تحضى بها هذه المادة خاصة في الصناعة البترولية و نقل السوائل عبر أنابيب محكمة

و بالتالي فإن عملنا هذا يعتبر تشخيص تركيبى و ميكانيكى للمناطق الملحمة من فولاذ غير قابل للأكسدة من نوع 2205

و الذي تحمل علاج حراري إلى درجات 950 1000 و 1050°

التجارب المختلفة التي أجريت لهذا التشخيص هي تجربة الصلابة ، تجربة المقاومة للصدمات و أخذنا كذلك صور بواسطة المجهر الضوئي لمختلف المناطق من هذا التركيب الملحوم .

استخلصنا خاصية الصلابة مهمة خاصة في الحبل الملحوم و بالتالي فإن المقاومة ضد الصدمات تقل من جهة أخرى فإن مفعول درجة الحرارة للعلاج تزيد في خاصية المقاومة .

المفاتيح : الفولاذ الغير قابل للأكسدة ، تشخيص تركيبى و ميكانيكى ، التلحيم

Résumé

Les aciers inoxydables sont des matériaux ayant des propriétés mécaniques intéressantes et une résistance à la corrosion exceptionnelle; d'ou leurs utilisations très variées dans différents secteurs de l'industrie, en particulier celle des hydrocarbures sous formes de tubes soudés.

De ce fait, notre étude présente une caractérisation structurale et mécanique de joints soudés d'un acier inoxydable duplex 2205, hyper trempé à 950, 1000 et 1050° .

Les différents essais pour caractériser les matériaux mécaniquement sont l'essai de dureté, de résistance et de traction. On a également pris des micrographies des différentes zones d'un assemblage soudé.

On note que les propriétés de dureté sont plus importantes au sein du cordon de soudure et donc une moindre résistance aux chocs d'autre part, l'influence de la température d'hyper trempé est telle que si elle est plus élevée la résilience augmente.

Mots clés

Acier inoxydable duplex – soudage – TIG - caractérisation structurale et mécanique

Abstract

Stainless steels have interesting mechanical properties and a good resistance against corrosion; this what can explain their large use in different parts of industry especially hydro carbides one at the form of weld pipes.

Our work is a characterization of weld pipes duplex stainless steel 2205 quenched at 950, 1000 and 1050°C

The different tests made on these materials are the sharpy test; the hardness test and we took photos of the microstructure of the zones of weld combination.

We note that hardness is higher in the melt zone what can be translated by a little resistance. From another side, the temperature of quench increases the resistance to shocks.

Key words

Duplex stainless steel – welding – structural and mechanical characterisation

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

Partie I - ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1 – Les Aciers Inoxydables

1.1. Introduction.....	3
1.2. Influences des éléments d'additions.....	4
1.3. Les différentes classes d'aciers inoxydables.....	6
1.3.1. Les aciers inoxydables martensitiques.....	6
1.3.2. Les aciers inoxydables ferritiques.....	7
1.3.3. Les aciers inoxydables austénitiques.....	8
1.3.4. Les aciers inoxydables austéno-ferritiques.....	9

CHAPITRE 2 – Le Soudage

2.1. Généralités et définitions.....	14
2.2. Les différents procédés de soudage.....	15
2.2.1. Soudage par pression.....	16
2.2.2. Soudage par fusion.....	16
2.3. Le soudage à l'arc électriques.....	17
2.4. Métallurgie du soudage.....	19
2.5. Les cycles thermiques du soudage.....	20
2.5.1. Notion d'état quasi stationnaire.....	20
2.5.2. Répartition et solide thermique.....	21
2.5.3. Facteurs influençant la répartition thermique.....	21
2.6. Soudage en plusieurs cycles ou passes.....	22

CHAPITRE 3 – Transformations de phases en soudage

3.1. Transformations de phases à l'échauffement.....	23
3.1.1. Recristallisation après écrouissage.....	23
3.1.2. Phénomène de surchauffe.....	24
3.1.3. La coalescence.....	25
3.1.4. Modification de la constitution.....	25
3.2. Transformations de phases en refroidissement.....	25
3.2.1. Retour à l'état d'équilibre.....	25
3.2.2. Transformation perlitique en soudage.....	25
3.2.3. Transformation martensitique en soudage.....	26

CHAPITRE 4 – Traitements thermiques des assemblages soudés

4.1. Traitement de relaxation ou de détente.....	27
4.2. Recuit de normalisation.....	28
4.3. Trempe et revenu des ensembles soudés.....	29

CHAPITRE 5 – Soudage des aciers inoxydables duplex

5.1. Procédé de soudage TIG pour les aciers inoxydables.....	30
5.2. Métallurgie du soudage des aciers inoxydables duplex.....	32
5.2.1. Structure et taux de ferrite.....	32
5.2.2. Tenué à la corrosion.....	33

Partie 2 - PROCEDURE EXPERIMENTALE

1. Caractérisation structurale

1.1. Identification du métal de base.....	35
1.1.1. Choix du métal de base.....	35
1.1.2. Caractérisation du métal de base.....	35
1.2. Soudage des tubes.....	35
1.2.1. Choix du procédé de soudage.....	36
1.2.2. Choix du métal d'apport.....	36
1.2.3. Fiche technique de soudage.....	37
1.3. Traitements thermiques.....	39
1.4. Prélèvement des échantillons.....	40
1.5. Essai de micro dureté.....	41
1.5.1. Micro dureté Vickers sur les assemblages soudés.....	41
1.6. Examen métallographique.....	43
1.6.1. Préparation de l'échantillon.....	43
1.6.2. Polissage.....	44
1.6.3. Attaque chimique.....	44
1.6.4. Micrographie.....	45

2. Caractérisation mécanique

2.1. Essai de résilience.....	46
2.1.1. Localisation des éprouvettes.....	47
2.1.2. Les dimensions des éprouvettes.....	47
2.1.3. Calcul de la résilience.....	48
2.2. Essai de traction.....	49
2.2.1. Prélèvement des éprouvettes.....	49
2.2.2. Les dimensions et la forme de l'éprouvette.....	49
2.2.3. Les caractéristiques mécaniques de traction et diagramme conventionnel de traction	50

PARTIE 3 – INTERPRETATIONS ET RESULTATS

1. Résultats de l'analyse chimique.....	52
2. Résultats de la micro dureté.....	52
3. Résultats de l'essai de résilience.....	59
4. Micrographies.....	59
4.1. Micrographies d'échantillons traité à 950°C.....	59
4.2. Micrographies d'échantillons traité à 1000°C.....	62

4.3. Micrographies d'échantillons traité à 1050°C.....	65
5. Interprétations des dureté.....	68
6. Interprétations des micrographies.....	69
7. Interprétations des résiliences.....	70

CONCLUSION

INTRODUCTION GENERALE

Le soudage reste une méthode d'assemblage de pièces métalliques par fusion très efficace, mais aussi très prisée dans différents secteurs de l'industrie en particulier dans le raccordement des tuyauteries destinées au transport des fluides inflammables tels que le gaz ou le pétrole.

Le choix des matériaux à cet usage se fait en fonction de paramètres qui exigent des assemblages soudés des caractéristiques aussi proches que possibles du métal de base (la zone non soudée). Les aciers inoxydables sont des matériaux qui remplissent ces conditions, et offrent en plus une excellente résistance aux phénomènes de dégradations tels que la corrosion en plus de très satisfaisantes grandeurs mécaniques à des températures extrêmes (des températures cryogéniques aux températures très élevées).

Notre travail consiste en une caractérisation de ce type de matériaux raccordés par soudage et plus précisément le soudage d'un tube d'acier inoxydable duplex et l'étude des propriétés mécaniques et des caractéristiques structurales des joints hétérogènes de soudures.

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1. LES ACIERS INOXYDABLES

1.1. Introduction

L'acier inoxydable est considéré comme le matériau de choix dans différents secteurs de l'industrie chimique, l'industrie des transports maritimes, ainsi que pour les tubes destinés au transport des fluides, il présente des propriétés mécaniques très satisfaisantes de même qu'une excellente résistance à la corrosion.

Qu'est ce qu'un acier inoxydable ?

Les aciers inoxydables sont avant tout, des alliages à base de fer ou plus exactement à base d'acier (alliages de fer et de carbone) qui doivent contenir un minimum de 10.5 % de chrome (pour les alliages plutôt simples) selon la norme européenne EN 10088-1, le taux de chrome peut aller jusqu'à 25% (alliages plus complexes) ; ainsi que d'autres éléments d'addition tels que le nickel (ou alors son substitut : le manganèse) et dans une moindre mesure le molybdène.

Les premières observations des propriétés de haute résistance à la corrosion du fer allié au chrome furent faites par le français Berthier en 1821. Vers 1930, Hochmann a découvert les nuances biphasées austénoferritiques appelées de nos jours les **duplex**.

Il faut souligner que, si les aciers inoxydables ont connu l'extraordinaire développement des dernières années, cela est dû à la disponibilité à grande échelle des métaux entrant dans leur composition.

Que peut offrir un acier inoxydable ?

- Une résistance à la corrosion, aux taches, à la rouille et aux piqûres.
- Une résistance à l'oxydation jusqu'à 700°C et parfois au dessus de 1000°C.
- Une limite élastique variant de 200 à 1500 N/mm².
- Une résistance aux chocs et une ténacité jusqu'aux températures cryogéniques.
- Il peut être moulé, corroyé, usiné, poli et assemblé par les techniques usuelles de soudage.
- Une longue durée de vie ainsi qu'un bel aspect extérieur [1].

Pourquoi est-il inoxydable ?

En présence de l'oxygène ou d'une atmosphère oxydante, le chrome forme rapidement une pellicule d'oxyde passive et tenace sur la surface exposée. Cet oxyde agit comme une barrière et empêche toute oxydation et corrosion subséquentes. Il est à noter que dans les atmosphères réductrices ou en l'absence d'oxygène, les propriétés de résistance à la corrosion sont très sérieusement diminuées.

1.2. Influences des éléments d'addition sur les propriétés des aciers inoxydables [2] , [3]

Le chrome

- C'est le plus important des éléments d'alliages dans les aciers inoxydables.
- Il élargit le domaine ferritique.
- Il est à l'origine de la passivation de ce type d'aciers et de ce fait améliore la résistance à la corrosion.

Le nickel

- Il favorise l'extension du domaine austénitique aussi bien à température ambiante que pour les basses températures.
- Il favorise une bonne mise en œuvre par déformation plastique.
- Améliore nettement la résistance à la corrosion, en particulier sous tension.

Le molybdène

- Lorsqu'il est utilisé à des teneurs comprises entre 2 et 5%, il augmente le qualité de résistance à la corrosion dans presque tous les milieux (sauf les solutions nitriques bouillantes).
- Accroît la résistance du film passif.

Le manganèse

- Bien que classé comme élément gamma-gène, il agit comme alpha-gène à des teneurs supérieures à 7%, renforçant ainsi l'opposition à la fissuration à chaud lors des solidifications rapides (telles que celles rencontrées dans les opérations de soudage).
- Il favorise la formation de sulfures donc améliore l'usinabilité.
- Améliore les propriétés mécaniques de ce type d'aciers.

Le carbone

- Élément fortement gamma-gène.
- Il contribue à la stabilisation de la phase γ lors de la déformation à froid.
- Il peut provoquer la formation de carbures de chrome $Cr_{23}C_6$, diminuant par la même l'opposition à la corrosion inter-granulaire.

L'azote

- Stabilise le domaine de l'austénite.
- Associé à une basse teneur en carbone, l'azote permet d'atteindre des limites d'élasticité élevées sans pour autant diminuer la résistance à la corrosion inter-granulaire.

Le silicium

- Tend à élargir le domaine de la ferrite.
- Le silicium améliore les propriétés d'emploi à hautes températures.

Titane, niobium, vanadium

- Ces trois éléments sont alpha-gènes, qui interviennent en faibles quantités dans les aciers inoxydables d'une manière générale.
- Le titane en se liant avec l'azote donne un nitrure de titane qui renforce l'opposition contre la corrosion inter-cristalline.
- Le niobium, en s'associant avec le carbone s'oppose à la corrosion inter-granulaire.
- Le vanadium, quant à lui, augmente la résistance mécanique à chaud.

1.3. Les différentes classes d'aciers inoxydables

Tous les aciers inoxydables peuvent être classés en 4 principaux groupes, qui représentent 4 types distincts de structures métallurgiques. Les aciers inoxydables sont classés comme suit : martensitiques, ferritiques, austénitiques, austénoferritiques (ou duplex).

1.3.1. Les aciers inoxydables martensitiques

De même que les alliages fer-carbone ordinaires les aciers inoxydables peuvent également être soumis à des traitements thermiques, ils peuvent être trempés pour obtenir une dureté maximale, puis ils peuvent subir un revenu pour améliorer leur ductilité (ce qui peut avoir comme effet de diminuer légèrement la résistance à la corrosion).

Les aciers inox martensitiques contiennent de 11.5 à 18 % de chrome et un maximum de 1.2 % de carbone, selon la norme EN 10020. Ils ont une grande capacité de trempe (importantes épaisseurs) par refroidissement à l'air ou à l'huile.

Le tableau suivant illustre la classification des aciers inoxydables martensitiques suivant la composition [2]:

Groupe	Composition chimique (% en masse)			
	Carbone	Chrome	Nickel	Molybdène
1	≤0.15	11.5 à 13.5	≤1.0	≤0.60
2	0.15 à 0.50	12.0 à 14.5	≤1.0	≤0.80
3	0.60 à 1.20	14.0 à 18.0	≤1.0	≤0.80
4	≤0.22	12.0 à 18.0	1.5 à 6.0	≤1.50

Tableau N°1 : Classification des aciers inoxydables martensitiques

1.3.2. Les aciers inoxydables ferritiques

La structure cristalline de ces aciers est identique à celle du fer α (ferrite), c'est à dire qu'ils ne subissent pas la transformation allotropique $\alpha \leftrightarrow \gamma$ dans tout l'intervalle de température, c'est pour cela que le terme ferritique est utilisé pour cette classe.

Les aciers inoxydables ferritiques contiennent généralement entre 15 et 30 % de chrome. Leur structure stable est maintenue jusqu'aux températures de fusion, c'est la raison pour laquelle un durcissement par trempe n'est pas possible. L'écroutissage réduit rapidement la ductilité, ce qui nécessite un recuit intermédiaire, qui doit éviter un grossissement excessif des grains et une fragilisation subséquente [1].

Les aciers inoxydables ferritiques sont généralement plus résistants à la corrosion que ceux de la classe martensitique et peuvent être utilisés en contact avec de l'acide sulfurique, les acides organiques tels que l'acide formique, citrique, lactique, oxalique, etc., ainsi que les atmosphères marines. Ces aciers sont fortement magnétiques jusqu'à leur point de Curie d'environ 760°C et ont un coefficient d'expansion similaire à l'acier doux. Leur conductibilité thermique correspond à environ 50% de celle des aciers doux .

Les différents groupes des aciers inoxydables ferritiques selon la composition sont montrés dans la tableau 2 [2]:

Groupe	Teneur en chrome (% en masse)	Teneur en carbone (% en masse)	Autres éléments (dont stabilisants)
1	10.5 à 13.0	≤ 0.080	Stabilisant : Ti
2	16.0 à 18.0	≤ 0.080	Stabilisants : Ti, Nb, Zr, V Résistance à la corrosion : Mo
3	>20	≤ 0.020	Stabilisants : Ti, Nb Résistance à la corrosion : Mo

Tableau N° 2 : Classification des aciers inoxydables ferritiques .

1.3.3. Les aciers inoxydables austénitiques

Les aciers inoxydables du type Fe-Cr-Ni représentent environ 80% du marché mondial des aciers inoxydables.

Le pourcentage suffisant de chrome (de 16 à 20 %) offre une excellente résistance à la corrosion, tandis qu'un pourcentage allant de 8 à 12 % de nickel assure une stabilité de la structure austénitique, ils peuvent être complétés par d'autres éléments supplémentaires (surtout le molybdène) pour améliorer la résistance aux piqûres [1].

Ce type d'alliage, par contre, ne peut être durcis par traitements thermiques, ils sont sensibles particulièrement à l'érouissage.

La structure cristallographique des aciers inoxydables austénitiques est cubique à faces centrées (CFC), ce qui leur confère une ductilité et une ténacité exceptionnelles depuis les températures cryogéniques, jusqu'aux températures très élevées, il faut ajouter à cela une très bonne soudabilité opératoire et métallurgique. [2]. Toutefois, ils sont sensibles à la fissuration à chaud et à la corrosion inter-cristalline par précipitation de carbure de chrome (aux joints des grains)[4].

La composition des plus importants aciers inoxydables austénitiques figure sur le tableau 3.

Nuance selon les normes françaises NF	C%	Mn%	P%	S%	Si%	Ni%	Cr%	Mo%	Autres
X2CrNi18-9	<0.03	<2.0	0.045	<0.030	<1.0	8.0/10.0	17.5/19.5		N<0.11
X2CrNi19-11	<0.03	<2.0	0.045	<0.030	<1.0	10.0/12.0	18.0/20.0		N<0.11
X2CrNiN18-10	<0.03	<2.0	0.045	<0.030	<1.0	8.5/11.5	17.0/19.0		0.12<N<0.22
X5CrNi18-10	<0.07	<2.0	0.045	<0.030	<1.0	8.0/10.5	17.0/19.5		N<0.11
X8CrNiS18-9	<0.10	<2.0	0.045	0.15/0.35	<1.0	8.0/10.5	17.0/19.0		N<0.11-Cu<1
X6CrNiTi18-10	<0.08	<2.0	0.045	<0.030	<1.0	9.0/12.0	17.0/19.0		5 x C à 0.7
X4CrNi18-12	<0.06	<2.0	0.045	<0.030	<1.0	11.0/13.0	17.0/19.0		N<0.11
X2CrNiMo17-12-2	<0.03	<2.0	0.045	<0.030	<1.0	10.0/13.0	16.5/18.5	2.0/2.5	N<0.11
X2CrNiMo17-11-2	<0.03	<2.0	0.045	<0.030	<1.0	10.0/12.0	16.5/18.5	2.0/2.5	0.12<N<0.22
X5CrNiMo17-12-2	<0.07	<2.0	0.045	<0.030	<1.0	10.0/13.0	16.5/18.5	2.0/2.5	N<0.11
X6CrNiMoTi17-12-2	<0.08	<2.0	0.045	<0.030	<1.0	10.5/13.5	16.5/18.5	2.0/2.5	5 x C à 0.7
X2CrNiMo17-12-3	<0.03	<2.0	0.045	<0.030	<1.0	10.5/13.0	16.5/18.5	2.5/3.0	N<0.11
X2CrNiMoN17-13-3	<0.03	<2.0	0.045	<0.015	<1.0	11.0/14.0	16.5/18.5	2.5/3.0	0.12<N<0.22
X3CrNiMo17-13-3	<0.05	<2.0	0.045	<0.030	<1.0	10.5/13.0	16.5/18.5	2.5/3.0	N<0.11
X2CrNiMo18-14-3	<0.03	<2.0	0.045	<0.030	<1.0	12.5/15.0	17.0/19.0	2.5/3.0	N<0.11
X2CrNiMoN17-13-5	<0.03	<2.0	0.045	<0.015	<1.0	12.5/14.5	16.5/18.5	4.0/5.0	0.12<N<0.22
X3CrNiCu18-9-4	<0.04	<2.0	0.045	<0.030	<1.0	11.0/13.0	17.0/19.0		3<Cu<4 N<0.11

Tableau N° 3 Composition des aciers inoxydables austénitiques [4].

1.3.4. Les aciers inoxydables austéno-ferritiques (duplex)

Les aciers inoxydables austéno-ferritiques ont été développés il y a de cela plus de 70 ans, en Suède pour une utilisation dans une industrie de papier. A l'origine, ils furent créés pour résister à des milieux très agressifs (spécialement l'acide chlorhydrique) dans les refroidisseurs, ainsi que dans d'autres processus chimiques.

On appelle ce type d'acier également les aciers duplex, car leur microstructure contient deux phases (l'austénite γ et la ferrite α) avec des proportions, de manière générale , 50% de ferrite et 50% d'austénite . La composition chimique de ces alliages est basée sur des teneurs en chrome et en molybdène, ce qui a pour effet d'augmenter la résistance à la corrosion inter-granulaire et par piqûres respectivement. Des additions en azote peuvent faire bénéficier l'alliage d'un bon durcissement structural.

Une première génération d'alliages Fe-Cr-Ni-Mo présentaient de bonnes caractéristiques, mais les produits soudés avaient une faible ténacité à cause d'un excès de ferrite, ce qui limitait l'utilisation à quelques domaines très spécifiques. La naissance de la deuxième génération d'aciers inoxydables duplex a coïncidé avec le développement de la production des gaz et pétrole offshore dans la mer du Nord, ce qui a conduit vers de très nettes améliorations des propriétés des aciers inoxydables austéno-ferritiques. L'addition de l'azote conférait une très bonne ténacité de la zone affectée thermiquement (ZAT) ainsi qu'une excellente résistance à la corrosion dans des atmosphères de chlore, cela représente actuellement plus de 80% de l'usage de ce type d'aciers [5].

Les principales caractéristiques des aciers inoxydables duplex [6]

- Haute résistance mécanique.
- Haute résistance à la corrosion par piqûres et à la corrosion par fissuration.
- Bonne opposition à la dégradation sous contrainte et par fatigue.
- Bonne résistance à la corrosion uniforme.
- Bonne résistance à l'érosion et à la fatigue.
- Haute énergie d'absorption.
- Basse dilatation thermique.
- Très bonne soudabilité.

Les plus importantes applications des aciers duplex :

- Echangeurs de chaleurs.
- Chauffages des eaux.
- Réservoirs et bâches.
- Roue mobile et roue de compresseurs.
- Turbines.
- Axes et arbres.
- Cloison pare feu sur les plate-formes offshore.
- Industrie de papier.
- Dans les centrales de désaliénation.
- Transport de fluides (gaz et pétrole).
- Industrie et transports marins.

La composition chimique de aciers austéno-ferritiques les plus utilisés, ainsi que leurs désignations normalisées (selon les normes françaises NF, européennes EN et américaines ASTM) sont présentées dans le tableau 4.

Désignations normalisées			Teneurs de éléments (en % massiques)				
EN	ASTM	NF	C	N	Cr	Ni	Mo
1.4301	304	Z7 CN 18-09	0.04	0.05	18.1	8.3	-
1.4404	316L	Z3 CND 17-11-02	0.02	0.04	17.2	10.2	2.1
1.4362	S32304	Z3 CN 23-04 Az	0.02	0.10	23.0	4.8	0.3
1.4410	S32750	Z3 CND 25-06 Az	0.02	0.27	25.0	7.0	4.0

Tableau N° 4-Composition chimique des aciers inoxydables duplex les plus utilisés [6].

Les propriétés mécaniques

Les principales grandeurs mécaniques qui caractérisent les aciers inoxydables duplex sont données dans le tableau N° 5.

Caractéristiques mécaniques	Valeurs des caractéristiques
Limite d'élasticité $R_{p0.2}$ (N/mm ²)	620
Résistance à la rupture R_m (N/mm ²)	840
Allongement à la rupture A (%)	30

Tableau N° 5-Les principales grandeurs mécaniques des aciers inoxydables duplex[7].

L'utilisation des aciers inoxydables duplex est plus souhaitable que les aciers austénitiques ou ferritiques dans de nombreux cas, cela peut se traduire par d'excellentes propriétés mécaniques. Le tableau N°6 dresse une comparaison entre les précédentes caractéristiques mécaniques pour les trois types d'aciers inoxydables.

Structure	Limite élastique $R_{p0.2}$ (N/mm ²)	Résistance à la rupture R_m (N/mm ²)	Allongement à la rupture A (%)
Ferritiques	370	500	26
Austénitiques	270	620	56
Austéno-Ferritiques	620	840	30

Tableau N°6-Comparaison des propriétés mécaniques des aciers inoxydables ferritiques, austénitiques, et austéno-ferritiques (duplex) [7].

Les propriétés physiques

Les propriétés physiques des aciers inoxydables duplex ont des valeurs intermédiaires entre les structure ferritiques et austénitiques, le tableau N°7 énonce les plus importantes grandeurs.

Propriétés physiques	Valeurs
Masse volumique (kg/dm ³)	7.8
Module d'Young E (N/mm ²)	200000
Coefficient de dilatation Linéaire entre 20 et 200°C (en 10 ⁻⁷ K ⁻¹)	13.0
Capacité thermique Massique (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	500
Résistivité électrique (μ.Ω.m)	0.8

Tableau N° 7-Principales propriétés physiques des aciers inoxydables duplex .[7]

2. LE SOUDAGE

2.1. Généralités et définitions

« *e duobus unum* » ce qui veut dire en latin de deux ils ne font qu'un.

Cette phrase constitue la devise du *Welding Institute* de Londres, et peut servir comme une définition du soudage.

L'action de souder désigne l'opération qui consiste à réunir entre eux deux ou plusieurs éléments d'un assemblage tout en assurant la continuité de la matière.

Le terme soudage désigne la technique opératoire utilisée à cet effet et celui de soudure le résultat de celle-ci.

Le continuité de la matière peut être obtenue soit par pression, sous l'action d'un effort mécanique s'exerçant sur l'assemblage porté à des températures optimales avec déformation plastique, dans ce cas le soudage relève d'une opération de forge localisée ; soit par fusion et refroidissement des bords de l'assemblage, ce qui peut être considéré comme une action de fonderie localisée [8].

Ce dernier procédé et ce qu'il comporte comme techniques opératoires est désigné par le terme soudage autogène, il consiste donc à assembler entre eux, par fusion des bords, deux ou plusieurs éléments de même nature ou de natures voisines de telle sorte à obtenir après solidification, une liaison homogène.

Dans la majorité des cas pour le soudage homogène, la constitution des soudures est favorisée par l'addition d'un métal de même nature porté simultanément à la fusion, le métal constituant les pièces à assembler se nomme métal de base, alors que celui venant en renfort métal d'apport.

Cependant, il existe un soudage hétérogène aussi appelé brasage qui consiste à introduire entre les éléments à assembler un métal à plus bas point de fusion, à l'état liquide et après la solidification lie fortement les deux éléments. Le métal de base et le métal d'apport ne sont pas de même nature.

La soudabilité peut être définie comme étant l'aptitude d'un métal à être assemblé par soudage ; elle est représentée sous trois aspects :

- La soudabilité opératoire.
- La soudabilité métallurgique.
- La soudabilité constructive.

Un métal n'est vraiment soudable que s'il satisfait à ces trois définitions.

L'assemblage qui résulte du soudage comporte trois zones :

- Le métal de base.
- Le métal de base affecté thermiquement ou par la chaleur (ZAT).
- Le métal de la soudure ou le métal fondu.

Ces trois zones doivent posséder certaines caractéristiques qui sont celles des métaux d'une manière générale : ténacité, ductilité, résistance à la corrosion, à la fatigue ... Un métal est d'autant plus soudable que ses propriétés essentielles sont conservées après le soudage [9].

2.2. Les différents procédés de soudage

La classification des procédés de soudage se fait en considérant certaines caractéristiques telles que :

- Le type d'énergie mise en œuvre.
- Les paramètres physiques (températures, pression, milieu extérieur).
- Le mode d'élaboration de la continuité de la matière (solidification depuis le liquide ou diffusion depuis la solide).
- La morphologie de la liaison qu'ils permettent de réaliser.

D'une manière très globale on classe les procédés de soudage sous deux importantes catégories :

2.2.1. 1^{ère} catégorie :soudage par pression

Le soudage par pression consiste à amener le métal à l'état plastique par chauffage et de les réunir par pression ou par chocs sans avoir recours au métal d'apport. L'énergie dans ce type de procédés est mécanique. Dans ce cas la qualité des soudures dépend de la température à laquelle le métal est porté, ainsi que la force extérieure.

Dans cette catégorie on peut trouver les procédés suivants :

- Soudage par forgeage.
- Soudage par diffusion.
- Soudage par frottement.
- Soudage par friction.

2.2.2. 2^{ème} catégorie :soudage par fusion

Dans cette classe, l'assemblage se fait par la fusion locale du métal. Cette fusion est assurée par les différents types d'énergie : électrique ou thermique...

Les principaux procédés contenus dans cette catégorie sont :

- Le soudage à l'arc électrique.
- Le soudage à l'arc sous gaz de protection.
- Le soudage par jet de plasma.
- Le soudage sous flux.
- Le soudage par résistance.
- Le soudage par aluminothermie.

2.3. Le soudage à l'arc électrique

Le procédé de soudage le plus répandu est le soudage à l'arc électrique ; il exploite l'énergie de l'arc comme source de fusion.

L'arc électrique est un flux continu d'électrons qui se forme dans l'espace entre deux électrodes qui est accompagné d'un dégagement de chaleur et de l'émission de la lumière.

Pour amorcer un arc il est nécessaire d'ioniser la colonne de l'air entre les deux électrodes. L'ionisation de l'air ou du gaz exige une certaine quantité d'énergie qui est déterminée par la grandeur de potentiel pour libérer les électrons, cette ionisation est assurée par l'échappement de ces derniers de la cathode vers l'anode ; dans l'espace entre les deux électrodes entrent en collision avec les molécules ou les atomes de gaz, les dissocient en formant des ions positifs, ils passent vers la cathode et transforment l'énergie cinétique en énergie lumineuse et thermique.

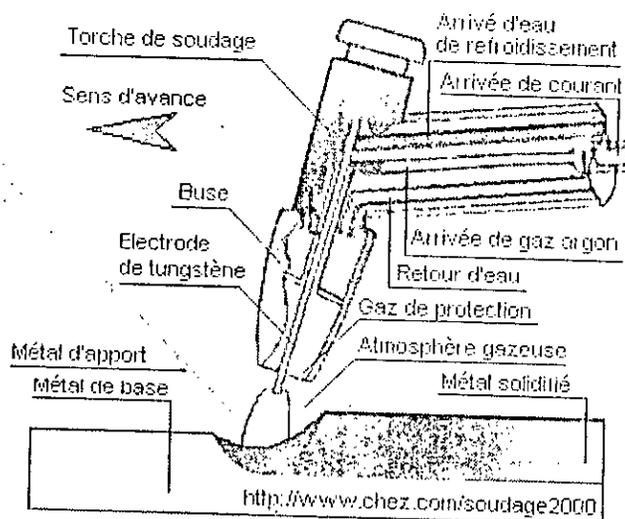


Figure N°1 – Schéma d'un soudage TIG [4].

L'effet thermique provoque la fusion aussi bien de l'électrode que du métal de base . Pour amorcer un arc il faut que le courant parcourt un circuit fermé d'une part la pièce et de l'autre l'électrode [10].

L'arc électrique obéit à des lois physiques essentielles [11]:

- Lois thermiques auxquelles se rattachent les phénomènes de fusion.
- Lois électriques reliant la tension et le courant auxquelles se lient les caractéristiques de fonctionnement des générateurs.

L'arc électrique est la source de chaleur à la base de nombreux procédés de soudage, les raisons primordiales de ce choix sont :

- Les effets thermiques aux électrodes : l'arc de soudage est un arc court entre une électrode formant ainsi l'outil, et les pièces à souder portées localement à la température de fusion.
- Les phénomènes de transport de matière qui s'instaurent naturellement et simultanément de l'électrode, lorsqu'elle est fusible, formant un dépôt se diluant avec les bords à souder pour constituer après refroidissement la liaison métallique recherchée. Il est à noter que pour le cas des électrodes réfractaires il n'y a pas de transfert entre l'électrode et la pièce.

Les procédés de soudage qui utilisent l'arc électrique comme source de fusion sont :

- Le soudage automatique sous flux électro-conducteur.
- Le soudage semi-automatique sous protection gazeuse (Metal Inert Gas MIG ou Metal Activ Gas MAG).
- Le soudage avec électrodes réfractaires (Tungsten Inert Gas TIG).

Le tableau N°8 montre les caractéristiques de ces procédés de soudage :

Procédé	Caractéristiques
Manuel avec électrode enrobée	Procédé très courant, toutes positions, laitiers à éliminer, faibles vitesses de dépôt.
TIG	Exige de l'habilité, convient très bien pour les tubes, forte dilution dans la passe de fond, faible les vitesses de dépôt, automatisable.
MIG-MAG	Exige de l'habilité, préparation plus soignée, le transfert de métal dépend de la qualité du fil (projections), couramment utilisé pour les passes de remplissage, grandes vitesses de dépôt, automatisable.
Soudage au fil fourré	Produits d'apport moins disponible, uniquement pour les passes de remplissage, grandes vitesses de dépôts, protection par laitier.
Soudage sous flux	Mécanisé, importants préparatifs, uniquement pour soudage plat, forte dilution affectant les propriétés des soudures, vitesses de dépôt maximales, laitier parfois difficile à éliminer.

Tableau N° 8 - Caractéristiques des procédés de soudage [12].

2.4. Métallurgie du soudage

L'étude métallurgique du soudage conduit à une approche thermique, car la maîtrise du côté thermique de l'opération de soudage permet avant tout une interprétation plus quantitative des phénomènes métallurgiques que cette opération engendre et par suite de prévoir ces mêmes phénomènes pour en tenir compte lors du choix du procédé de soudage à utiliser.

Le développement de cette étude thermique a permis de piloter ou de diriger une opération, en d'autres termes, le réglage des paramètres et des valeurs à fixer en faisant appel à des installations automatisées et de noter l'évolution de la température en un point donné ou alors l'écart de température entre deux points.

2.5 Les cycles thermiques

2.5.1 Notion d'état quasi stationnaire

En relevant à l'aide de thermocouples les courbes $\theta = f(t)$ en des points situés sur la soudure à l'arc équidistants les uns des autres à partir d'une origine O de ce cordon on obtient les parcours suivants :

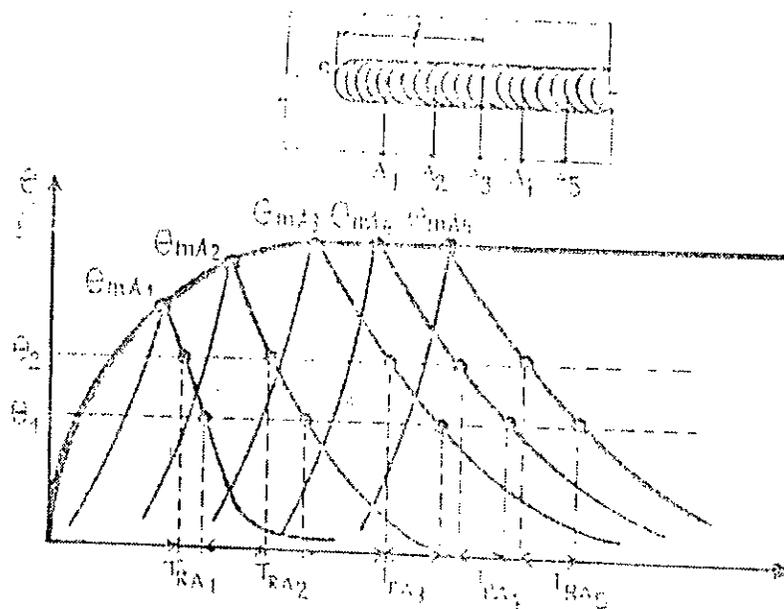


Figure N° 2 - Cycle thermique le long d'un cordon de soudure [13].

On note que la température maximale croît avec la distance parcourue à partir de O puis se stabilise à une valeur constante (la vitesse de progression de la source de chaleur est constante) ; ainsi que les lois de refroidissement mesurées par les temps de refroidissement entre deux températures deviennent identiques, en d'autres termes les courbes de refroidissement $\theta = f(t)$ deviennent superposables à partir d'un certain seuil d'où un état stationnaire s'installe.

L'existence d'un tel état de stabilité peut limiter à déterminer les courbes de refroidissement en des points répartis sur une droite perpendiculaire à la ligne de soudure partant de la source de chaleur.

2.5.2 Répartition thermique, solide thermique

Le terme solide thermique a été proposé par SEFERIAN et PORTEVIN afin de décrire la répartition dans l'espace des cycles thermiques pendant une opération de soudage. Les trois axes de cette représentation sont S_x distance de la ligne de soudure ; S_y distance le long de la ligne ou axe des temps ; l'axe S_z perpendiculaire au plan XY sur lequel sont représentées les températures. Du fait de l'état quasi stationnaire, le solide thermique reste le même tout au long de la ligne de soudure selon laquelle il se déplace en engendrant en chaque point une courbe.

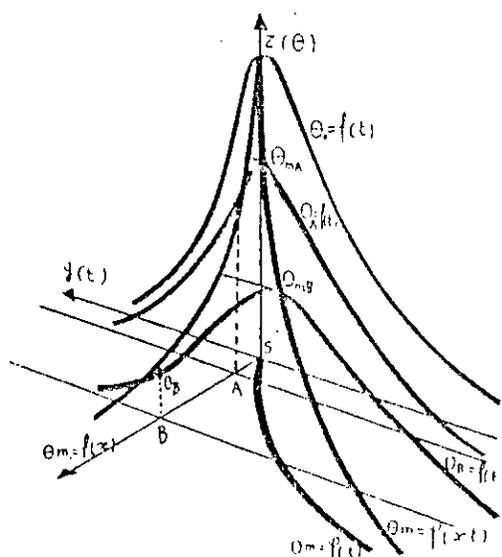


Figure N° 3 – Représentation spatiale du solide thermique . [13]

2.5.3 Facteurs influençant la répartition thermique

2.5.3.a Le métal de base

Le métal de base influence le processus thermique du soudage par ses propriétés et ses caractéristiques thermiques (conductivité et donc de résistivité) par sa masse et par la disposition des pièces à assembler et enfin par la température initiale de ces pièces.

2.5.3.b Les conditions de soudage

L'influence des conditions de soudage peut s'exprimer en fonction de l'énergie mise en jeu durant l'opération ; d'autres part, l'environnement et ses paramètres ont un important impact sur la répartition thermique (la pression et la composition de l'entourage direct de l'arc électrique). En augmentant la pression, une constriction de l'arc aura lieu et par suite la température augmentera.

2.6 Soudage en plusieurs passes ou cycles

La répartition thermique précédemment décrite ne s'applique qu'au cas d'un soudage en une seule passe ou alors la première d'une série. L'évolution de la température pour les passes qui suivent dépend des facteurs suivants :

- La température initiale.
- Le nombre, la disposition des passes et des conditions d'exécution.
- L'intervalle de temps entre les passes.
- La position par rapport à la soudure du point désigné pour étudier la variation de la température.

3. TRANSFORMATION DE PHASES AU COURS DU SOUDAGE

Le terme "transformations de phases" concerne aussi bien la structure que la constitution de l'alliage ; la structure métallographique englobe la répartition et la morphologie des constituants en présence, ceci veut dire la taille et la forme ainsi que l'orientation des grains et des précipités. La constitution, quant à elle, est décrite par la nature et les proportions des phases, la variation de cette composition et l'effet de la température (qui peut être réversible).

3.1 Transformations de phases à l'échauffement

3.1.1. Recristallisation après écrouissage

La recristallisation désigne une réorganisation du réseau cristallin puis des grains par l'effet d'une température croissante.

L'écrouissage est un travail à froid qui entraîne une déformation au sein du métal et un changement de sa structure micrographique (déformation des grains dans le sens imposé par le traitement mécanique) et de sa structure cristalline (distorsion des plans de plus grande densité atomique). Ces changements se traduisent par une évolution des propriétés mécaniques (résistance à la traction, dureté et limite élastique) qui est elle même fonction du taux de déformation.

Sous l'effet de la température, un métal à l'état écroui peut recristalliser.

Le soudage des produits écrouis peut être considéré comme une application directe de la recristallisation après écrouissage, on note dans ce cas un adoucissement du métal de base (diminution de la dureté) et en un degré moindre les caractéristiques de traction. La zone fondue quant à elle, peut se voir durcir ou s'adoucir (douce comme le métal recristallisé ou dure comme le métal de base écroui).

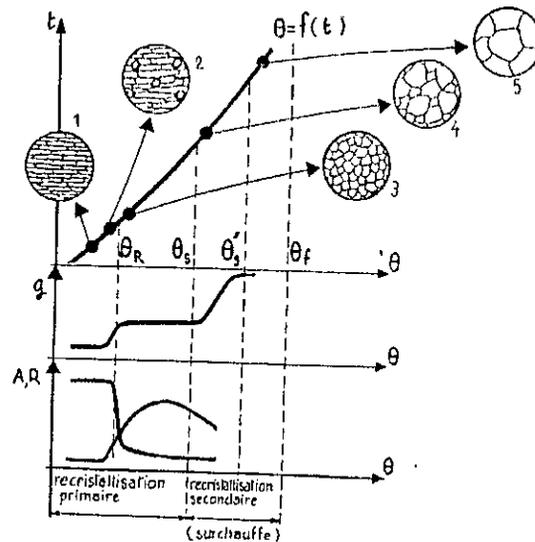


Figure N° 4 – Phases successives au phénomène de recristallisation [13].

3.1.2 Phénomène de surchauffe (recristallisation secondaire)

Ce phénomène intervient directement avant la fusion, il suit la recristallisation et le faible grossissement des grains qui l'accompagne ; l'apparition des effets de la surchauffe ou de la recristallisation secondaire est notée à partir d'une certaine température, de nouveaux grains apparaissent en lieu et à la place d'autres et augmentent en taille ; et passer une autre température il ne restera que les nouveaux grains (ceux qui ont subi le grossissement).

Au voisinage des soudures, le métal de base étant au départ supposé non écroui, les grains croîtront lorsque la distance avec la zone de soudure diminuera.

Dans le cas des aciers, l'évolution des grains est coupée par la transformation allotropique ferrite/austénite ($\alpha \rightarrow \gamma$), le fer γ de structure CFC succédera au fer α qui lui à un arrangement de type CC, donc c'est le grain austénitique qui subira la recristallisation secondaire jusqu'à la fusion . L'étendue de cette zone de surchauffe obéit à la répartition thermique précédemment exposée, elle dépend du gradient de température et du temps de maintien à haute température.

3.1.3 La coalescence

La coalescence est le regroupement ou le rassemblement lors d'un traitement thermique des particules d'un constituant en présence dans une solution solide ; lorsque les particules sont finement dispersées sur toute la structure, un bref cycle thermique (comme dans le cas du soudage) est susceptible de déclencher la coalescence, généralement comme cycle final d'un effet de revenu (cas des aciers inoxydables).

3.1.4 Modification de la constitution

La plus importante conséquence de l'échauffement par rapport à la constitution d'un alliage est le rapprochement vers un état d'équilibre si ce n'est l'atteinte de cet équilibre (forme de revenu) on peut également assister à une mise en solution d'un constituant dans une solution solide. Ainsi, dans les aciers inoxydables on a une précipitation de carbures ($Cr_{23}C_6$) ; le cycle de soudage provoque la coalescence de ce précipité puis sa remise en solution.

3.2. Transformations de phase en refroidissement

Ces transformations à l'état solide, impliquent toutes les zones de soudage (la zone affectée thermiquement ZAT ou la zone fondue ZF après la solidification) et concernent la constitution physico-chimique du métal.

3.2.1. Retour à l'état d'équilibre

Si le refroidissement qui suit l'opération de soudage n'est pas trop rapide, le retour à l'état d'équilibre a normalement lieu et de la même manière que pour les transformations en échauffement, on peut également assister à des transformations allotropiques (cas des aciers) mais dans des intervalles de températures décroissantes.

3.2.2. Transformation perlitique en soudage

Lorsqu'un acier est soudé dans des conditions qui permettent au mode perlitique d'intervenir au cours du refroidissement, l'apparition des constituants ferrite et cémentite se fait suivant un processus particulier et mène à une structure qui dépend à la fois de la vitesse

de ce refroidissement, de la composition chimique de cet acier (en particulier la teneur en carbone) et de la grosseur initiale des grains de l'austénite en cours de transformation.

3.2.3. Transformation martensitique en soudage

D'après les diagrammes de transformation en refroidissement continu TRC la transformation martensitique a lieu à partir d'une loi critique de refroidissement, c'est à dire au dessous d'un temps critique de refroidissement se produit plus bas que la température de début de transformation de la martensite M_s (la plus basse température de transformation).

Le problème rencontré ou alors l'inconvénient d'une transformation martensitique est la fragilisation par l'hydrogène, car il est présent dans l'austénite mère au moment où elle se transforme en martensite d'où une bonne dureté mais une importante fragilité ; pour y remédier, on effectue un revenu qui a pour but de décomposer la martensite qui est un constituant hors d'état d'équilibre (donc instable) en ferrite et cémentite à une température inférieure à A_1 le résultat escompté étant une amélioration de la ductilité.

4. TRAITEMENTS THERMIQUES DES ASSEMBLAGES SOUDÉS

Il a été décrit les modifications que peut subir un métal après une opération de soudage que ce soit sur le métal de base ou sur la zone de liaison ; structure et propriétés peuvent alors être affectées. Principalement, le soudage engendre des contraintes résiduelles dont la répartition et l'amplitude sont liées au mode d'assemblage utilisé.

Dans plusieurs cas les changements dus au soudage peuvent être tolérables, les utilisations de ces assemblages ne sont pas très exigeantes, d'autres part, certains cas imposent des traitements thermiques post soudage afin d'améliorer les propriétés (cela dépend aussi des conditions d'utilisation et de service) ou de réduire (voir éliminer) ces contraintes résiduelles.

Les traitements thermiques généralement utilisés pour les assemblages soudés (en particulier pour les aciers) sont :

- Traitement de relaxation (de détente).
- Traitement de normalisation.
- Traitement de trempe et de revenu.

4.1. Traitement de relaxation ou de détente

La relaxation ou la détente se traduit par la diminution (si possible l'annulation) des contraintes résiduelles provoquées par une opération de soudage.

Le traitement de relaxation agit comme un revenu si l'acier à traiter contient dans la zone fondu ou dans la zone affectée thermiquement des éléments favorisant la trempe ; cet effet peut être néfaste dans la mesure où il peut atténuer certaines propriétés mécaniques provoquant par la même le phénomène de fissuration ou de réchauffage. Ce traitement s'effectue dans un intervalle de température inférieur à la celle du point A₁.

L'étude thermique et thermomécanique de la relaxation par élévation de la température sur les soudures a démontré que la détente des contraintes résiduelles est obtenue par la

diminution de la limite élastique causée elle-même par l'augmentation de la température (c'est à dire que la ductilité augmente avec la température) ; ainsi, toutes les parties hébergeant des contraintes résiduelles (de nature élastique) tendront à donner un aspect plastique à ces dernières (toujours en température croissantes) on obtiendra alors une fraction croissantes de relaxation. La norme NF A36-200 qui a pour titre l'influence des traitements thermiques après soudage sur les propriétés mécaniques des aciers pour chaudières récipients à pression (englobant les aciers inoxydables).

Le taux de relaxation est fonction de la température et du temps, en première approximation en fonction de la température, le rendement est assez faible jusqu'à 200°C, on atteint 50 à 60 % à 500°C, 70 à 85 % à 575°C et 90 à 95 % à 625°C . Mais ce traitement est réellement défini en fonction de la température et du temps ; on introduit alors le paramètre de Hollomon :

$$H = T (20 + \log t) 10$$

T est la température en °C ; t est le temps de maintien en secondes .

4.2. Recuit de normalisation

Le traitement de normalisation consiste à effectuer un chauffage au dessus de A₃ , ce qui a pour effet d'ausénitiser la totalité de la pièce, puis un refroidissement lent, l'objectif étant d'avoir une structure métallographique fine dont les constituants sont la ferrite et la perlite.

Parmi les avantages de ce traitement, l'uniformité de la répartition thermique sur la pièce soudée, on évitera par la même occasion les gradients de température.

L'effet recherché à travers cette normalisation affectera aussi bien la zone fondue que la zone affectée thermiquement.

4.3 Trempe et revenu des ensembles soudés

Le traitement de trempe et de revenu est utilisé pour éliminer les effets négatifs du soudage et d'obtenir une optimisation des qualités et des propriétés aussi bien celles du métal de base que celles du métal fondu puis solidifié.

5. SOUDAGE DES ACIERS INOXYDABLES DUPLEX

Pour souder des tubes ou des tôles en acier inoxydable duplex, le procédé le plus utilisé est le soudage TIG suivi de passes de remplissage en soudage manuel généralement avec électrodes enrobées ou au fil fourré.

5.1. Procédé de soudage TIG pour aciers inoxydables

Le soudage TIG (Tungsten Inert Gas) ou GTAW (Gas Tungsten Welding) est un procédé à l'arc sous protection de gaz inerte avec une électrode infusible.

Le soudage est réalisé à partir d'un arc électrique créée et entretenu entre l'électrode infusible (de tungstène) et la pièce à souder. Le métal d'apport (baguette de fil dressé) est amené manuellement ou automatiquement avec un dévidoir motorisé dans le bain de fusion. ce bain est protégé de l'atmosphère externe par un cône invisible de gaz de protection (Argon, Argon + Hélium ou Argon + H₂).

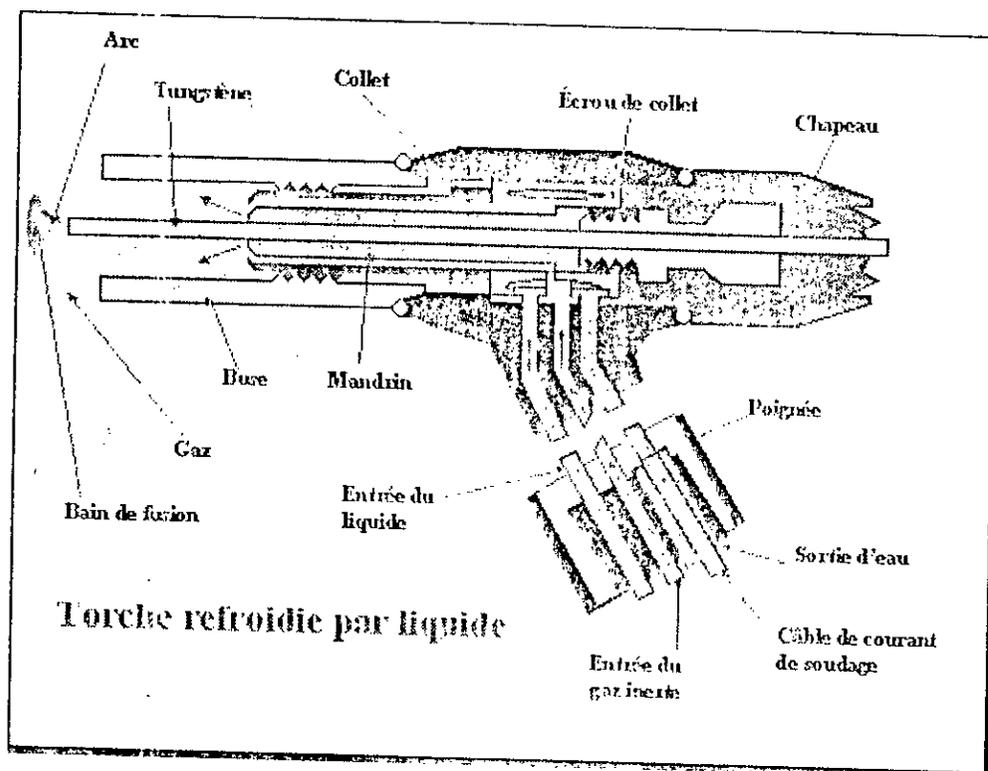


Figure N° 5 – Torche de soudage pour procédé TIG [4].

Les variables les plus importantes qu'il faut contrôler pour obtenir une bonne qualité de soudure sont les suivantes :

- Les produits consommables.
- La préparation des joints.
- La position de soudage.
- Réglage du courant, de la tension et de la polarité.
- L'énergie de soudage.
- La nature du gaz de protection.
- La température entre les passes.

Les avantages que présente le procédé de soudage TIG :

- Simplicité d'utilisation.
- Précision et finesse du travail.
- Un large éventail d'épaisseurs.
- Très bonnes qualités des joints soudés.
- Très bonnes caractéristiques mécaniques des zones de liaison.
- Soudage possible dans toutes les positions.
- Aspect très correct du cordon de soudures.
- Possibilité d'automatiser le procédé.

Quelques préparations des joints à souder avec le procédé TIG :

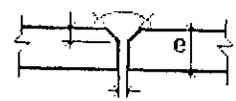
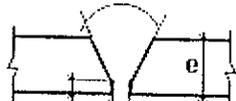
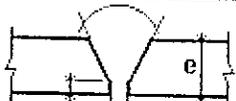
Epaisseur en mm	Fourchette d'intensité	Ø métal d'apport	Préparation
De 2,5 à 4,0 mm	45 à 80 ampères	Ø 2,0 mm	
De 4,0 à 6,0 mm	60 à 100 ampères	Ø 2,0 mm	
De 8,0 à 12 mm	90 à 180 ampères	Ø 2,0 à 3,0 mm	
De 8,0 à 12 mm	90 à 180 ampères	Ø 2,0 à 3,0 mm	

Tableau N° 9 – Quelques préparations de joints pour le soudage TIG [4].

5.2. Métallurgie du soudage des aciers inoxydables duplex

5.2.1. Structure et taux de ferrite

Pendant la solidification de l'acier duplex notamment du métal fondu des soudures, il se forme une structure presque entièrement ferritique ; en poursuivant le refroidissement au dessus de 900°C la phase austénitique est amorcée aux joints de grains ferritiques.

La proportion des deux phases ne varie plus après 900°C, toutefois l'apparition éventuelle de précipités est notée dans un intervalle décroissant de température compris entre 900 et 450°C.

Tout l'art du soudage de ce type de matériaux réside dans l'obtention d'un état biphasique proportionné à 50 % pour chacune des phases sans précipités aux joints de grains. Plus long est le temps de refroidissement du cordon de soudure (donc une forte énergie de soudage) plus important est le pourcentage de la phase γ (austénite) et des précipités.

Il reste très important de contrôler les proportions de ces phases pendant le soudage ; il est ainsi possible de vérifier sur chantier ou en atelier (par un essai non destructif) le taux de ferrite d'une soudure ou des zone thermiquement affectées par le contrôle de l'aimantation à l'aide d'un ferritoscope étalonné (avec un étalon correspondant au pourcentage de ferrite recherché). Toutefois, une meilleure précision est obtenue par le comptage de la répartition de la ferrite sur une coupe micrographique (essai destructif cette fois). On peut également prévoir l'évolution du taux de ferrite d'un cordon de soudure pour des aciers inoxydable duplex en utilisant le diagramme d'ESPY (figure) ou le diagramme de constitution du WRC1992 (*Welding Research Council* aux Etats-Unis) [13].

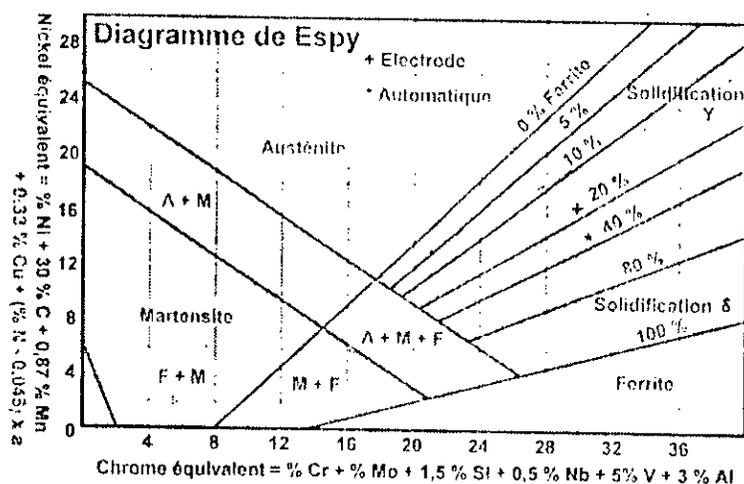


Figure N° 6 - Diagramme d'ESPY pour la prédiction du taux de ferrite [4].

On peut également avoir recours à l'indice de ferrite (F/N) qui lui est déterminé selon la norme AWS A4.2-91, pour avoir une valeur représentative de la teneur en ferrite.

5.2.2. Tenue à la corrosion

La principale raison de l'utilisation des aciers inoxydables est la très bonne tenue et résistance à la corrosion dans des milieux agressifs, de ce fait un contrôle de cette dernière s'impose sur les soudures de ces matériaux, notamment la corrosion par piqûres par la réalisation d'un test de corrosion (essai destructif) normalisé (selon ASTM G 48A) qui consiste à déterminer la perte en poids d'un échantillon et de la piqûration de ce dernier dans une solution agressive de chlorure de fer.

PROCEDURE EXPERIMENTALE

1. CARACTERISATION STRUCTURALE

1.1. Identification du métal de base

1.1.1. Choix du métal de base

Le métal de base est un acier inoxydable duplex, ce choix est dicté par rapport à sa bonne soudabilité, sa basse dilatation thermique ainsi que ses excellentes propriétés mécaniques et de résistance à la corrosion.

1.1.2. Caractérisation du métal de base

Le produit de base est un tube sans soudure d'une épaisseur de 7mm, on a découpé des échantillons de cet acier inoxydable pour déterminer sa composition chimique en fractions massiques des différents éléments qui constituent l'alliage.

Des analyses chimiques de notre acier duplex ont été effectuées au laboratoire de Métallurgie de la BCL (Base Centrale Logistique) de Blida par la méthode de spectrométrie de fluorescence des rayons X . D'autres analyses faites sur des échantillons du même métal au laboratoire de la SNVI de Rouiba ont complété ces résultats, la méthode utilisée cette fois-ci est le dosage par voie humide.

1.2. Soudage des tubes

Les tubes utilisés ont les dimensions suivantes :

- Un diamètre de 170 mm.
- Une épaisseur de 7 mm.
- Une longueur de 240 mm.

Après l'usinage d'un chanfrein sur un tour parallèle sur chaque bord du tube (le chanfrein choisi est en forme de V avec une ouverture d'angle de 65°). Un nettoyage mécanique (par un brossage) ou chimique (à l'aide d'un solvant) s'impose avant l'exécution de la soudure afin d'éviter la contamination du bain fondu par les poussières ou les grains présents sur les tubes (et plus précisément sur les bords à souder).

1.2.1. Choix du procédé de soudage

Le raccordement par soudage des tubes en acier en général se fait par des procédés utilisant la chaleur comme source de fusion (ou à énergie électrothermique), soudage à l'arc avec électrodes enrobées, TIG, MIG...

On a utilisé dans notre cas le soudage TIG manuel pour la première passe, ce choix est justifié par la bonne qualité des cordons qui sont exempts de défauts en surface, de même que d'excellentes propriétés mécaniques des joints soudés.

Le soudage a été complété par deux autres passes, cette fois par un procédé à l'arc électrique avec des électrodes enrobées sous forme de baguettes.

1.2.2. Choix du métal d'apport

Le métal d'apport doit avoir une composition chimique aussi proche que possible de celle du métal de base afin d'obtenir une homogénéité au niveau des joints soudés.

Pour le soudage TIG des aciers inoxydables duplex à 22% de chrome, le métal d'apport le mieux adapté est le DP 8T sous forme de baguette ou de tige de diamètres variables selon l'épaisseur des tubes.

Le fournisseur du métal de base est la firme japonaise SUMITOMO WELDING MATERIALS & EQUIPMENTS et la composition chimique du DP 8T proposé par le fabricant est la suivante :

Eléments chimiques	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N
Pourcentage	0.009	0.390	1.570	0.008	0.001	8.550	22.250	3.290	0.10	0.10

Tableau N°10 - Composition chimique du métal d'apport selon le fabricant [14].

1.2.3. Fiche technique du soudage

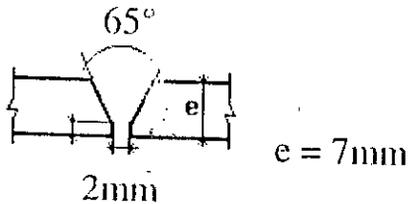
Cette fiche nous renseigne sur les paramètres utilisés lors de l'exécution de la soudure de nos tubes ainsi que les conditions avec lesquelles c'est déroulée l'opération, les spécifications concernant la position et la forme du joint.

FICHE TECHNIQUE DE SOUDAGE DES TUBES

PROCEDE DE SOUDAGE : T.I.G.

ATELIER DE SOUDAGE :

POSTE DE SOUDAGE : SAF

<p>METAL DE BASE : Acier inoxydable duplex Nuance : 2205 Fournisseur : Unité de déshydratation de Ain Salah SONATRACH</p>	<p>METAL D'APPORT : Acier inoxydable Nuance : 2209 Baguette de 2.0 mm</p>
<p>JOINT :</p> 	<p>POSITION : Tube fixe avec axe horizontal . Soudage en position verticale montante.</p>

Chanfrein : 65° en forme de V

Dimensions des tubes à assembler : Les deux tubes sont de mêmes dimensions, 220 mm de longueur, 170 mm de diamètre et 7mm d'épaisseur.

TRAITEMENTS AVANT SOUDAGE

Préchauffage du métal de base : sans

PARAMETRES DU SOUDAGE

Procédé	Passé	Intensité de courant (A)	Tension (V)	Temps de soudage (mm)	Protection
T.I.G.	N° 1	136	11	21 mm 08 s	Protection Argon À la torche 12 l/mm À la pièce 25 l/mm
	N° 2	32	11	18 mm 00s	
Arc électrique avec électrodes enrobées	N° 3	15	11	16 mm 00 s	

1.3. Traitements thermiques

Les tubes soudés ont été découpés par une scie mécanique en trois parties formant ainsi des tôles avec le cordon de soudure qui traverse ces dernières horizontalement.

Les trois tôles ont subi des traitements thermiques à trois températures différentes : 950°C, 1000°C et 1050°C, le temps de maintien dans le four est 1 heure à partir du moment où la température voulue est atteinte. Le refroidissement a été effectué par une trempe à l'eau.

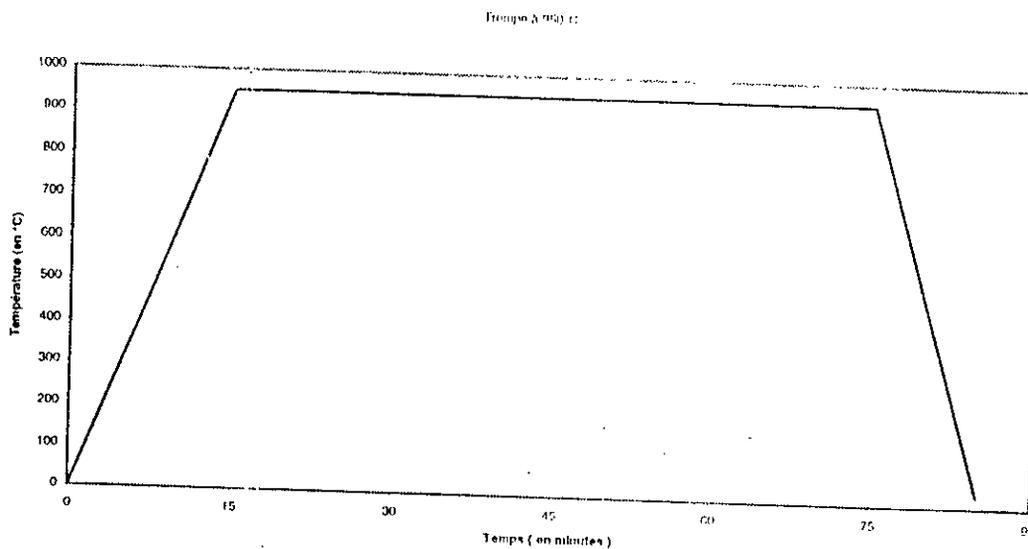


Figure N°7 – Courbe de traitement thermique (chauffage, maintien puis trempe à partir de 950°C).

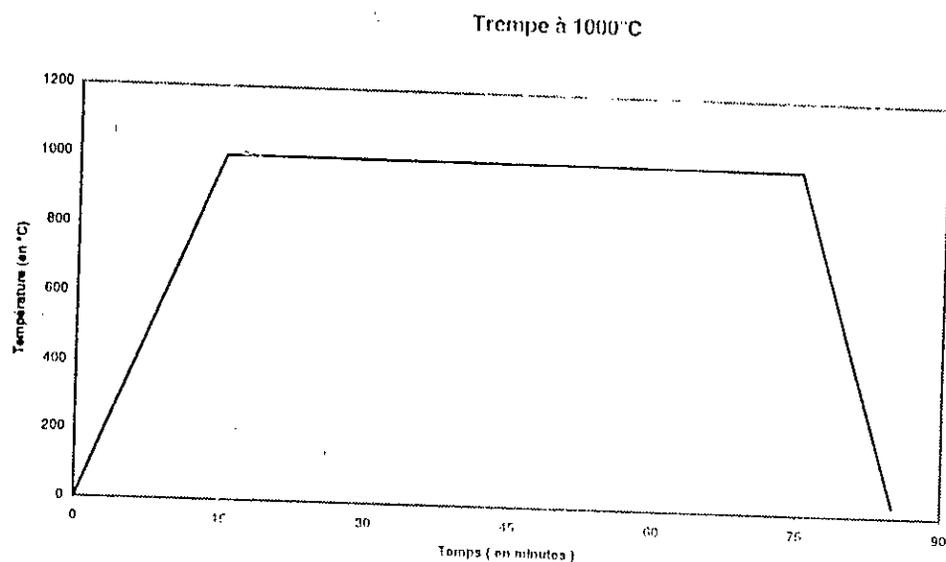


Figure N°8 – Courbe de traitement thermique (chauffage, maintien puis trempe à partir de 1000°C).

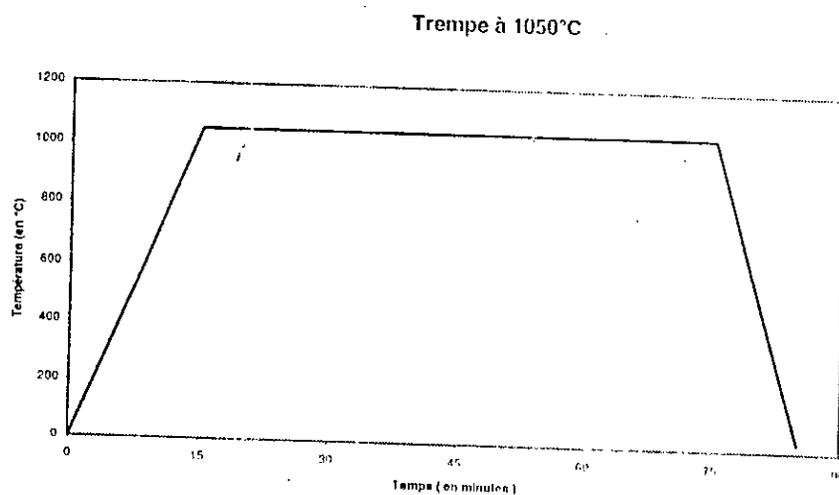


Figure N°9 – Courbe de traitement thermique (chauffage, maintien puis trempe à partir de 1050°C).

1.4. Prélèvement des échantillons pour les essais

Les tôles traitées à 950°C, 1000°C et 1050°C puis trempées ont été découpées longitudinalement chacune en 5 tiges avec le cordon de soudure toujours au milieu, puis usinées selon les normes respectives aux essais à effectuer, les 5 éléments sont :

- (2 éprouvettes×3 températures) pour l'essai de résilience (ou flexion par choc) dont une pour un choc dans la zone fondue et une autre pour un choc dans la ZAT.
- (1×3) pour un essai de traction.
- (1×3) pour l'étude métallographique.
- (1×3) pour l'essai de dureté et la diffraction des Rayons X (après un autre polissage).

1.5. Essai de micro dureté

L'essai consiste à appliquer sur une éprouvette à mesurer un pénétrateur sous une charge d'appui donnée. La dureté est mesurée par rapport aux dimensions des empreintes laissées par le pénétrateur (selon la méthode et donc de la forme du pénétrateur) sur la surface du matériau contrôlé. Ces empreintes sont d'autant plus importantes que le métal est qualifié de mou ;en d'autres termes, la dureté peut être définie comme la résistance à la pénétration.

1.5.1. Essai de micro dureté Vickers (HV) sur les assemblages soudés

Dans le cas de la dureté Vickers le pénétrateur a la forme d'une pyramide droite à base carrée et d'angle de 136° au sommet. La charge de l'essai est généralement de 49.2 N soit 5 Kgf (HV5) ou 98.07 N ou 10 Kgf (HV10 utilisée dans notre étude). Cette charge est appliquée d'une manière progressive et constante jusqu'à ce que la charge choisie soit atteinte, elle est ainsi maintenue pour une période de temps variant entre 10 et 15 s. Enfin, l'essai de dureté se déroule à la température ambiante.

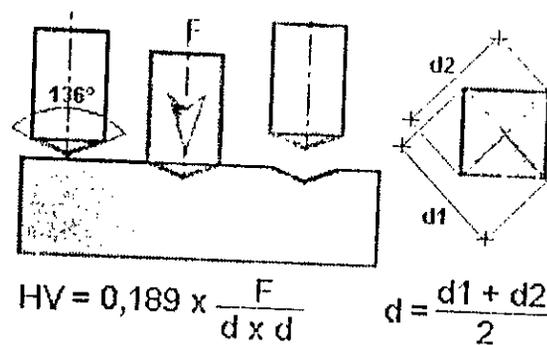


Figure N°10 - Dimensions de l'empreinte et formule de calcul de la dureté selon Vickers [4].

- d1 et d2 les diagonales de l'empreinte de forme rectangulaire.
- F la charge appliquée.
- HV la dureté Vickers.

Notre essai a été réalisé sur des échantillons prélevés de manière perpendiculaire à l'axe du cordon de soudure des tôles traitées aux trois précédentes températures, ils ont été polis à l'aide d'une polisseuse et du papier abrasif (les granulométries du papier que l'on a utilisé pour ce test de dureté sont : 80, 240 puis 400 grains / cm² successivement), l'état de surface est alors bon.

La mesure de la dureté dans notre cas a été effectuée par un balayage ce qui a pour objectif d'étudier l'évolution de la dureté dans les différentes zones d'un assemblage par soudage c'est à dire le cordon de soudure, la zone thermiquement affectée et le métal de base. A cet effet, les mesures ont été faites selon 3 profils parallèles aux bords de l'éprouvette, le premier distant de 2 mm du bas, le second de 2 mm du haut et le dernier entre les deux donc à une distance de 3.5 mm des bords (l'épaisseur des tubes est de 7 mm). Le choix de cette méthode est motivé par la soudure en 3 passes (1 TIG et 2 manuellement à l'arc électrique avec baguettes enrobées) et donc de l'étude de la variation de la dureté dans ces 3 parties de la zone fondue.

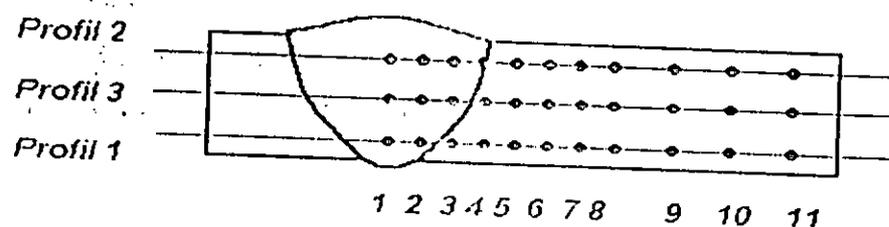


Figure N°11 - Schéma du balayage pour la mesure de la dureté sur le long d'un échantillon.

Les essais de dureté ont été faits au laboratoire de Métallurgie du CSC de Chéraga, sur une machine de dureté de marque INSTRON WOLPERT.

1.6. Examen métallographique

Cet examen a pour but la mise en évidence de la structure duplex ou biphasique de nos échantillons aussi bien dans le métal de base que dans la zone fondue, ainsi que les inclusions non métalliques qui existent au sein du matériau de même que les effets des traitements thermiques, et ce par une observation au microscope optique.

1.6.1. Préparation micrographique de l'échantillon

L'obtention de la surface d'examen nécessite une suite d'opérations allant du prélèvement effectué sur le produit à l'attaque micrographique. Afin d'arriver à un état de surface qui permette une bonne observation, nous avons suivi les consignes dictées par la norme NF A 05-150[3].

2. CARACTERISATION MECANIQUE

2.1. L'essai de résilience ou de flexion par choes

L'essai de résilience (appelé aussi essai de rupture fragile) consiste à mesurer le travail nécessaire pour rompre à l'aide d'une masse un barreau usiné selon certaines dimensions avec une encoche entaillée au centre de ce dernier reposant sur deux points d'appui. La machine grâce à laquelle cet essai a lieu est appelée le mouton pendule rotatif qui enregistre l'énergie absorbée par la rupture.

On peut à travers cet essai caractériser notre matériau du point de vue de la résistance aux choes. La norme de référence est NF EN 10045-1 Octobre 1990 et NF EN 875 Novembre 1995.

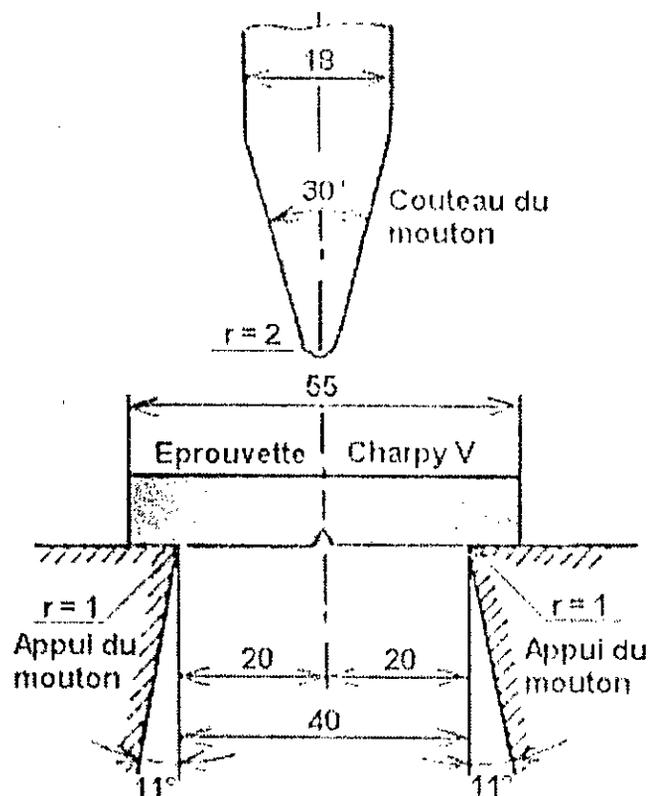
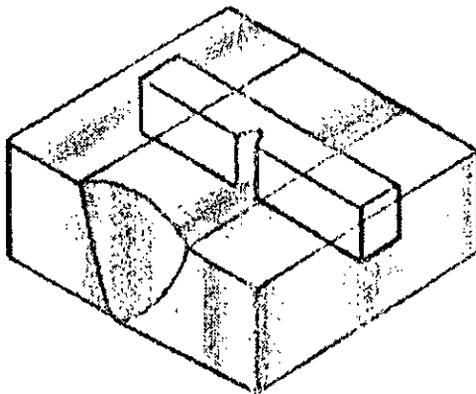


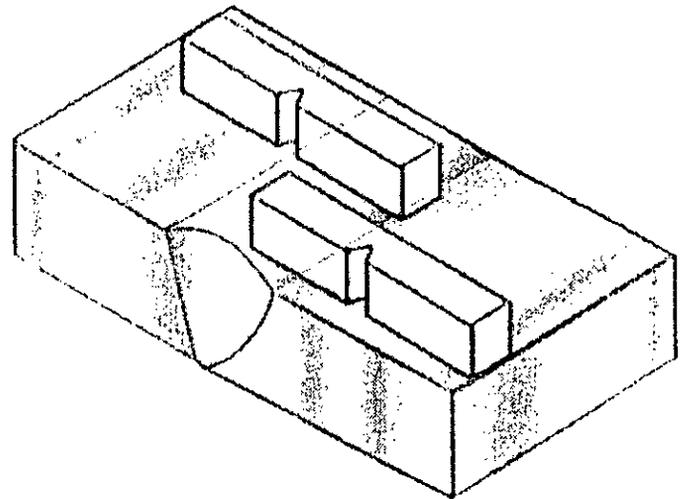
Figure N°12 - Principe de l'essai de résilience [4].

2.1.1. Localisation des éprouvettes dans un assemblage soudé

Pour chacune des trois températures on prends 2 éprouvettes ; la première avec l'entaille au centre du cordon de soudure, l'autre à 2 mm de la zone fondue c'est à dire dans la ZAT.



Entaille dans la zone fondue



Entaille dans la ZAT

Figure N°13 - Les différentes positions des éprouvettes de résilience dans un assemblage soudé [4].

2.1.2. les dimensions des éprouvettes

La norme NF A 03-161 définit les dimensions des éprouvettes de résilience et prévoit même pour les assemblages plans et tubulaires d'épaisseurs inférieures à 10 mm (sections réduites) des grandeurs normalisées.

Dans notre cas l'épaisseur des tubes est de 7 mm une diminution de cette dernière s'impose (la norme prévoit 5 mm ou 7.5 mm).

L'usinage s'est fait à l'atelier de fabrication mécanique de Anabib Petits Tubes.

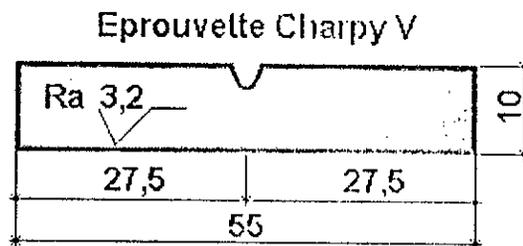


Figure N°14 - Dimensions d'une éprouvette de résilience d'entaille V [4].

2.1.3. Calcul de la résilience

Le pendule est écarté de la verticale à une hauteur correspondant à une énergie de départ

$$W_0 = P \times h_0$$

h_0 : hauteur initiale

P : poids du pendule

$W_1 = P \times h_1$ est l'énergie qui correspond à une hauteur après le choc de h_1 .

L'énergie absorbée $W = W_1 - W_0 = P \times (h_1 - h_0)$

La résilience KCV est donnée par la formule suivante :

$$\text{KCV (J/cm}^2 \text{)} = \frac{W \text{ (J)}}{S_2 \text{ (cm}^2 \text{)}}$$

W : est l'énergie absorbée (J)

S_2 : Section au droit de l'entaille (cm²)

La section réduite dans le cas d'une épaisseur de 5 mm est : $S_2 = 0.5 \times 0.8 = 0.4 \text{ cm}^2$

L'essai de résilience a été effectué au laboratoire d'essais mécaniques et d'études métallurgiques de GTP à Reghaïa sur une machine de type PW30 INSTRON.

2.2. Essai de traction

L'essai de traction consiste à soumettre une éprouvette prismatique (dans notre cas) à un effort progressif et croissant jusqu'à la rupture de la pièce d'essai. L'essai de traction permet de caractériser les propriétés mécaniques d'un matériau ductile.

La norme de référence est la NF EN 10002-1 Octobre 1990 [4].

2.2.1. Prélèvement des éprouvettes

Les éprouvettes sont prélevées transversalement au joint soudé de telle façon qu'après l'usinage l'axe de la soudure demeure à mi longueur de la partie calibrée de l'éprouvette.

2.2.2. Les dimensions et formes des éprouvettes de traction

L'obtention des dimensions des éprouvettes de traction passe par un usinage précis et qui prend compte de certaines précautions afin d'éviter un écroutissage ou alors un échauffement excessif de notre matériaux.

En suivant les recommandations de la norme qui gère les dimensions des éprouvettes de traction :

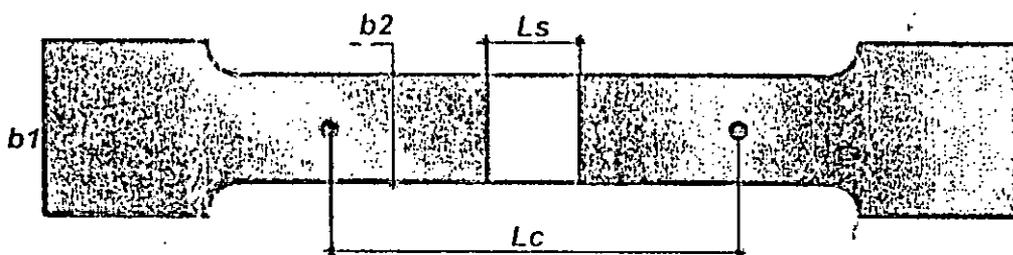


Figure N°16 - Dimensions et forme d'une éprouvette pour un essai de traction [15].

$L_t = 220$ mm : longueur totale de l'éprouvette.

$L_c = 80$ mm : longueur de la partie calibrée.

$L_s = 14$ mm : longueur du cordon de soudure.

$b_2 = 20$ mm : largeur de la partie calibrée.

$b_1 = b_2 + 12 = 32$ mm : largeur de l'éprouvette.

$R = 25$ mm : rayon de raccordement.

2.2.3. Les caractéristiques mécaniques de la traction et diagramme conventionnel de traction

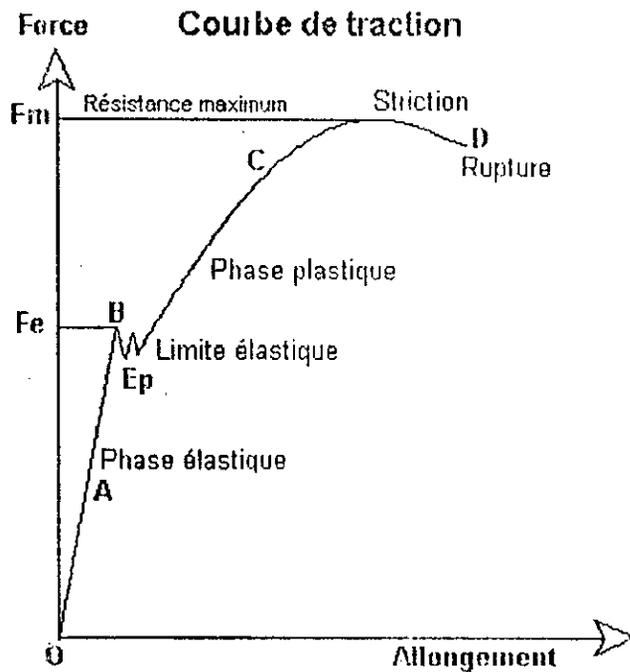


Figure N°17 - Diagramme conventionnel de traction [4].

Les valeurs caractéristiques de traction se déduisent directement à partir du diagramme de traction.

Caractéristiques de traction	Formules de calculs
Limite élastique apparente – R_e	$R_e(N/mm^2) = F_e(N) / S_0 (mm^2)$
Résistance à la rupture – R_m	$R_m(N/mm^2) = F_m (N) / S_0 (mm^2)$

Tableau N°11 - Caractéristiques en traction [4].

S_0 étant la section initiale au niveau du joint soudé.

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

1. Résultats de l'analyse chimique

L'analyse chimique des éléments d'alliage présents dans notre acier inoxydable duplex, obtenue par les deux méthodes précédemment citées sont sur le tableau N° .

Elément chimique	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	V
Pourcentage	0.033	0.38	1.57	0.018	0.015	5.37	22.00	2.28	0.20	0.10

Tableau N° 12 - Résultats de l'analyse chimique des pourcentages massiques des éléments d'alliages du métal de base.

Les résultats de l'analyse chimique des échantillons de notre matériau ont démontré à partir des pourcentages sus-cités que l'acier que nous utilisons est équivalent suivant la norme EN 10081 au X2CrNiMo22.5.2 .

2. Résultats de l'essai de micro dureté

Les résultats des mesures de micro dureté effectuées sur des échantillons traités aux trois températures 950, 1000 et 1050°C sont donnés par les tableaux 13, 14 et 15.

Positions	HV Profil 1 bas	HV Profil 2 haut	HV Profil 3 Centre
1	282	274	265
2	287	270	267
3	275	275	277
4	253	269	278
5	252	268	252
6	251	270	253
7	251	240	249
8	253	242	254
9	246	240	246
10	249	249	247
11	247	243	242
12	242	241	249
13	247	243	243
14	247	236	241

Tableau N° 13 – Micro duretés des échantillons traités à 950 °C.

Positions	HV Profil 1 Bas	HV Profil 2 Haut	HV Profil 3 Centre
1	233	232	225
2	245	225	223
3	238	161	219
4	241	159	220
5	180	181	162
6	185	173	173
7	182	173	174
8	180	172	178
9	177	166	177
10	172	167	169
11	174	168	171
12	164	169	171
13	172	168	170
14	167	163	165

Tableau N° 14 - Micro duretés des échantillons traités à 1000 °C.

Positions	HV Profil 1 Bas	HV Profil 2 Haut	HV Profil 3 Centre
1	229	224	226
2	228	222	229
3	228	215	228
4	230	222	223
5	160	219	231
6	155	222	149
7	150	164	151
8	153	148	145
9	163	161	169
10	173	165	164
11	171	162	163
12	165	167	160
13	168	177	161
14	171	159	156

Tableau N° 15 - Micro duretés des échantillons traités à 1050 °C.

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Les figures suivantes illustrent les courbes de variations de la micro dureté en fonction de la position, elles permettent d'observer l'évolution de cette variable tout au long des échantillons et en fonction des profils représentatifs des passes de soudage.

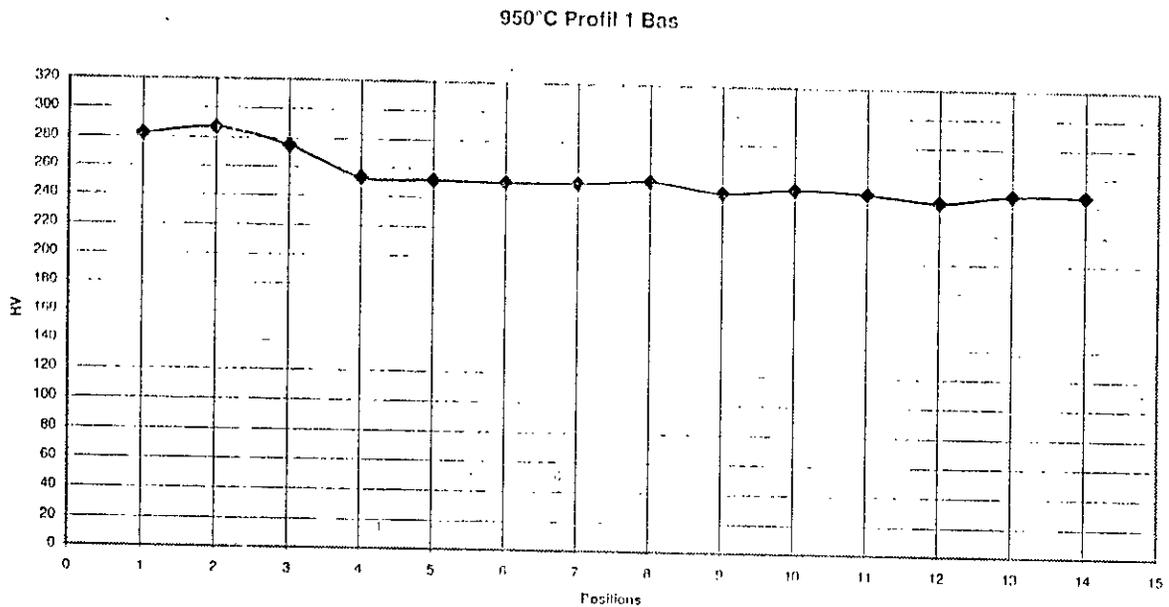


Figure N° 18 – Profil 1 de micro dureté de l'échantillon traité à 950°C.

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

1000°C Profil 1 Bas

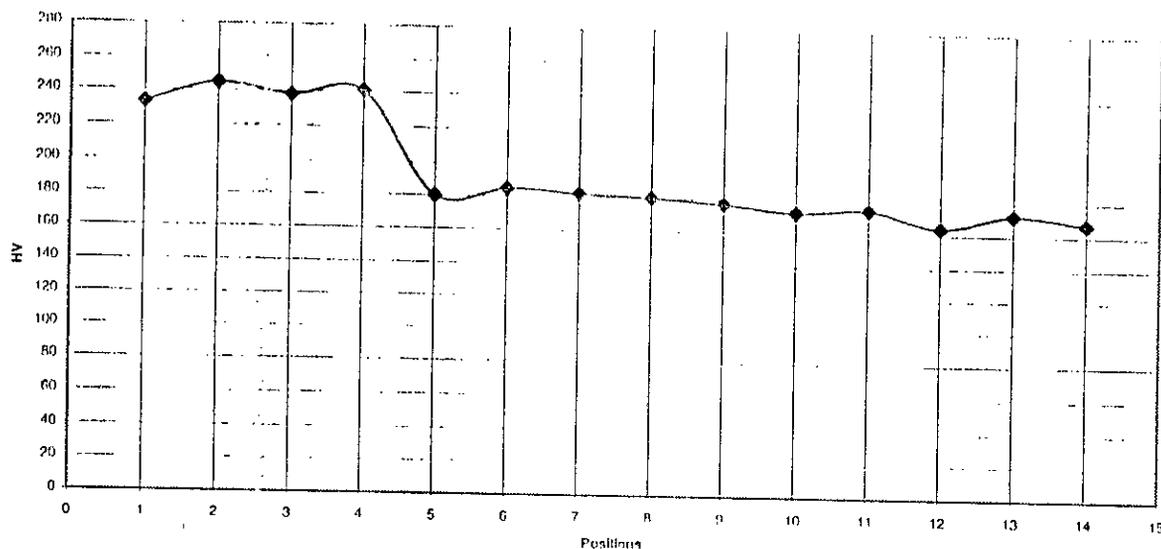


Figure N°19 – Profil 1 de micro dureté de l'échantillon traité à 1000°C.

1050°C Profil 1 Bas

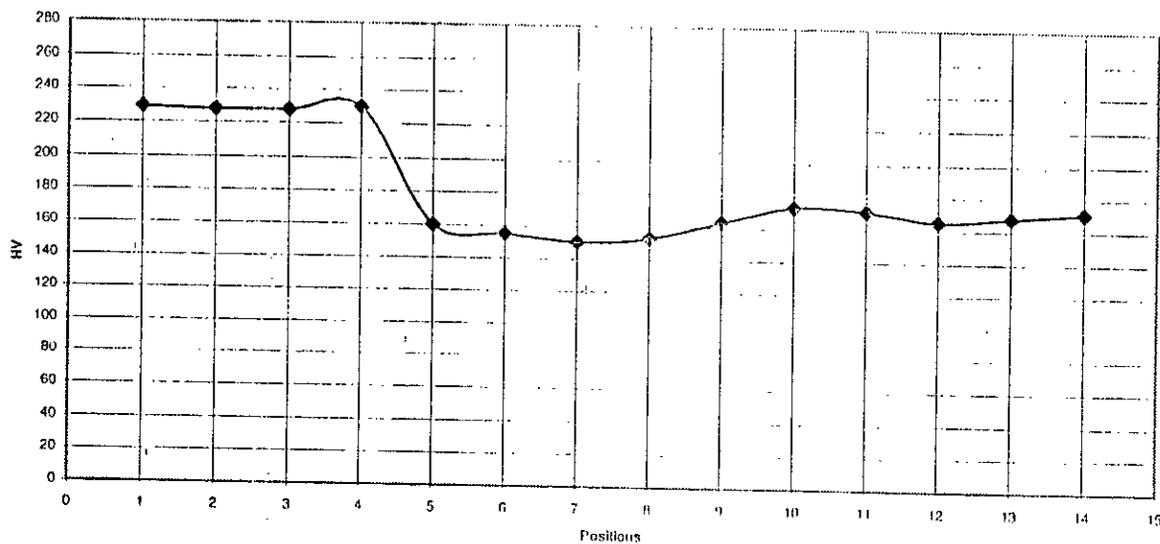


Figure N°20 – Profil 1 de micro dureté de l'échantillon traité à 1050°C.

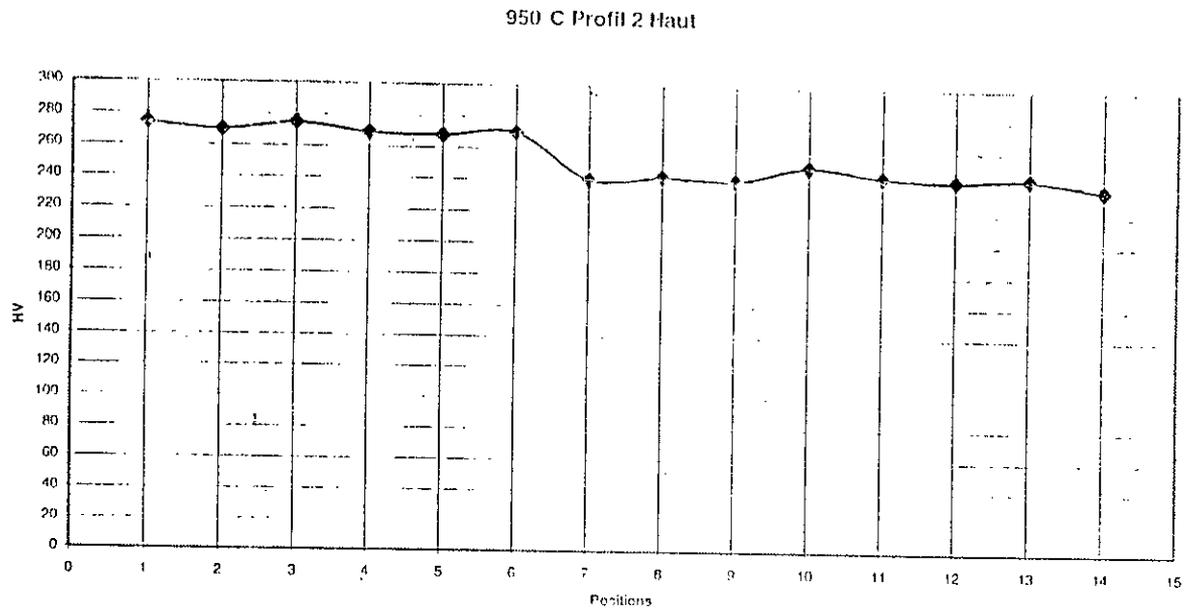


Figure N°21 – Profil 2 de micro dureté de l'échantillon traité à 950°C.

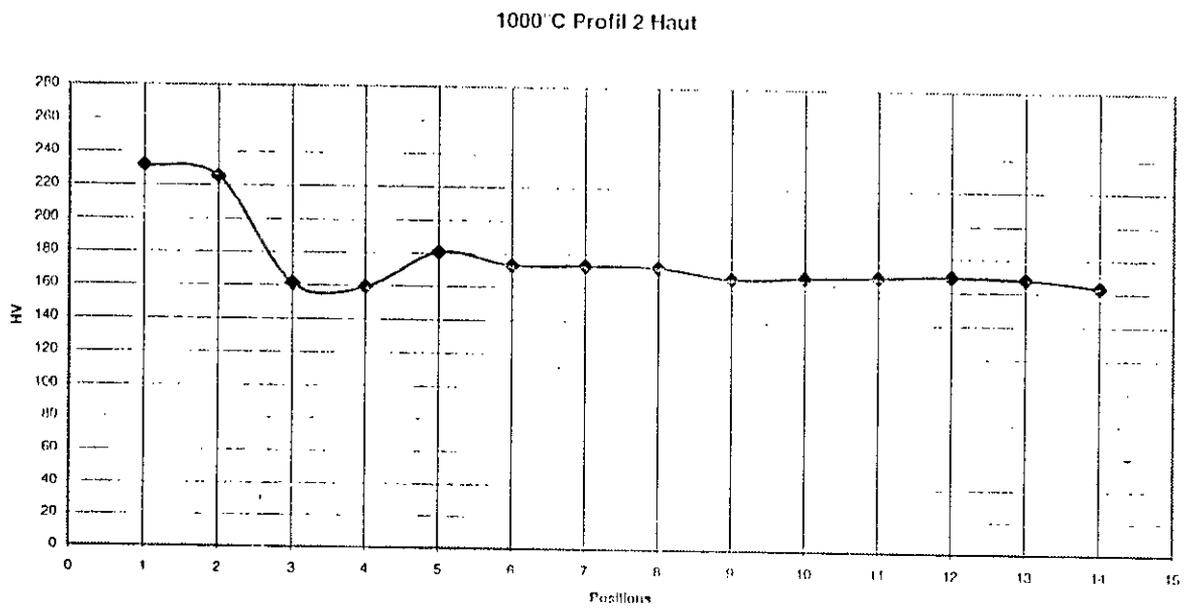


Figure N°22 – Profil 2 de micro dureté de l'échantillon traité à 1000°C.

1050°C Profil 2 Haut

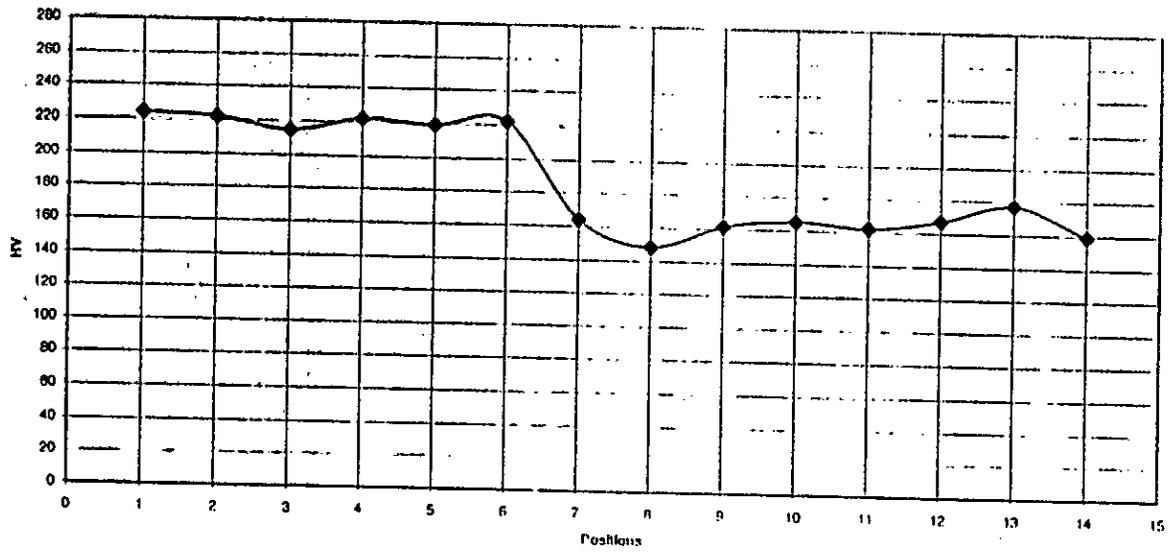


Figure N°23 - Profil 2 de micro dureté de l'échantillon traité à 1050°C.

950 C Profil 3 Centre

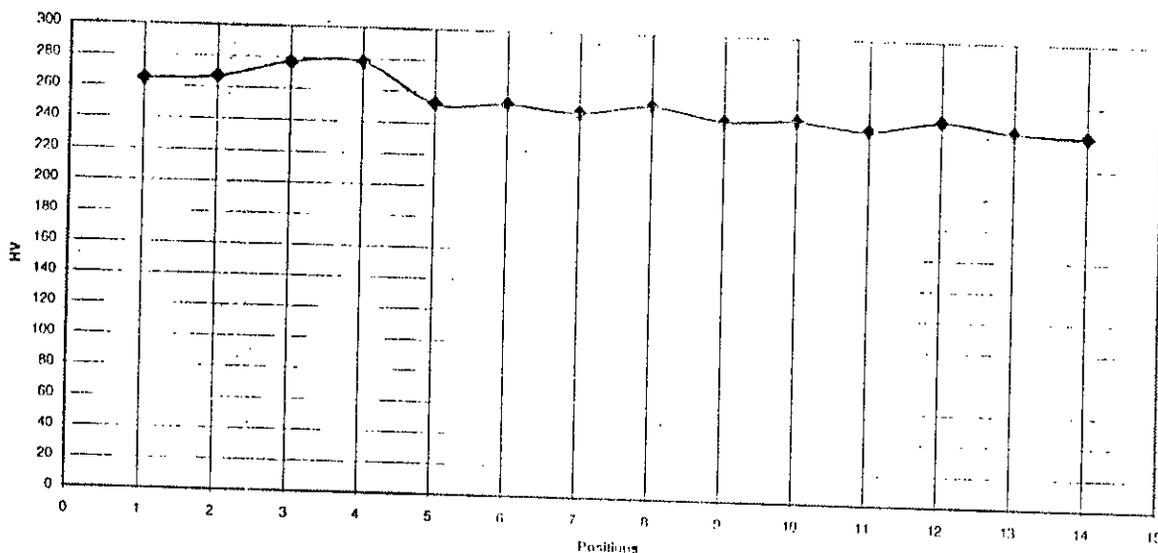


Figure N°24 – Profil 3 de micro dureté de l'échantillon traité à 950°C.

1000°C Profil 3 Centre

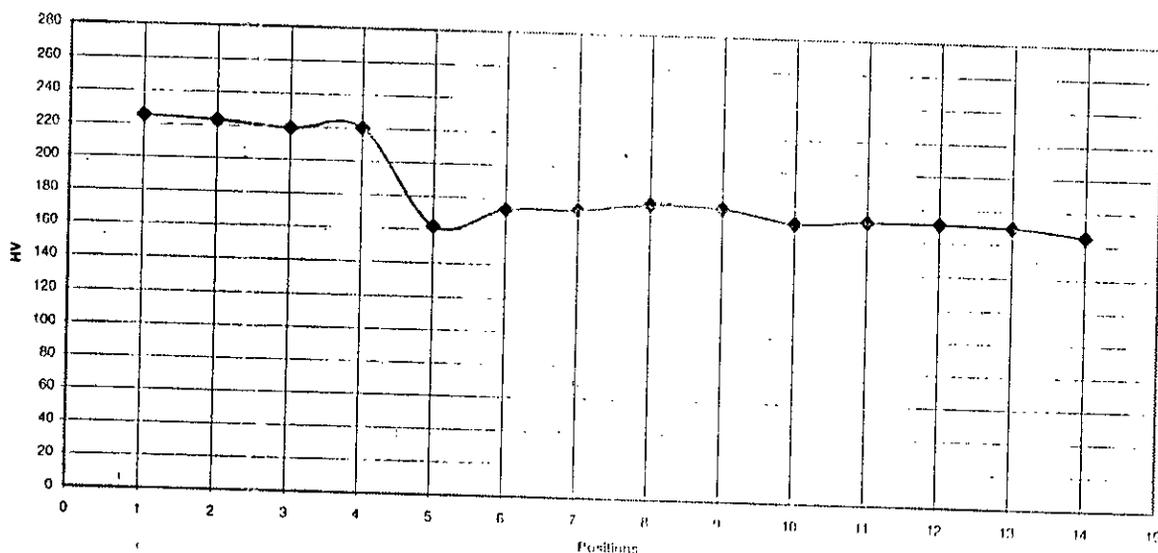


Figure N°25 – Profil 3 de micro dureté de l'échantillon traité à 1000°C.

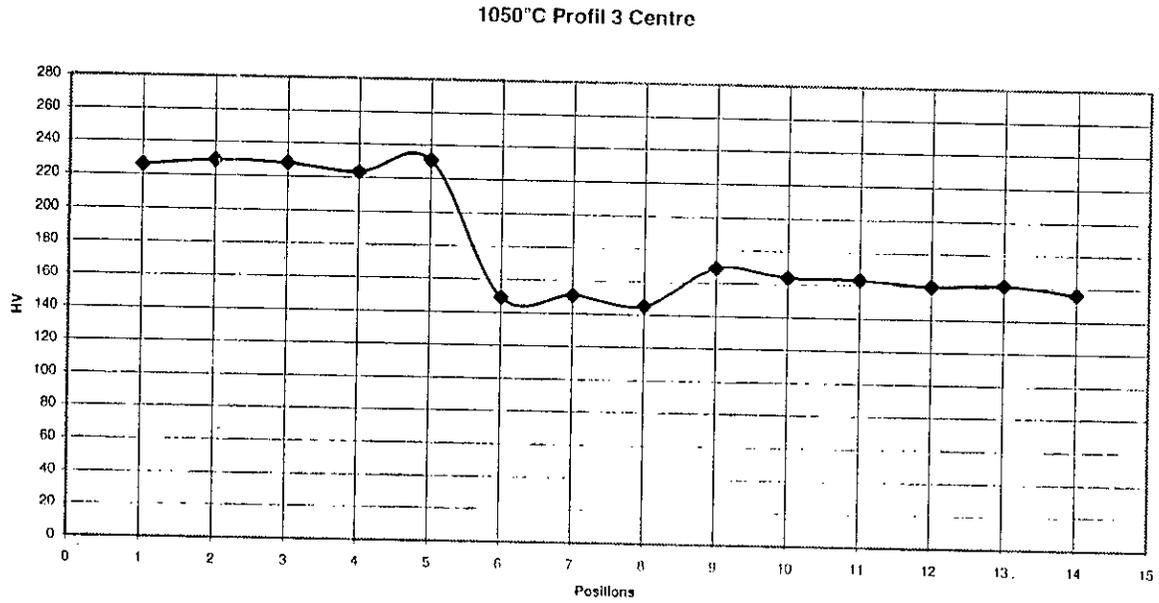


Figure N°26 – Profil 3 de micro dureté de l'échantillon traité à 1050°C.

3. Résultats de l'essai de résilience

950°C

Eprouvette	Section (mm ²)	Energie (J)	Résilience KCV (J/mm ²)
ZF	40	27	0.675
ZAT	40	34	0.850

1000°C

Eprouvette	Section (mm ²)	Energie (J)	Résilience KCV (J/mm ²)
ZF	40	70	1.75
ZAT	40	72	1.80

1050°C

Eprouvette	Section (mm ²)	Energie (J)	Résilience KCV (J/mm ²)
ZF	40	65	1.625
ZAT	40	110	2.750

ZF et ZAT désignent respectivement l'éprouvette qui contient l'entaille dans la zone fondue et dans la zone thermiquement affectée.

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

4. Micrographie

Les figures suivantes représentent des micrographies d'échantillons traités aux températures 950, 1000 et 1050°C ainsi que les différentes zones d'un assemblage soudé.

4.1. Micrographies d'échantillons traités à 950°C

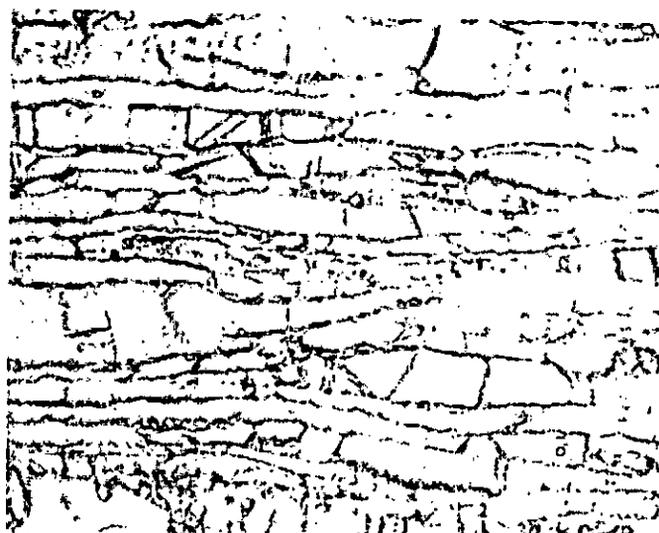


Figure N°27 - G x 500 - Métal de base à 950°C.

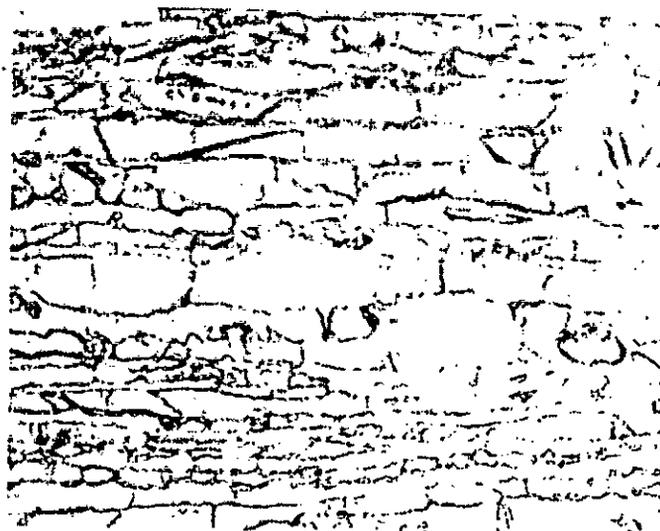


Figure N°28 - G x 500 - ZAT à 950°C.

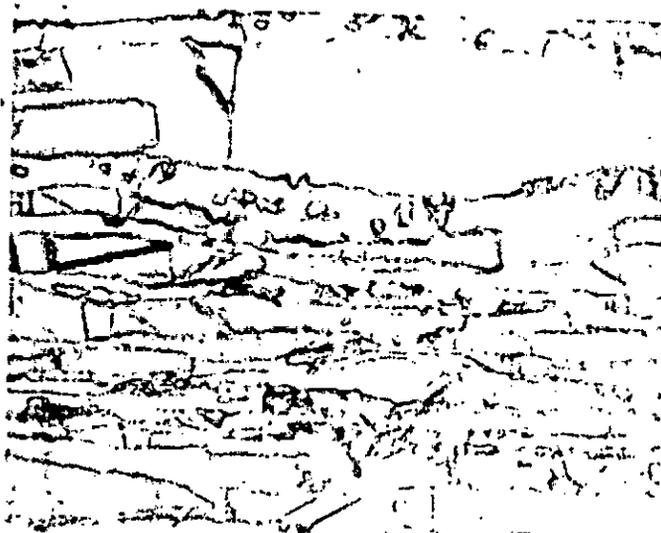


Figure N°29 - G x 500 - ZAT à 950°C.



Figure N°30 - G x 500 - Zone de liaison à 950°C.



Figure N°31 - G x 500 - Zone fondue passe 1 à 950°C.



Figure N°32 - G x 500 - Zone de liaison passe 1- passe2 à 950°C.

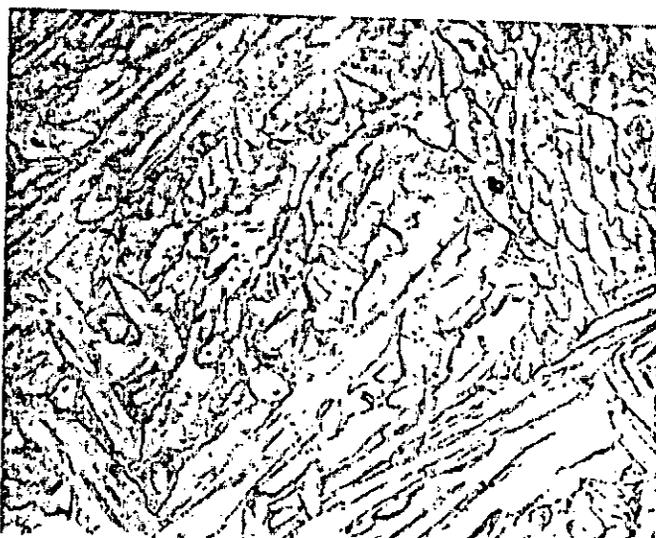


Figure N°33 - G x 500 - Zone fondue passe 2 à 950°C.

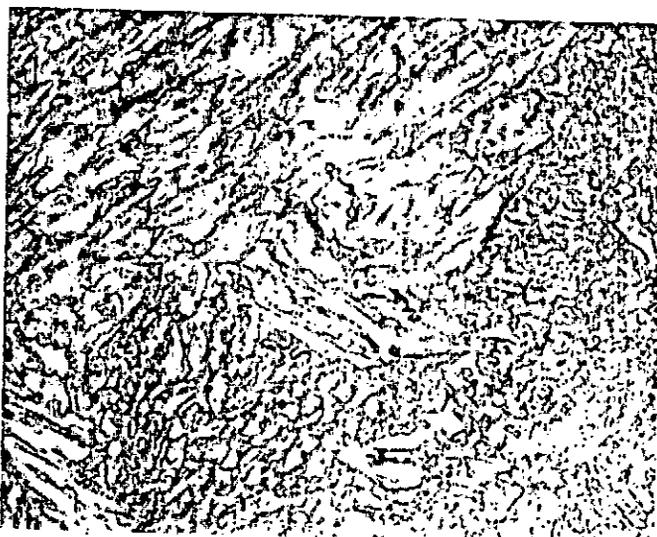


Figure N°34 - G x 500 - Zone fondue passe 3 à 950°C.

2.2. Micrographies d'échantillons traités à 1000°C



Figure N°35 - G x 500 - Métal de base à 1000°C.

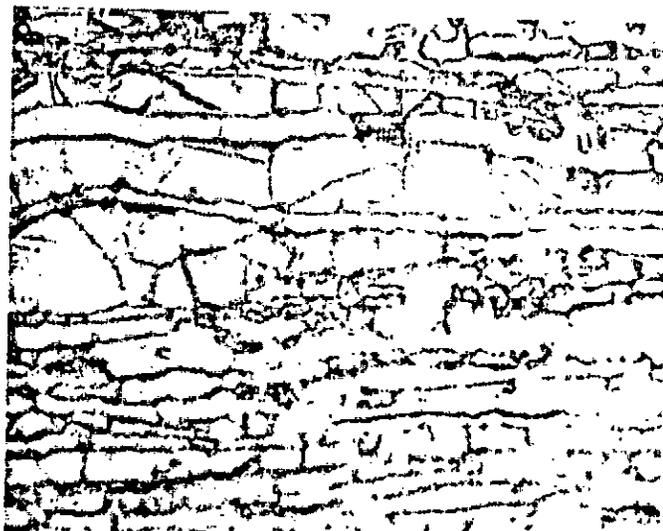


Figure N°36 - G x 500 - ZAT à 1000°C.



Figure N°37 - G x 500 - Zone de liaison passe 2 - passe 3 à 1000°C.



Figure N°38 - G x 500 - Zone de liaison à 1000°C.

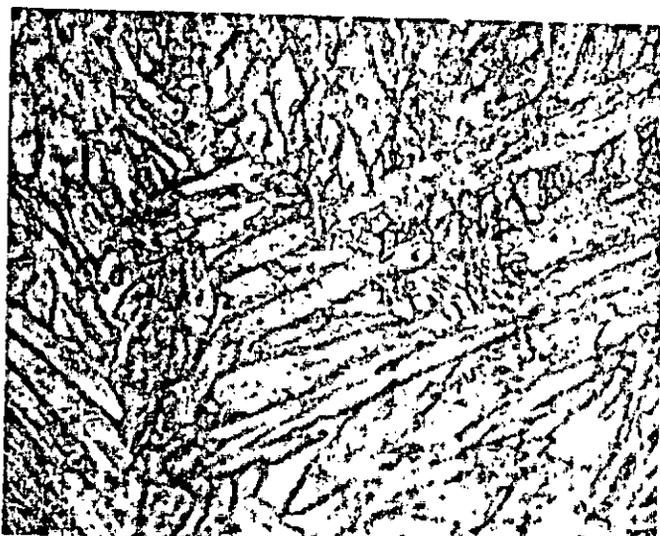


Figure N°39 - G x 500 - Zone fondue passe 1 à 1000°C.



Figure N°40 - G x 500 - Zone fondue passe2 à 1000°C.



Figure N°41 - G x 500 - Zone fondue passe 3 à 1000°C.

2.3. Micrographies d'échantillons traités à 1050°C



Figure N°42 - G x 500 - Métal de base à 1050°C.

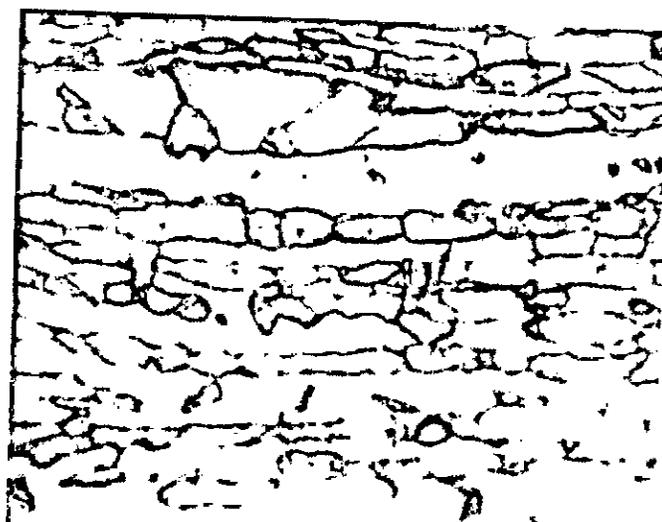


Figure N°43 - G x 500 - ZAT à 1050°C.



Figure N°44 – G x 500 – Zone de liaison à 1050°C.



Figure N°45 – G x 500 – Zone fondue passe 1 à 1050°C.



Figure N°46 – G x 500 – Zone fondue passe 2 à 1050°C.



Figure N°47 - G x 500 - Zone fondue passe 3 à 1050°C.



Figure N°48 - G x 500 - Zone de liaison passe 1 - passe 2 à 1050°C.

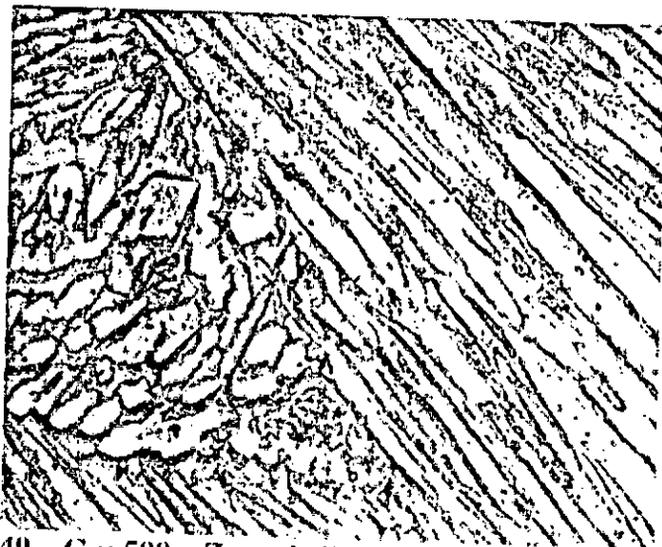


Figure N°49 - G x 500 - Zone de liaison passe 2 - passe 3 à 1050°C.

5. Interprétation des duretés

Lors de la mesure de la micro dureté on a noté pour tous les profils et toutes les températures une stabilité palliative des valeurs au sein du cordon de soudure, puis intervient une chute brusque de la dureté suivie d'un maintien sur un seuil de valeurs relativement voisines, ce qui correspond au passage au métal de base à partir de la zone fondue ; la chute de la dureté a lieu pour des positions croissantes allant du profil 1 (bas) puis 3 (centre) puis 2 (haut) .Ce qui peut s'expliquer par la forme trapézoïdale du joint de soudure.

Cependant, les grandeurs diffèrent en fonction de la température des traitements thermiques, on note qu'en moyenne la dureté de l'échantillon traité à 950°C est supérieure à celle de 1000°C qui est à son tour plus élevée que pour l'échantillon traité à 1050°C.

En faisant une comparaison des valeurs dans le cordon de soudure on peut remarquer que la moyenne de dureté du profil 1 est à chaque fois plus élevée que celle du 2 et du 3 respectivement.

On peut en déduire que la première passe de soudage (TIG) est plus dure que les deux autres soudées manuellement à l'arc électrique avec électrodes enrobées, car elle a eu un refroidissement lent par rapport aux deux suivantes passes.

On peut également dire qu'on ne peut pas déterminer la largeur de la zone thermiquement affectée par cette mesure de dureté car l'épaisseur du tube (7 mm) est relativement importante ce qui a pour effet de réduire de manière considérable l'étendue de cette zone.

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

6. Interprétations des micrographies

Le métal de base

Pour les trois températures on a une structure en bandes, avec des grains allongés dans le sens du laminage (au départ on avait des tubes sans soudures). Le métal de base est un acier inoxydable duplex, il contient donc de la ferrite et de l'austénite, le microscope optique ne permet pas de distinguer les deux phases. On remarque toutefois la légère présence de carbures qui ont précipité aux joints de grains.

La différence entre les micrographies des trois températures réside dans la taille variable des grains, qui croît en fonction de la température d'hyper trempe.

La ZAT.

Dans cette zone on observe le même type de structure, avec seulement plus de carbure, avec des tailles de grains supérieures pour l'hyper trempe à 1050°C par rapport à celle de 1000°C et 950°C.

La zone fondue

Dans les trois cas la structure de la passe 1 est aléatoire c'est à dire avec des grains différemment orientés.

Le taux le plus important de précipités est enregistré dans cette zone.

Dans les passes 2 et 3 une teneur en carbures presque similaire que celle de la première est notée avec comme différence la forme, la taille et l'orientation (toujours aléatoires) des grains.

7. Interprétations des résilience

On note que les résilience sont croissantes en passant de 950 à 1000 puis 1050°C. Et que à chaque fois l'éprouvette qui présente l'entaille dans la zone fondue emmagasine moins d'énergie que celle dans la zone thermiquement affectée donc a un KCV plus faible.

Ce qui peut être expliquer en détaillant les différentes zones d'un assemblage soudé :

1. Le métal de base

Le métal de base a une structure d'hyper trempe qui est dans le cas des aciers inoxydables duplex ($\alpha + \gamma$) avec un faible taux de carbures ($Cr_{23}C_6$) ce qui lui confère une faible dureté et donc une résilience importante.

2. La ZAT

Le taux de précipités est plus important que dans le métal de base, car cette zone n'a pas refroidi avec la même vitesse que la précédente. La dureté est moyenne et la résilience est dans ce cas plus grande.

3. La zone fondue

On note que la dureté de cette zone est plus élevée que celles des 2 autres, ce qui s'explique par le refroidissement qui s'est fait en fonction des différents cycles de soudage (03), c'est à dire que chaque passe de soudage affecte la précédente qui refroidi donc moins vite, on peut donc qualifier la cinétique de relativement lente, ce qui laisse le temps aux carbures de précipiter en plus grandes proportions (voir les micrographies), donc la dureté est plus importante et la résilience plus faible dans cette zone.

Conclusion

- Les traitements thermiques d'hyper trempe que nous avons fait subir à nos soudures ont eu l'effet de réduire la dureté des joints soudés des aciers inoxydables duplex 2205 et par la même d'augmenter la résistance aux chocs.
- D'un point de vue structural, l'élévation de la température d'hyper trempe accroît la taille des grains.
- Le traitement d'hyper trempe a dans notre cas l'objectif d'obtenir la structure duplex c'est à dire des proportions de 50% de ferrite et 50% d'austénite.
- Le soudage en trois passes affecte de manière considérable le refroidissement de la zone soudée, il devient plus lent ce qui laisse suffisamment de temps aux différents précipités de se former, d'où un impact direct sur les propriétés mécaniques des tubes soudés.

Pour conforter les résultats de nos conclusions, les tests de diffractions des RX, la microscopie électronique à balayage de même que l'essai de traction auraient été souhaités, cependant ces derniers n'ont pu être effectués pour des raisons d'indisponibilité des équipements adéquats pour ces types d'essais, de même que la conjoncture actuelle liée à ce qui s'est passé dans notre pays le 21 mai a engendré de sérieuses difficultés pour un travail complet.

BIBLIOGRAPHIE

- [1]. Institut Castolin "Les propriétés et les caractéristiques de soudage des aciers inoxydables". 1984.
- [2]. Techniques de l'Ingénieur M4540.
- [3]. J. Barralis ; "Précis de Métallurgie", 5^{ème} édition, Nathan, 1990.
- [4]. www.chez.com/sodage2000
- [5]. www.oceanint.com
- [6]. www.avestapolarit.com
- [7]. Technique de l'Ingénieur M4541
- [8]. L. DUCROS. "Le soudage manuel à l'arc électrique", BIBLIOTHEQUE PROFESSIONNELLE, 1971
- [9]. Centre interentreprises. "Cours de soudage"
- [10]. E. SALHI. Technologie des métaux Cours de 3^{ème} année ENP.
- [11]. Techniques de l'Ingénieur B7730
- [12]. L. NASSAU, H. MEEKELER, J. HIKLES "Le soudage des aciers inoxydables duplex et super duplex". Souder Juillet 1994.
- [13]. "Bases métallurgiques du soudage". Eyrolles. 1987
- [14]. Sumitomo welding materials and equipments.
- [15]. Recueil des normes françaises. "Soudage et techniques connexes". Tome 3 Contrôles et essais. 1994