

REPUBLIQUE ALGERIENNE DMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique

Université M'Hamed Bougara – Boumerdes –

Faculté des Hydrocarbures de la chimie



Département Transport et Equipements des Hydrocarbures

Mémoire de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de
MASTER

Domaine : Sciences et Technologies

Filière: Hydrocarbures

Spécialité : Génie Mécanique : **Mécaniques des Chantiers Pétroliers.**

THEME

**Caractérisation d'une soudure hétérogène sur tubes en aciers
inoxydables, par méthodes destructives et non-destructive.**

Réalisé par : **BENKHERROUR. ADIL**

Soutenu publiquement le : **23 / 06 / 2015**

Devant le jury

Président de jury	S. AISSANI	Professeur	(UMBB)
Encadreur	M.GACEB	Professeur	(UMBB)
Co-encadreur	K. BETTAHAR	Attaché de Recherche	(CSC)
Examineur	A.GUEBLI	M C.B	(UMBB)
Examineur	R.HARHOUT	Charge de Recherche	(UMBB)

Année Universitaire : **2014 – 2015**

ملخص

ان الحام خلأئط المعدن الغير مؤكسد له دور فعال في شتى المجالات الصناعية :كصناعة الطائرات والإنتاج البترولي. تهدف هذه الدراسة في ميدان اللحام التطبيقي بين (المعادن الغيرمؤكسدة مارطونسييت- دوبلاكس); الى معرفة العلاقة بين البنية المجهرية وما يقابلها من تطورات في المميزات الميكانيكية على مستوى الشريط الملحم وذلك باستخدام تجارب الكشف المجهرى , الشد, الصلابة والامواج فوق الصوتية. كلمات المفاتيح : المعدن الغير مؤكسد - اللحام - مميزات مجهرية وميكانيكية - الشريط الملحم.

Résumé

Le soudage des alliages d'acier inoxydables présente un intérêt particulier dans le cadre de son application dans diverses industries aéronautique, production pétroliers et autres.

Ce travail, Consistera à évaluer, dans le domaine de soudabilité opératoire entre les aciers inoxydables (martensitique ; duplex), les évolutions des caractéristiques mécaniques et microstructurales au travers du joint de soudure. On utilise la microscopie optique pour la microstructure et les essais de dureté, de traction monotone et le contrôle par l'ultrason pour les caractéristiques mécaniques.

Mots clé : Aciers inoxydables, Soudage, caractéristiques mécaniques et microstructurales, joint de soudure.

Abstract

Welding stainless steel alloys is of particular interest in the context of its application in various fields, aerospace, petroleum production and others. This work aims to investigate in the domain of operative weldability, the structural and mechanical properties through a dissimilar weld joint, made of duplex and supermartensitic materials. This by using optical microscopy for microstructure, hardness tests, monotonic tensile tests and Ultrasonic NDT technique for mechanical properties

Keywords: Stainless steel, welding, mechanical and microstructural characteristics weld joint.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

"وَقُلْ رَبِّي زِدْنِي عِلْمًا"

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail.

A ma grande mère et à mon grand père.

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

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

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

À tous mes amis.

REMERCIEMENTS

Ce travail de recherche a été effectué conjointement au sein du Centre de recherche en Soudage et Contrôle (CSC-Alger et le Laboratoire de recherche en Fiabilité des Equipements Pétroliers et Matériaux (LFEPM) de l'Université M'Hamed Bougara de boumerdes.

Je tiens à remercier d'abord mon promoteur Pr. M. GACEB pour avoir accepté de m'encadrer et de me soutenir durant les moments difficiles. Merci pour votre patience et vos encouragements. C'était un réel plaisir de travailler avec vous.

Mes plus vifs remerciements vont également à mon Co-encadreur Monsieur K.BETTAHAR Attaché de recherche au CSC. Pour m'avoir gracieusement fait bénéficier, tout au long de ce travail, de ses précieuses connaissances, de sa longue expérience dans le domaine des Sciences des Matériaux et d'avoir été disponible malgré son plan chargé.

Je tiens à rendre hommage à tous mes enseignants de la FHC, qu'ils trouvent dans cette partie consacrée aux remerciements toute ma reconnaissance.

Mes remerciements s'adressent également à tout staffe du Département transport et Equipements des hydrocarbures.

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

sommaire

Introduction	1
---------------------------	---

Partie I : Synthèse Bibliographique

CHAPITRE I : Généralités Sur Les Aciers Inoxydables	2
I.1. Naissance des aciers inoxydables.....	3
I.2. Définition de l'acier inoxydable.....	4
I.3. Rappels sur la corrosion et la passivation.....	4
I.3.1. Définition de la corrosion.....	4
I.3.2. Définition du film passif.....	5
I.4. Types d'aciers inoxydables.....	5
I.5. Structure métallurgique.....	8
I.5.1. Système métallurgique.....	8
I.5.2. Diagramme d'équilibre de phases	8
• Système Fe-Cr.....	8
• Système fer-nickel	9
• Système fer-chrome-nickel	10
I.5.3. Influence spécifique des éléments d'addition	11
a) Le chrome,	
b) Le carbone,	
c) Les autres éléments.	
I.5.4. Traitements thermiques des aciers inoxydables	12
I.5.5. L'attaque des joints de grain	12
I.5.6. Les états de surface des aciers inoxydables.....	13
I.6. Principales nuances d'aciers inoxydables.....	13
I.7. Procédure d'assemblage et d'accord des aciers inoxydables(Soudage).....	14
I.8. Produits en aciers inoxydables.....	15
I.9. Principales Applications.....	15
I.10. Produit dans le domaine des hydrocarbures	17

Chapitre II : Le soudage des aciers inoxydables	18
Introduction	19
II.1. Définition du soudage	20
II.2. Les procédés de soudage	20
II.3. Types de soudures	21
II.3.1. Soudage de métaux dissemblables (hétérogène)	22
II.4. Le soudage TIG	22
II.4.1. Définition et Principe du soudage TIG	22
4.1.1. Histoire du TIG	22
4.1.2. Définition	23
4.1.3. Principe du soudage TIG	23
4.1.4. Morphologie de la zone de fusion	24
II.4.2. Installation du soudage TIG	25
II.4.3. Description de l'installation TIG	25
4.3.1. Alimentation électrique dans ce procédé de soudage	26
4.3.2. Gaz utilisés en procédé TIG	26
4.3.3. Les électrodes non fusibles	26
4.3.4. Paramètres ayant une influence sur la soudure TIG	27
II.5. Caractéristiques de la soudure	27
II.5.1. Définition	27
II.5.2. Notion de la macrostructure d'un cordon de soudure	27
II.5.3. Les cycles thermiques de soudage	28
II.5.4. Aspects métallurgiques du soudage de l'acier	30
II.5.5. Effet des paramètres de soudage	31
II.6. Les défauts et les problèmes du soudage	31
II.6.1. Définition et différents types de défauts	31
II.7. Applications du soudage TIG	34
II.8. Les Avantages et inconvénients du soudage TIG	34

Partie II : Partie Expérimentales

CHAPITRE III : Matériaux et Technique Expérimental	35
Introduction	36
III.1. Réalisation Des Soudures	36
III.1.1.Présentation du joint soudé	36
III.1.2. Le soudage des tubes	37
i. Application au soudage multi passes.	38
ii. Comment choisir le métal d'apport acceptable ?	39
III.2. Contrôle et Caractérisations De La Soudure Hétérogène	39
III.2.1. Méthode de prélèvement des échantillons	39
III.2.2. Caractérisation structurale du joint soudé	40
2.2.1. Examen macrographie	40
2.2.1.1. Préparation de la surface d'examen	40
i. Prélèvement des échantillons	40
ii. Polissage grossier ou abrasion	40
iii. Polissage de finition	41
2.2.1.2. Révélation de la macrographie du joint de soudure	41
2.2.2. Examen micrographique	41
III.2.3. Caractérisations mécanique (control destructif)	43
2.3.1. Essai du traction	43
i. Réalisation de l'essai de traction	43
iv. le comportement d'une éprouvette métallique soumise à la traction	44
2.3.2. Essais de la durté et la microdurté	45
i. Définition	45
ii. Realisation Les essais De Dureté.....	45
III.2.4. Contrôle non destructif	46
2.4.1. Contrôle visuel	46
2.4.2. Contrôle par Ultra-son	46
i. Définition	46
ii. Principe	46
iii. Utilisations	47
iv. Détermination des propriétés élastiques	48
v. Dispositif expérimental	49

III.3. Simulation par ABAQUS	55
III.3.1. Les logiciels de conception	55
III.3.2. Historique de logiciels ABAQUS	55
III.3.3. Présentation du logiciel ABAQUS	55
III.3.4. Préparation d'un modèle physique par ABAQUS	57
i. Création géométrique	57
ii. Propriétés physiques du matériau	57
iii. Maillage du modèle	57
iv. Les conditions aux limites	58
III.3.5. L'essai Du TRACTION	58
3.5.1. Déterminations Des Coefficients Elastique (E, ν) par Ultrasons	58
3.5.2. Détermination les courbe de la traction des deux métaux de base	58
3.5.3. Déterminations des constants d'écroutissage (k, n)	59
i. Relation entre la dureté Vickers et la résistance à la traction	59
3.5.4. Courbe de traction et d'écroutissage des métaux de base	60
III.3.6. Application de la simulation	60
3.5.1. Approche locale	60
i. Les dimensions du modèle géométrique	60
ii. Le modèle utilisé	60
iii. Maillage de l'éprouvette	60
iv. Les conditions aux limites et le chargement appliqué	61
CHAPITRE IV : Résultats Et Interprétations	62
INTRODUCTION	51
IV.1. Eprouvettes et la composition du métal d'apport	51
IV.1.1. L'équivalence de Métal d'apport	51
IV.1.2. Les Eprouvettes Prélevé Après Le Soudage	51
IV.2. CARACTÉRISATION DE LA SOUDURE	52
IV.2.1. Macrographie	52
IV.2.2. Micrographie	52
1) Métal de base	54
2) Zone affectée thermiquement côté duplex	55
3) Zone affectée thermiquement côté martensitique	55
4) Zone fondue	56
5) Zones de liaison	58
IV.3. Caractérisations mécaniques	59

IV.3.1. Résultats de l'essai de la traction	59
IV.3.2. Résultats de la dureté et de micro dureté.....	60
IV.3.3. Résultats du contrôle par ultrasons	62
IV.4. Simulation par LOGICIEL ABAQUS	63
IV.4. Simulation du comportement élastique de l'éprouvette hétérogène	63
IV.4.1. SIMULATION	63
i. Le modèle utilisé	63
ii. Les conditions aux limites et le chargement appliqué	63
IV.4.2. Principales étapes	64
IV.4.3. Résultats	66
Conclusion	68
Références	70

Listes des figures et des tableaux

I. Les figures

Figure. I.1 : Représentation schématique des différentes couches composant un acier inoxydable.....	5
Figure I.2. La microstructure de l'acier duplex.....	8
Figure I.3. : Structure des métaux de symétrie cubique.....	8
Figure I.4.: Diagramme d'équilibre de phases du système fer-chrome.....	9
Figure I.5. : Diagramme D'équilibre fer-nickel	10
Figure I.6. : Coupe du diagramme de phase ternaire Fe-Cr-Ni	10
Figure I.7. Les lignes de formage et la grosseur de grain de l'acier inoxydable.....	13
Figure I.8. Représentent quelque composantes pour assures une bonne étanchéité...	15
Figure II.1. Statistiques des publications dans le domaine de l'assemblage hétérogène	19
Figure II.2. Classification des procédés de soudage selon la source d'énergie	20
Figure II.3. Energies spécifiques des différents procédés de soudage par fusion.....	21
Figure II.4. Principe du procédé de soudage TIG simple flux	23
Figure II.5. Schéma général d'installation du procédé TIG	25
Figure II.6. Variété de macrostructures dans un cordon de soudure par fusion	27
Figures II (7.8) : Influence du cycle thermique sur la zone affectée thermiquement	29
Figure II.9. Représentation schématique des zones d'un joint soudé en Acier	30
Figure. II.10(a): Fissuration du joint de liaison	31
Figure. II.10(b) : les différente Fissurations à froid	32
Figure III.1. "Joint soudé étudié"	38
Figure III.2. Soudage multi passes	38
Figure III.3. Méthode de prélèvement des éprouvettes	39
Figure III.4 : Schéma de la microscope optique	42
Figure III.5. Dimensions de l'éprouvette de traction selon ASTM E8	43
Figure III.6. Machine de l'essai de traction de type ZWICK ROELL Z050	44
Figure III.7. Machine de dureté universelle TYPE INOVATEST NEMESIS 9000	46
Figure III.8. Principe de réflexion	47
Figure. III.9. Dispositif expérimental d'ultrasons.	49

Figure IV.1. Les éprouvettes des essais	61
Figure IV.2 Illustration macrographique du joint soudé et ses zones principales....	52
Figure IV.3 Illustration micrographique du joint soudé et ses zones principales.....	53
Figure IV.4. " Microstructure du métal de base duplex 2205".....	54
Figure IV.5. " Microstructure du métal de base martensitique".....	54
Figure IV.6. " Microstructure de la ZAT coté duplex ".....	55
Figure IV.7. " Microstructure de la ZAT coté martensitique".....	55
Figure IV.8.1. "Microstructure de la zone fondue dans la premier passe".....	56
Figure IV.8.2 Microstructure de l'Inter-passe 1-2	56
Figure IV.8.3 Microstructure de l'Inter-passe 2-3 et 3-4.	57
Figure IV.8.4. "Microstructure de la zone fondue dans la dernière passe".....	57
Figure IV.9. "Microstructure de la zone de liaison coté duplex (Position 8)".....	58
Figure IV.10. "Microstructure de la zone de liaison coté martensitique (Position 9)"	58
Figure IV.11. "Courbe du traction rationnelle typique".....	59
Figure IV.12.a. "Positions de prélèvement des valeurs de dureté pour la soudure à l'état reçu"	60
Figure V.12.b. " Illustration par un histogramme de la valeur de dureté dans chaque zone du joint soudé".....	61
Figure V.13. " Illustration par un histogramme de la valeur de Module d'Young dans chaque zone du joint soudé".....	62
Figure IV.14. Section de la pièce par les mesures réelles selon la norme ASTM E8..	64
Figure IV.15. Solide de la pièce.....	64
Figure (IV.16.a). Affectée caractéristiques mécaniques du duplex.....	64
Figure (IV.16.b). Affectée caractéristiques mécaniques de la zone fondue.....	65
Figure (IV.16.c). Affectée les caractéristiques mécaniques du martensite.....	65
Figure (IV.17). Maillage fine	65
Figure (IV.18.a). Encastrement des Surfaces S1 et S2.	66
Figure (IV.19). Déformation (eps xx) le long de l'éprouvette Répartition non-uniforme	66
Figure (IV.20). Contrainte uniformément répartie (Sigma xx) le long de l'éprouvette	67
Figure (IV.21). le comportement plastique des différentes zones	67

II. Les tableaux

Tableau I.1. Principales applications des aciers inoxydables	16
Tableau II.1. Assemblage des métaux ou alliages de nature différente	22
Tableau II.2. Aperçu des problèmes avec causes et remèdes associés au soudage TIG	33
Tableau III.1. "Composition chimique en pourcentage massique de l'acier inoxydable martensitique"	36
Tableau III.2. "Caractéristiques Mécaniques de traction simple de la martensitique...	36
Tableau III.3. "Composition chimique en pourcentage massique de l'acier inoxydable duplex A790 GR"	36
Tableau III.4. "Caractéristiques mécaniques de traction simple de duplex A790GR	37
Tableau III.5. "Composition chimique en pourcentage massique de l'acier inoxydable duplex DP-3WT "	37
Tableau III.6. "Caractéristiques mécaniques de traction simple duplex DP-3WT	37
Tableau III.7. "Principaux paramètres du procédé de soudage employé"	39
Tableau III.8. "Illustration des ordres d'usinage effectués"	42
Tableau III.9. "Paramètres du polissage de finition "	43
Tableau III.10. "Solution d'attaque chimique classique "	43
Tableau III.11. "Réactifs utilisées pour la révélation micro-structurale "	43
Tableau III.12 les paramètres appliqués pour les deux essais	50
Tableau IV.1 les compositions équivalentes de chrome et nickel.....	51
Tableau IV.2 résultats de laissai de traction.....	60
Tableau IV.3. "Résultats de la dureté pour la soudure à l'état reçu".....	61
Tableau IV.4. Module d'Young et coefficient de Poisson obtenus par ultrasons.....	62

INTRODUCTION

Dans de nombreuses applications industrielles, et en particulier dans les grosses constructions pétrolières, il est souvent nécessaire d'assembler par soudage des aciers de natures différentes. Dans cette étude nous nous intéressons à une soudure hétérogène entre deux aciers inoxydables, l'étude portera sur l'aspect structural et mécanique. Nous introduisons la technique Non-destructive (Ultrason) pour la détermination des modules de Young, et une simulation numérique.

Ce mémoire est composé de deux parties :

Une partie théorique qui débute par un premier chapitre qui présente des généralités sur les aciers inoxydables.

Le soudage TIG et ses différentes caractéristiques sont présentés dans le deuxième chapitre.

La deuxième partie est constituée des deux chapitres 3 et 4. Le troisième chapitre concerne la procédure expérimentale, qui est consacré à la description de la méthode de soudage et des outils expérimentaux de caractérisations (essai de contrôle destructif et non destructif). Le quatrième chapitre présente les résultats expérimentaux et les résultats de simulation obtenus par le logiciel ABAQUS.

Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion.

CHAPITRE
I

ACIERS
INOXYDABLES

I. Généralités sur les aciers inoxydables

I.1. Naissance des aciers inoxydables

Il est connu que le fer et les aciers ont en général une mauvaise résistance à la corrosion ; c'est certainement un de leurs points faibles ou de leurs inconvénients majeurs. Cela explique que de tout temps, de nombreuses tentatives ont été faites pour protéger le fer de façon efficace et durable.

Dans les années 1890, l'Allemand Hans Goldschmidt développa et breveta un procédé appelé la thermité qui permettait d'obtenir du fer sans carbone. Entre 1904 et 1911, divers chercheurs, notamment le Français Léon Guillet, mirent aux points différents alliages que l'on pourrait aujourd'hui considérer comme inoxydables. En 1911, l'Allemand Philip Monnartz mettait en évidence l'influence du taux en chrome des alliages et leur résistance à la corrosion.

Enfin, en 1913, l'Anglais Harry Brearley des laboratoires Brown-Firth, en travaillant sur l'érosion dans les canons d'armes à feu, développa, dans la ville de Sheffield en Angleterre, un acier appelé **rustless** (« sans rouille ») et qui sera ensuite renommé **stainless** (« sans tache », ou « pur ») qui sera officiellement le premier acier à porter le nom d'« inoxydable » ; Brearley entra dans l'histoire comme leur inventeur. Il s'agissait alors d'un acier inoxydable martensitique (0,24 % en carbone et 12,8 % en chrome). Le chrome protège la surface de l'acier à l'aide d'une couche passive de très faible épaisseur. Cette couche est constituée d'oxydes durs et résistants qui font écran entre le métal et l'agression de l'atmosphère. Ces aciers permettent de répondre aux problèmes de corrosion sévère (industrie chimique, eau de mer...) ainsi qu'à la corrosion douce lorsque toute contamination est interdite (industrie agro-alimentaire, pharmacie, industrie nucléaire...). Ils permettent aussi de résoudre les problèmes d'aspect de surface en milieu atmosphérique (bâtiment, mobilier...). Et dès que le rôle prépondérant du chrome fut reconnu, la curiosité des chercheurs fût aiguillée vers celui d'autres additions, en particulier celle du Nickel et puis d'autres éléments, tels que le molybdène, le manganèse, le tungstène, le cobalt, etc.

➤ Développement industriel

Le développement d'aciers ayant une résistance à la corrosion élevée a constitué un immense progrès, un saut technologique. Dans un premier temps, ils ont été la solution aux problèmes posés par l'industrie chimique. Par la suite de nombreux autres domaines d'application se sont progressivement ouverts. Généralement, il peut s'agir :

- de résoudre des problèmes de corrosion sévère (industrie chimique, électroménager, eau de mer, etc.)

- de résoudre des problèmes de corrosion douce dans des conditions nécessitant une absence totale de contamination (industrie alimentaire, pharmacie, nucléaire, etc.)
- de résoudre des problèmes d'aspect de surface en milieux atmosphériques ou voisins (bâtiment, mobilier, etc.).

I.2. Définition de l'acier inoxydable

Les aciers inoxydables, couramment appelés **inox**, jouent un grand rôle dans d'innombrables domaines : vie quotidienne, **industrie mécanique**, agroalimentaire, chimie, transports, médecine, chirurgie, etc.

Ce sont des aciers, alliages de fer et de carbone, auxquels on ajoute essentiellement du chrome qui, au-delà de 10,5 % en solution (selon la teneur en carbone) dans la matrice, provoque la formation d'une couche protectrice d'oxyde de chrome qui confère à ces aciers leur inoxydabilité.

D'autres éléments peuvent être ajoutés, notamment le nickel qui améliore les propriétés mécaniques en général et la ductilité en particulier, et d'autres éléments comme le molybdène ou le titane qui améliorent la stabilité de l'alliage pour des températures autres que l'ambiante ainsi que des éléments à hauts points de fusion comme le vanadium et le tungstène accompagné en général d'une augmentation de la teneur en chrome, pour obtenir la résistance aux hautes températures au contact d'une flamme (aciers réfractaires).

I.3. Rappels sur la corrosion et la passivation

I.3.1. Définition de la corrosion

Les phénomènes de corrosion des métaux sont de nature électrochimique: le métal retrouve son état thermodynamiquement stable, l'état oxydé.

En présence d'un milieu oxydant (eau, atmosphère), le métal réagit avec l'environnement, cette réaction se faisant avec des échanges d'électrons.

Le fer, constituant majoritaire des aciers, s'oxyde facilement ; le produit de corrosion, la rouille, s'effrite ou se dissout dans l'eau, ce qui crée une dégradation de la pièce.

À chaud, la diffusion des atomes oxydant dans l'épaisseur du métal peut compliquer encore le problème.

L'une des manières pour éviter la corrosion consiste à mettre une quantité importante de chrome (Cr) dans l'acier (plus de 10,5 % en masse) : le chrome réagit avec le dioxygène de l'air et forme une couche d'oxyde de chrome **Cr_2O_3 : $4 Cr + 3 O_2 \rightarrow 2 Cr_2O_3$**

Cette couche, compacte, adhérente et donc protectrice, est appelée « couche passive » : elle forme une barrière séparant l'acier de son milieu. En temps normal, elle est invisible car très fine. Ainsi, contrairement à son nom, l'acier n'est pas inoxydable : il s'oxyde rapidement, mais forme un oxyde protecteur, contrairement à la rouille.

L'ajout de nickel améliore les propriétés de la couche passive ; celui-ci s'intègre à la couche d'oxyde $2 \text{Ni} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{NiO}$.

I.3.2. Définition du film passif

La représentation classique des aciers inoxydables comprend des couches successives de métal, oxydes et hydroxydes, le tout recouvert par une couche de contamination résultant généralement de l'adsorption de matériaux carbonés de l'air ambiant ou des phases d'élaboration (**figure 1**). Cette couche protectrice de quelques nanomètres d'épaisseur, appelée film passif, se forme soit à l'air, soit en solution aqueuse de manière naturelle sous le pouvoir oxydant de l'eau (Dubois, 2000).

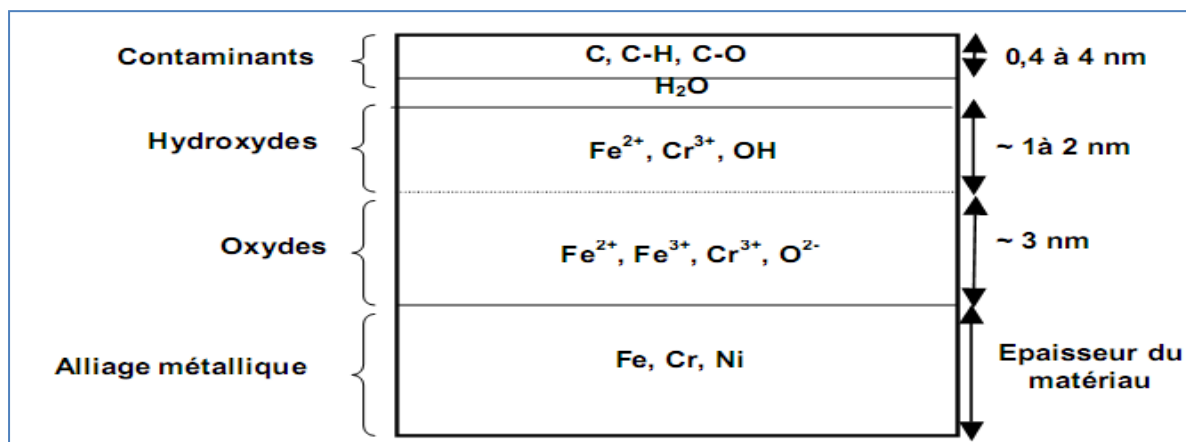


Figure. I.1 : Représentation schématique des différentes couches composant un acier inoxydable.

I.4. Types d'aciers inoxydables

Les **aciers au chrome** sont ferritiques et magnétiques à l'état adouci. Certains se comportent comme des aciers spéciaux autotremnants, d'autres ne se trempent que partiellement ou pas du tout. Les **aciers au nickel-chrome** sont en général austénitiques, ils sont livrés à l'état hypereutecté. Après certaines phases de travail, dans certains cas après soudage, il arrive que ces aciers subissent à nouveau un traitement d'hypertrempe (*réchauffage à 1100 °C environ*) pour remettre en solution des composés intermétalliques et/ou chimiques qui auraient pu se former.

L'hyper trempe est toujours suivie d'un refroidissement rapide pour traverser très rapidement les zones de températures où il pourrait se former des précipités genre carbure de chrome ou phases intermétalliques indésirables.

Cette hyper trempe confère à l'acier les propriétés qu'il avait lors de son élaboration.

On distingue les quatre familles d'aciers inoxydables suivantes :

- **Les aciers martensitiques**

Ils sont utilisés lorsque les caractéristiques de résistance mécanique sont importantes. Ces alliages comprennent **de 12 à 18% de chrome** et des teneurs en **carbone pouvant atteindre environ 1%** et ils peuvent contenir jusqu' à **7 % de nickel**, et jusqu'à **3% de molybdène**. Ils présente des propriétés intéressantes en termes de limite d'élasticité, de résistance à la corrosion et de dureté. Ils possèdent une structure martensitique (quadratique, notée α') obtenue apres trempe de la phase austénitique. Cette transformation homogène se produit avec une augmentation de volume, responsable de fortes contraintes de compression et qui tend à stabiliser de l'austénite résiduelle. Ces aciers sont utilisés **pour leur résistance mécanique élevée**, Ils sont utilisés comme matériaux de **construction, outillage à main**.

Exemples : **X20Cr13, X46Cr13, X29CrS13**.

- **Les aciers ferritiques**

Sont parfois utilisés comme barrière de résistance à la corrosion (tôles plaquées, tôle revêtues, protégées (dites « claddées », de « cladding »)) des parois d'équipements sous pression en acier utilisés dans les industries pétrochimique et chimique.

Leur teneur en carbone est faible (**inférieure à 0.08 %**). Un acier qui contient plus de 12 % de chrome demeure ferritique à toutes les températures ; il ne peut plus prendre la trempe martensitique. Ils peuvent contenir entre **12% et 30 %** de chrome.

Ils sont au chauffage sensible au grossissement des grains, ce qui entraîne une dégradation de leur ductilité et de leur ténacité.

Exemples : **X6Cr17, X6CrMo17-1, X3CrTi17**.

- **Les aciers austénitiques**

Ce sont de loin les plus nombreux, en raison de leur résistance chimique très élevée, de leur ductilité comparable à celle du cuivre, et leurs caractéristiques mécaniques élevées.

Les teneurs en éléments d'addition sont d'environ **18 % de chrome** et **10 % de nickel**. La teneur en **carbone est très basse** et leur stabilité peut être améliorée par des éléments tels que le **titane ou le niobium**.

De par leur excellente ductilité, ces aciers ont aussi un domaine d'utilisation aux basses températures (jusqu'à **moins 200 °C**) et sont en compétition avec les alliages légers et l'acier à **9 % de nickel** pour la réalisation d'équipements destinés à la cryogénie.

Exemples : X2CrNi18-9, X2CrNiMo17-12-2.

- **Les aciers improprement dénommés « austéno-ferritiques »**

Les aciers austéno-ferritiques sont des mélanges biphasés ferrite et austénite (d'où leur nom anglais de **duplex**), et contiennent des teneurs en **chrome, molybdène et azote** relativement élevées. Ils sont obtenus par trempe depuis une structure mixte austénite-ferrite.

Les principales nuances contiennent **22 à 25 % de chrome et 4 à 7 % de nickel**.

Les incorporations de **molybdène (3 ou 4 %)** et **d'azote (0,1 à 0,3 %)** permettent de limiter les corrosions par **piqûres et par crevasses**.

Alliant les bonnes propriétés de résistance à **la corrosion des aciers ferritiques** et les hautes résistances **mécaniques des aciers austénitiques**, ces aciers sont utilisés dans des conditions relativement agressives : industries chimique, pétrolière et maritime.

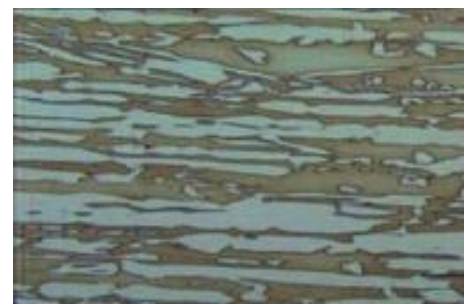
La microstructure de base de l'acier inoxydable duplex (**figure I.2**) est constituée de grains d'austénite dispersés dans une matrice ferritique.

Ils ont des propriétés de résistance à la corrosion inter granulaire ainsi qu'à la corrosion en **eau de mer** remarquables et présentent, pendant l'essai de traction, un palier élasto-plastique. Ils ont un comportement mécanique semblable aux aciers de construction. La transformation liquide / solide se traduit par une solidification en phase ferritique (ferrite delta) puis d'une seconde transformation, à l'état solide, en austénite. Ils devraient donc, en conséquence, être dénommés **aciers ferrito-austénitiques**.

Le simple fait de désigner correctement ces aciers permet de tout de suite comprendre qu'un refroidissement lent, pendant le soudage, permettra à un maximum de phase ferritique de se transformer en phase austénitique et réciproquement, un refroidissement rapide aboutira à un gel de la ferrite laissant peu de possibilités à la transformation austénitique.

REMARQUE : la connaissance des types d'acier est essentielle pour les systèmes constitués d'éléments assemblés mécaniquement ou par soudage, la mise en présence de deux aciers inoxydables trop différents dans un électrolyte peut effet provoqué des phénomènes de corrosion destructif.

Figure I.2. La microstructure de l'acier duplex



I.5. Structure métallurgique

I.5.1. Système métallurgique (Figure I.3)

Le fer pur possède trois formes allotropiques en fonction de la température :

- jusqu'à 910 °C : forme alpha (α), ferrite (cc) ;
- de 910 à 1400 °C : forme gamma (γ), austénite (cfc) ;
- de 1400 à 1538 °C (température de fusion) : forme delta (δ), ferrite (cc).

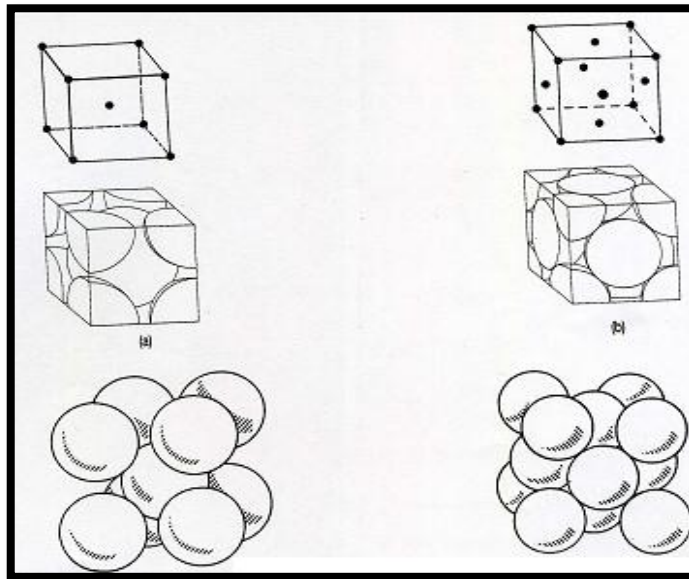


Figure I.3. : Structure des métaux de symétrie cubique :

(a) structure cubique centrées, (b) structure cubique à faces centrées

(Lacombe and Béranger, 1990).

I.5.2. Diagramme D'équilibre De Phases (Systèmes D'équilibres)

• Système Fe-Cr

Le chrome est un élément dit alphagène. Il favorise fortement la forme ferritique. Sur le diagramme de phase Fe-Cr (**fig. I.4**), le domaine austénitique est assez réduit et est représenté par un domaine limité appelé boucle gamma. Pour des teneurs supérieures à 11,5 % de chrome, l'alliage reste ferritique dans toute la plage de températures. Il y a disparition de la transformation allotropique α - γ . entre 10,5 et 11,5 % de chrome, l'alliage est biphasé ferrite plus austénite dans certaines plages de température.

Il subit une transformation ferrite/austénite pour des teneurs inférieures à 10,5 %.

On notera que le chrome jusqu'à 8 % abaisse la température A3 et se comporte comme un élément gammagène. Ce comportement s'inverse pour des teneurs supérieures à 8 %, point à partir duquel cette température augmente.

Pour certaines teneurs de chrome, dans le cadre d'un refroidissement lent, il peut y avoir formation de phase intermétallique sigma (σ) à des températures inférieures à 820 °C. Elle précipite au joint de grain ou dans la matrice ferritique entraînant une fragilité [1]

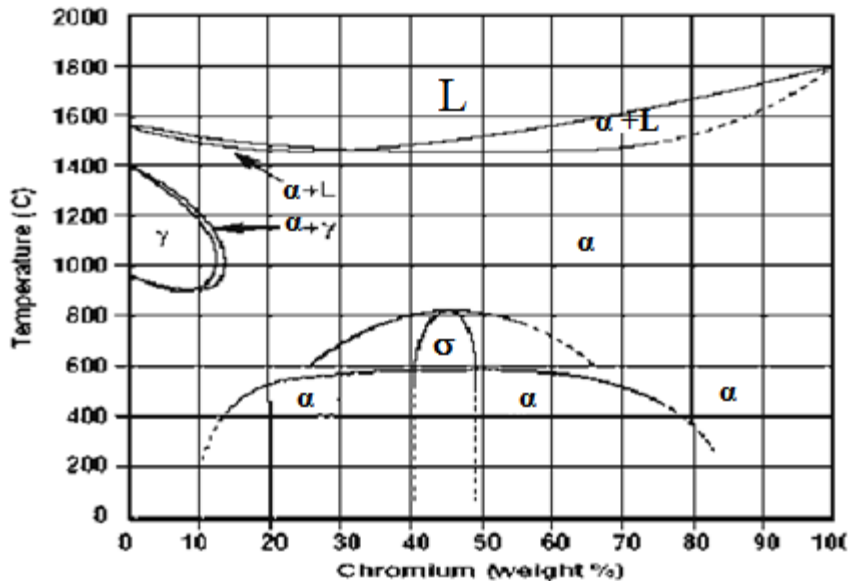


Figure I.4.: Diagramme d'équilibre de phases du système fer-chrome. [2].

• Système fer-nickel

Le nickel, de structure cubique à faces centrées, favorise la formation d'une solution solide austénitique (cubique à faces centrées) étendue aux dépens de la structure cubique centrée ferritique α : le nickel est dit γ -gène. Aussi, aux fortes teneurs en nickel, les alliages sont austénitiques à la température ambiante alors qu'aux faibles teneurs en nickel (< 5 à 6 %) ils peuvent être ferritiques

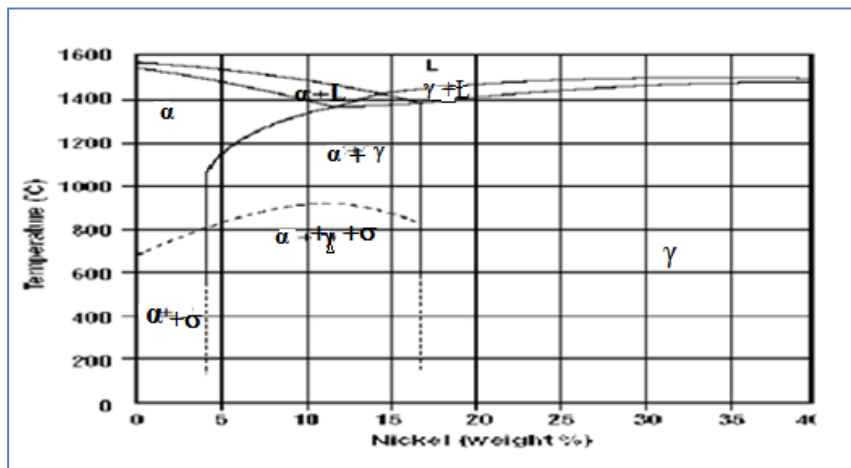


Figure I.5. : Diagramme D'équilibre fer-nickel [3].

• Système fer-chrome-nickel

Le nickel est à l'opposé du chrome un élément dit gammagène. Il ouvre le domaine austénitique. **Figure I.6.**

Concrètement, l'addition de nickel augmente la taille de la *boucle gamma*.

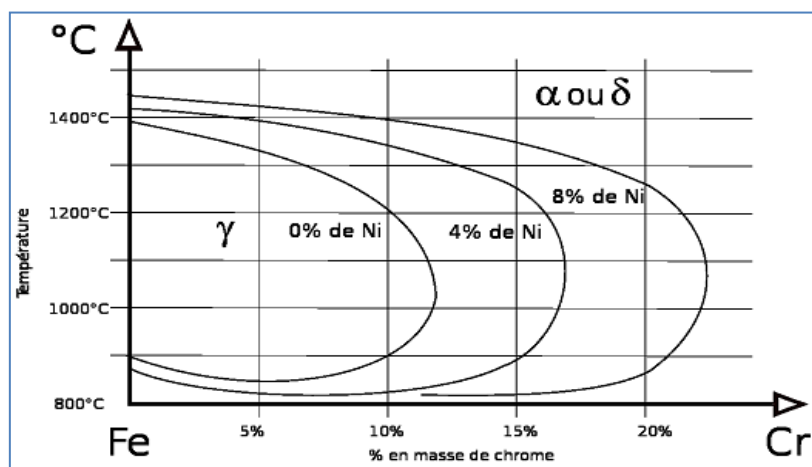


Figure I.6. : Coupe du diagramme de phase ternaire Fe-Cr-Ni montrant l'évolution du domaine austénitique γ en fonction de la teneur en nickel.

A cet alliage ternaire Fe-Cr-Ni, nous pouvons ajouter un quatrième élément comme le manganèse ou le molybdène. Le manganèse, bien que classé comme élément γ -gène, a un rôle α -gène pour les teneurs supérieures à 7 % renforçant ainsi la résistance à la fissuration à chaud lors de solidification rapide. Le molybdène, élément α -gène, est fréquemment ajouté à raison de 2 à 5 % pour améliorer la tenue à la corrosion dans presque tous les milieux [3].

Éléments α -gènes γ -gènes

D'autres éléments ont un rôle **alphagène ou gammagène**. Un rôle particulier est tenu par le carbone et l'azote.

Le carbone a un rôle **gammagène** et rentre donc en « compétition » avec le chrome.

En fait plus que le carbone seul, c'est le couple carbone-azote dont il faut tenir compte. Ces deux éléments étant des éléments d'alliage d'insertion contrairement aux autres éléments qui sont des éléments de substitution.

Les éléments **alphagènes** sont le chrome, le molybdène, le silicium, le titane, le niobium, le vanadium, le tungstène, l'aluminium et le tantale.

Les éléments **gammagènes** sont le nickel, le carbone, l'azote, le cobalt et le manganèse. Le manganèse peut avoir un rôle plus complexe.

Plusieurs diagrammes ont été proposés, partant du constat que certains éléments d'alliages ont un effet α -gène et d'autres un effet γ -gène, pour déterminer la structure des aciers inoxydables.

Pour cela on calcule un « Chrome équivalent » et un « Nickel équivalent ». "Schaeffler"

$$Cr_{eq} = \% Cr + 1.73 \% Si + 0.88 \% Mo$$

$$Ni_{eq} = \% Ni + 24.55 \% C + 21.75 \% N + 0.4 \% Cu$$

I.5.3. Influence spécifique des éléments d'addition

a) Le chrome

Les aciers inoxydables sont des alliages fer-chrome ou plus exactement acier-chrome c'est-à-dire fer-carbone-chrome. Conformément à la norme européenne EN 10088-1, un acier est classé acier inoxydable s'il contient au minimum 10,5 % en masse de chrome et moins de 1,2 % de carbone. [4],

C'est le chrome qui donne aux aciers inoxydables leur résistance à la corrosion.

b) Le carbone

La teneur en carbone est limitée à un maximum de 1,2 % en masse afin d'éviter la formation de carbures [5] (notamment de carbures de chrome qui est un composé chimique très stable avide de chrome) qui sont préjudiciables au matériau. Par exemple, le carbure Cr_2C_6 qui peut apparaître dans l'austénite 18-9 a un effet négatif vis-à-vis de la corrosion inter granulaire (appauvrissement très important en chrome aux abords des carbures formés provoquant la perte du caractère d'inoxidabilité par captation du chrome)

Les autres éléments :

- c) **Le nickel et Le manganèse** : favorisent la formation de structures homogènes de type austénitique. Il apporte les propriétés de ductilité, de malléabilité et de résilience.
- d) **Le molybdène et le cuivre** améliorent la tenue dans la plupart des milieux corrosifs,
- e) **Le tungstène** améliore la tenue aux températures élevées des aciers inoxydables austénitiques.
- f) **Le titane** doit être utilisé à une teneur qui dépasse le quadruple de la teneur en carbone.
- g) **Le niobium** a un point de fusion beaucoup plus élevé que le titane et présente des propriétés semblables.
- h) **Le silicium** joue également un rôle dans la résistance à l'oxydation, notamment vis-à-vis des acides forts [6].

I.5.4. Traitements thermiques des aciers inoxydables

Le but des traitements thermiques appliqués aux aciers inoxydables est d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques ou leur résistance à la corrosion.

Si la qualité première des aciers inoxydables est leur tenue à la corrosion, il convient de rappeler qu'ils peuvent par traitement thermique approprié acquérir des caractéristiques mécaniques supérieures dont une grande dureté, ce qui permet des économies de matière et un allègement des structures.

La structure totalement martensitique confère aux aciers inoxydables une limite d'élasticité, une résistance mécanique et une dureté élevées. Leur ductilité est par contre moindre que celle des aciers inoxydables ferritiques ou austénitiques.

Afin de l'améliorer, les aciers inoxydables martensitiques subissent en général un traitement de revenu plus ou moins prononcé, afin d'obtenir une structure ferritomartensitique.

➤ Divers traitements thermiques possibles :

- trempe martensitique,
- trempe de déstabilisation de l'austénite,
- traitement de détensionnement ou de revenu,
- traitement d'adoucissement ou de recuit.

I.5.5. L'attaque des joints de grain

Dans une attaque électro-nitrique, on observe la formation de sillons aux joints de grain car ils se dissolvent plus vite que l'intérieur des grains. Cela arrive même quand il n'y a pas de carbures inter granulaires.

Cette attaque préférentielle des joints est liée en partie à d'éventuelles ségrégations chimiques (S, P,...) mais surtout au fait que le joint de grain est une zone désordonnée dans laquelle les atomes sont moins liés au réseau et donc plus faciles à « décrocher » par dissolution anodique **figure I.7**. L'éventualité d'une précipitation de carbures et d'un déchromisation associée ne fait qu'amplifier le phénomène.

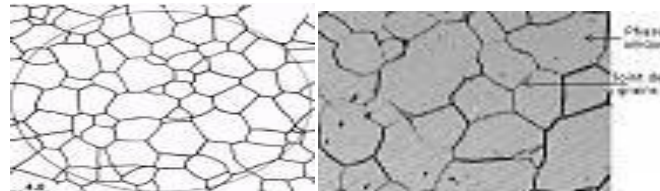


Figure I.7. : Les lignes de formage et la grosseur de grain d'une pièce en acier inoxydable.

I.5.6. Les états de surface des aciers inoxydables

On peut trouver dans **la norme NF EN 10088-2** et de la norme **NF EN 10088-3**, les éléments concernant les aspects de surface et les gammes de fabrication des produits en acier inoxydable. On évoque principalement :

- **Pour les produits plats** : les aspects recuit, mat ou brillant, poli, brossé, avec motifs colorés.
- **Pour les produits longs** : les aspects lisse, mat ou brillant, éventuellement poli...

I.6. Principales nuances d'aciers inoxydables

Pour être classé dans la catégorie inoxydable, un acier doit contenir au moins 10,5 % de chrome (Norme EN 10020). Les plus courants :

- **X2CrNi18-10 (AISI 304L)** : C : 0,02 %, Cr : 17 à 19 %, Ni : 9 à 11 %, utilisés pour la réalisation d'ouvrages toutes qualités ;
- **X2CrNiMo17-12 (AISI 316L)** : C : 0,02 %, Cr : 16-18 %, Ni : 11-13 %, Mo (molybdène) : 2 %, utilisés dans les industries chimiques, pharmaceutique, pétrolières, agro-alimentaires et aussi intensément en milieu nautique ;
- **X8Cr17 (AISI 430)** : C : 0,08 %, Cr : 16-18 %, utilisés pour les articles de ménage, l'électroménager, les éviers ;
- **X6CrTi12 (AISI 409)** : C : 0,06 %, Cr : 11-13 %, Ti (titane), utilisé dans les échappements automobiles, fourneaux, etc.

(Analyse chimique en % pondéral) La plupart des aciers inoxydables utilisés sont conformes à des normes par exemple :

- **européennes** (norme EN 10088 en particulier) ;
- **américaines** (normes de l'ASTM) ; L signifie *low carbon (bas carbone)*, H signifie *High carbon (haut carbone)*. [3]

I.7. Procédure d'assemblage et d'accord des aciers inoxydables (Soudage)

Les procédés de soudage existants restent valables dans l'ensemble ; on recherche naturellement des soudures saines, sans porosités, dotées d'une bonne résistance mécanique, mais ici il faut en outre qu'elles conservent les qualités de résistance à la corrosion qui sont celles des matériaux de base.

Avant de procéder au soudage d'un acier inoxydable, il est extrêmement important de nettoyer convenablement les bords à souder y compris les abords (sur une zone qui pourrait atteindre une température supérieure à 400 °C) de toutes traces de graisse, de dépôts de carbone (traçage au crayon mine) ou autres impuretés de façon à éviter la formation de carbures du genre Cr₂C₆ ce qui provoquerait un fort appauvrissement en chrome (de l'ordre de 95%) et donc la perte d'inoxidabilité de ces zones appauvries.

Une très bonne méthode de nettoyage consiste à utiliser un jet de vapeur surchauffée.

Les mêmes précautions sont à prendre lors du coupage thermique (plasma, LASER) et les traitements thermiques.

En principe les aciers inoxydables se travaillent dans des ateliers dits "blanc", c'est-à-dire présentant une propreté accrue et l'absence de matière pouvant polluer l'acier inoxydable. Dans les cas où la propreté doit être poussée (aviation, spatial, alimentaire, chimie, pharmacie...etc.), l'accès à l'atelier se fait par sas et l'atmosphère est sur pressurisée.

La propriété de la couche d'oxyde ne doit pas faire oublier que le chrome est oxydable et donc de la nécessité de protéger le bain de fusion de l'action de l'oxygène par une atmosphère inerte qui peut être selon le cas, de l'argon ou de l'hélium ou de l'azote voire le vide, dans des procédés de soudage sans laitier comme le **TIG**, le MIG, le A-TIG, le plasma, le laser, le faisceau d'électron...

• **Les aciers martensitiques**, en raison de leur haute teneur en carbone, se prêtent mal au soudage homogène (problème de rupture fragile en 1ère passe) et de fissuration à froid par conjugaison des trois facteurs : (présence de structures fragiles, effet de l'hydrogène et apparition de contraintes) ; à chaque fois que possible préconiser le soudage hétérogène avec produit d'apport austénitique.

• **Les aciers ferritiques** : tendent à devenir fragiles lorsqu'ils sont soudés en homogène et devraient être immédiatement suivis d'un traitement d'hypertrempe (*remise en solution des carbures et des composés intermétalliques*), ce qui n'est pas toujours réalisable. Lorsque rien ne s'y oppose (problème de corrosion galvanique par exemple) ou qu'il n'y a pas de contre-indication avec la destinée de l'équipement fabriqué, il est préconisé de souder en hétérogène avec un produit d'apport austénitique en utilisant de faibles énergies de soudage pour éviter la formation de zones à gros grains fragiles à basse température.

• **Les aciers austénitiques** : sont les plus aptes au soudage. Le métal d'apport et les paramètres de soudage doivent être choisis avec soin afin que le joint soudé conserve les propriétés chimiques et mécaniques de l'acier de base.

• **Les aciers austéno-ferritiques** : On a toujours intérêt à privilégier les méthodes qui limitent dans le temps et en volume la fusion du métal : le soudage par résistance (par points, à la molette, par étincelage) donne d'excellents résultats et il ne faut pas oublier le brasage, qui ne provoque aucune fusion du métal de base. [3]

I.8. Produits en aciers inoxydables :

Les principales formes de produits sont :

- Les tôles laminées à chaud et à froid ;
- **Les tubes ronds**, carrés (décoration), rectangulaires (décoration) ;
- **Les barres** ; Les fils, les fibres ;
- Les demi-produits destinés à être soit forgés, soit relaminés ;
- Accessoires, robinetterie, **raccords**. [2]

Figure I.8.

Représentent quelques compositions simples pour assurer une bonne étanchéité. [2]



I.9. Principales Applications

De ces différents critères et de l'agressivité des milieux avec lequel l'acier inoxydable sera en contact et donc de la résistance à la corrosion attendue, le **tableau I.1**. Donne un résumé des principales situations rencontrées. [2]

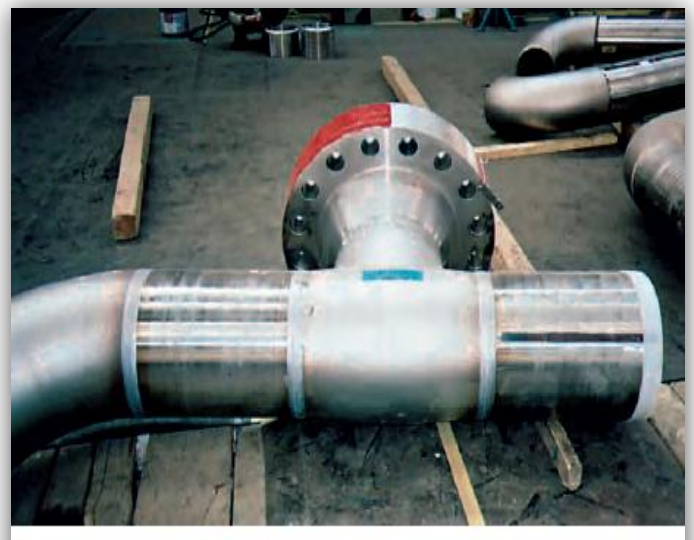
Application	Famille de nuances	Résistance à la corrosion	Caractéristiques mécaniques	Formage, emboutissage, cintrage	Soudage
Industrie alimentaire, stockage du vin	Austénitiques : Fe-Cr-Ni-(Mo)	***	*	*	**
Ustensiles ménagers	Austénitiques : Fe-Cr-Ni	***	*	***	*
Echappement automobile	Ferritiques : Fe-Cr-(Ti/Nb)	**	**	***	*
Appareils électroménagers	Austénitiques : Fe-Cr-Ni Ferritiques : Fe-Cr-(Ti)	**	*	***	**
Matériels de transport	Austénitiques : Fe-Cr-Ni-(N) Ferritiques : Fe-Cr	**	***	**	**
Couteaux, instruments chirurgicaux	Martensitiques : Fe-Cr-(Ni-Mo)	**	***		
Industries chimiques et papetières	Austénitiques : Fe-Cr-Ni-Mo Austénoferritiques Fe-Cr-Ni-Mo	***	**	*	***

*** : très élevées
** : élevées
* : moyenne

Tableau I.1 : Principales applications des aciers inoxydables. [2]



Tubes en acier inoxydable duplex (Source : Butting)



Té avec bride, acier EN 1.4462 (2205) (Source : Arco Exploration and Production Technology)

I.10. Produit dans le domaine des hydrocarbures (Pétrole et Gaz)

L'acier duplex a joué un rôle déterminant dans l'industrie du pétrole et du gaz, en permettant de faire face à des conditions particulièrement sévères. Ceci s'explique non seulement par sa résistance mécanique et sa tenue générale à la corrosion, mais aussi plus précisément par le fait que sa résistance à la corrosion par piqures et sa résistance à la corrosion caverneuse sont supérieures à celles des alliages austénitiques standard, avec un indice PREN souvent supérieur à 40.

Les principales applications des aciers duplex sont **les conduites d'écoulement** et autres tuyauteries en générale ; ainsi que les équipements tels que **séparateurs, laveurs ou pompes**. Dans les **opérations offshore**, les **aciers duplex** sont employés dans **les tubes de production, les manifolds, les composants des arbres de Noël, les lignes de collecte et les oléoducs d'évacuation** du pétrole et du gaz corrosifs.

Les aciers super duplex (**25% de chrom**) sont appréciés pour **leur résistance mécanique**, de sorte qu'ils sont souvent utilisés sous de multiples formes **barres, pièces forgées, pièces moulées, tôles, plaques, tubes, boulonnerie, par** exemple. Les aciers super-duplex présentent également **une excellente résistance en fatigue** et une excellente compatibilité galvanique vis-à-vis d'autres aciers inoxydables fortement alliés.

Les ombilicaux servent au contrôle des têtes de puits, au moyen de circuits hydrauliques ; ils peuvent également être employés pour l'injection de produits chimiques. Depuis la mise sur le marché des ombilicaux en acier, ce sont les aciers duplex qui ont été le plus couramment utilisés. On note, ces dernières années, une tendance à l'exploration de champs sous-marins toujours plus profonds, ce qui nécessite des liaisons ombilicales plus longues.

L'augmentation de la résistance mécanique de l'acier permet de réduire le poids des ombilicaux et ainsi d'augmenter les longueurs. La tendance est également à une utilisation des ombilicaux dans des eaux plus chaudes et au développement de concepts consistant à introduire un riser dans la liaison, ce qui accroît encore la demande en matière de résistance à la corrosion et de résistance mécanique.

De nouveaux aciers inoxydables, **hyperduplex**, ont été développés à cet effet, avec une meilleure résistance à la corrosion et une meilleure résistance mécanique que les aciers inoxydables superduplex. [7].

CHAPITRE
II

Le
soudage des
aciers
inoxydables

II. LE SOUDAGE DES ACIERS INOXYDABLES

Introduction

L'assemblage des métaux différents a été le sujet de plusieurs investigations du fait de son haut potentiel technique et économique. Les matériaux à assembler peuvent avoir des températures de fusion, des conductivités thermiques et des coefficients de dilatation thermique très différents. En conséquence, les cordons peuvent se rompre pendant la solidification du bain fondu ou même pendant le service. La compatibilité métallurgique doit aussi être prise en compte pour prévenir la formation des phases intermétalliques fragiles. La règle générale à respecter pour l'assemblage **hétérogène** est d'obtenir une soudure au moins aussi résistante que le matériau le moins résistant des deux. Le problème de l'assemblage des matériaux métalliques de natures différentes est toujours **d'actualité** et il ne peut pas toujours être résolu par l'utilisation des techniques de soudage habituelles comme le soudage à l'arc, MIG, **TIG** etc. Par contre, les procédés comme le soudage par faisceau laser, par faisceau d'électrons et les techniques d'assemblage à l'état solide (assemblage par diffusion, soudage par explosion, soudage par friction, etc.) peuvent permettre d'aborder différemment les problèmes de soudabilité.

La distribution des publications consacrées aux différentes techniques d'assemblage hétérogène est présentée ci-dessous **Figure II.1**.

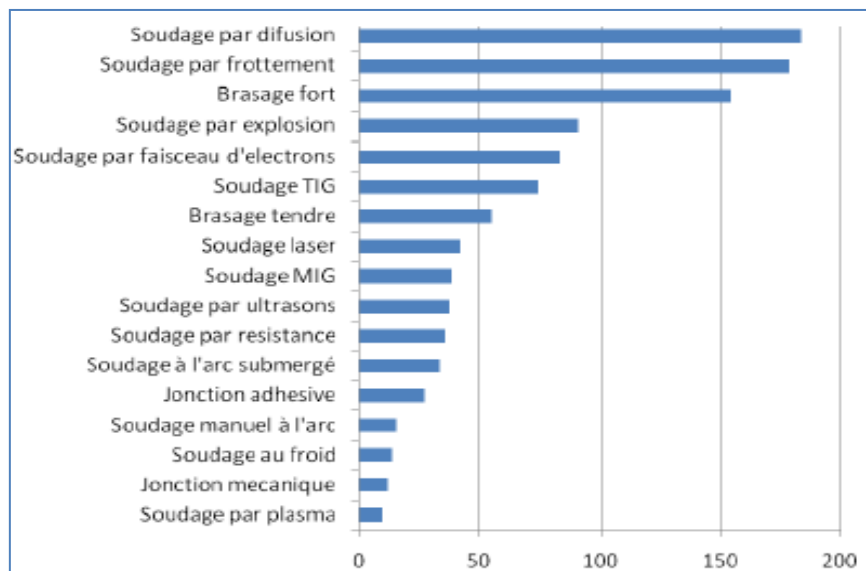


Figure II.1. Statistiques des publications dans le domaine de l'assemblage hétérogène (Methadex Database 1985-1994).

II.1. Définition du soudage

Le **soudage** est une technique d'assemblage permanent qui établit une continuité de nature entre les pièces soudées. Le terme soudure est utilisé pour désigner l'alliage reliant les pièces à assembler formé par la fusion des bords à assembler, avec ou sans adjonction d'un produit d'apport. La soudure peut donc être le résultat du seul mélange des matériaux de base (les matériaux à souder) ou du mélange des matériaux de base et d'un produit d'apport. En ce qui concerne les métaux, beaucoup sont soudables moyennant les études préalables requises pour la mise au point du mode opératoire ; citons les aciers (dits soudables), le cuivre, l'aluminium, le nickel et leurs alliages.

Lors du soudage, il y a fusion locale des éléments à assembler, contrairement à ce qui se passe dans le cas **du brasage** où il n'y a jamais fusion des matériaux à assembler.

II.2. Les procédés de soudage

Il existe de nombreux procédés de soudage dont les principes et la mise en œuvre sont très différents. Pour les uns l'assemblage est obtenu par fusion locale des éléments à assembler, pour d'autres, la continuité métallique est obtenue sans fusion par effets purement mécaniques. On peut aisément classer ces procédés en fonction des énergies mises en œuvre comme présenté sur la **Figure II.2** [8].

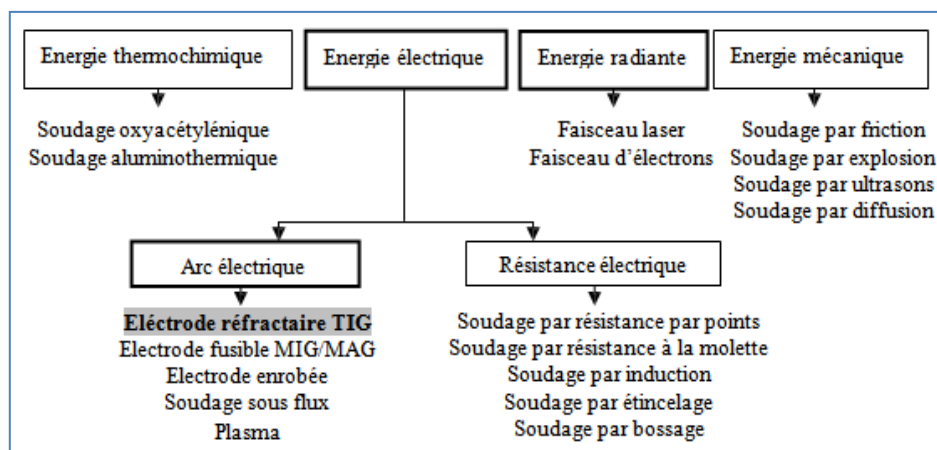


Figure II.2: Classification des procédés de soudage selon les différentes sources d'énergie [8].

Les procédés de soudage par fusion peuvent aussi être classés suivant l'intensité de la source d'énergie qui induit des différences de caractéristiques importantes sur les cordons de soudure **figure II.3**. L'énergie spécifique de chaque procédé agit sur la pénétration,

qui est le rapport de la profondeur de la soudure sur la largeur, et sur les caractéristiques mécaniques des cordons de soudure.

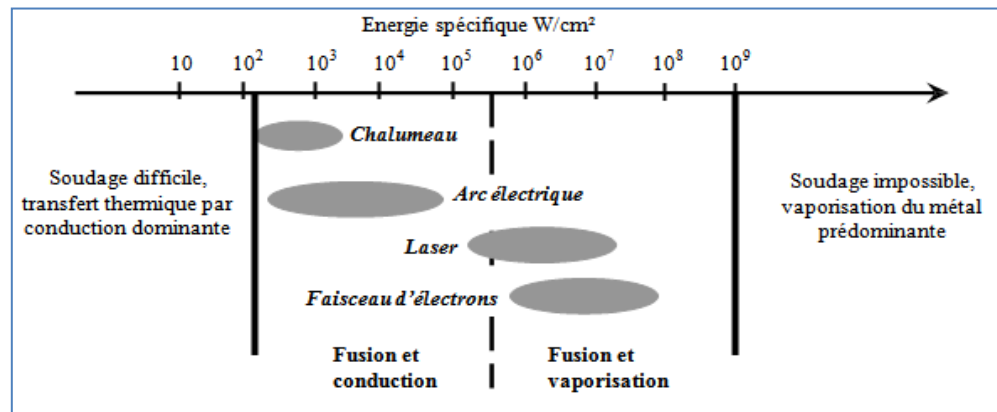


Figure II.3.: Energies spécifiques des différents procédés de soudage par fusion [8].

Le choix du procédé d'assemblage en conception industrielle dépend de multiples facteurs tels que la rentabilité économique, les contraintes d'assemblages et de conception, mais aussi l'assurance qualité des cordons de soudure pour satisfaire les conditions d'application finale.

Le soudage aujourd'hui est utilisé dans les domaines de la fabrication et des assemblages métalliques à partir de la microélectronique jusqu'à la fabrication de grand engins. On estime que 60 à 80% de la production mondiale de l'acier est destinée à la fabrication des produits soudés. On peut souder aujourd'hui des éléments d'épaisseur **de 0.01 mm jusqu'à 1000mm** et plus, on soude presque tous les métaux et alliages utilisés pour la remise en état des pièces et assemblages usés ou endommagés. [8]

II.3. Types de soudures

En ce qui concerne les métaux on distingue trois types de soudures :

- **La soudure homogène**, dans laquelle les métaux de base et le métal d'apport éventuel sont tous de même nature,
- **La soudure hétérogène de type « A »** qui associe des métaux de base de même nature avec un métal d'apport d'une autre nature,
- **La soudure hétérogène de type « B »** où les métaux de base et le métal d'apport sont tous trois de natures différentes.

II.3.1. Soudage de métaux dissemblables (hétérogène)

Il est souvent utile dans une construction soudée d'assembler des métaux ou alliages de nature différente. Ceci n'est pas toujours possible car il peut se former dans la zone de liaison des composés intermédiaire fragiles. Dans ce cas on a parfois recours à un troisième métal par exemple **cuivre**, **nickel** ou **argent**, qui ne présente pas d'incompatibilité avec l'un et l'autre des métaux de base. Cet alliage intermédiaire s'emploie comme métal d'apport soit sous forme d'un beurrage des bords [9].

Des métaux différents ont des conductibilités calorifiques différentes. L'opérateur devra diriger l'arc de préférence vers le métal le plus conducteur et, au besoin, le réchauffer.

	Ni	Cu-Ni	laiton	Cu-Al	Cu	Inox	Acier carbone
acier au carbone	R	R	R	P	P	P	R
Acier inox	R	P	N	P	P	R	
Cu	R	R	P	R	R		
Cu-Al	P	P	P	R			
Laiton	N	N	R				
Cu-Ni	R	R					
Ni	R						

N = non soudable
P = possible
R = recommandé

Tableau II.1 : représentant les possibilités d'assembler des métaux ou alliages de nature différente [9].

II.4. Le soudage TIG

II.4.1. Définition et Principe du soudage TIG :

4.1.1. Histoire du TIG

Le procédé TIG a été développé dans les années **1940** par une société, qui a ensuite intégré ESAB.

A l'origine, ce procédé fût utilisé pour souder des alliages résistants à la corrosion et des métaux, à l'époque difficiles à souder, tels que l'aluminium et les alliages de magnésium.

Le TIG s'est énormément développé et permet de réaliser la désoxydation et le soudage de toutes les nuances de métaux que l'on trouve sur le marché. [8]

4.1.2. Définition

Lorsque le soudeur actionne **la gâchette**, celle-ci actionne d'une part la sortie **du gaz**, et en même temps, il ferme le circuit électrique qui permet le passage du courant. si **le fil** est

suffisamment proche d'une pièce en contact avec la masse, il se crée un arc électrique d'une énergie suffisante pour fondre la matière. Le soudeur apporte **manuellement** (ou automatiquement sur certaines installations) **le métal d'apport** (d'un diamètre d'environ 0,8 mm à 4 mm) pour le mélanger à la matière et ainsi grossir la partie fondue en créant le cordon de soudure. Le tout s'exécute sous protection gazeuse. La soudure TIG a la particularité d'être exécutée sous protection de gaz inerte avec une électrode non fusible et réfractaire (en tungstène). Ce procédé s'appelle **Tungsten Inert Gas (TIG)** ou **Gaz Tungsten Arc Welding (GTAW)** aux USA. [8]

4.1.3. Principe du soudage TIG

A l'aide d'un courant électrique, on fait jaillir dans une **veine** d'argon un arc électrique entre une électrode infusible de tungstène et la pièce à souder de polarité opposée. (Cet arc électrique engendre un champ magnétique auto induit qui crée à son tour des forces de Lorentz qui vont entraîner le gaz en projection vers la surface de la pièce. L'énergie calorifique provenant du plasma constitué **des particules d'ionisation du gaz** de protection, **des électrons de l'arc électrique et d'éléments métalliques vaporisés**, permet de faire fondre localement la pièce formant ainsi le joint soudé après refroidissement [8].

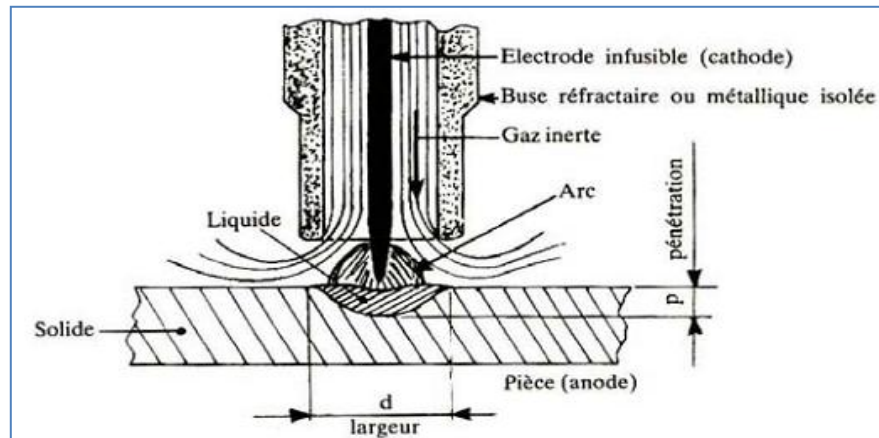


Figure II.4. : Principe du procédé de soudage TIG simple flux. [8]

4.1.4. Morphologie de la zone de fusion

La forme et la constitution du bain de fusion dépendent de multiples facteurs tels que la nature du matériau à souder, les caractéristiques de l'arc ou du plasma permettant la fusion du métal qui sont liées aux paramètres technologiques du procédé, et les mouvements du bain de fusion.

Les bains de fusion créés lors des opérations de soudage sont le siège de processus thermo-physiques très complexes mettant en jeu des phénomènes thermiques, convectifs, chimiques et électromagnétiques interdépendants selon la nature du procédé utilisé.

Ces mouvements de convection du métal liquide ou gazeux influencent de façon importante la forme du cordon et les transferts de chaleur pouvant induire des hétérogénéités (ségrégations) ou la présence de défauts tels que les inclusions ou porosités. D'une façon globale le bain de fusion est en équilibre sous l'action de forces aux effets variables. Ces forces d'origines différentes sont:

- les forces de gravité (ou flottabilité),
- les tensions superficielles (forces de Marangoni),
- la pression du plasma ou de l'arc en surface,
- les forces électromagnétiques (forces de Lorentz) pour les procédés de soudage à l'arc

Une partie seulement de l'énergie calorifique produite par l'arc sert au soudage, le reste étant perdu par **rayonnement, convection et conduction** dans le métal adjacent.

Ces forces ont une influence variable sur la forme du bain de fusion, sur les transferts thermiques ainsi que sur le brassage des éléments chimiques, selon le sens et la vitesse des mouvements des courants induits. [8]

II.4.2. Installation du soudage TIG : Figure (II.5)

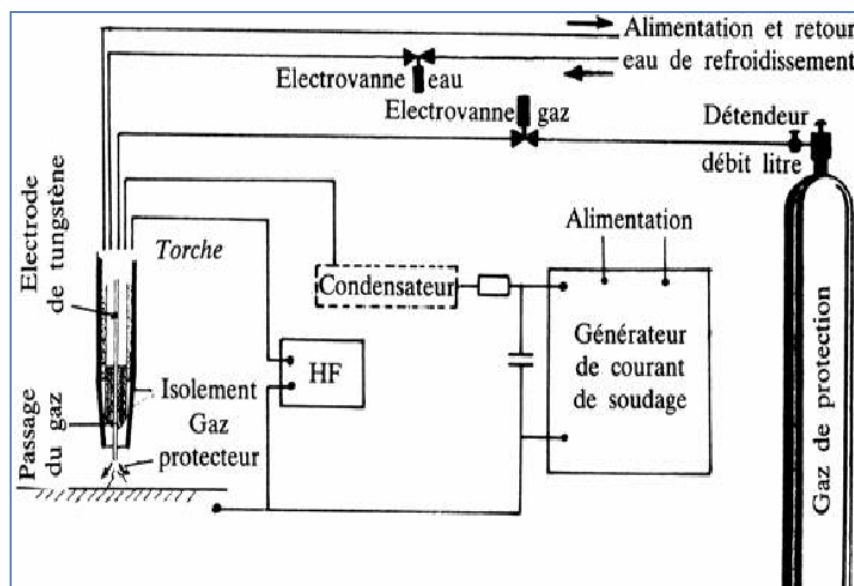


Figure II.5. : Schéma général d'installation du procédé TIG. [8]

II.4.3. Description de l'installation TIG

Une installation TIG comprend cinq composantes principales, **figure II.5**

- **La source de courant** fournit du courant de soudage qui peut être AC ou DC, et une tension de Soudage qui permet l'amorçage et le maintien de l'arc.
- **Le gaz de protection** est dirigé vers l'extrémité de l'électrode au tungstène afin de maintenir l'arc, de protéger le bain de soudage ainsi que l'électrode.
- **La torche munie d'un faisceau de câbles et tuyaux** distribuant le gaz, parfois l'eau. La tête de torche maintenant l'électrode réfractaire qui assure le transfert de courant. Ceci permet à l'arc de s'établir et de se maintenir allumé.
- **L'électrode non fusible au Tungstène** est montée sur la torche TIG et joue un rôle important dans Le procédé TIG. Pour obtenir de bons résultats il faut choisir parmi les différents types et les différents diamètres.
- **La masse doit être parfaite (conductrice)** afin d'assurer la fermeture du circuit électrique et garantir ainsi les amorçages et la stabilité de l'arc.

4.3.1. Alimentation électrique dans ce procédé de soudage

En fonction des matériaux, des dimensions et des épaisseurs à souder, on pourra souder **en courant continu à polarité directe, souder en courant pulsé, ou encore souder en courant alternatif :**

Le courant continu à polarité directe (pôle négatif à l'électrode) s'exécute pour le **soudage de tous les métaux**, y compris de l'aluminium (avec certaines précautions à prendre)

- **le courant pulsé**, qui consiste à développer des périodes de hautes et de basses intensités, pour réduire le volume de métal fondu. Ceci facilite le travail en position et **le soudage des faibles épaisseurs** avec une meilleure régularité, surtout au niveau des pénétrations.
- **le courant alternatif** est principalement utilisé pour le **soudage des alliages d'aluminium**.

L'alternance de polarité craque ainsi la couche d'alumine réfractaire pour permettre ensuite la pénétration.

4.3.2. Gaz utilisés en procédé TIG

- **l'argon** pur est le plus couramment utilisé en **soudage TIG**.
- **l'hélium** utilisé en complément à l'argon, l'arc développe une énergie plus importante et donc des performances accrues du fait de vitesse plus grande. Le coût du soudage est plus important cependant.

- **l'hydrogène** utilisé en addition avec l'argon permet lui aussi d'obtenir un arc plus énergétique, donc **une vitesse de soudage améliorée**. En outre, une pénétration plus importante est constatée ainsi qu'un aspect **plus esthétique du cordon de soudure**.
- **l'azote** peut aussi être utilisé en complément à l'argon et en très petite quantité pour souder des aciers duplex.

4.3.3. Les électrodes non fusibles

On peut considérer qu'il existe **quatre types d'électrodes** non fusibles qui peuvent être utilisées en soudage TIG:

- **Tungstène pur** (extrémité verte) utilisée pour les courants alternatifs (alliages d'aluminium).
- **Tungstène avec oxyde de zirconium** utilisé aussi en courant alternatifs (alliages d'aluminium).
- **Tungstène thorié** (couleur d'extrémité rouge) utilisée pour les aciers de construction et aciers **inoxydables**.
- **Tungstène cérié** qui est moins utilisés.

4.3.4. Paramètres ayant une influence sur la soudure TIG :

- la vitesse de soudage (**avance du soudeur**)
- le choix et le débit du **gaz**
- le choix et le débit du **métal d'apport**
- le choix, l'affûtage et le diamètre de **l'électrode réfractaire**
- la position de soudage (**bout a bout**, T, V,....etc.)
- la préparation des bords à souder
- la dimension et la nature des **matériaux à souder**.

II.5. Caractéristiques de la soudure

II.5.1. Définition

Le soudage est le procédé qui permet de reconstituer la continuité métallique entre les surfaces des éléments à assembler. Pour activer les surfaces, la fusion est une méthode très efficace qui permet également le nettoyage des surfaces afin d'assurer l'installation de la liaison métallique. On obtient ainsi, après solidification, un joint homogène de même composition que le métal de base, ou un joint hétérogène dans le cas de métaux différents. Quel que soit le procédé de soudage par fusion, la structure d'une soudure typique d'un alliage est composée de 6 zones principales [10] **figure II.6**.

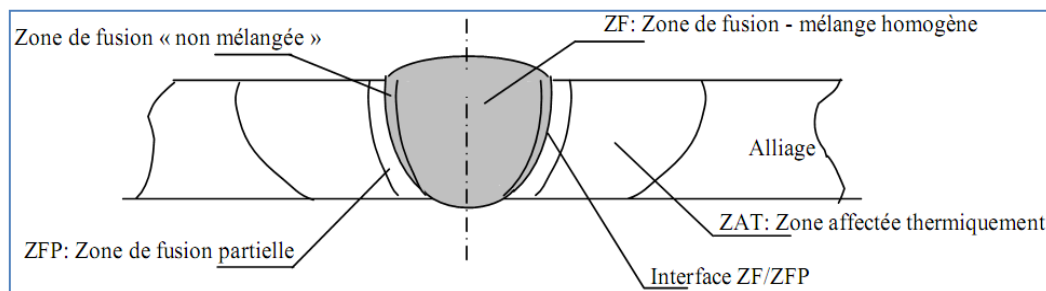


Figure II.6: Variété de macrostructures dans un cordon de soudure par fusion.

II.5.2. Notion de la macrostructure d'un cordon de soudure

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 II.6.**

- **Métal de base (MB)** Le métal de base, est la partie de l'assemblage qui ne subit aucune action thermique.
- **La zone de fusion (ZF) mélange homogène :** est la région chauffée au dessus de la température du liquidus. La structure du métal de base initial est changée par les processus de fusion et solidification, et la composition peut également varier par évaporation de certains éléments de l'alliage. Un mélange complet des éléments est obtenu par les mouvements de convection forcée.
- **La zone de fusion (ZF) non mélangée :** dans cette zone les forces de convection étant inférieures aux forces de friction des fluides, la composition chimique est identique à celle du métal de base. Même si cette zone est présente dans toutes les soudures, elle n'est facilement visible que dans les soudures utilisant un métal d'apport de composition chimique différente du métal de base.
- **Zone fondu partiellement (ZFP):** le cycle thermique de soudage s'opère dans cette zone à des températures comprises entre le liquidus et le solidus de l'alliage. Dans certains alliages contenant des inclusions et des impuretés à bas points de fusion, ou des ségrégations d'élément d'alliages aux joints de grains, la liquation de ces régions microscopiques peut se produire et s'étendre de l'interface de soudure à l'intérieure de la zoner de fusion partielle.

- **Zone affectée thermiquement (ZAT)** : est la zone où la température est comprise entre le solidus et une température plus basse mais suffisamment élevée pour permettre des réactions ou des transformations à l'état solide et pour modifier la structure du métal de base. [11]

II.5.3. Les cycles thermiques de soudage

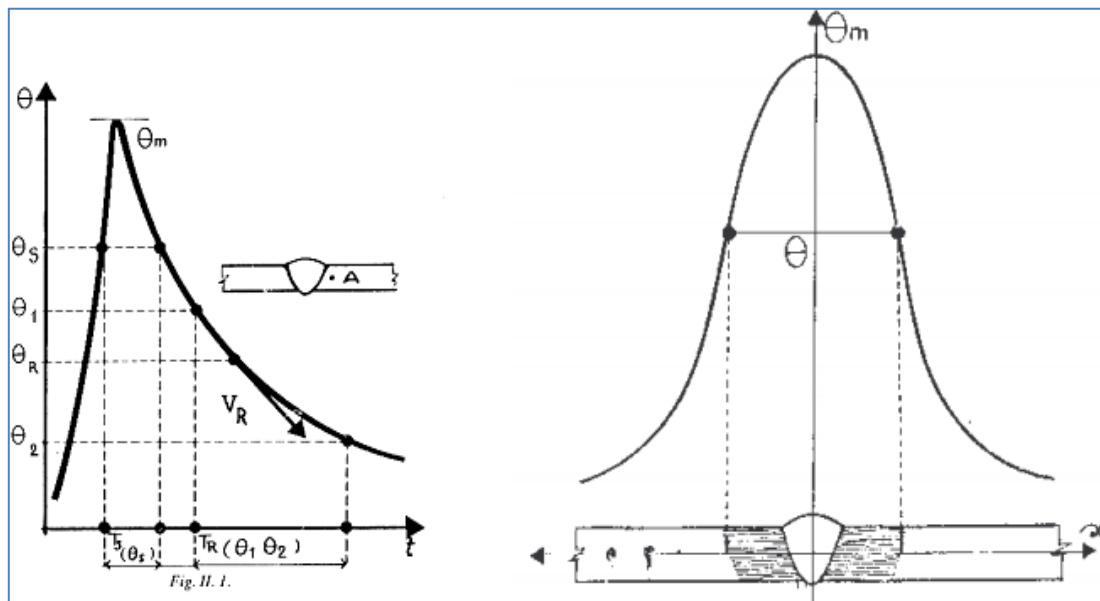
Pendant que la source de chaleur (arc ou flamme) se déplace le long des bords à souder, le matériau environnant s'échauffe, atteint une température maximale, puis se refroidit. L'apport localisé de la chaleur et l'écoulement de celle-ci engendrent des cycles thermiques qui permettent de connaître l'importance des modifications locales créées, donc d'évaluer selon le milieu et les conditions de service, la tenue des constructions soudées dans les zones ainsi affectées. Pour interpréter les phénomènes qui prennent naissance pendant l'opération de soudage en un point donné de l'assemblage, il faut donc connaître le cycle thermique de soudage, c'est-à-dire la variation de la température θ en fonction du temps. La courbe correspondante $\theta = f(t)$, tracée en un **point A** voisin d'une soudure (**figure II.7**), nous renseigne sur les grandeurs associées au cycle thermique.

- La température maximale atteinte θ_m
- Le temps de séjour T_s au-dessus d'une température θ_s
- Le temps de refroidissement entre deux températures θ_1 et θ_2
- $Tr(\theta_1, \theta_2)$, ou la vitesse de refroidissement V_r à une température θ_r .

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 II.8**) donnant la variation à la distance **X**.

Parcourue de part et d'autre de la zone fondue. Chaque phénomène étant caractérisé, comme première condition, par la température 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 II.7. : $\theta = f(t)$ Figure II.8. : $\theta_m = f(x)$

Figures II (7.8) : Influence du cycle thermique sur la zone affectée thermiquement.

II.5.4. Aspects métallurgiques du soudage de l'acier

Les caractéristiques d'un acier sont fonction de sa nature et de sa composition chimique, la structure étant elle-même liée à la composition chimique et au traitement thermique que subit l'acier. Les principes généraux de la métallurgie (composition chimique, transformation d'état de structure, modifications chimiques), s'appliquent aux caractéristiques mécaniques et chimiques, de la zone fondue des soudures. L'examen métallographique de la soudure fait apparaître une grande diversité de structures. On observe pour chaque joint soudé divers aspects qui rendent compte de la variation du cycle thermique subi en chaque point examiné. La température et le temps de chauffage ainsi que les vitesses de refroidissement produisent des modifications qui affectent la dimension des grains et les phases en présence. Parce que le bain de fusion a un volume relativement restreint, son refroidissement est rapide et les cristaux qui se solidifient sont orientés dans la direction du gradient de température. **Leur dimension dépend de la température et de la cinétique de refroidissement.** Qui donne une représentation schématique d'un joint soudé perpendiculairement à la ligne de fusion.

On distingue plusieurs zones: **figure (II.9) [11]**.

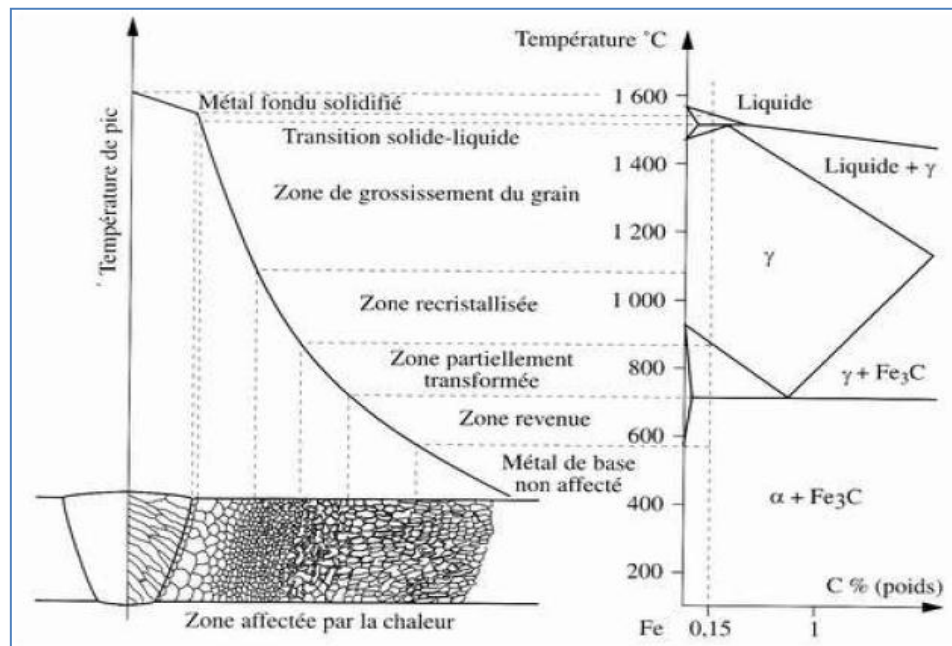


Figure. II.9. : Représentation schématique des différentes zones
D'un joint soudé en Acier.

II.5.5. Effet des paramètres de soudage

Les paramètres de soudage contrôlent la forme, les dimensions et les structures des régions chauffées du cordon de soudure.

L'énergie nécessaire à la fusion du métal, qui dépend des paramètres puissance et vitesse de soudage, contrôle la vitesse de refroidissement.

La vitesse de soudage régit directement la vitesse de croissance du front de solidification et donc également la forme du bain de fusion.

La structure et le mode de croissance des grains dépendent de l'apport **calorifique linéaire**.

La croissance des grains devient plus rapide et donne lieu à une structure grossière avec un apport calorifique croissant alors qu'une structure fine est obtenue avec une énergie linéaire modérée.

Ces paramètres affectent également les contraintes thermiques induites qui s'appliquent sur la soudure et qui entraînent la formation de **contraintes résiduelles** et **des distorsions géométriques**.

II.6. Les défauts et les problèmes du soudage

II.6.1. Définition et différents types de défauts

Une définition possible de ce qu'on entend par défaut pourrait être «Accident géométrique autre que ceux inhérents aux cordons de soudure proprement dits ».

On rencontre donc, entrant dans cette définition, toutes les entailles inhabituelles présentées par le cordon de soudure et son voisinage immédiat. On citera, en se référant par exemple à la classification suivante :

- les fissures.
 - les cavités.
 - les inclusions solides.
 - les manques de fusion et de pénétration.
 - les défauts de forme.
 - les autres défauts.
- Les fissures sont des ruptures qui sont provoqués en générale durant le refroidissement, par des contraintes exercées sur les structures au cours de solidification, éventuellement fragilisées, notamment par la présence d'hydrogène (**figure II.10**).

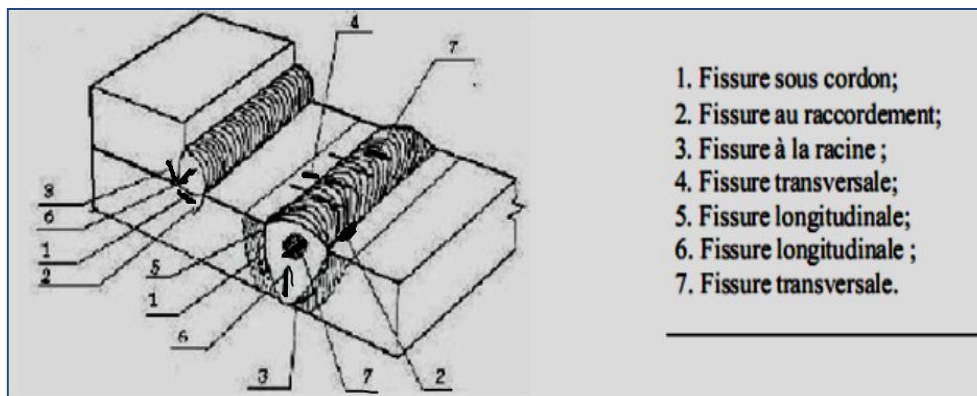


Figure (II.10) : les différentes fissurations à froid [11].

L'orientation et la localisation des fissures dépendent de leur origine. Elles entrent toutefois, d'une manière systématique dans la famille des défauts plans c'est-à-dire des défauts dont l'une des dimensions est très petite devant les deux autres et dont le pourtour constitue, par conséquent, une entaille particulièrement aigüe.

Les cavités, appartiennent à la famille des **défauts volumiques** et peuvent résulter de mécanismes différents. On distinguera :

- **Les retassures** : suite à un retrait du métal lors de son refroidissement, l'espace vide formé apparaît visuellement à la surface du cordon, ainsi qu'à l'intérieur du cordon.

- **Les soufflures** : formées par des gaz emprisonnés lors de la solidification, qui se présente sous la forme des bulles.

- **Les inclusions** solides constituées de particules de laitier ou d'oxydes.

Les manques de fusion ou collages résultent d'une absence de liaison entre le métal fondue et le métal de base tandis que les manques de pénétration représentent l'absence de fusion des bords à souder lors de la première passe. Ces défauts sont également des **défauts plans**.

Les défauts de forme sont particulièrement nombreux et on citera, sans y insister :

- Les surépaisseurs excessives et les effondrements
- Les défauts d'alignement
- Les caniveaux.

Enfin, on rencontre d'autres défauts tels que les coups de meule, les morsures d'arc les coups de burin, ...etc. dont l'acuité est variable [11].

Le tableau(II.2) présente un aperçu de tous les problèmes qui peuvent se poser lors du soudage TIG et ainsi que les causes possibles et les remèdes.

SOUDAGE TIG		
PROBLEMES	CAUSES POSSIBLES	REMEDES
GRANDE CONSOMMATION D'ELECTRODES	<ol style="list-style-type: none"> 1 Débit insuffisant de gaz de protection 2 DCEP (électrode positive) 3 Diamètre de l'électrode non approprié au courant de soudage 4 Echauffement excessif dans le pistolet 5 Electrode contaminée 6 Oxydation de l'électrode lors du refroidissement 7 Le gaz de protection contient de l'oxygène ou du CO₂ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Augmenter le débit de gaz 2. Prendre une électrode de plus grand diamètre ou passer au DCEN 3. Prendre une électrode de plus grand diamètre 4. Contrôler si le porte-électrode assure bien le contact 5. Eliminer la contamination en meulant l'électrode. La soudure sera toujours mauvaise aussi longtemps que la contamination subsiste. 6. Régler le flux de gaz à l'arrêt du soudage entre 10 et 15 s 7. Utiliser un gaz correct.
ARC INCORRECT	<ol style="list-style-type: none"> 1 Matériau à souder sale ou gras 2 Joint trop étroit 3 Electrode contaminée 4 Arc trop long 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Nettoyer avec des produits chimiques, une brosse ou des produits abrasifs. 2. Mettre un joint plus large, placer l'électrode plus près de la pièce. 3. Eliminer la contamination, meuler l'électrode 4. Diminuer la distance torche-pièce.
POROSITES	<ol style="list-style-type: none"> 1 Inclus. de gaz (hydrogène, azote, air, vapeur d'eau) 2 Tuyaux de gaz défectueux et/ou mauvais raccordement des tuyaux 3 Film d'huile sur le métal de base 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Purger les conduites avant de démarrer l'arc, utiliser un gaz ayant un degré de pureté correct (99,99%) 2. Contrôler les tuyaux et les raccordements (fuites). Arc trop long 3. Utiliser un nettoyeur chimique. Ne pas souder quand le métal est humide.
CONTAMINATION DE LA SOUDURE PAR LE TUNGSTENE	<ol style="list-style-type: none"> 1 Electrode en contact avec la pièce lors du démarrage. 2 Fusion de l'électrode 3 L'électrode de tungstène touche le bain de fusion. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Démarrer en HF, utiliser une plaquette en cuivre pour amorcer l'arc. 2. Souder avec courant plus faible ou prendre une électrode de plus. Grand diamètre, utiliser une électrode appropriée pour le matériau à souder. 3. Ne pas mettre en contact l'électrode de tungstène avec le bain de fusion.

Tableau .II.2. Aperçu des problèmes avec causes et remèdes associés au soudage TIG[12].

II.7. Applications du soudage TIG

- la réalisation d'ouvrages alimentaires.
- la chaudronnerie d'acier inoxydable.
- l'industrie aéronautique et spatiale.
- la carrosserie.
- plus généralement, les entreprises travaillant des matériaux à bases **d'aciers inoxydables** et d'alliages légers.

II.8. Les Avantages et inconvénients du soudage TIG:

A- Les avantages:

- large gamme d'épaisseurs à souder ;
- simple d'emploi ;
- travail précis et esthétique ;
- peu de fumées ;
- soudage dans toutes les positions ;
- procédé automatisable ;

B- Les Inconvénients:

- Productivité inférieure au MIG/MAG ;
- Énergie de soudage supérieure au MIG/MAG ;
- Pas compatible avec les environnements poussiéreux et enfumés.

CHAPITRE
III

Matériaux et
Techniques
Expérimentales

INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous exposerons les différentes techniques expérimentales et de caractérisation utilisées dans ce travail plus une simulation numérique de l'essai de traction. Nous aborderons le principe de fonctionnement et le mode opératoire de chaque appareillage ainsi que les paramètres d'expérience.

III.1. RÉALISATION DES SOUDURES

III.1.1 Présentation du joint soudé

Le joint soudé de l'étude est un joint en bout-à-bout de deux tubes en aciers inoxydables, le premier est un Supermartensitique dont la composition chimique est donnée dans le tableau (III.1) et les caractéristiques mécaniques par le tableau (III.2)

Élément	Cr	Ni	C	Mn	P	S	Ti
Taux en %	13	7	0.015	1	0.02	0.005	0.15
Élément	Mo	N	Nb	Si	B	Al	Cu
Taux en %	2.5	0.01	0.05	0.05	0.0005	0.055	0.25

TABLEAU (III.1). Composition chimique en pourcentage massique de l'acier inoxydable "Supermartensitique"

Ses caractéristiques mécaniques sont données par le **tableau (III.2)**

Limite d'élasticité moyenne à 0.2%	Résistance à la traction moyenne Rm	Allongement à la rupture A%
650 MPa	850 MPa	22%

Tableau (III.2). "Caractéristiques mécaniques de traction simple à la température T = 20°C"

Le deuxième tube est un duplex (austénoferritique) A790 GR selon la norme ASTM, sa composition chimique est donnée dans le **tableau (III.3):**

Élément	Cr	Ni	C	Mn	P	S	Cu
Taux en %	25.46	6.9	0.021	0.48	0.022	0.0007	0.61
Élément	Mo	N	Si	W			
Taux en %	3.65	0.25	0.49	0.64			

Tableau III.3. "Composition chimique en pourcentage massique de l'acier inoxydable duplex A790 GR".

Ses caractéristiques mécaniques à la température ambiante sont données par le **Tableau (III.4)** :

Limite d'élasticité à 0.2% d'allongement $Re_{0.2\%}$	Résistance à la traction R_m	Allongement à la rupture moyen $A\%$
653 Mpa	790 Mpa	28,2%

Tableau III.4. "Caractéristiques mécaniques de traction simple à la température $T = 20^\circ\text{C}$ ".

Le métal d'apport est austéno-ferritique (superduplex) dont la nuance est DP-3WT. Sa composition chimique et ses caractéristiques mécaniques sont données par **les tableaux (III.5) et (III.6)** respectivement :

Élément	Cr	Ni	C	Mo	Cu	Si	N	W
Taux en %	25.1	6.7	0.02	3.5	0.5	0.4	0.3	2

Tableau III.5. "Composition chimique en pourcentage massique de l'acier inoxydable duplex DP-3WT".

Limite d'élasticité à 0.2% d'allongement $Re_{0.2\%}$	Résistance à la traction R_m	Allongement à la rupture $A\%$
550 Mpa	800 Mpa	15%

Tableau III.6. "Caractéristiques mécaniques de traction simple à la température $T = 20^\circ\text{C}$ ".

III.1.2. Le soudage des tubes

L'assemblage des deux tubes a été réalisé par ENGTP (Entreprise Nationale de Grands Travaux Pétroliers).

On utilisant le procédé TIG. La jonction est faite en 5 passes (Tableau III.7).

La préparation des bords des deux tubes à joindre par un chanfrein en V est nécessaire avant l'exécution de l'opération du soudage. Les dimensions du chanfrein dépendent de la géométrie et de la nature métallurgique de la zone à souder et de la procédure de soudage utilisé. Ces dimensions sont données dans la figure III.1 :

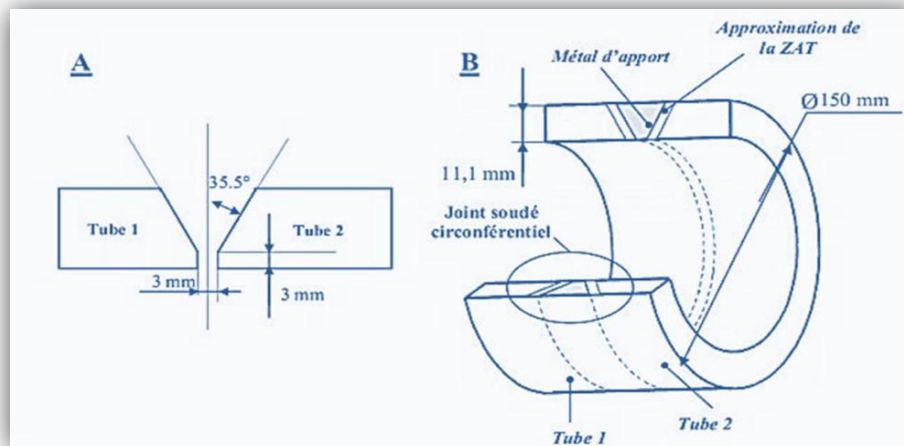


Figure III.1. "Joint soudé hétérogène".

A) Le joint circconférentiel de rabotement des deux tubes.

B) Géométrie de la section du joint. Le tube 1 en acier duplex, le tube 2 en acier martensitique

i. Application au soudage multi passes.

Dans ce cas, chaque passe superpose son cycle thermique à celui de la passe précédente, provoquant ainsi une évolution des structures et des propriétés résultantes. Pour un point situé dans la zone affectée par la première passe, on peut noter (**Figure III.2**) que:

- la température maximale atteinte baisse,
- la vitesse de refroidissement diminue.

Il en résulte que le cycle le plus sévère est celui de la première passe.

Par ailleurs, chaque passe provoque une régénération structurale de métal fondu et du métal de base (pour les aciers possédant un point de transformation allotropique).

Pour un point situé dans la zone affectée par la dernière passe, on note que :

- le cycle le plus sévère est le dernier,
- ce cycle est moins sévère que celui du point situé près du premier cordon,
- il n'y a pas régénération de la structure.

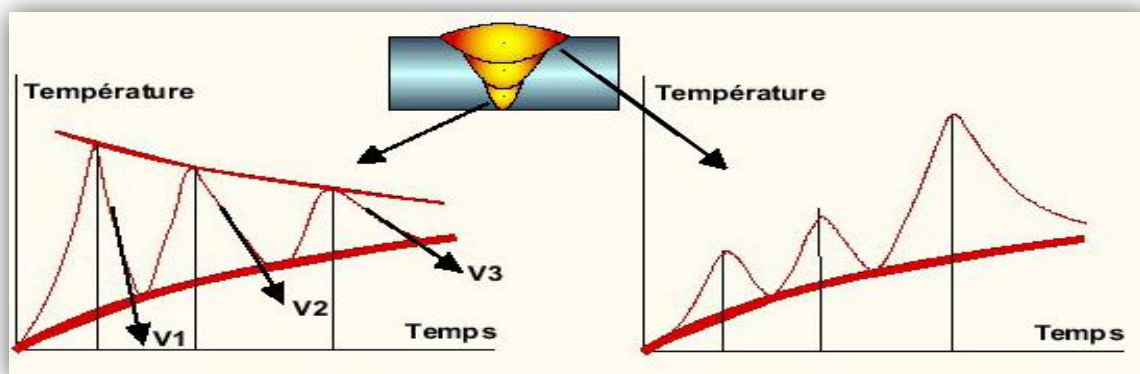


FIGURE III.2. Soudage multi passes.

ii. Comment choisir le métal d'apport acceptable ?

Pour choisir le métal d'apport correct (soudable, compatible, etc.) on utilise des modèles approximatifs. Plusieurs modèles approximatifs ont été mis au point pour prévoir le comportement de l'alliage en fonction de la composition globale de l'alliage. Les teneurs sont affectées de coefficients établis par expérience afin de tenir compte du poids de chacun des éléments. Il existe également le **modèle de Schaeffler** et le modèle de Delong pour les aciers inoxydables à l'état brut de soudage.

- **Modèle de Schaeffler :**

- chrome équivalent : $(Cr)_{eq} = (\%Cr) + 1,5(\%Si) + (\%Mo) + 0,5(\%Nb)$;

- nickel équivalent : $(Ni)_{eq} = (\%Ni) + 0,5(\%Mn) + 30(\%C)$.

- **Modèle de Delong :**

- chrome équivalent : $(Cr)_{eq} = (\%Cr) + 1,5(\%Si) + (\%Mo) + 0,5(\%Nb)$;

- nickel équivalent : $(Ni)_{eq} = (\%Ni) + 0,5(\%Mn) + 30(\%C) + 30(\%N)$.

Contrairement au modèle de Schaeffler, le modèle de Delong prend en compte l'azote.

ANNEX II.

III.2. Contrôle et Caractérisations De La Soudure Hétérogène

III.2.1. Méthode de prélèvement des échantillons

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 E8. (Voir **figure III.3** ci- dessous)

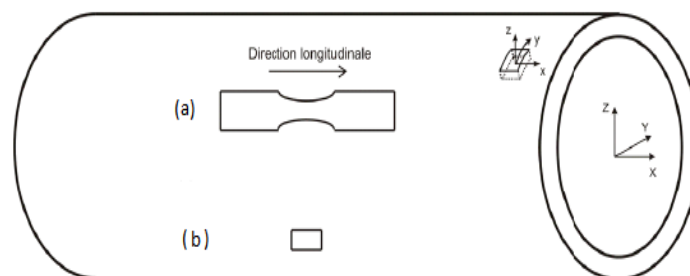


Figure III.3 : Méthode de prélèvement des éprouvettes

(a) Eprouvettes de tractions

(b) Eprouvettes de caractérisation.

Pour les essais de traction et de micro dureté, 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 **ASTM E8** prise en compte. Les

éprouvettes seront soumises par la suite à une machine de traction apte à donner la charge à laquelle la rupture a lieu.

III.2.2. Caractérisation structurale du joint soudé

Elle comprend la caractérisation macro et microstructurale de l'échantillon.

2.2.1. Examen macrographique

La macrographie permet la délimitation des différentes zones qui constituent le cordon de soudure à savoir **la zone fondue, la ZAT et le métal de base.**

2.2.1.1. Préparation de la surface d'examen

La réalisation de la surface d'examen nécessite une suite d'opérations normalisées et bien ordonnées chronologiquement.

i. Prélèvement des échantillons

Les échantillons sont prélevés à partir du tube soudé par une scie mécanique. Pour éviter l'échauffement de la surface du matériau à usiner, on procède à un découpage à froid avec une lubrification continue.

ii. Polissage grossier ou abrasion

Après le découpage, nous passons les éprouvettes sur une surfaceuse à disque abrasif (polisseuse). C'est une opération mécanique qui permet d'avoir des états de surface semblable à celui **d'un miroir**. Ce polissage s'effectue en plusieurs étapes avec des disques en papiers abrasifs de différentes granulométrie des grains abrasif en carbure de silicium (du plus gros au plus fin : 180, 400, 600, 800, 1000, 1200 et 4000) qui tournent avec une vitesse de 150 tr/mn, jusqu'à 600 tr/min. Cette opération se fait sous aspersion d'eau pour éviter l'échauffement de l'échantillon. Le polissage a été réalisé au niveau du Laboratoire de recherche en Fiabilité des Equipements Pétroliers et Matériaux (LFEPM) du Département de transport et équipements des hydrocarbures de la FHC/UMBB.

Ordre des opérations de polissage	Granulométrie utilisée	Durée	Vitesse de polissage
1	800	15 min	600 tr/min
2	1000	15 min	600 tr/min
3	1200	15 min	600 tr/min
4	2400	15 min	600 tr/min
5	4000	15 min	300 tr/min

Tableau III.8 "Illustration des opérations de polissage effectuées" au LFEPM/FHC/UMBB.

iii. Polissage de finition

Le polissage de finition est réalisé à la pâte d'allumine répartie sur un feutre fin de 0.3 μm , permet d'obtenir une surface finie miroir.

Ordre des opérations de polissage	Taille de grain de la pâte d'alumine	Durée	Vitesse de polissage
6	0.3 μm	20 min	250 tr/min

Tableau III.9. "Paramètres du polissage de finition " (LFEPM/ FHC/UMBB).

2.2.1.2. Révélation de la macrographie du joint de soudure

La distinction des différentes zones du joint soudé après le polissage est difficile, c'est pour cela que l'on utilise l'attaque électrolytique ou l'attaque chimique. Dans notre cas on a utilisé l'attaque chimique. Les réactifs de la solution d'attaque chimique classique et le temps sont présentés dans le **tableau (III.10)**

Nom	Composition	Durée
VELLILA	92.5 ml D'éthanol 2,5 g d'acide picrique 5 ml d'acide hydrochlorique	De 30 à 40 s

Tableau III.10. "Solution d'attaque chimique classique ".

La macrographie a été réalisée au niveau du **Laboratoire de métallurgie du Centre de soudage et contrôle (LM/CSC)**.

2.2.2. Examen micrographique

L'examen micrographique (Réalisée au niveau du laboratoire **DMM/CSC**) est nécessaire pour la visualisation des propriétés structurales. Cette technique permet d'avoir des renseignements sur chaque zone de la soudure. On utilisera les mêmes démarches que celles citées précédemment pour la préparation de la macrographie. (**Tableau III.11**) Pour les trois aciers de soudure, on a utilisé une deuxième attaque chimique classique pour la révélation de la morphologie de la structure totale (joints de grains/macles).

Nom	Composition	Durée
Glycerigia	Glycerin 30 ml HCL 20-50 ml HNO ₃ 10 ml	De 30 à 40 s

Tableau III.11. "Réactifs utilisées pour la révélation micro-structurale".

Le moyen d'observation utilisé est un microscope optique type (**Nikon** ECLIPSE LV100ND) doté d'une caméra numérique NIKON reliée à un logiciel d'acquisition d'image et de traitement des résultats . (**Figure III.4**)

La métallographie micro et macroscopique a pour but de mettre en évidence les constituants de la microstructure. c'est une technique très utilisée dans les divers travaux réalisés sur le soudage des aciers inoxydables. Dans notre cas, elle permet d'apprécier l'évolution des transformations microstructurales des différentes zones (ZF, ZL, ZAT, MB). Cela peut aussi nous permettre d'observer les phases grossières.

La microscopie est faite à l'aide d'un microscope optique utilisant une source lumineuse qui envoie la lumière sur l'échantillon à travers un dispositif optique. Les rayonnements réfléchis par l'échantillon sont repris par la lentille objective qui donne une première image intermédiaire qui grâce à un miroir semi-réfléchissant, elle est renvoyée vers l'œil du manipulateur à travers une lentille oculaire. L'appareil permet également d'obtenir des photos sur un micro-ordinateur à travers une caméra solidaire. contenant un logiciel d'acquisition et de traitement des résultats. Le microscope utilisé est de marque **Nikon** ECLIPSE LV100ND doté d'une caméra NIKON CCD.



Figure III.4 : Microscope optique, (Laboratoire de métallurgie du **CSC**).

III.2.3. Caractérisations mécanique (control destructif)

Elle comprend les essais mécaniques : de traction, de dureté.

2.3.1. Essais de traction

i. Réalisation des l'essai de traction

Ces essais ont été réalisés au sein du laboratoire du CSC, avec une machine d'essais hydraulique de type ZWICK ROELL Z050 et commandé par ordinateur. Les essais sont faits avec à une vitesse de déformation constante.

Les principales caractéristiques mesurées à partir de ces essais sont :

- la limite d'élasticité, R_e
- la résistance à la traction, R_m
- l'allongement à la rupture, $A\%$.

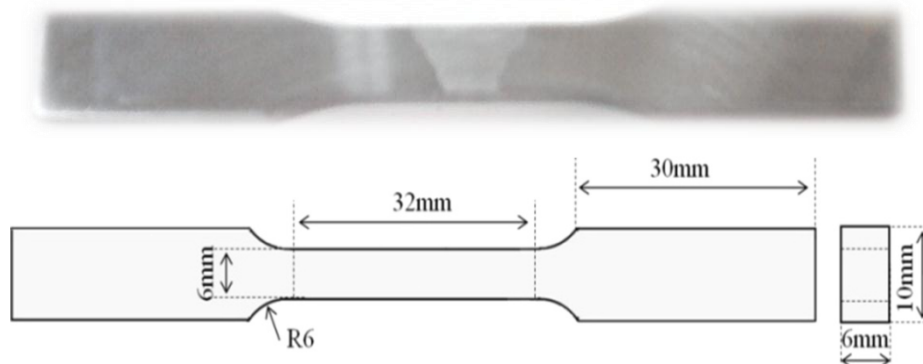


Figure III.5. Dimensions de l'éprouvette de traction selon ASTM E8.

L'essai de traction consiste à exercer une déformation croissante sur un barreau prismatique et à mesurer l'évolution de la force nécessaire pour le déformer jusqu'à sa rupture.



Figure III.6. Machine de l'essai de traction de type **ZWICK ROELL Z050**.

ii. le comportement d'une éprouvette métallique soumise à la traction

Ces modélisations sont les premières qui sont habituellement utilisées pour décrire analytiquement le comportement d'une éprouvette métallique soumise à la traction.

- **Comportement élastique**

Dans le domaine élastique, la déformation longitudinale est proportionnelle à la contrainte.

Ce comportement est traduit par la relation unidimensionnelle.

$$\sigma = E \varepsilon \quad (\text{III a.1})$$

E étant le module de Young (exprimé en Mpa).

- **Comportement plastique**

Les mécaniciens ont souvent cherché une représentation analytique du domaine plastique des courbes obtenues en traction. Pour notre cas nous avons opté pour la relation d'Hollomon des aciers doux.

2.3.2. Essais de durté

i. Définition

La durté est la résistance d'un matériau à une pénétration locale. C'est une propriété physique complexe à interpréter et qui dépend des caractéristiques du matériau. La mesure de la durté est un moyen efficace et largement utilisé dans l'industrie pour vérifier l'évolution d'une pièce mécanique. Elle permet de plus d'apprécier, dans une certaine mesure, la résistance mécanique et la difficulté d'usinage d'un matériau. Il existe plusieurs méthodes de mesure de la durté. Les plus courantes consistent en la mesure de la résistance à la pénétration. Ces méthodes sont la durté **Brinell**, **Rockwell** et **Vickers..etc.**

ii. Réalisation des essais De Durté et microdurté Vickers

Les mesures de micro-durté sont faites sur un micro-duromètre au laboratoire de Métallurgie du CSC. Les essais de durté ont été réalisés sur une machine de durté universelle de type INOVATEST NEMESIS 9000 (**figure III.7**).

Nous avons choisi l'essai Vickers, qui est effectué avec un pénétrateur en diamant de forme pyramidale à base carrée. L'angle entre deux faces opposées de cette pyramide est de 136° . La valeur de la durté Vickers HV est le rapport de la charge F qui est égale à **10 Kgf** à la surface S de l'empreinte comme le montre la relation (III b.1).

$$HV = F / [d^2 / 2 \sin (136^\circ / 2)] \dots\dots\dots \text{(III b.1)}$$

$$HV = 1.8544 * 0.102F / D^2$$

Avec **d**: Diagonal de l'empreinte **F**: Charge appliqué

Les essais de **durté** permettent d'avoir une idée générale sur l'évolution de la durté d'un matériau, sur la soudure hétérogène. Les mesures de la durté et de micro-durté moyenne *Vickers* ont été effectuées sur la surface des échantillons traités, polis mécaniquement et attaqués. Tableau **III.12**

Essai	Charges appliquée F	Temps de maintien
Durté	10 kgf	16 s à 20 s

Tableau III.12 les paramètres appliqués pour l'essai de durté.



Figure III.7 : Machine de dureté universelle TYPE INOVATEST NEMESIS 9000

Brinell, **Vickers** et Rockwell, du laboratoire de métallurgie au CSC.

III.2.4. Contrôle non destructif

L'une des étapes qui a suivi le soudage est le contrôle non destructif. Celui-ci comprend :

- Le contrôle visuel;
- le contrôle par ultra-sons.

2.4.1. Contrôle visuel :

l'objectif est de vérifier les irrégularités du cordon de soudure (défauts de formes) ou les défauts débouchant et apparents telles que les porosités, les fissures.

2.4.2. Contrôle par Ultra-sons

i. Définition

Un ultrason est un son de très haute fréquence, supérieure à 20000 Hz, (Hz = nombre de vibrations par seconde) inaudible par l'oreille humaine, seulement perceptible par certains animaux.

ii. Principe

Un ultrason (de même qu'un son) est une onde mécanique longitudinale qui nécessite un support matériel de propagation (milieu solide, liquide ou gazeux). Il se propage par changement de pression dans le milieu où il circule. Ces variations de pression entre les

différentes particules du milieu sont à l'origine du mouvement ondulatoire.

- Les ultrasons se propagent à une vitesse qui est fonction de la nature du milieu (indépendamment de la fréquence de l'onde).
- Dans l'organisme humain, les tissus présentent une certaine résistance au passage des US, cette résistance, appelée impédance est propre à chaque milieu et est fonction de son élasticité et de sa densité. [13]

De même que certaines autres ondes, à chaque fois qu'un ultrason rencontre une interface, une partie de l'onde incidente est transmise (traversant l'interface) tandis que l'autre partie est réfléchi.

Les caractéristiques de cette réflexion sont propres à l'impédance (ou densité) du milieu traversé.

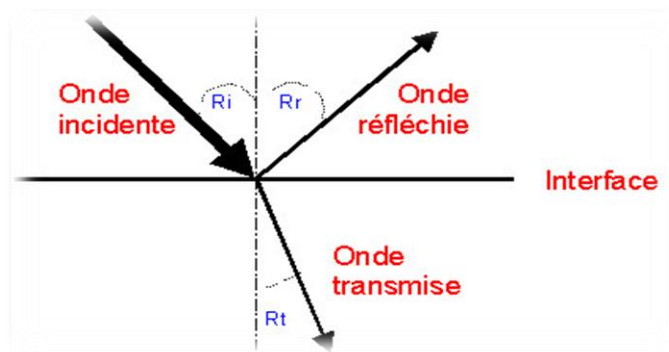


Figure III.8. Principe de réflexion.

Ce principe de réflexion est beaucoup utilisé dans les différentes applications des ultrasons, et notamment dans l'acquisition des images.

iii. Utilisations

Les ultrasons peuvent être utilisés dans plusieurs domaines:

- Examen de pièces métalliques (moulées, forgées, usinées, soudées...) à tous stades d'élaboration et d'utilisation (fabrication, maintenance)
- Contrôle des cordons de soudure
- Caractérisation et contrôle de matériaux composites et de bétons.
- Contrôle de précontrainte dans les assemblages boulonnés
- Mesure de propriétés physiques ou métallurgiques de matériaux.
- Suivi en service d'installations et de matériels (nucléaire, transports aérien et ferroviaire, pétrochimie...).

L'utilisation des ultrasons dans l'évaluation non destructive des matériaux a connu un essor considérable ces dernières années aussi bien dans la détection et le dimensionnement des

défauts, **que dans l'évaluation qualitative et / ou quantitative des propriétés mécaniques et physiques des matériaux.**

Chaque mode de propagation des ondes ultrasonores est directement lié aux propriétés physiques ou mécaniques du milieu exploré.

La possibilité de générer plusieurs modes de propagation d'ondes acoustiques dans un même matériau donne un avantage considérable aux ultrasons dans la caractérisation des matériaux de manière générale.

Dans cette expérience, peut être utilisons une technique de mesure des constantes élastiques des matériaux solides (**constantes de Lamé, module d'Young et coefficient de Poisson**) par voie ultrasonore. Au plan macrographique, elles caractérisent la proportionnalité entre efforts et déformations et, à ce titre, elles sont indispensables pour la caractérisation des structures.

Le principe est basé sur la mesure des vitesses de propagation des différents types d'ondes ultrasonores à travers les échantillons.

iv. Détermination des propriétés élastiques

Dans le cas des solides isotropes les vitesses de propagation des ondes ultrasonores sont dépendantes des constantes élastiques de ces matériaux.

$$V_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad \text{et} \quad V_T = \sqrt{\frac{E}{\rho 2(1+\nu)}} \quad (\text{III c. 1})$$

Avec :

- **E** : Module d'élasticité longitudinale ou module d'Young
- **ν** : Coefficient de Poisson ;
- **ρ** : Masse volumique

En posant $\alpha = V_L / V_T$, on en déduit :

$$\nu = \frac{\alpha^2 - 2}{2(\alpha^2 - 1)} \quad \text{et} \quad E = 2\rho V_T^2 (1 + \nu) \quad (\text{III c. 2})$$

Donc, pour connaître **ν**, il suffit de trouver V_L et V_T par la mesure du temps de transit de l'onde longitudinale (t_L), et de l'onde transversale (t_T) dans le matériau. Le module d'Young sera calculé à partir de (**α**) et de la masse volumique (**ρ**) qui doit être mesurée avec précision par la technique dite de **double pesée**. [13]

v. Dispositif expérimental

Le principe de la mesure est basé sur l'exploitation du phénomène de conversion de mode à une interface eau-métal.

Dans le but d'effectuer ces mesures de manière automatique, nous avons utilisé le dispositif décrit par la figure III.9.

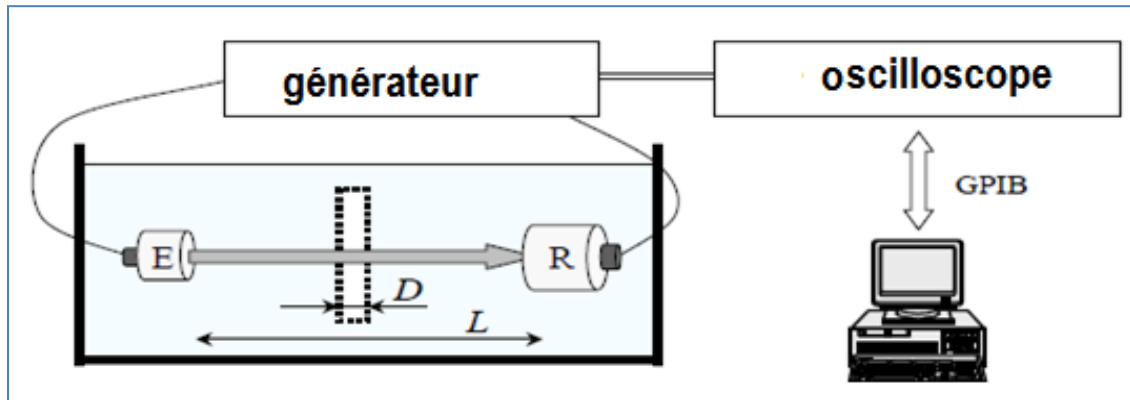


Figure. III.9. Dispositif expérimental d'ultrasons.

Le dispositif est constitué de deux transducteurs piézoélectriques : un émetteur et un récepteur immergés dans une cuve.

Les capteurs sont reliés à un générateur d'impulsions ultrasonores, lui-même relié à un oscilloscope. Les signaux visualisés sur l'oscilloscope sont récupérés sur ordinateur par le biais d'une liaison GPIB.

CHAPITRE
IV

RESULTATS ET
INTERPRETATION

INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats des différentes investigations menées sur le joint soudé hétérogène. Nous présentons également une partie complémentaire de simulation du comportement dans le domaine élastique.

IV.1. Eprouvettes et composition du métal d'apport

IV.1.1. L'équivalence de Métal d'apport

- **Modèle de Schaeffler : Annexe II**

- chrome équivalent : $(Cr)_{eq} = (\%Cr) + 1,5(\%Si) + (\%Mo) + 0,5(\%Nb)$;

- nickel équivalent : $(Ni)_{eq} = (\%Ni) + 0,5(\%Mn) + 30(\%C)$.

Métaux Equivalence	MB 1 DUPLEX	MÉTAL D'APPORT SUPER DUPLEX	MB2 MARTENSITIQUE
(Cr) eq	29.845	29.2	15.6
(Ni) eq	7.77	7.3	7.95

Tableaux IV.1 Les compositions équivalentes en Chrome et en Nickel.

La composition de métal d'apport est la plus loin que le métal de base un, (duplex).

IV.1.2. Prélèvement d'éprouvettes

On prélève après le soudage du tube deux catégories d'éprouvettes qui sont représentées par la figure IV.1.



Figures IV.1. Les éprouvettes :

1. De traction,

2. De la dureté et caractérisation micrographique.



IV.2. CARACTÉRISATION DE LA SOUDURE

2.1. Macrographie

La figure ci-dessous montre une macrographie de notre soudure hétérogène, on constate la présence de cinq zones principale qui sont :

- ✓ Métal de base Supermartensitique.
- ✓ Métal de base duplex.
- ✓ Zone affectée thermiquement 1 du coté duplex
- ✓ Zone affectée thermiquement 2 du coté Supermartensitique
- ✓ Zone fondue.

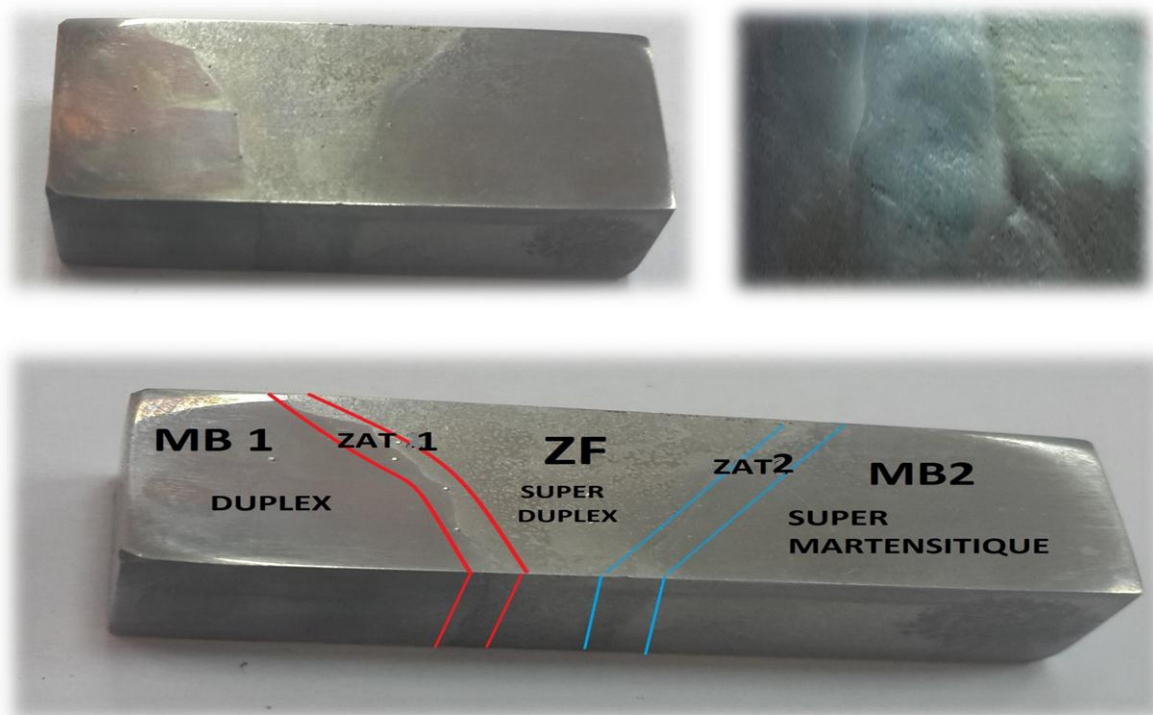


Figure IV.2 : Illustration macrographique du joint soudé et des zones principales.

IV.2.2. Micrographie

Le schéma de la figure ci-dessous présente les différentes positions de prise d'image par microscopie optique. Les micrographies présentées correspondent aux différentes microstructures qui constituent le joint de soudure hétérogène. Ces microstructure montre bien l'aspect hétérogène de la soudure.

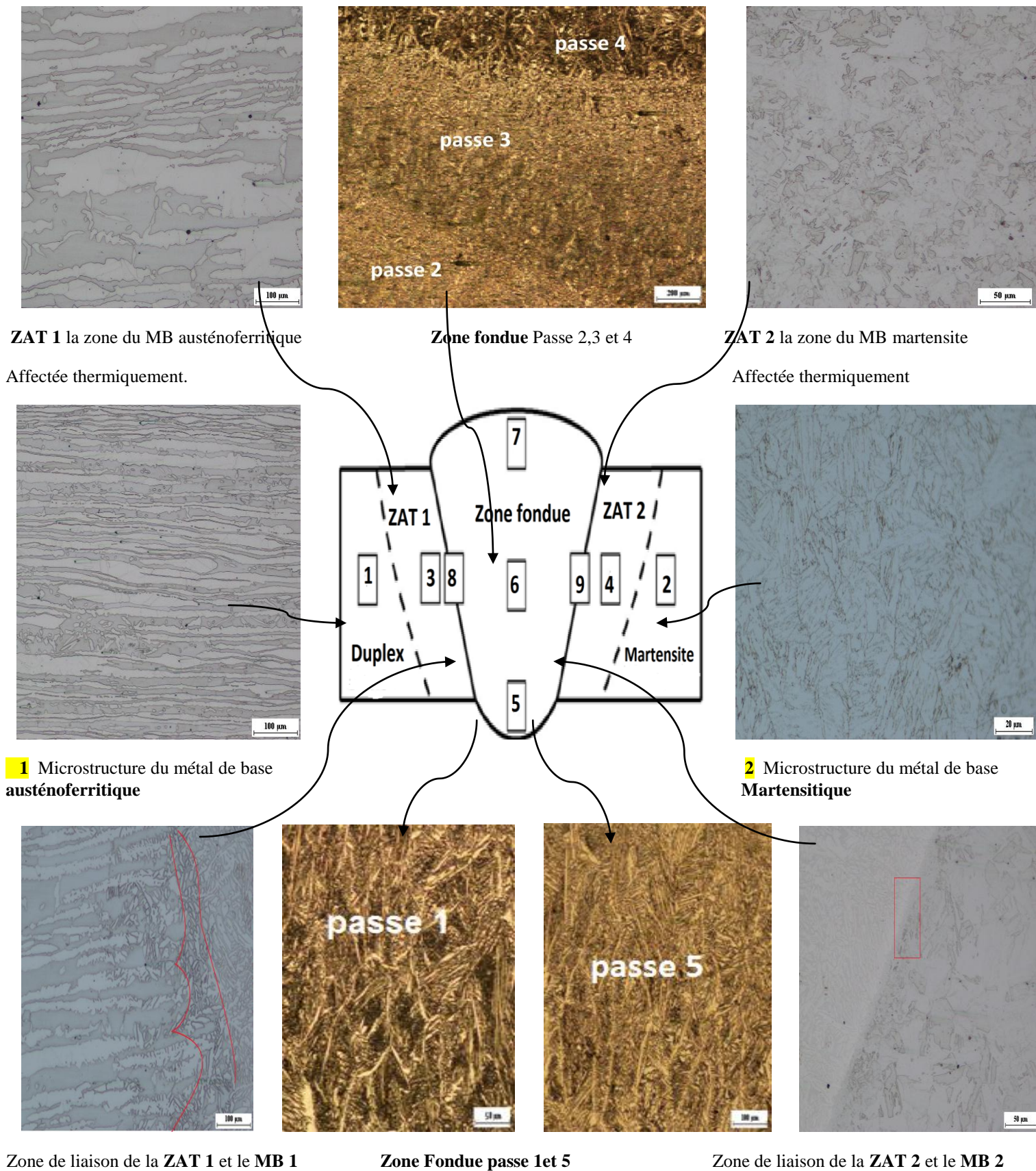


Figure IV.3 : Illustration micrographique du joint soudé et ses zones principales.

1) Matériaux de bases :

Les deux figures ci-dessous présentent respectivement les microstructures des deux matériaux de bases Duplex et Supermartensitique. La première est celle du matériau duplex, elle est caractérisée par une structure en bande constituée de proportion approximativement égale entre ferrite et austénite. La ferrite apparaît en couleur plus sombre. La deuxième figure correspond à l'acier Supermartensitique, c'est un matériau qui a une structure martensitique constitué de lath fine avec des orientations aléatoires.

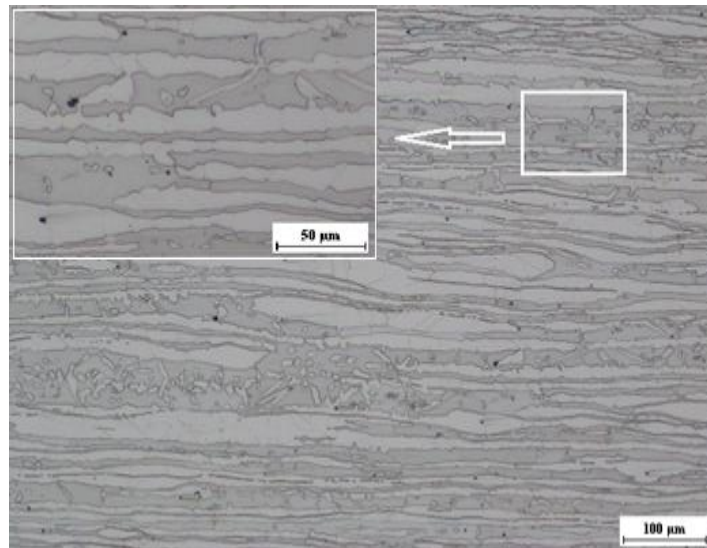


Figure IV.4. " Microstructure du métal de base duplex 2205".

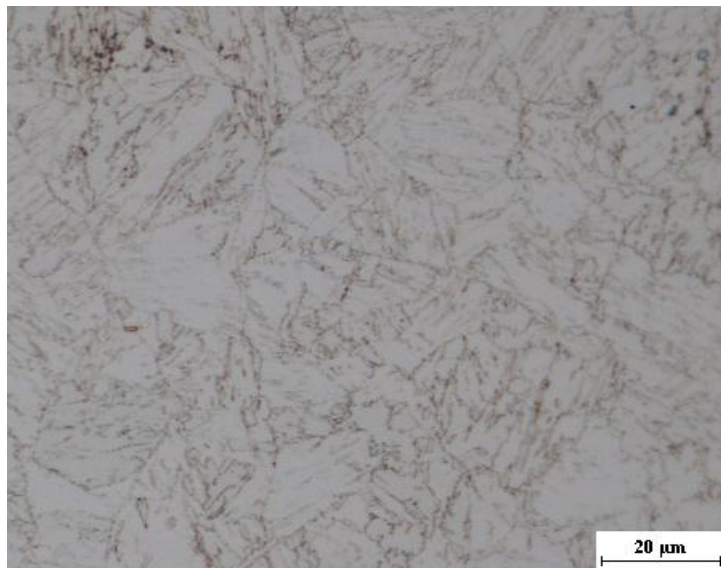


Figure IV.5. " Microstructure du métal de base martensitique".

2) **Zone affectée thermiquement côté duplex** : La zone affectée thermiquement du côté duplex (position 3) proche de la zone fondue présente un grossissement considérable des grains par rapport au métal de base avec un élargissement de la taille de la ferrite.

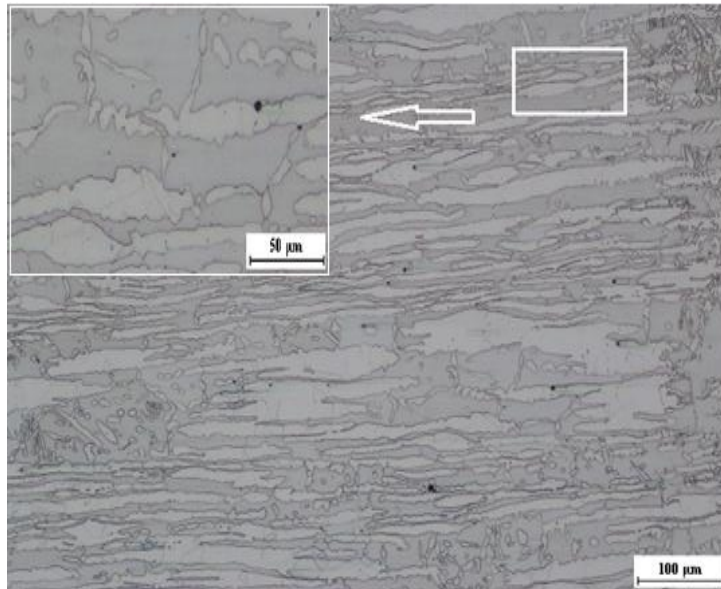


Figure IV.6. " Microstructure de la ZAT coté duplex ".

3) **Zone affectée thermiquement côté martensitique** : nous remarquons dans cette zone qui est située en position 4 un grossissement de grains considérable suite aux cycles thermiques de soudage.

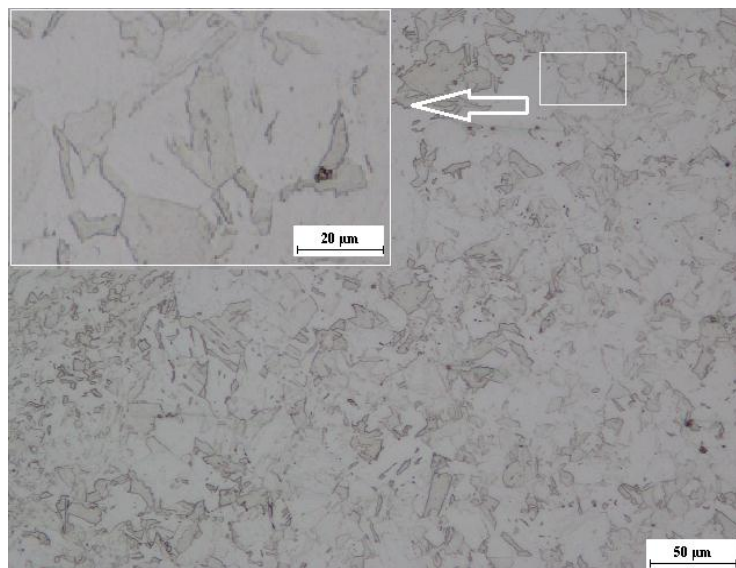


Figure IV.7. " Microstructure de la ZAT coté martensitique" .

4) **Zone fondue** : On remarque dans la zone fondue dans la première passe (positions 5) que la structure est dendritique (structure brute de solidification).

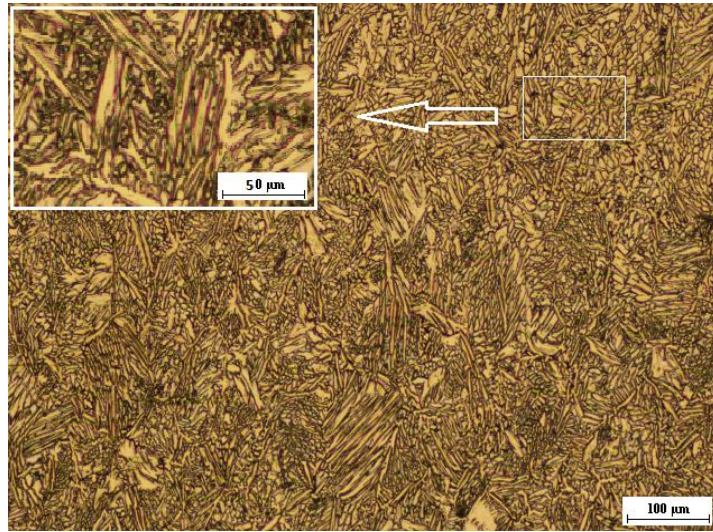


Figure IV.8.1. "Microstructure de la zone fondue dans la premier passe".

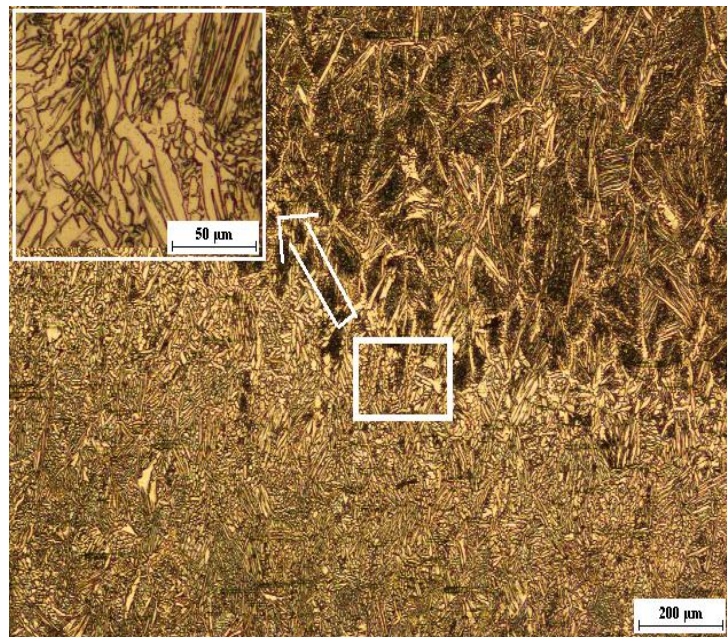


Figure IV.8.2. Inter-passe 1-2

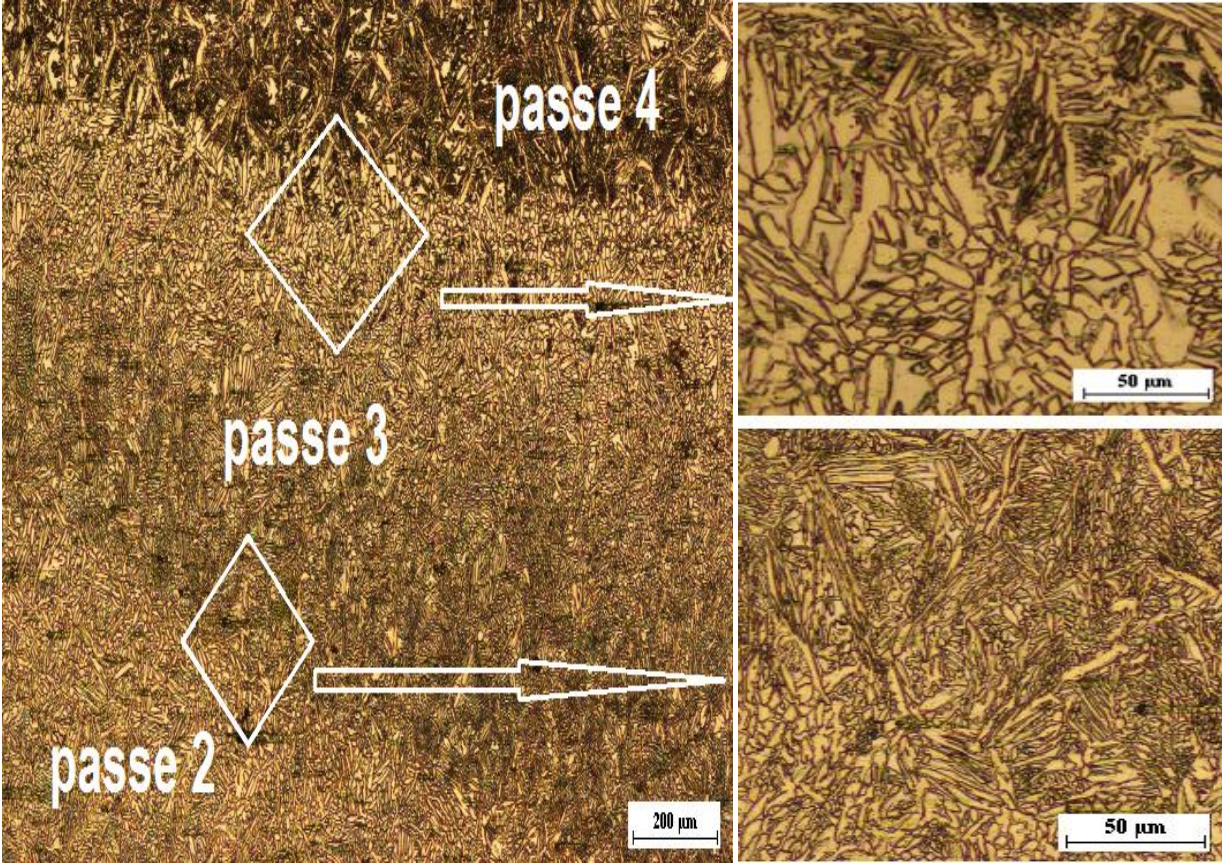


Figure IV.8.3 Inter-passe 2-3 et 3-4.

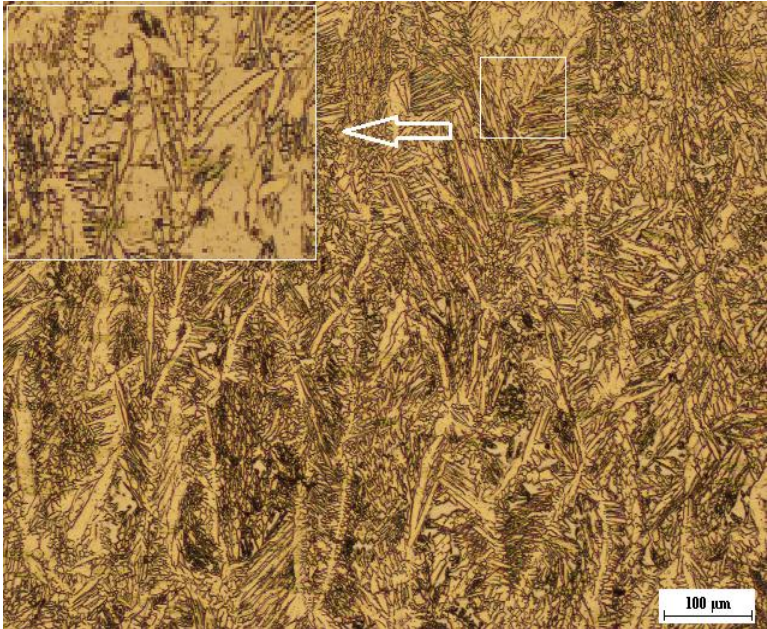


Figure IV.8.4. "Microstructure de la passe de finition".

5) **Zones de liaison** Ces zones (position 8 et 9) séparent le métal fondu et le métal de base affecté thermiquement.

Position 8

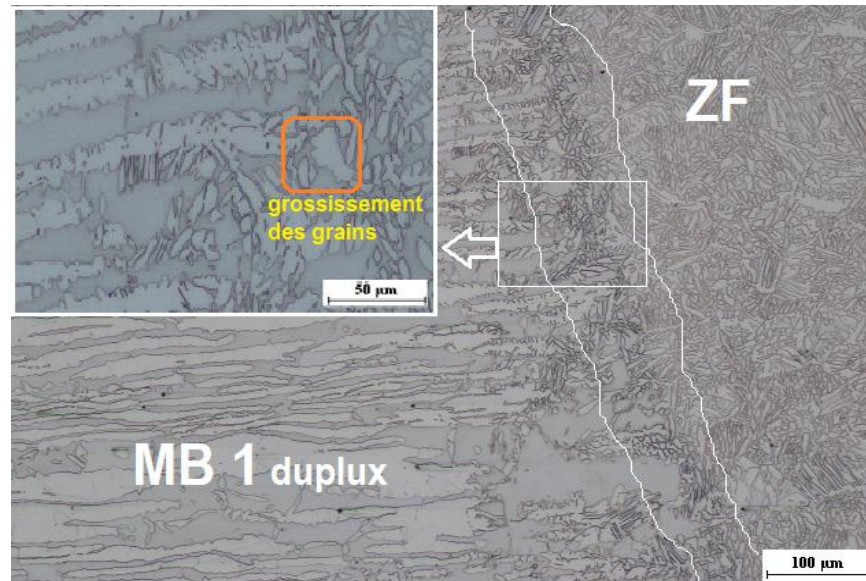


Figure IV.9. "Zone de liaison coté duplex (**Position 8**)".

Position 9

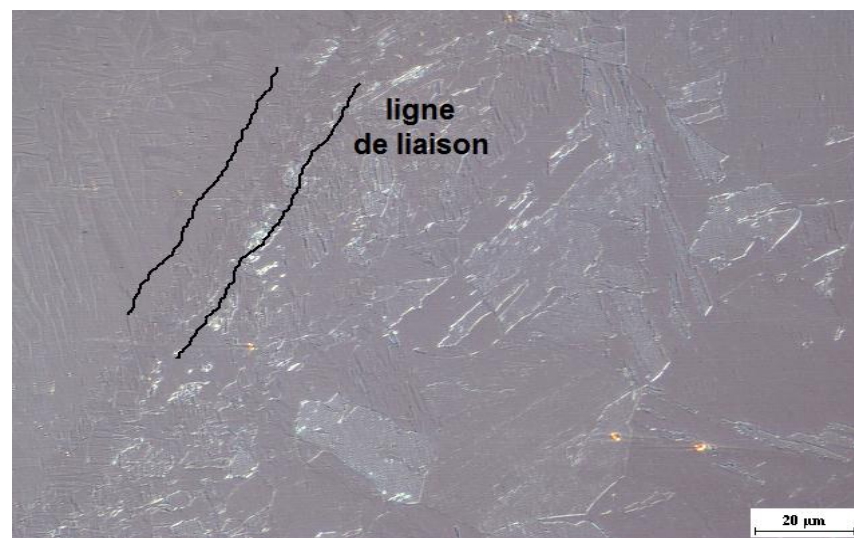


Figure IV.10. "Zone de liaison coté Spermartensitique (**Position 9**)".

Cette région montre bien la continuité de matière assurée par le procédé de soudage. Au niveau des zones de liaison la croissance des grains en cours de la solidification se fait par épitaxie. Du coté duplex nous remarquons bien un grossissement de grains et un élargissement du domaine ferritique en dépend du celui austénitique

IV.3. Caractérisations mécaniques

IV.3.1. Résultats de l'essai de traction

Le diagramme contrainte -déformation obtenu par lessai de traction , figure IV.11, fait apparaître un domaine élastique 'Oa' dans lequel les déformations sont réversibles et proportionnelles à la charge appliquée et un domaine plastique 'ac' dans lequel les déformations sont permanentes. De 'a' à 'b', les déformations sont homogènes, tandis que de 'b' à 'c', elles ne sont plus homogènes (elles sont localisées) par suite de la striction qui précède la rupture.

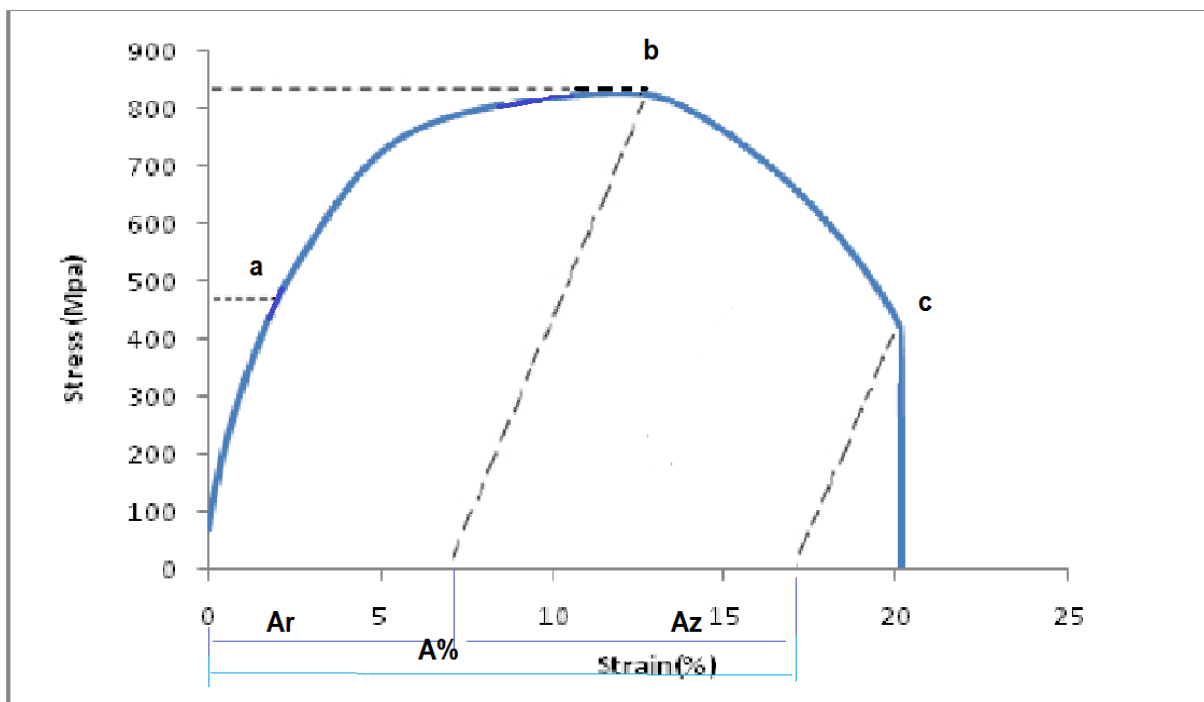


Figure IV.11 : Courbe de traction CONVENTIONNELLE typique.

- Zones Oa : ici on observe une partie presque rectiligne. La projection du point A sur l'axe des contraintes désigne la contrainte maximale d'élasticité. ; Cette zone est nommée ; zone élastique ; ici le matériau peut toujours reprendre sa forme initiale après décharge.
- Zone abc : on observe une courbe curviligne qui croît dans un premier temps (ab), pour atteindre la valeur maximale en b qui correspond à R_m et enfin décroît jusqu'à c : cette zone est appelée zone de déformation plastique ; ici le matériau ne peut reprendre sa forme. Après décharge. Cette partie peut être subdivisée en deux sous-zones à savoir *la zone d'écrouissage* qui contient le palier d'écoulement quand il en existe et la *zone de striction*. Les courbes de traction rationnelle à comportement ductile dont fait parti l'acier inoxydable doux permettent de déterminer 4 grandeurs caractéristiques :

- ✓ le module d'élasticité E (ou module d'Young), qui est donné par la pente de la partie élastique de la courbe $\sigma = f(\epsilon)$ (selon la formule $E = t_g \alpha$)
- ✓ la limite d'élasticité (R_e) qui correspond à la contrainte nominale à partir de laquelle se produit la déformation plastique.
- ✓ la résistance à la rupture R_m qui correspond à la contrainte nominale maximale supportée par l'éprouvette.
- ✓ la déformation à la rupture (A%) qui correspond à la déformation plastique nominale à la rupture en traction de l'éprouvette. La valeur de la déformation à la rupture(A%) représente une des grandeurs caractéristiques de la ductilité.

Les résultats expérimentaux obtenus par la courbe de traction de l'éprouvette soudée, sont donnés sous forme d'un tableau.

$\sigma_P = R_e$ [MPa]	$\sigma_r = R_M$ [MPa]	A%
500	827	20

Tableau IV.2 résultats de l'essai de traction.

Nous avons constaté que l'éprouvette rompue que la déformation a été hétérogène le long de la zone utile et le fait que la rupture a eu lieu au niveau de base Supermartensitique peut être expliqué par les seuils d'écrouissage qui diffèrent d'une zone à une autre.

IV.3.2. Résultats de la dureté

Plusieurs mesures de dureté ont été effectuées dans chaque zones de l'échantillon soudé. On a calculé après la dureté moyenne par zone, voici les résultats:

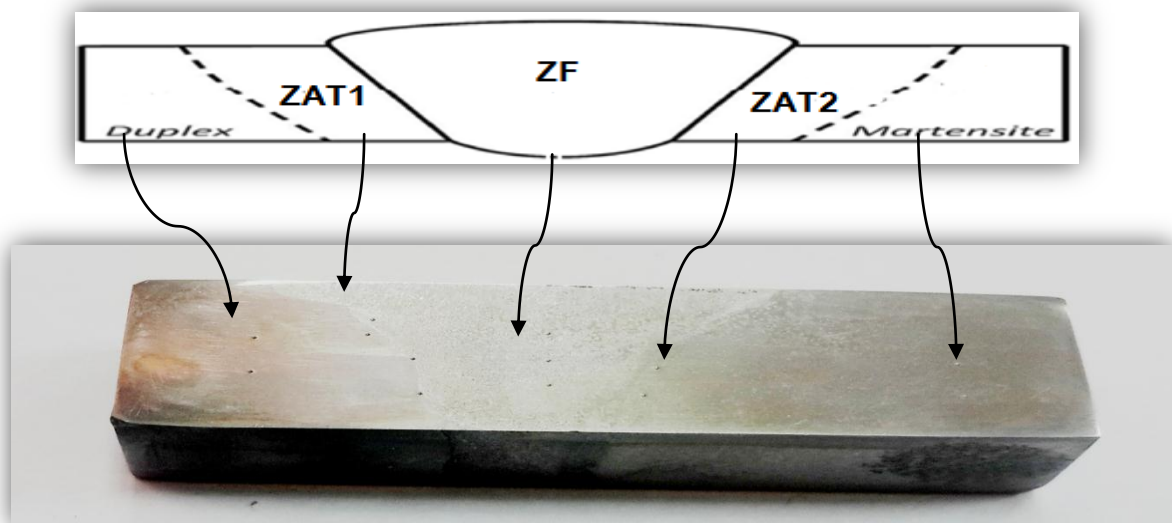


Figure IV.12.a. "Positions de prélèvement des valeurs de dureté pour la soudure à l'état reçu".
Les résultats sont présentés dans le tableau IV.3 :

Position	MB duplex	ZAT 1	ZF	ZAT 2	MB martensite
Hv10 moy	245	276	283	300	250

Tableau IV.3. "Résultats de la dureté pour la soudure à l'état reçu F = 10 Kgf".

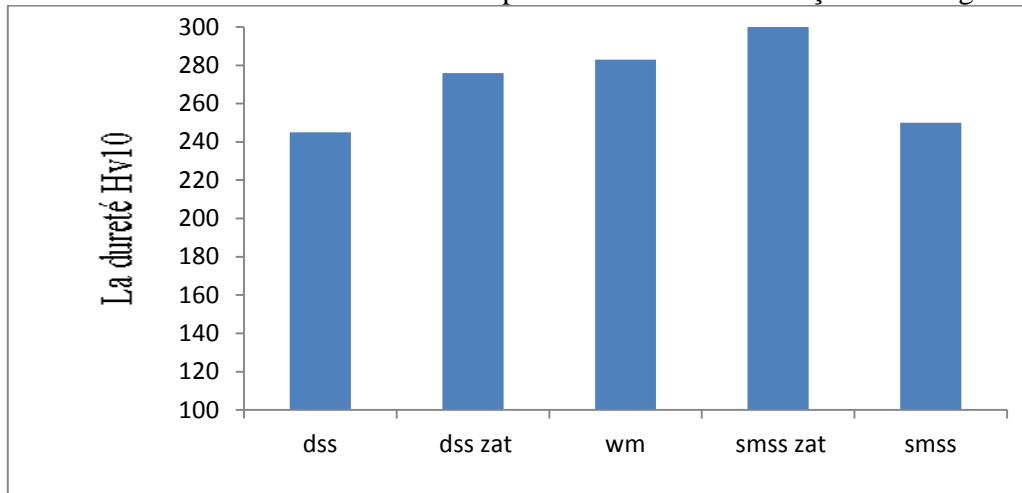


Figure V.12.b. " Illustration par un histogramme de la valeur de dureté dans chaque zone du joint soudé".

DSS : MB duplex

DSS ZAT : ZAT coté duplex

WM : Zone Fondue

SMSS ZAT : ZAT coté martensite

SMSS : MB martensite

• INTERPRETATION DES RESULTATS

On remarque dans l'histogramme que :

$$Hv \text{ MB1} < Hv \text{ MB2} < Hv \text{ ZAT1} < Hv \text{ ZF} < Hv \text{ ZAT2}$$

On constate une variation de la dureté dans les différentes zones du joint soudé (Zone fondue, Zone affectée thermiquement et matériaux de base).

- La dureté dans la ZAT du coté Supermartensitique est la plus élevée, nous attribuons cela aux variations structurales due aux cycles thermiques de soudage. Tel que la seconde trempe.
- La zone fondue est la plus dure parmi les zones du joint soudé après ZAT2. Cette augmentation est due à sa nature structurale dendritique et à l'orientation aléatoire des dendrites.
- L'augmentation de la dureté dans la zone affectée thermiquement du côté duplex est due à l'augmentation du taux de ferrite. Par contre, dans le côté martensitique, cette

augmentation est tout à fait normale à cause de la présence du carbone dans la structure cristalline de cette phase.

IV.3.3. Résultats du contrôle par ultrasons

Les résultats expérimentaux obtenus par la méthode (**ultrasonore**) sont donné sous forme d'un **tableau IV.4**

Constantes élastiques	MB1 DUPLEX	ZONE FONDUE	MB2 MARTENSITE
Module d'Young E en (KN/mm ²)	205	240	230
Coefficient de Poisson (ν)	0.2	0.26	0.23

Tableau IV.4. Module d'Young et coefficient de Poisson obtenus par ultrasons.

Les valeurs des coefficients de Poisson obtenues par ultrason sont légèrement inférieure à 0,3 qui est connue comme valeur conventionnelle pour les aciers. C'est due aux conditions expérimentales qui ne sont pas parfaite et a la précisions des calcules.

On constate que : $E_{MB1} < E_{MB2} < E_{ZF}$ et $\nu_{MB1} < \nu_{MB2} < \nu_{ZF}$.

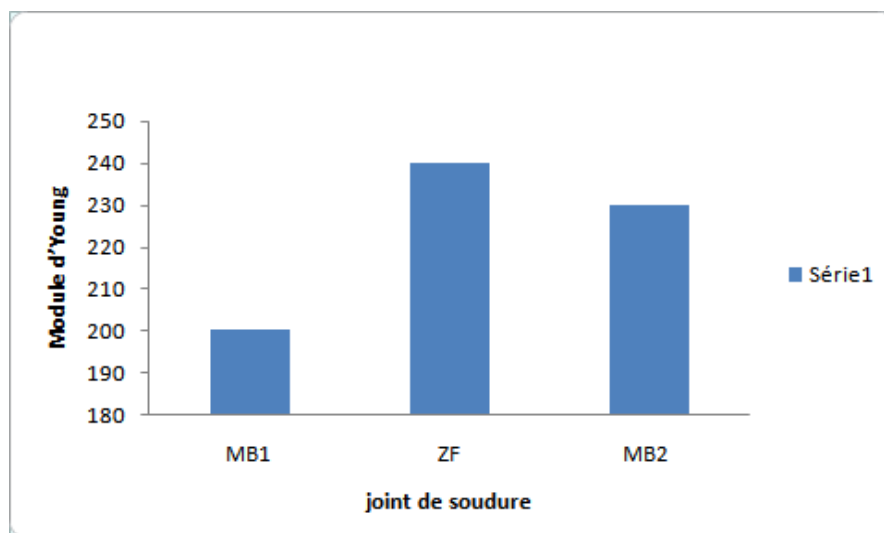


Figure V.13. " Illustration par un histogramme de la valeur de **Module d'Young** dans chaque zone du joint soudé".

IV.4. Simulation du comportement élastique de l'éprouvette hétérogène

IV.4.1. SIMULATION

i. Le modèle utilisé

Dans cette partie on divise le comportement mécanique du joint soudé en deux phases.

La première phase consiste à utiliser **la loi de Hooke** dans le domaine élastique.

➤ Le prétraitement

Dans cette étape on définit le modèle du problème physique de la pièce ou de la structure à étudier ; le modèle est créé graphiquement en utilisant ABAQUS/CAE.

➤ La simulation

Cette étape consiste à résoudre les équations du modèle en utilisant soit la méthode standard soit la méthode explicite. C'est l'étape la plus longue car le temps de résolution dépend du degré de complexité du problème, de la puissance de l'ordinateur et de la précision exigée. Les résultats de la résolution sont stockés dans un fichier **job.old** pour être prêts à l'étape suivante.

➤ Post traitement

C'est la phase de calcul des efforts, des déformations, et des contraintes dans les éléments. Elle contient également toute la partie de post traitement graphique (illustration, analyse, coupes, visualisation des champs de déformation et répartition du champ de contrainte dans la structure étudiée, ...etc.) [14].

ii. Les conditions aux limites et le chargement appliqué

On applique les conditions aux limites suivantes :

- Encastrement des surfaces (S1) et (S2) de l'éprouvette ; cette condition consiste à annuler les déplacements dans les trois directions et à annuler la rotation dans les trois sens, c'est-à-dire que les nœuds situés dans ces surfaces sont fixes.
- Application d'un déplacement sur les surfaces (S'1) et (S'2) : cette condition consiste à donner un déplacement maximal sur les nœuds situés dans ces surfaces. Parce que dans l'essai de traction expérimentale on fait le déplacer la travers à vitesse constante en cours de l'essai, puis nous enregistrons les efforts.

Pour la simulation numérique nous nous sommes intéressés à la partie élastique. Et cela du fait que nous ne disposant pas des allongements à la contrainte maximale des différentes zones. Les propriétés élastiques utilisées pour la simulation sont celles obtenues par ultrason par rapport au module de Young et aux coefficients de Poisson. Concernant les limites élastiques sont données par les fiches techniques des deux matériaux de base et le métal d'apport.

En raison du rétrécissement des deux zones affectées thermiquement. Leur contribution dans le comportement globale de l'éprouvette entière est supposé négligeable dans cette partie.

IV.4.2. Principales étapes

✓ **Section sketch**

On dessine la section longitudinale de la pièce dont les mesures réelles selon la norme ASTM E8 par la méthode des coordonnées.

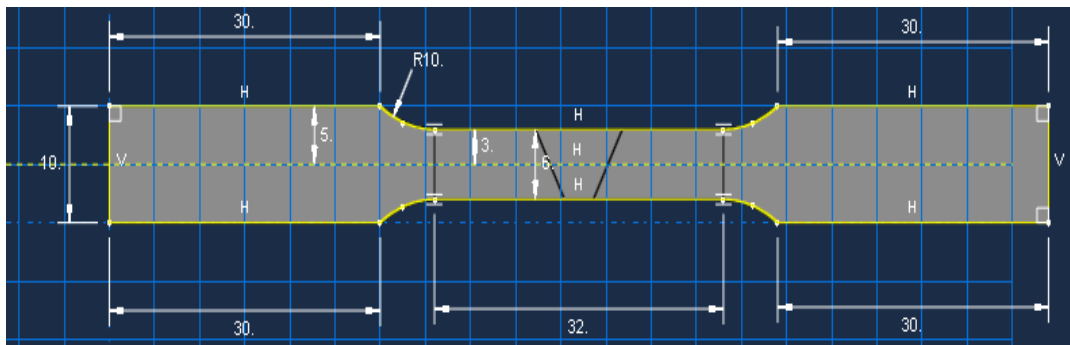


Figure IV.14. Section de la pièce par les mesures réelles selon la norme ASTM E8

✓ **Réalisation du Solide de la pièce par extrusion**

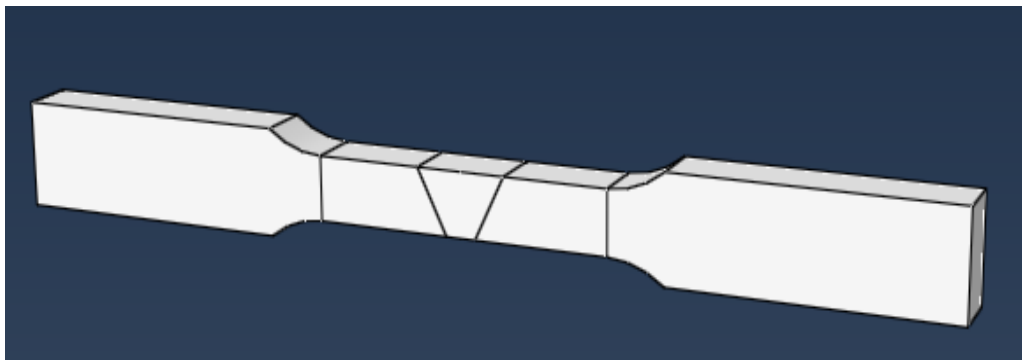


Figure IV.15. Géométrie de l'éprouvette de traction en perspective.

✓ **Les différentes parties de la soudure hétérogène**

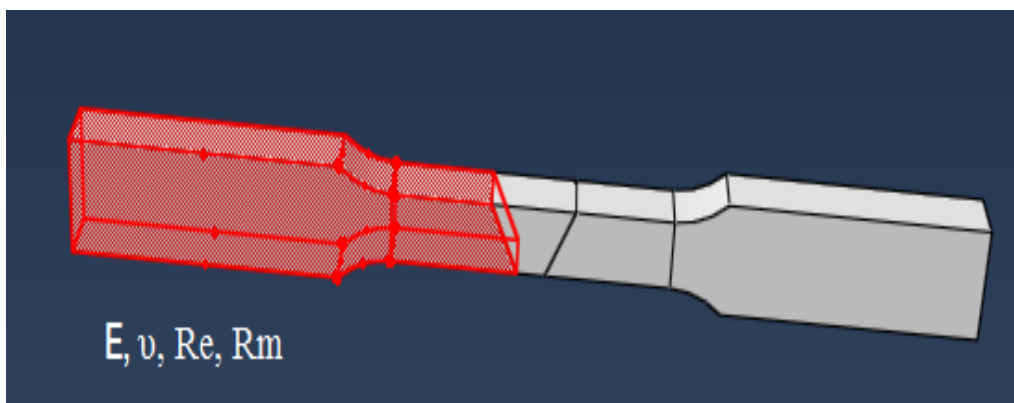


Figure (IV.16.a). Partie 1 MB Austinoferrique, Duplex

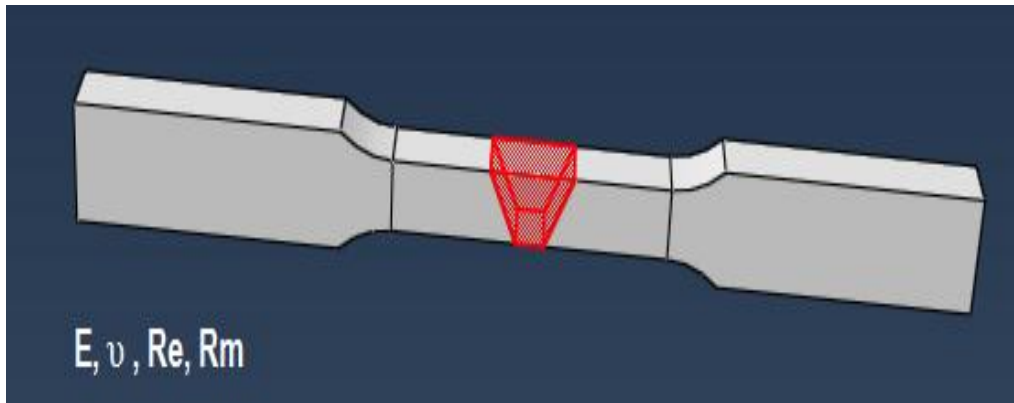


Figure (IV.16.b). Partie 1 zone fondue

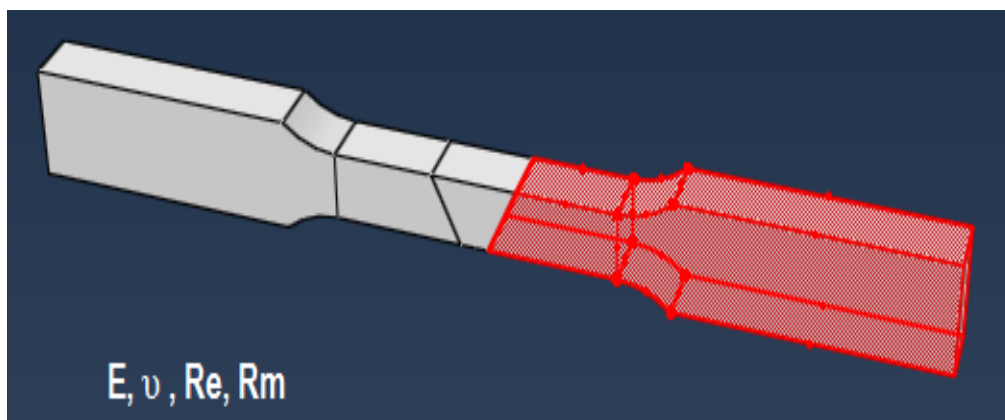


Figure (IV.16.c). Partie 1 MB supermartensitique.

✓ Maillage

On utilise la fonction (**mesh**) pour mailler la pièce avec les trois parties assemblées,

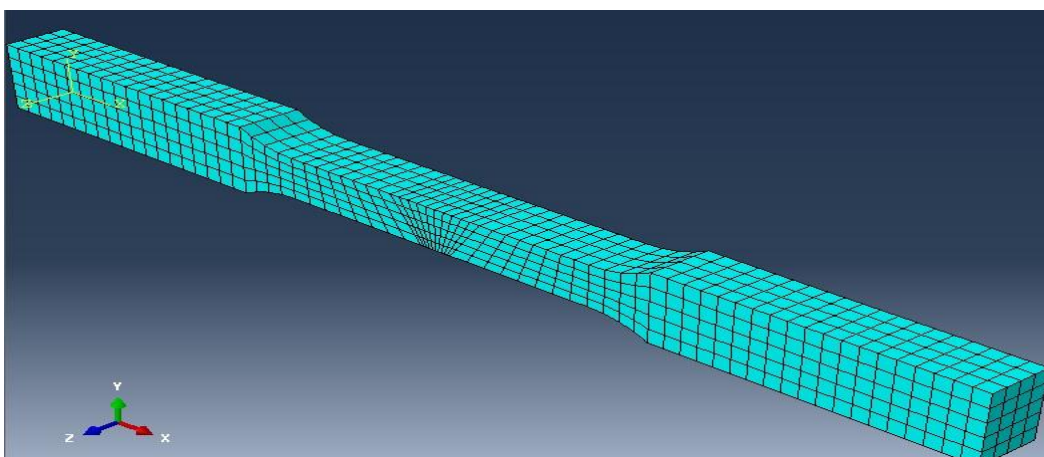


Figure (IV.17). Maillage.

✓ les conditions aux limites

On applique sur les surface S1 et S2 par la fonction (**displacement**) un déplacement nul ($U1=0 ; U2=0 ; U3=0$).

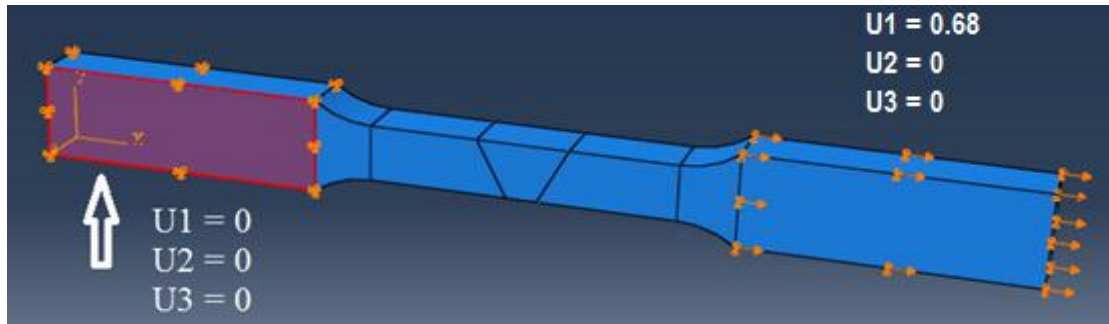


Figure (IV.18). Encastrement des Surfaces S1 et S2, et chargement des surfaces S'1, S'2 en déplacement.

De l'autre coté de la pièce on applique un **déplacement globale** de 0,068mm correspondant à 0,2% de déformation d'après la courbe expérimentale, en direction de l'axe X. ($U'1=0,068\text{mm} ; U'2=0 ; U'3=0$).

IV.4.3. Résultats

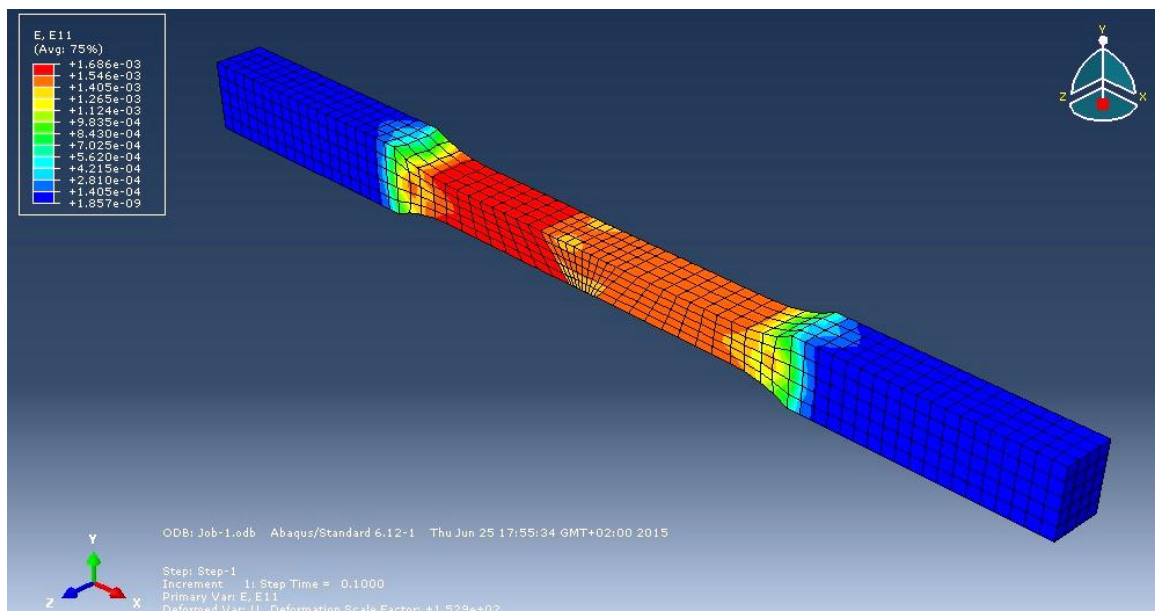


Figure (IV.19). Déformation (eps xx) le long de l'éprouvette

Répartition non-uniforme

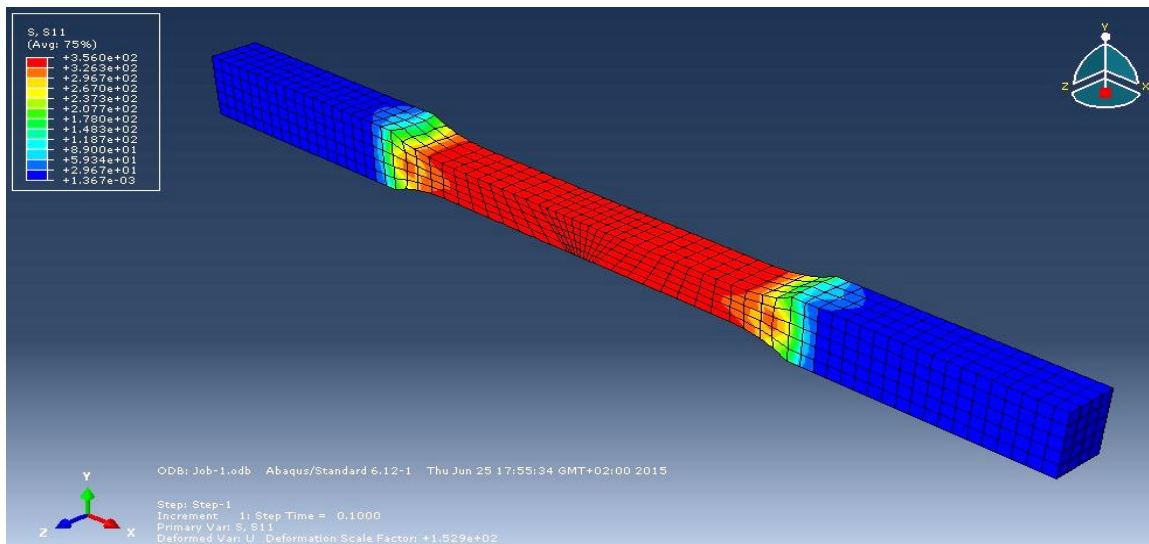


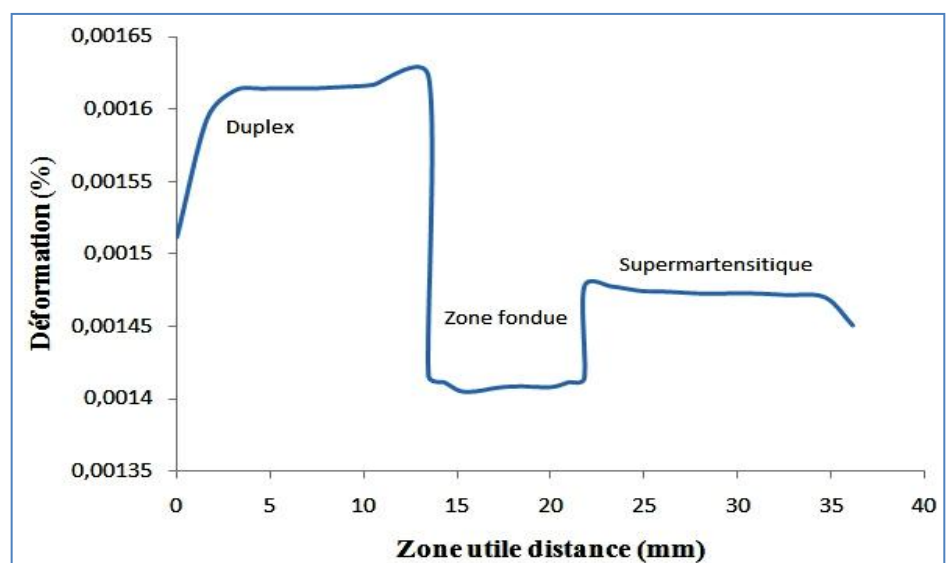
Figure (IV.20). Contrainte uniformément répartie (Sigma xx) le long de l'éprouvette.

Dans cette partie il apparait que le comportement global de l'éprouvette est lié aux propriétés locales. Nous constatons d'après les deux figures ci-dessus que dans le domaine élastique pour des déformations inférieure à 0,2% (déplacement correspondant = 0,068mm) la répartition des déformations le long de la zone utile n'est pas uniforme, par contre la contrainte est uniforme. Les deux matériaux de base et la zone fondue ne réagissent pas de la même façon suite à des chargements statiques. Cela peut être expliqué par les différences et les gradients des propriétés structurales et mécaniques qui varient d'une zone à une autre.

Dans la figure ci-dessous nous remarquons que pour une déformation globale de 0,2% les différentes zones encaissent des taux de déformations différentes. Pour le comportement plastique la situation globale dépend des résistances maximales et des taux d'écroutissage permmissible par les différentes zones (même les zones affectées thermiquement).

Figure (IV.21)

le comportement
plastique des
différentes zones



A decorative L-shaped line consisting of a vertical line on the left and a horizontal line at the bottom, both in a dark gray color. The vertical line is positioned to the left of the word 'CONCLUSION', and the horizontal line extends across the width of the page below the word.

CONCLUSION

CONCLUSION

Les aciers inoxydables sont largement utilisés dans l'industrie pétrolière, pour la production et le transport de pétrole brut ou de gaz, dans l'industrie chimique, dans l'industrie nucléaire, dans le domaine maritime, la médecine... Ces aciers sont très intéressants, aussi bien pour leur résistance à la corrosion que pour leurs propriétés mécaniques, ainsi que pour un coût de production raisonnable. La présente étude a été conçue de façon à prendre en charge les opérations suivantes

- La caractérisation métallographique effectuée par microscopie optique qui nous a permis de voir les changements de microstructure de l'acier inoxydable sous l'influence du flux thermique de procédé de soudage TIG. Par ailleurs, un constat a été fait sur l'évolution de l'état de surface, la nature des différentes passes des échantillons. En outre une appréciation du degré d'hétérogénéité.
- La caractérisation mécanique réalisée par les essais de traction, les mesures de dureté.
- La mesure des constantes élastique par technique non destructive (ultrasons)
- La simulation numérique du comportement élastique de la soudure
- Ce qui nous a permis de dégager les constatations et conclusion ci-après :
 - Pour la micrographie nous avons pu tirer les conclusions suivantes :
 - ✓ Le joint soudé a été caractérisé micro- et macroscopiquement, l'attaque chimique a permis de mettre en évidence les différentes structures à travers le cordon. Nous avons constaté que le joint soudé est constitué de cinq zones principales (MB1, MB2, ZAT1, ZAT2, MF).
 - ✓ La structure de zone affectée thermiquement du côté duplex se caractérise par un grossissement des grains. Une recristallisation partielle et un réarrangement des grains ont été remarqués aussi dans des endroits de la zone surchauffée. C'est une formation de nouveaux grains aux niveaux des joints initiaux.
 - ✓ la structure de la zone affectée thermiquement du côté martensitique se caractérise par une réduction de la taille des grains, ne révèle pas de changement structural très clair. Cela peut être dû à la finesse de la structure.
 - ✓ le métal fondu a une structure dendritique (structure brute de solidification).
 - ✓ Les zones de liaisons ne sont pas visibles par la macrographie, mais elle est clairement mise en évidence par la micrographie.
 - Pour les essais mécaniques nous avons pu tirer les conclusions suivantes :

- ✓ Les propriétés de traction de l'éprouvette hétérogène sont proche de celles des deux matériaux de base.
- ✓ Le mode de rupture de ce joint soudé est un mode ductile.
- ✓ Le métal d'apport de type DP3WT présente une bonne soudabilité sans apparition de fissuration après soudage.
- ✓ Les propriétés mécaniques de l'inox duplex ne varient pas beaucoup.
- Pour la simulation numérique on peut tirer les conclusions suivantes:
 - ✓ La simulation obtenue dans le domaine élastique montre une bonne concordance avec les résultats des essais expérimentaux.
 - ✓ La simulation numérique du comportement élastique de la soudure hétérogène qui a permis de visualiser l'aspect non uniforme de la déformation a travers le zone de la soudure.

En perspective, nous souhaitant que cette étude sera complété par d'autre travaux qui examine les comportements locaux séparé des différentes zones en s'intéressant au domaine plastique avec plus de détaille.

Références

Références

- [1]. J. Philibert et al. *Métallurgie, du minerai au matériau*, Éditions Dunod, 2e édition, 2002, (ISBN 978-2-10-006313-0), p. 621.
- [2]. O. Bletton, « Les aciers inoxydables », éd. Physique (1990). Chap.13, pp. 493-518,
- [3] M. Colombié., « Matériaux industriels : Matériaux métalliques », éd. Dunod (2000). Chap. 5, pp. 193-244
- [4] EN 10088-1 : Aciers inoxydables. - Partie 1 : liste des aciers inoxydables.
- [5] Michel Dupeux, *Aide mémoire sciences des matériaux*, éditions Dunod, Paris, 2004 (ISBN 978-2-10-005458-9), p. 212.
- [6] Pierre-Jean Cunat, « Aciers inoxydables, critères de choix et structures », traité « Matériaux métalliques », *Techniques de l'ingénieur*, **juin** 2000, p. M4541-6.
- [7] guide pratique pour le travail des aciers inoxydable duplex premier édition 2011, éditée par IMOA, LODRES, GB p.52.
- [8] J. CORNU, *Traité de soudage Automatique: Volume 2 Procédés* ; Hermes (1985).
- [9] Antony FERNANDES, Guide pratique Interne procédé TIG Propriété exclusive d'ESAB, pp.169.170.
- [10] C.FERDINAND. Mise en œuvre et caractérisation d'assemblages soudés par procédés TIG et laser de tôles d'alliages de titane réfractaires, thèse.de Doctorat p 21.22.
- [11] Hanifa MAROUF. Caractérisation structurale et mécanique du joint soudé de la liaison bimétallique Acier Ordinaire E36/ Acier anti-usure Naxtra70 utilisé par l'Unité Grue de Bejaïa dans l'assemblage de la pelle chargeuse. Mémoire de Magister pp6.7.
- [12] Ir. R. Vennekens, IWE, CEWE, FWeldI, Ing. Tom Vandewijngaert, IWE Institut Belge de la Soudure, Service Guidance Technologique (Traduction: M.C. Ritzen – I.B.S.), article défauts lors du soudage TIG, mig/mag et a l'arc submerge, p.1.
- [13] H.Walaszek Pôle EPI CETIM. Les nouvelles techniques de contrôle non destructif: un atout pour votre entreprise .p 36.
- [14] Tutorial, Abaqus 6.12 Abaqus/CAE User's Manual pp.20.30.
- Lionel DEPRADEUX. Simulation numérique du soudage – acier 316l validation sur cas tests de complexité croissante. Thèse *pour obtenir* le grade de Docteur. p.18.

ANNEXES

ANNEXE. I

(Tableau .1) Désignation des aciers inoxydables-Correspondance entre les désignations [11].

Nuance d'acier selon l'EN 10088		Allemagne (DIN)		Grande-Bretagne	France	Italie	Suède	Espagne	États-Unis	
Appellation	N°	Appellation	N°	BSI	AFNOR	UNI	SIS	UNE	AISI	UNS
X5CrNi18-10	1.4301	X5 CrNi 18 10	1.4301	304 S 15 304 S 16 304 S 31	Z 8 CN 18-09	X5 CrNi 18 10	2332 2333	3504	304	S 30400
X2CrNi19-11	1.4308	X2 CrNi 19 11	1.4308	304 S 11	Z 2 CN 18-10	X2 CrNi 18 11	2352	3503	304 L	S 30403
X2CrNi18-9	1.4307	.	.	.	.	.	.	.	.	.
X8CrNiTi18-10	1.4541	X8 CrNiTi 18 10	1.4541	321 S 31	Z 8 CNT 18-10	X8 CrNiTi 18 11	2337	3523	321	S 32100
X5CrNiMo17-12-2	1.4401	X5CrNiMo 17 12 2	1.4401	316 S 31	Z 8 CND 17-11	X5 CrNiMo 17 12	2347	3534	316	S 31600
X2CrNiMo17-12-2	1.4404	X2CrNiMo 17 13 2	1.4404	316 S 11	Z 2 CND 17-12	X2 CrNiMo 17 12	2348	3533	316L	S 31603
X2CrNiMo17-12-3	1.4432	.	.	.	.	.	.	.	.	.
X2CrNiMo18-14-3	1.4435	X2 CrNiMo 18 14 3	1.4435	316 S 13	Z 2 CND 17-13	X2 CrNiMo 17 13	2353	3533	316 L	S 31603
X1NiCrMoCu25-20-5	1.4539	X1 NiCrMoCuN 25 20 5	1.4539	.	Z 1 CNDU 25-20	.	2582	.	904 L	N 08904
X8CrNiMoTi17-12-2	1.4571	X8 CrNiMoTi 17 12 2	1.4571	320 S 31	Z 8 CNDT 17-12	X8 CrNiMoTi 17 12	2350	3535	316 Ti	S 31635
X2CrNiN18-10	1.4311	X2 CrNiN 18 10	1.4311	304 S 81	Z 2 CN 18-10 Az	.	2371	.	304 LN	S 30453
X2CrNiMoN17-11-2	1.4408	X2 CrNiMoN 17 12 2	1.4408	316 S 82	Z 2 CND 17-12 Az	.	.	.	316 LN	S 31653
X2CrNiMoN17-13-5	1.4439	X2 CrNiMoN 17 13 5	1.4439	.	.	.	.	.	317 LMN	S 31726
X1NiCrMoCuN25-20-7	1.4529	X1 NiCrMoCuN 25 20 8	1.4529	.	.	.	.	.	.	.
X2CrNiN18-7	1.4318	X2 CrNiN 18 7	1.4318	.	.	.	.	.	301 LN (302 LN)	.
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	X2 CrNiMoN 22 5 3	1.4462	Duplex 2205	Z 2 CND 22-5 Az	.	2377	.	.	S 31803

ANNEXE. II

Diagramme de Schaeffler

EQUIVALENCES DES TROIS ACIERS INOXYDABLES

