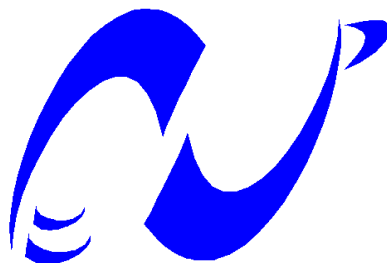


République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Ecole Nationale Supérieure Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Métallurgie

Projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Métallurgie

THEME :

Etude de réalisation d'un assemblage
hétérogène (A333. Grade 6 / A790. S32 550)
par un métal d'apport "ER 2209"

Proposé par : E.N.G.T.P

Réalisé par :
TOUAIBI DJALLEL-EDDINE

Promoteur : M. E. DJEGHLAL

Co-promotrice : Mlle. A. HACINI

PROMOTION: 2009

E.N.S.P 10, Avenue Pasteur, BP N° 182 El Harrach Alger

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mes chers parents

A mes frères

A toute ma famille

Ainsi qu'à tous mes amis, et à tous les algériens, où
qu'ils soient.

DJALLEL-Eddine.

Remerciements

Avant tout, merci à DIEU tout puissant pour sa bonté et sa clémence de m'avoir permis de mener à bien ce modeste travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur djeghlal mon promoteur et ma Co-promotrice mademoiselle hacini de m'avoir accordé toute leur attention en m'accompagnant et me dirigeant de la meilleur manière qu'il soit.

Je tiens à remercier tous les membres du jury à savoir Mme KECHOUD d'avoir accepté de présider le jury, Mr.HELLAL, Mr.MESRATI, Mr.SALHI qui m'ont fait l'honneur de traiter et d'évaluer mon travail.

Je remercie Mr BELKACEM KHALED qui m'a aidé à effectuer ce travail au sein de cette grande entreprise Qu'est ENGTP.

Un grand merci à tous le personnel de L'ENGTP, et notamment au département soudage en particulier Mohamed, Mr Lahouel, Mr mansouri, Mr zaffoune, sans oublier Monsieur Gouila Tayeb et son équipe notamment ami djaefar qui m'ont été d'une aide précieuse en mettant à ma disposition des informations très utiles pour mon travail.

Mes remerciements vont également à tout le personnel du laboratoire de l'ENGTP et notamment au chef de service (Mr ouahil) qui a bien voulu mettre à ma disposition une documentation riche et variée et le matériel nécessaire.

Mes remerciements vont également à tous mes enseignants du département métallurgie qui ont contribué activement à ma formation. Qu'ils trouvent dans ce mémoire le bien de ce qu'ils m'ont appris.

Je remercie tous ceux qui ont contribué de prêt ou de loin à ce travail.

Ma profonde gratitude à tout le personnel de l'Ecole Nationale Polytechnique pour m'avoir accueillis au sein de leur établissement et de m'avoir octroyé la meilleur formation qui soit.

Sans oublier tous mes instituteurs et enseignants qui m'ont pris en main depuis la crèche.

Et enfin un grand merci à tous les algériens.

Merci beaucoup.

Résumé

Ce présent travaille entre dans le cadre d'étude de soudabilité sur assemblage hétérogène (Acier inoxydable "Duplex" / Acier au "carbone – manganèse"), en se servant des diagrammes de Prédiction (schaeffler dans Notre cas) ; ainsi que d'évaluer les caractéristiques microstructurales et le Comportement de l'assemblage Aux basses températures.

Mots clés : Acier inoxydable, Acier Duplex, Aciers au (Carbone – Manganèse), Diagrammes de constitution, Schaeffler, Soudabilité des aciers inoxydables, Soudabilités des aciers au carbone, Assemblages hétérogènes, Soudage.

Abstract

This present works enters into the framework of study of weldnability on heterogenous Assembly (stainless Steel " Duplex" / Steel to the " carbon - manganese"), While using the Diagrams of Prediction (schaeffler in our case); as well as to evaluate the micro structural Characteristics and the assembly Behavior To The low temperatures.

Key words: stainless steels, duplex steels, (C-Mn) Steels, constitution diagrams, Schaeffler, weldnability of stainless steels, weldnability of carbon steels, heterogenous assembly, welding

ملخص

هذا العمل يندرج في إطار دراسة عن الالتحام غير المتجانس [فولاذ المقاوم للصدأ "مزدوج البنية" / فولاذ (كربون- منغنيز)]، وذلك باستخدام الرسوم البيانية للتنبؤ (شافلير في هذه الحالة) وكذلك لتقييم خصائص البنية الجزئية و سلوك التجمع في درجات الحرارة المنخفضة.

كلمات المفاتيح :

الفولاذ المضاد للتأكسد، الفولاذ الأوستينوفيري، الفولاذ الصلب (كربون – منغنيز) ، الرسوم البيانية، شافلير، ألحام الفولاذ المضاد للصدأ، ألحام الفولاذ الصلب (كربون – منغنيز) ، التجميع الغير متجانس ، اللحام.

Liste des figures

Partie bibliographique :

Figure I-1 : Diagramme d'équilibre fer-carbone.....	2
Figure I-2 : Microstructure d'un acier hypoeutectoïde.....	3
Figure I-3 : Structure perlitique.....	3
Figure I-3 : Microstructure d'un acier hypereutectoïde.....	4
Figure I-4 : Variation des propriétés mécaniques des aciers au carbone en fonction de la teneur en carbone.....	5
Figure I-6 : Influence des éléments d'addition sur les caractéristiques mécaniques des aciers.....	7
Figure I-7 : Coupes du diagramme ternaire fer-chrome-nickel Pour des teneurs croissantes en nickel. Influence du nickel Sur l'extension de la boucle γ	8
Figure I-8 : Structure ferritique.....	9
Figure I-9 : Structure Austénitique.....	9
Figure I-10 : Structure biphasée (austénite +ferrite).....	10
Figure I-11 : Structure martensitique.....	11
Figure II-1: Illustration du déroulement de l'opération de soudage.....	14
Figure II-2 : Chanfreins en 'V'.....	15
Figure II-3 : Illustration du procédé GTAW.....	16
Figure II-4 : Cordon de soudure.....	17
Figure II-5 : Courbe mettant en évidence $\theta = f(t)$	18
Figure II-6 : Courbe mettant en évidence $\theta_m = f(x)$	19
Figure II-7 : Cycles thermiques de différents points situés à une distance x du cordon de soudure.....	19
Figure II-8 : Solide thermique.....	20
Figure II-9 : Les isothermes.....	20
Figure II-10 : Les effets thermiques du soudage en plusieurs passes, dans le cas d'une soudure sur bords chanfreinés en V, exécutée en trois passes sans préchauffage.....	21
Figure II-11 : Illustration de la structure obtenue après refroidissement de la zone fondue.....	23
Figure II-12 : Coupe pseudo binaire du diagramme fer-chrome-nickel à 70% de fer.....	24
Figure II-13 : Cycle thermique de soudage et transformations structurales.....	25

Figure II-14: Les différentes régions de la zone affectée par la chaleur et les différentes microstructures. Obtenues au voisinage de la zone fondue.....	26
Figure II-15: Diagramme TRC spécialement élaboré pour le soudage.....	27
Figure III-5: Diagramme de scheaffler.....	28
Figure III-6: Diagramme de Delong.....	29
Figure III-7: Diagramme d'Espy.....	30
Figure III-8: Diagramme WRC92.....	30
Figure III-9: Diagramme de scheaffler.....	32
Figure III-6: Zones à risques métallurgiques.....	33
Figure III-7: Taux de dilution.....	34
Figure III-8: Illustration de la conception graphique.....	36
Figure VI-1: Transition.....	37
Figure VI-2: Portions sous forme de coudes.....	37
Figure VI-3: Supports de fixation de pipelines.....	38

Partie techniques expérimentales :

Figure I-1: Coupon de prélèvement.....	39
Figure I-2: Echantillon obtenu.....	39
Figure I-3: Echantillon obtenu.....	39
Figure I-4: Pollisseuse.....	40
Figure I-5: Illustration de la technique.....	41
Figure I-6: Microscope optique.....	42
Figure III-1: Position de soudage.....	43
Figure III-2: Dispositif (ENGTP).....	43
Figure III-3: Torche (ENGTP).....	43
Figure III-4: Soudage GTAW avec double protection gazeuse. (ENGTP).....	44
Figure IV-1: Schéma + Dispositif de l'attaque électrolytique. (ENSP).....	45
Figure V-1: Prélèvement aléatoire des clichés.....	47
Figure V-2: Logiciel de traitement d'image '' IMAGE J ''.....	48
Figure V-3: Avant traitement.....	48

Figure V-4: Après traitement.....	48
Figure VI-1: Appareil d'essai de résilience.....	49
Figure VI-2: Dispositif de l'essai de résilience.....	49
Figure VI-3: Les dimensions réelles de l'éprouvette.....	50
Figure VI-4: Positionnement de l'éprouvette.....	50
Figure VI-5: Neige carbonique.....	50
Figure VII-1: Dimensions de l'empreinte pyramidale et formules de calcul.....	51
Figure VII-2: Appareil de mesure de dureté (Vickers) (ENSP).....	51

Partie résultats et interprétations :

Figure I-1: Microstructure de l'acier inoxydable.....	53
Figure III-1: Macrographie du joint soudé.....	54
Figure III-2: Micrographie optique du métal de base (acier duplex).....	55
Figure III-3: Micrographie optique de la ZAT du coté duplex.....	55
Figure III-4: Micrographie optique du métal fondu.....	56
Figure III-5: Micrographie optique de la zone de transition coté acier au carbone.....	56
Figure III-6: Micrographie optique de la ZAT du coté acier au carbone.....	56
Figure III-7: Micrographie optique du métal de base (acier au carbone).....	57
Figure IV-1: Position du point figuratif sur le diagramme.....	58
Figure IV-2: Image traitée.....	59
Figure V-1: Courbe de résilience (zone fondue).....	60
Figure V-2: Courbe de résilience (zone affecté thermiquement coté acier au carbone).....	61
Figure V-3: Profil de la Micro dureté de la première passe.....	62
Figure V-4: Profil de la Micro dureté de la deuxième passe.....	63
Figure V-5: Profil de la Micro dureté de la troisième passe.....	64
Figure VI-1: Transition (Acier au carbone – zone fondue).....	65
Figure VI-2: Transition (Acier au carbone – zone fondue)''2''.....	66
Figure VI-3: Zone fondue.....	66

Figure VI-4: Essai réalisé à -10 °C.	67
Figure VI-5: Essai réalisé à -65 °C.	67
Figure VI-6: Essai réalisé à -150 °C.	68
Figure VI-7: Essai réalisé à -178 °C.	68
Figure VI-8: Essai réalisé à -10 °C.	69
Figure VI-9: Essai réalisé à -60 °C.	69
Figure VI-10: Essai réalisé à -65 °C.	70
Figure VI-11: Essai réalisé à -80 °C.	70

Liste des tableaux

Partie bibliographique :

Tableau I-1: Influence des éléments d'addition sur les caractéristiques mécaniques des aciers.....	5
Tableau I-2 : Composition chimique des aciers inoxydables au sténo-ferritique.....	9
Tableau I-3 : Composition chimique des aciers inoxydables martensitiques.....	11
Tableau I-4 : Valeurs typiques de propriétés des différents aciers inoxydables.....	11
Tableau I-5 : Propriétés mécaniques des aciers inoxydables.....	12
Tableau I-6 : Principales applications des aciers inoxydables.....	12
Tableau I-7 : Principales applications des aciers inoxydables (suite).....	13
Tableau II-1 : Classification générale des procédés de soudage en fonction de l'énergie mise en jeu.....	15
Tableau III-4 : Formules de calcul.....	31
Tableau III-5 : Comparaison entre les différents diagrammes.....	31
Tableau III-6 : Caractéristiques des différentes structures.....	33

Partie techniques expérimentales :

Tableau II-7: Quelques valeurs caractéristiques du métal d'apport.....	42
---	----

Partie résultats et interprétations :

Tableau I-8: Composition chimique de l'acier inoxydable analysé (méthode de fluorescence X).....	53
Tableau II-9: Composition chimique de l'acier au carbone analysé (par spectroscopie).....	54
Tableau IV-1 : Taux de ferrite.....	59
Tableau V-1 : Résultats des essais de résilience pour la zone fondue des éprouvettes.....	60
Tableau V-2 : Résultats des essais de résilience pour la zone affectée thermiquement des éprouvettes.....	61
Tableau V-3 : Valeurs de la micro dureté de la première passe.....	62
Tableau V-4 : Valeurs de la micro dureté de la deuxième passe.....	63
Tableau V-5 : Valeurs de la micro dureté de la troisième passe.....	64
Tableau VI – 1: Composition chimique "coté ZAT".....	65
Tableau VI – 2: Composition chimique "coté zone de transition".....	66
Tableau VI – 3: Composition chimique "zone fondue".....	66

Sommaire

-Partie bibliographique-

Introduction générale.....	1
Chapitre "I" : Généralités sur les aciers.	
I – 1 – INTRODUCTION.....	2
I – 2 – IDENTIFICATION DES ACIERS.....	2
I – 2 – 1 – Aciers au carbone.....	2
I – 2 – 2 – Aciers inoxydables.....	7
I – 3 – CONCLUSION.....	13
Chapitre "II" : Soudage	
II – 1 – INTRODUCTION.....	14
II – 2 – DEFINITION ET PROCEDES.....	14
II – 2 – 1 – Définition du soudage.....	14
II – 2 – 2 – Types de soudage.....	14
II – 2 – 3 – Préparation des soudures.....	15
II – 2 – 4 – Les différents procédés de soudage.....	15
II – 3 – Métallurgie du soudage.....	17
II – 3 – 1 – Description d'un cordon de soudure.....	17
II – 3 – 2 – Facteurs d'influence.....	17
II – 3 – 2 – 1 – Facteur thermique (ou effet thermique).....	17
II – 3 – 3 – La dilution.....	22
II – 4 – LES DIFFERENTES TRANSFORMATIONS DE PHASES LORS DU SOUDAGE.....	23
II – 4 – 1 – ACIERS DUPLEX.....	23
II – 4 – 1 – 1 – Solidification et formation des structures.....	23
II – 4 – 1 – 2 – Changements structuraux durant le soudage.....	24
II – 4 – 2 – Aciers au carbone.....	25
II – 4 – 2 – 1 – Transformations au cours du soudage.....	25
II – 4 – 2 – 2 – Transformations lors du chauffage.....	26
II – 4 – 2 – 3 – Transformations lors du refroidissement.....	27
II – 5 – CONCLUSION.....	27
Chapitre "III" : Etude de soudabilité sur assemblages hétérogènes	
III – 1 – INTRODUCTION.....	28
III – 2 – Diagrammes de constitution.....	28
III – 2 – 1 – <i>Diagramme de schaeffler</i>	28
III – 2 – 2 – <i>Diagramme de Delong</i>	29
III – 2 – 3 – <i>Diagramme d'Espy</i>	30

III – 2 – 4 – <i>Diagramme WRC92</i>	30
III – 2 – 5 – <i>Formules de calcul des équivalents</i>	31
III – 2 – 6 – Comparaison des différents diagrammes.	31
III – 3 – Présentation du diagramme de "SCHAEFFLER".	32
III – 4 – Caractéristiques métallurgiques.	33
III – 4 – 1 – Différentes structures.	33
III – 4 – 2 – Identification des différentes zones à risques métallurgiques du diagramme de schaeffler.	33
III – 5 – Détermination de la structure de la zone fondue à partir du diagramme.	34
III – 5 – 1 – La dilution.	34
III – 5 – 2 – Construction graphique.	35
III – 6 – CONCLUSION.	36

Chapitre "IV" : Utilité du soudage hétérogène.

IV – Utilité du soudage hétérogène.	37
--	----

-Partie techniques expérimentales -

I – Identification des métaux de base.	39
I – 1 – IDENTIFICATION DE L'ACIER INOXYDABLE.	39
I – 1 – 1 – Prélèvement de l'échantillon.	39
I – 1 – 2 – Analyse chimique de l'échantillon.	40
I – 1 – 2 – 1 – Préparation de l'échantillon.	40
I – 1 – 2 – 2 – Exécution de l'expérience.	40
I – 1 – 2 – 3 – Analyse chimique par spectroscopie.	41
I – 1 – 2 – Analyse métallographique de l'échantillon.	41
I – 1 – 2 – 1 – Préparation de l'échantillon.	41
I – 1 – 2 – 2 – Attaque et observation.	42
I – 2 – IDENTIFICATION DE L'ACIER AU CARBONE.	42
II – Identification du métal d'apport.	42
III – Exécution de l'opération de soudage.	43
Matériel utilisé pour le procédé GTAW.	43
IV – Etude métallographique.	44
IV – 1 – Macrographie.	44
IV – 1 – 1 – Prélèvement de l'échantillon.	44
IV – 1 – 2 – Polissage de l'échantillon.	44
IV – 1 – 3 – Attaque chimique.	45
V – 2 – Micrographie.	45

V – Calcul du taux de ferrite.	46
V – 1 – Par le diagramme de schaeffler.....	46
V – 1 – 1 – Construction du diagramme.	46
V – 1 – 2 – Calcul de la dilution.	46
V – 1 – 3 – Détermination du point figuratif.	46
V – 2 – Par le logiciel d’analyse d’image ’’IMAGE J’’.....	47
VI – Essai de résilience.	49
VI – 1 – Principe de l’essai.....	49
VI – 2 – Type d’éprouvettes utilisées et leur positionnement dans le joint soudé.....	50
VII – Essai de dureté.	51
VII – 1 – Principe.	51
VII – Caractérisation par le M.E.B.	52

-Partie résultats et interprétations-

I – 1 – Résultats de l’analyse chimique (1)	53
I – 2 – Résultats de l’analyse micrographique	53
I – bis – Interprétation.....	53
II – Résultats de l’analyse chimique (2)	54
II – bis – Interprétation	54
III – 1 – Résultats de l’examen macrographique	54
III – 1 – bis – Interprétation	55
III – 2 – Résultats de l’examen micrographique	55
III – 2 – bis – Interprétation	57
IV – Résultats du calcul du taux de ferrite	58
IV – 1 – Par le diagramme de schaeffler	58
IV – 2 – Par le logiciel de traitement d’image (IMAGE ’’J’’)	59
VI– bis – Interprétation	59
V – Résultats et interprétation des essais mécaniques	60
V – 1 – Essai de résilience	60
V – 1 – bis – Interprétation	61
V – 2 – Essai de micro dureté	62
V – 2 – bis – Interprétation	65
VI – Résultats et interprétation de l’examen au MEB	65
VI – 1 – 1 – observation de la zone de transition.....	65
VI – 1 – 2 – observation de la zone fondue.....	66
VI – 1 – bis – Interprétation.....	66
VI – 2 – Observation des faciès de rupture.....	67
VI – 2 – 1 – Au niveau de la zone fondue.....	67
VI – 2 – 1 – bis – Interprétation.....	68
VI – 2 – 2 – Au niveau de la zone affectée thermiquement coté acier au carbone.....	69
VI – 2 – 2 – bis – Interprétation.....	70
Conclusion générale.....	72

-ANNEXES-

ANNEXE 1 : Présentation de L'ENGTP.

ANNEXE 2 : Les différents types de chanfreins.

ANNEXE 3 : Les différentes positions de soudage.

ANNEXE 4 : Spécification de la procédure de Soudage.

ANNEXE 5 : Description du fil d'apport.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

*Pour de nombreuses applications industrielles il est nécessaire d'assembler par soudage des Matériaux dissemblables (Aciers ferritiques avec des aciers inoxydables austénitiques, ou alliages à base nickel...Etc.).

- Indépendamment du mode opératoire employé, des assemblages comportent une transition brusque à un endroit quelconque de la soudure, et le comportement et les caractéristiques de la soudure seront dans une large mesure déterminés par cette transition et les modifications qu'elle entraîne dans la composition et structure du matériau.

** Ce présent travail consiste à réaliser une étude de soudabilité entre deux Aciers de nuances Différentes "assemblages hétérogène" l'un étant un Acier au carbone (A333, Gr6) et l'autre étant un Acier inoxydable biphasé (A790, S32550) à l'aide d'un fil d'apport ER 2209. en se basant principalement sur le diagramme de schaeffler

A333, A790, ER2209, (désignation ASTM).

Le procédé utilisé est le soudage à arc électrique sous atmosphère protectrice ou proprement dit (T.I.G.)

- L'étude Métallographique a pour but de définir les caractéristiques macroscopique et microscopique du joint soudé.
- L'évaluation du taux de ferrite nous permet de situer le domaine structural de la zone fondu dans le diagramme de schaeffler.
- Les essais mécaniques ont pour but de déterminer les caractéristiques mécaniques de l'assemblage soudé.
- Et l'observation par le MEB nous permettra d'apprécier plus clairement les différentes structures et de conforter les résultats des essais mécaniques.

Chapitre I

Généralités sur les aciers

I – 1 – INTRODUCTION

Les aciers sont élaborés pour résister à des sollicitations mécaniques ou des agressions chimiques ou une combinaison des deux. Pour résister à ces sollicitations et/ou agressions, des éléments chimiques peuvent être ajoutés en plus du carbone. Ces éléments sont appelés éléments d'additions, les principaux sont le manganèse (Mn), le chrome (Cr), le nickel (Ni), le molybdène (Mo).

I – 2 – IDENTIFICATION DES ACIERS

I – 2 – 1 – ACIERS AU CARBONE

I – 2 – 1 – 1 – Définition

L'acier est un alliage de fer et de carbone en proportions diverses, ainsi les aciers titrent moins de 2,1% de Carbone (limite théorique). Au delà de cette teneur l'alliage est nommé fonte.

La limite de 2,1% correspond à l'extrémité du palier eutectique γ -Fe₃-C du diagramme fer-carbone. Ainsi tout au moins à l'équilibre les aciers se solidifient sans apparition d'eutectique c'est-à-dire en absence de carbures Fe₃C primaires inversement aux fontes. Les carbures pourront toujours être dissouts dans le domaine austénitique à l'inverse des fontes.... [1].

D'autres éléments d'alliage peuvent être ajoutés en quantités diverses.

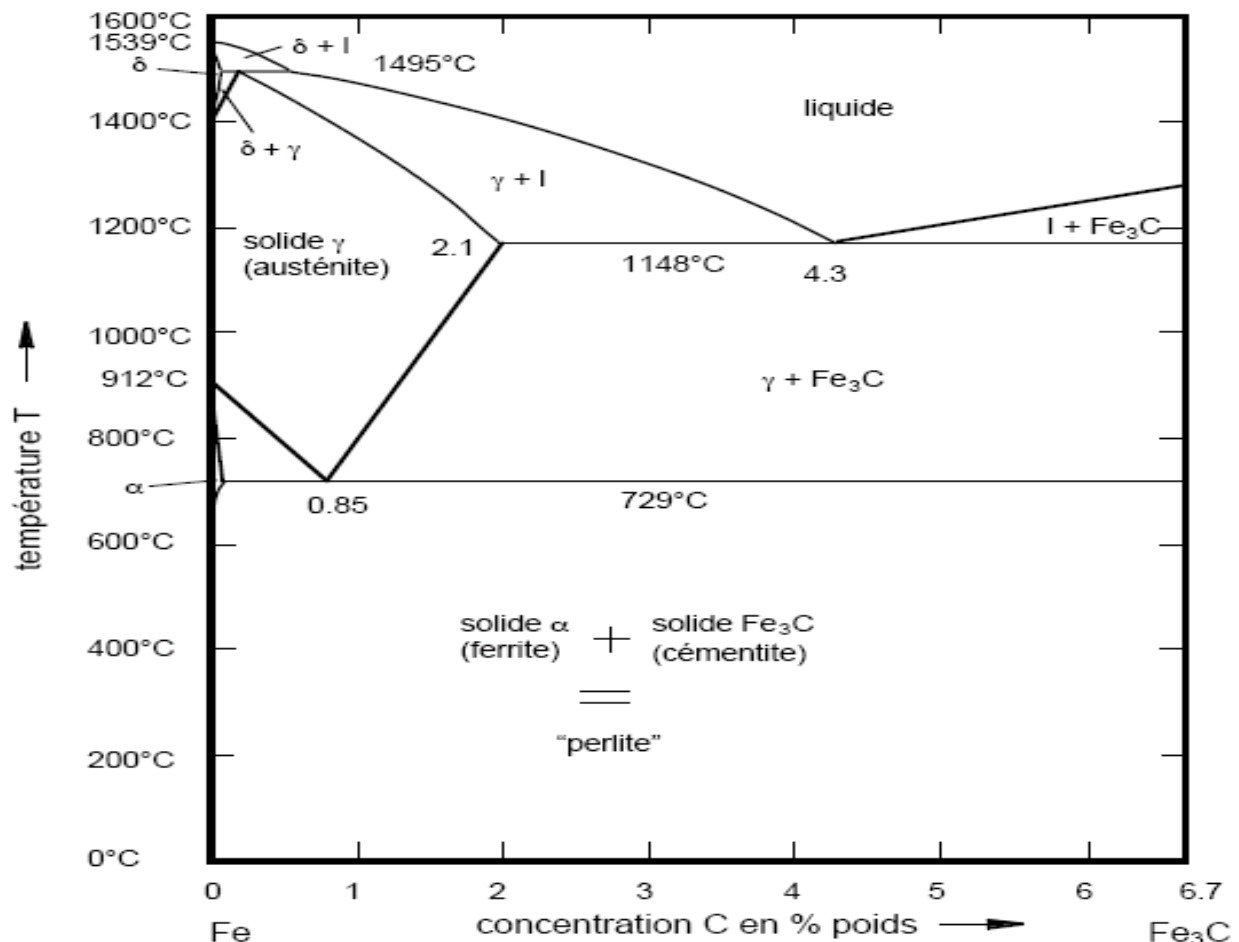


Figure I-1: Diagramme d'équilibre fer-carbone [2].

I - 2 - 1 - 2 - Structures des aciers

En fonction de la teneur en carbone on distingue trois types d'aciers.

- ❖ %C compris entre 0,002 % et 0,85 % : l'acier est du type hypoeutectoïde formé de perlite (ferrite α + cémentite Fe_3C) caractérisée par une structure en lamelles enveloppée dans une phase ferritique [3].

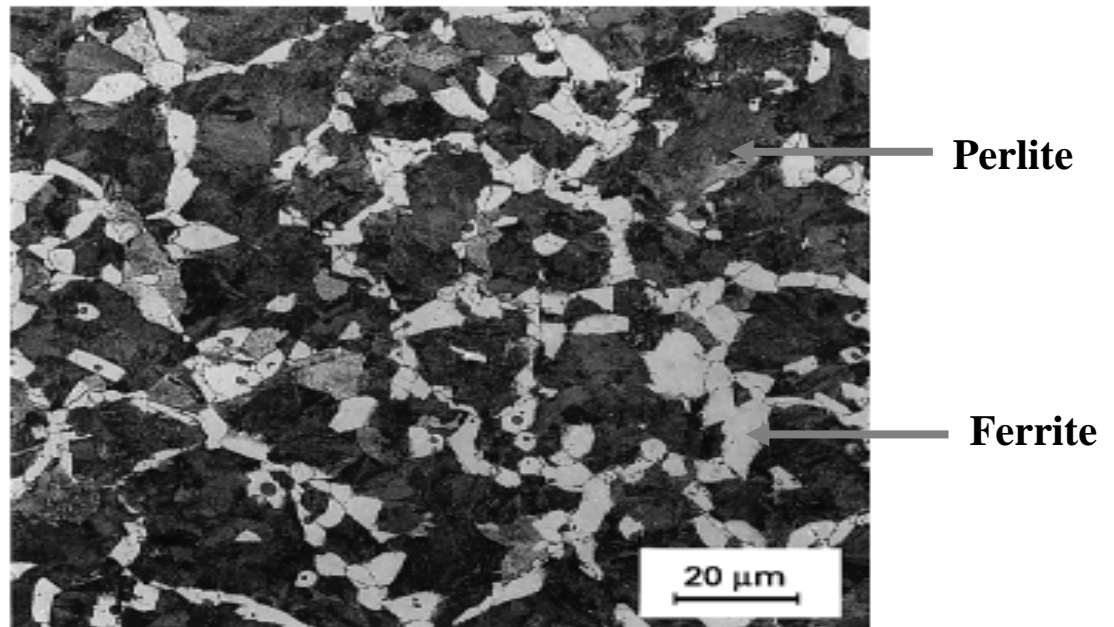


Figure I-2 : Microstructure d'un acier hypoeutectoïde [3].

- ❖ %C = 0,85% : l'acier est du type eutectoïde formé de 100% perlite (ferrite α + cémentite Fe_3C) caractérisée par une structure en lamelles [3].

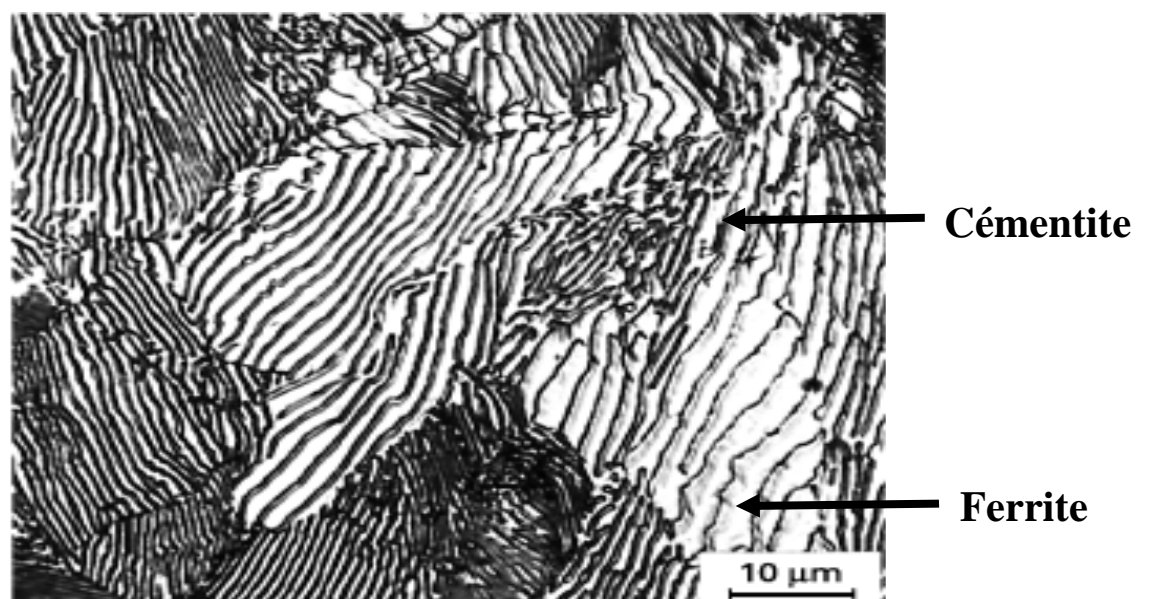


Figure I-3 : Structure perlitique [3].

- ❖ %C ∈] 0,85%, 2,1% [: l'acier est du type hypereutectoïde formé de perlite (ferrite α + cémentite Fe_3C) caractérisée par une structure en lamelles enveloppée dans de la cémentite [3].

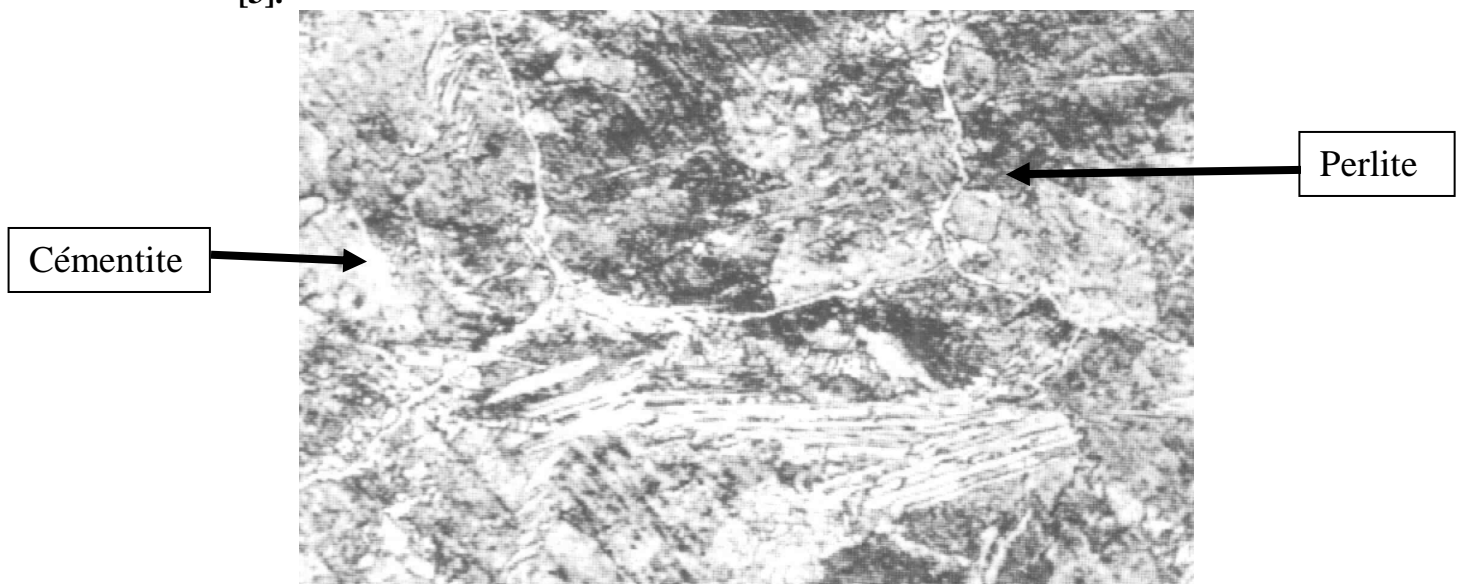


Figure I-4 : Microstructure d'un acier hypereutectoïde [3].

I – 2 – 1 – 3 – Types d'aciers

La norme européenne EN 10027 classe les aciers en quatre catégories principales:

- ✚ les aciers non-alliés d'usage général (construction), dits « aciers à ferrer les ânes ».
- ✚ les aciers non-alliés spéciaux, pour traitement thermique, malléables, soudables, forgeables,...
- ✚ les aciers faiblement alliés, pour trempe et revenu ; les éléments d'alliage favorisent la trempabilité et Permettent d'avoir des structures martensitiques ou bainitiques, donc des aciers à haute dureté, à haute limite élastique, pour les outils, les ressorts, les roulements,...etc.
- ✚ les aciers fortement alliés :
 - les aciers inoxydables,
 - les aciers rapides, pour les outils à forte vitesse de coupe comme les forets.

I – 2 – 1 – 4 – Propriétés

l'intérêt majeur des aciers réside dans le cumul de valeurs élevées dans les propriétés mécaniques fondamentales : résistance aux efforts : module d'élasticité, limite élastique, résistance mécanique ; dureté ; résistance aux chocs (résilience).

De ce fait les aciers restent privilégiés dans presque tous les domaines d'application technique :

- équipements publics (rails, signalisation).
- industrie chimique, pharmaceutique et nucléaire (cuves, réacteurs, tuyauteries).
- moyens de transport (automobile, aéronautique, ferroviaire, aérospatial).
- médical (instruments et appareils).
- produits destinés au grand public (meubles, ustensiles de cuisine, électroménager).....etc.

Les propriétés des aciers peuvent être modifiées en ajoutant d'autres éléments, principalement métalliques, et on parle d'aciers alliés. De plus, on peut encore améliorer grandement leurs caractéristiques par des traitements thermiques (notamment les trempes) prenant en surface ou à cœur de la matière ; on parle alors d'aciers traités [1].

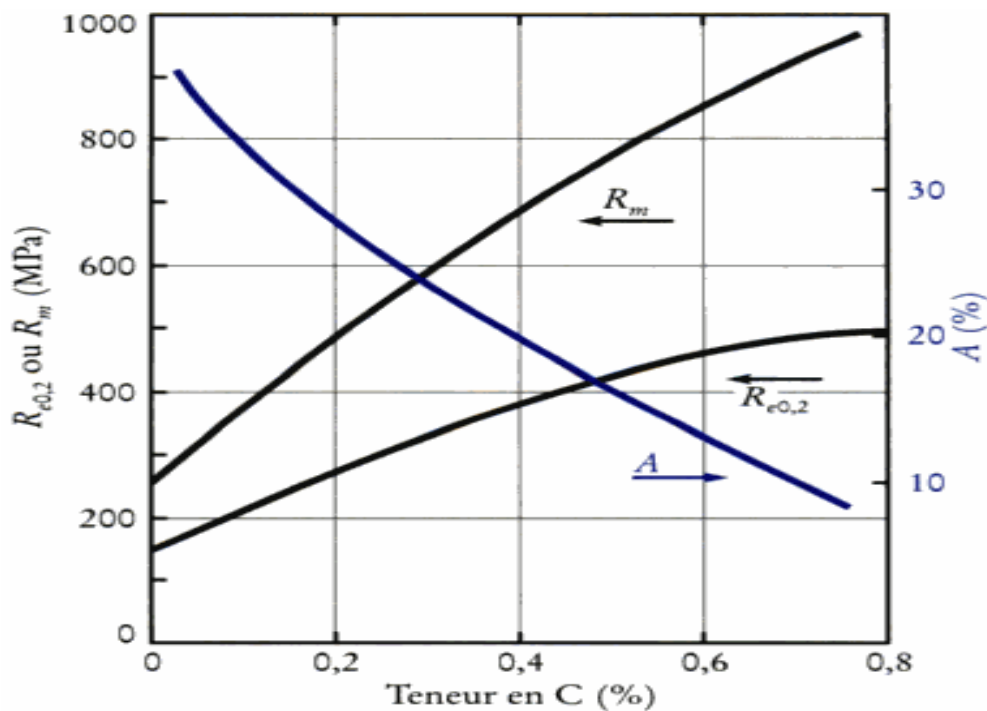


Figure I-5 : Variation des propriétés mécaniques des aciers au carbone en fonction de la teneur en carbone [4].

I – 2 – 1 – 5 – Influence des éléments d'addition

Tableau I-1: Influence des éléments d'addition sur les caractéristiques mécaniques des aciers [1].

	Résistance à la traction	Re	Résistance à l'usure	Résilience	Dureté à froid	Dureté à chaud	A%
Carbone	↗	↗	↗	↘	↗		↘
Chrome	↗	↗	↗	↘	↗		↘
Manganèse	↗	↗	↗		↗		↘
Molybdène	↗	↗				↗	
Nickel	↗	↗	↗	↗			↘
Silicium	↗	↗	↗		↗		
Tungstène	↗	↗	↗		↗	↗	

I – 2 – 1 – 6 – Les aciers au manganèse

Le manganèse est un élément d'alliage gammagène, déplace les courbes TTT et TRC vers la Droite.

Le manganèse comme tous les autres éléments d'alliage courants augmente la trempabilité des aciers, c'est-à-dire provoque un accroissement de l'étendu de la zone d'instabilité de l'austénite à gauche de la courbe de transformation.

Le manganèse durcit légèrement la ferrite. Pour les faibles teneurs en carbone, il abaisse la température de transition (ductile-fragile) des aciers, alors qu'il élève cette température pour les fortes teneurs en carbone (> 0,5 %)

[5].

Les aciers au manganèse se caractérisent par une ténacité élevée et une excellente soudabilité. Donc particulièrement adapté aux conditions sévères d'usure combinées à des impacts ou de la pression.

Ces aciers peuvent être utilisés dans plusieurs applications :

- pointes d'aiguilles.
- Barreaux de scalpeurs.
- Plats de glissement pour skips.

Secteur pétrolier (canalisation) [6].

I – 2 – 2 – ACIERS INOXYDABLES

I – 2 – 2 – 1 – Définition

Les aciers inoxydables sont essentiellement des alliages Fe-Cr ou Fe-Cr-Ni à teneur en carbone variant de 0,02 à 1 %. Comme on peut le constater le Chrome est l'élément clé dans ces types d'aciers, vu qu'il octroie le caractère d'inoxidabilité à ces aciers à travers la formation d'un film passif mince à la surface du substrat, permettant ainsi la protection de ce dernier des milieux agressifs.

Notons que la teneur en Chrome doit être supérieure ou égale à 10,5 %. D'autres éléments tels que "Ni, Mo, N, S, Si, Nb....." Sont ajoutés afin d'améliorer les propriétés mécaniques, la résistance à la corrosion ou encore pour favoriser certaines structures par rapport à d'autres [1,2].

I – 2 – 2 – 2 – Influence des éléments d'addition

I – 2 – 2 – 2 – 1 – Influence du Chrome

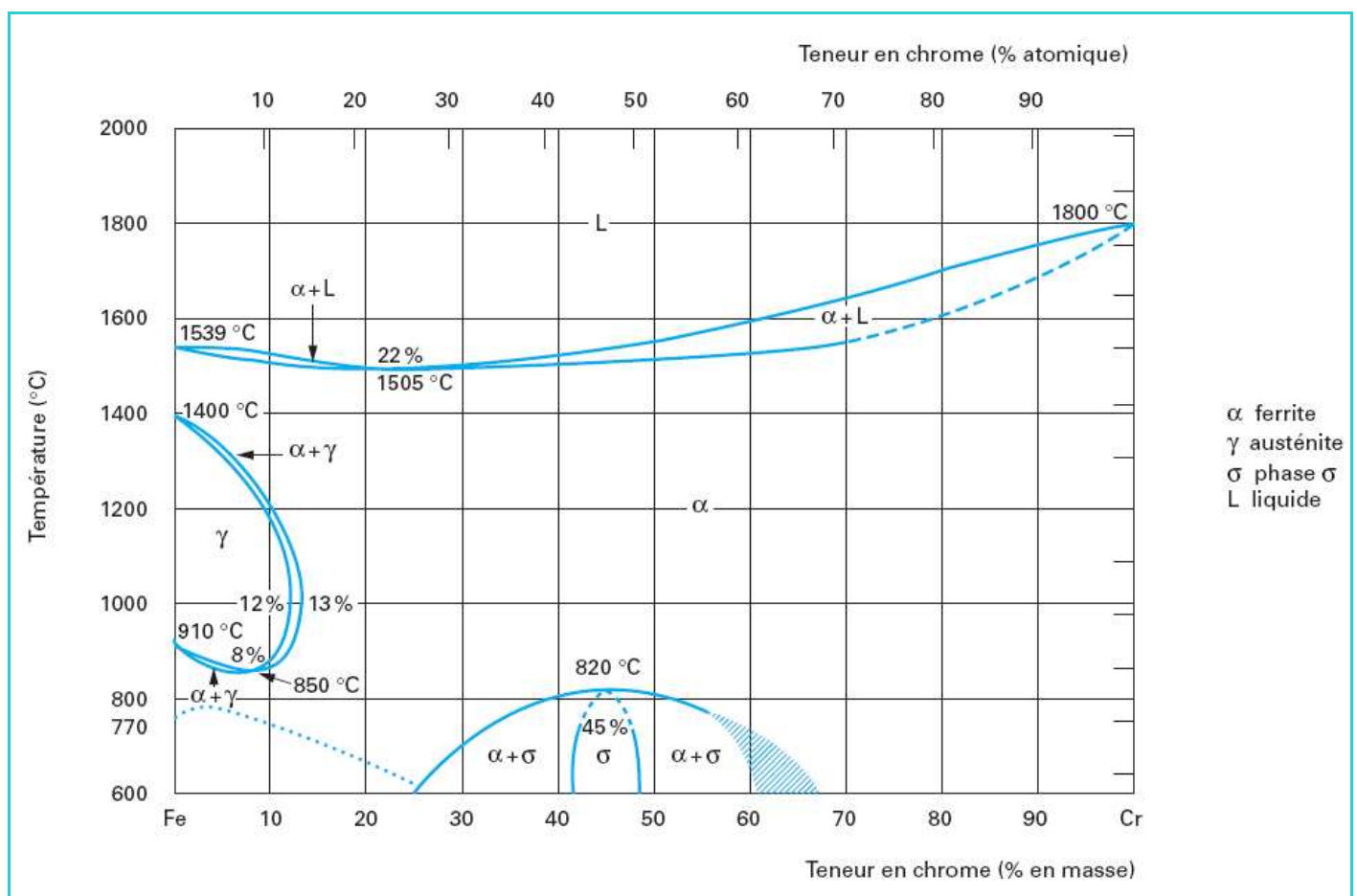


Figure I-6 : Influence des éléments d'addition sur les caractéristiques mécaniques des aciers [1].

Avant toute chose il faut préciser que le Chrome a une structure (Cubique Centrée), ce qui nous amène à dire que c'est un élément alphasène donc favorisant le domaine ferritique, d'où le domaine austénitique est réduit à une boucle comme spécifié dans le diagramme "coté gauche" Fe-Cr (Figure I-6).

Comme on peut le voir le diagramme peut être délimité en deux régions :

- Cr < 13% : ou les alliages peuvent subir une austénitisation totale (100% γ) ou partielle ($x\% \alpha + y\% \gamma$) à travers des traitements requis bien sur.
- Cr > 13% : ou les alliages ne peuvent qu'être ferritique [2].

I – 2 – 2 – 2 – 2 – Influence du Nickel

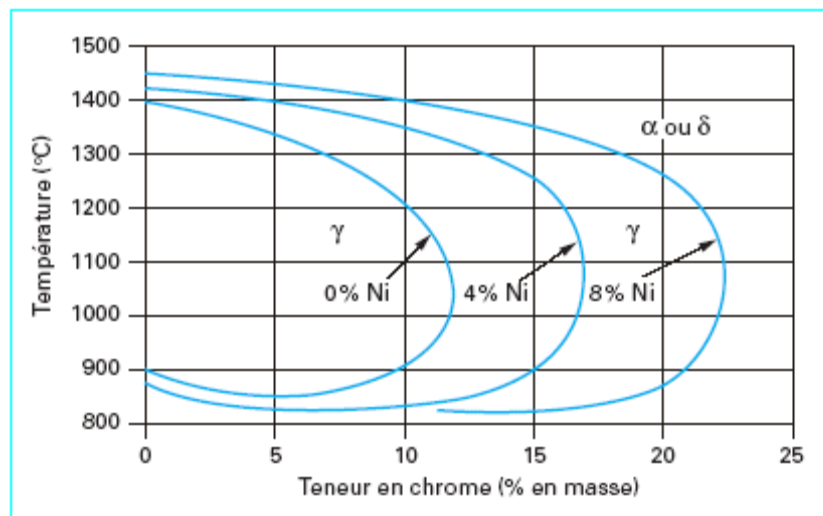


Figure I-7 : Coupes du diagramme ternaire fer-chrome-nickel Pour des teneurs croissantes en nickel. Influence du nickel Sur l'extension de la boucle γ [2].

Le Nickel lui a une structure (Cubique à Faces Centrées). Élément gammagène d'où le domaine austénitique est favorisé en sa présence [1].

Seulement l'ajout du nickel a un double effet, le premier étant l'élargissement du domaine austénitique (γ) Et le second consiste en la diminution du point Ms correspondant à la température de début de la transformation martensitique [7].

II – 2 – 2 – 2 – 3 – Influence des autres éléments

- Carbone : élément gammagène => favorise le domaine austénitique au même titre que le Ni, sauf que sa teneur est basse pour éviter la formation des carbures de Chrome qui fragilisent la résistance de l'acier [2].
- Azote : même effet que le carbone, il permet aussi d'améliorer certaines propriétés mécanique telle que la limite élastique [8].
- Le soufre : améliore l'usinabilité mais affecte la résistance à la corrosion [8].
- Le manganèse : élément gammagène, qui procure une amélioration de l'usinabilité [2].
- Le cuivre : rajouté aux aciers austénitique pour augmenter la résistance à la corrosion [8].
- Le phosphore : il garde la plasticité à son niveau maximum [8].
- Le titane : fixateur de carbone pour éviter la saturation de l'austénite en carbone qui provoquera à ce moment la une transformation martensitique [2].

I – 2 – 2 – 3 – Les différents types d’aciers inoxydables :

I – 2 – 2 – 3 – 1 – Les aciers inoxydables ferritiques

Ce sont des alliages qui ne présentent pas des transformations de phases. Ils se caractérisent par une structure α (Cubique centrée). Les éléments alpha gène et gammagènes sont en équilibre de manière à ce que l’alliage soit à toute température à l’extérieur de la boucle austénitique (γ) [7].

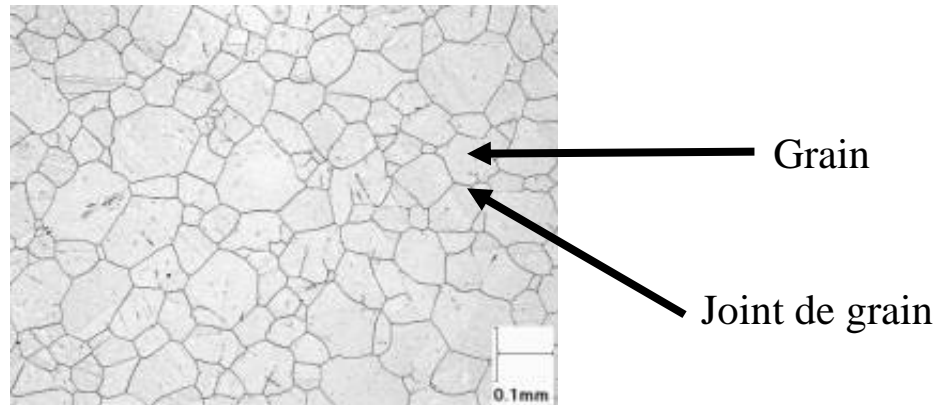


Figure I-8: Structure ferritique [9].

I – 2 – 2 – 3 – 2 – Les aciers inoxydables austénitiques

Ce sont des alliages à structure complètement austénitique à haute température (1050-1150 °C). Cette structure est ensuite maintenue à l’état métastable par hypertrempe à l’ambiante [7].

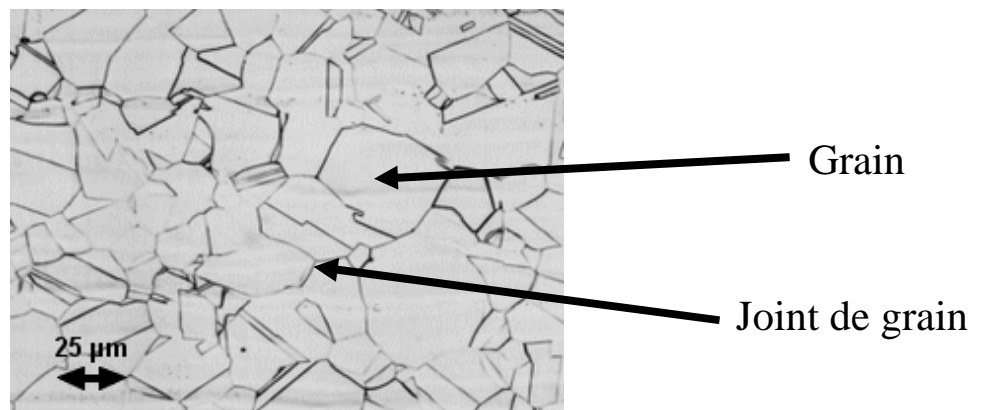


Figure I-9: Structure Austénitique [9].

I – 2 – 2 – 3 – 3 – Les aciers inoxydables austéno-ferritique "DUPLEX"

Découverts au tout début des années 1930 par J. Hochemann ils sont constitués de deux phases (Austénite + Ferrite). [2].

Ces aciers sont obtenus en refroidissant une composition chimique à 1100°C du domaine biphasé. La phase gamma reste métastable et la phase alpha reste inchangée, on obtiendra à la fin une structure mixte ($\alpha+\gamma$) identique à celle à l’équilibre à haute température.

Les taux d’austénite et de ferrite sont équilibrés pour contenir entre 40 et 60 % de ferrite.

Tableau I-2 : Composition chimique des aciers inoxydables austéno-ferritique [10].

Cr	C	Ni	Mo	Autres éléments (N)
24-27	0.05-1.2	4.5-7	2-6	0.05-0.2

Grâce à leur haute teneur en chrome, les aciers duplex ont une très bonne résistance à la corrosion. Aussi la nature biphasée œuvre à améliorer les propriétés mécaniques et fournit une résistance particulière à la corrosion (intergranulaire et sous contrainte) [11].

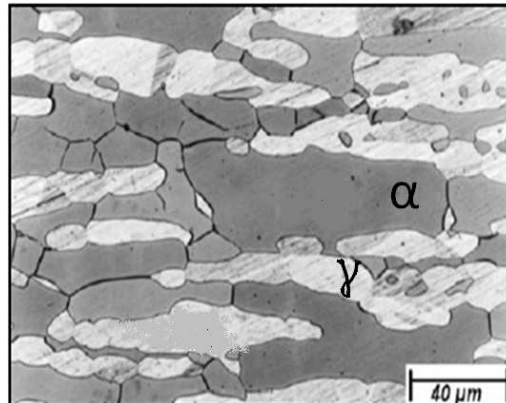


Figure I-10: Structure biphasée (austénite +ferrite) [9].

Notons aussi que ces aciers présentent un très bon comportement au soudage. Ces aciers contiennent un pourcentage de chrome variant de 22 à 27% et environ 4 à 8 %Ni ; ainsi que d'autres éléments d'addition tel que : Mo, Cu, N,etc. [10].

Les aciers duplex peuvent être classés en quatre sous-groupes :

- 1- Sous-groupe 1 : La seule nuance dans ce groupe est le 2304. Seulement sa résistance n'est pas aussi élevée que les aciers inoxydables austénitiques, le 2304 est considéré comme un acier inoxydable performant vu qu'il contient une faible teneur en carbone et une teneur élevée en azote qui procurent des propriétés élevées en matière de résistance à la corrosion. Il est aisément soudable et il présente une dureté élevée ainsi qu'une bonne résistance à la corrosion sous contraintes que l'acier 316L.
- 2- Sous groupe 2 : Dont la nuance est le 2205, ce type d'acier est le plus utilisé des duplex parce qu'il présente des propriétés performantes en matière de résistance à la corrosion, facilité d'élaboration, ainsi qu'en matière de prix de revient. Ces aciers ont une résistance élevée à la corrosion sous contrainte supérieure à celle des aciers austénitiques 316L.
- 3- Sous groupe 3 : Ces aciers contiennent aux alentours de 25% de chrome, cette teneur élevée contribue à une meilleure résistance à la corrosion localisée comparé au groupe précédent par contre il a une faible résistance à l'eau de mer. Le chrome confère une très bonne résistance dans les milieux acides, par contre une teneur élevée de ce dernier accélère la cinétique de précipitation des phases nuisibles qui conduit à l'endommagement de l'acier d'où la nécessité d'un traitement thermique adéquat.
- 4- Sous groupe 4 : C'est les plus alliés de toute la famille des aciers inoxydables la teneur élevée en Chrome, Nickel, Azote, Molybdène, confère une meilleure résistance à la corrosion ainsi qu'une dureté élevée. Ces aciers ont une très bonne résistance à la corrosion par piqure et par crevasses. D'ailleurs ce groupe est appelé le groupe des super-duplex [4].

Les aciers duplex ont généralement :

- des caractéristiques mécaniques ainsi qu'une résistance à la corrosion élevées.
- insensibilité à la corrosion inter granulaire.

- Seulement ils présentent un risque de Fragilisation à chaud [7].

I – 2 – 2 – 3 – 4 – Les aciers inoxydables martensitiques

Les aciers martensitiques ont quant à eux une structure tétragonale (centrée).

Pour avoir cette structure il est nécessaire de rester dans la boucle γ , ainsi en effectuant une opération consistant à (un chauffage à une température supérieure à 950 °C, un maintien, suivi d'un refroidissement rapide) l'acier aura une structure martensitique.

Cette structure est caractérisée par une dureté, charge à la rupture, et une limite d'élasticité élevées. [2].

Tableau I-3 : Composition chimique des aciers inoxydables martensitiques [10].

Cr	C	Ni	Mo	Autres éléments (N)
11,5 % - 18 %	0.05% - 1.2%	Jusqu'à 6 %	Jusqu'à 1,5 %	0.05 % - 0.2 %

En générale ils ont une dureté élevée, Ductilité limitée, résistance à la corrosion plus au moins bonne. [7].

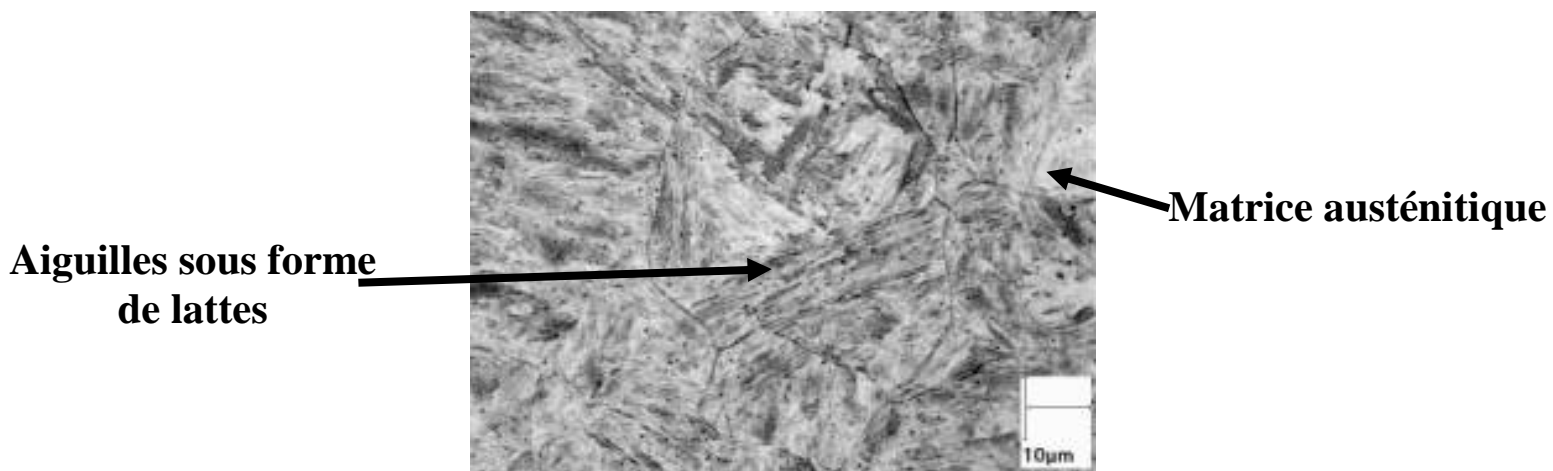


Figure I-11: Structure martensitique [9].

I – 2 – 2 – 4 – Propriétés physiques des aciers inoxydables

Tableau I-4 : Valeurs typiques de propriétés des différents aciers inoxydables [7].

	Masse volumique (g . cm ⁻³)	Coefficient de dilatation à 300°C (10 ⁻⁶ K ⁻¹).	Conductivité thermique à 20°C (Ω.m ⁻¹ .K ⁻¹).	Capacité thermique (J.Kg ⁻¹ K ⁻¹)	Résistivité (µΩ.cm).	Magnétisme	Module d'élasticité (GPA).
Ferritique	7,8	10 – 11,5	20,9	460	55	Ferromagnétique	206
Austénitiques	7,9 à 8	16,5	14,6	500	72 à 74	Amagnétique	193
Martensitiques	7,8	10,8 à 11,5	25,1	460	55 – 60	Ferromagnétique	206
<i>Austéno-ferritique</i>	<i>7,87</i>	<i>15</i>	<i>16,7</i>	<i>500</i>	<i>70</i>	<i>Ferromagnétique</i>	<i>200</i>

Les propriétés physiques des aciers inoxydables dépendent beaucoup de la structure de ces derniers.

On constate que la phase austénitique est Amagnétique contrairement aux structures ferritiques et martensitiques qui sont ferromagnétiques.

- les coefficients de dilatation des ferrites et martensite sont moins élevés que ceux de l'austénite d'où l'observation des phénomènes de dilatation thermique gênants surtout pour les structures mixtes au sténo-ferritique [3].

I – 2 – 2 – 5 – Propriétés mécaniques des aciers inoxydables

Tableau I-5 : Propriétés mécaniques des aciers inoxydables [7].

Acier	Limite d'élasticité $R_{p0,2}$ (N/mm ²).	Résistance à la rupture R_m (N/mm ²).	Allongement à la rupture A (%)
Ferritique	370	500	26
Austénoferritiques	620	840	30
Austénitique	270	620	56

I – 2 – 2 – 6 – Domaines d'utilisation des aciers inoxydables

Tableau I-6 : Principales applications des aciers inoxydables [7].

Famille	Applications principales
Aciers inoxydables (Ferritiques)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Secteur automobile (pots d'échappement, pots catalytiques). ➤ Bâtiment. ➤ Sucrierie (tubes minces). ➤ Containers. ➤ Eviers. ➤ Ballon d'eau chaude.
Aciers inoxydables (Austénitiques)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Industrie chimique. ➤ Retraitement du combustible. ➤ Appareillage scientifiques. ➤ Electronique

Tableau I-7 : Principales applications des aciers inoxydables (suite) [7].

Famille	Applications principales
<i>Aciers inoxydables (Austéno-ferritiques)</i>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ <i>Industrie chimique.</i> ➤ <i>Industrie papetière.</i> ➤ <i>Industrie pétrolière.</i> ➤ <i>Chaudronnerie lourde.</i>
Aciers inoxydables (Martensitiques)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Pièces mécaniques. ➤ Vannes. ➤ Robinets. ➤ Outils ménagers (couteau, cuillers, fourchettes, ➤ Outils chirurgicaux. Grosses pièces industrielles (vannes, pompes, turbines hydrauliques,... ; etc.).

I – 3 – CONCLUSION

Les aciers de part leurs propriétés et leurs comportements dans certaines conditions, restent les plus privilégiés dans presque tous les domaines d'applications techniques : de l'industrie chimique en passant par l'industrie pétrolière (PIPES, INSTALLATIONS DE SURFACE) jusqu'aux ustensiles ménagers.

Chapitre II

Soudage des aciers

II – 1 – INTRODUCTION

L'assemblage par soudage occupe une place primordiale dans l'univers industriel. Il est utilisé dans l'élaboration des bateaux, trains, avions, fusées, automobiles, ponts, *tuyaux*, réservoirs et tant d'autres choses qui ne sauraient être construites sans le recours au soudage.

La clé des problèmes qui se posent lors d'une construction à souder relève du métier du soudeur ou du constructeur soudeur dont la démarche doit inclure, outre l'opération de soudage, les problèmes se posant en amont et en aval de celle-ci, à savoir :

- La conception des assemblages : découpage de l'assemblage et disposition des joints.
- La préparation des pièces avant soudage : géométrie des bords, état des surfaces.
- La mesure de la qualité des soudures et de la tenue de l'assemblage en service.

II – 2 – DEFINITION ET PROCEDES

II – 2 – 1 – Définition du soudage

Le soudage tout simplement c'est l'opération qui permet de lier quasiment tous les matériaux, des matériaux métalliques jusqu'aux matières plastiques ; en assurant la continuité de la matière à assembler, et en préservant les propriétés mécaniques, ainsi que métallurgiques et physiques.

Autrement dit le soudage est un procédé d'assemblage qui consiste à la mise des pièces à souder à la température de soudage (Température de fusion, dans la majorité des cas) au niveau de leur joint, par le biais d'une source de chaleur. Une pression mécanique peut être éventuellement associée à cette chaleur. [12].

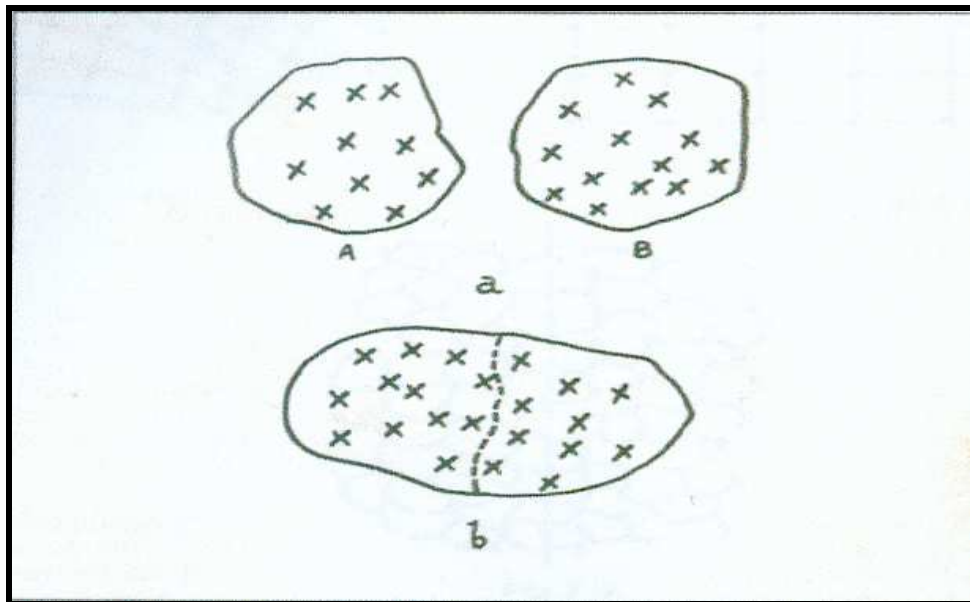


Figure II-1: Illustration du déroulement de l'opération de soudage [13].

II – 2 – 2 – Types de soudage

- Une soudure est dite Homogène lorsque les deux matériaux de base et le métal d'apport sont de même nature. Par exemple : le soudage MIG de deux aciers AISI 316L (austénitique) avec apport 316LSi.
- Une soudure est dite Autogène lorsque les deux matériaux de base sont de la même Composition et que l'assemblage s'effectue sans métal d'apport comme l'exemple du soudage des deux aciers inoxydables austénitique AISI 304.

➤ On parle d'une soudure "Hétérogène" si au moins un des matériaux en question (métaux de Base ou métal d'apport) est différent des autres. Exemple : soudage d'un acier duplex A790 et un acier martensitique 13 Cr avec un métal d'apport qui "*Reste à déterminer*" [9].

II – 2 – 3 –Préparation des soudures

Pour faciliter l'exécution et obtenir des cordons sans défauts ; elle consiste à donner aux bords, ou aux extrémités à souder, la forme qui va permettre le mieux possible une fusion franche et totale et qui donnera le moins lieu aux effets de la dilatation et du retrait.

Cette tâche consiste à abattre l'angle supérieur des bords de façon que, une fois rapprochés ces derniers forment une ouverture en "V" dans laquelle la soudure se fait aisément (Figure II-2)

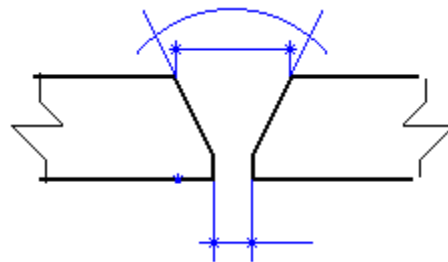
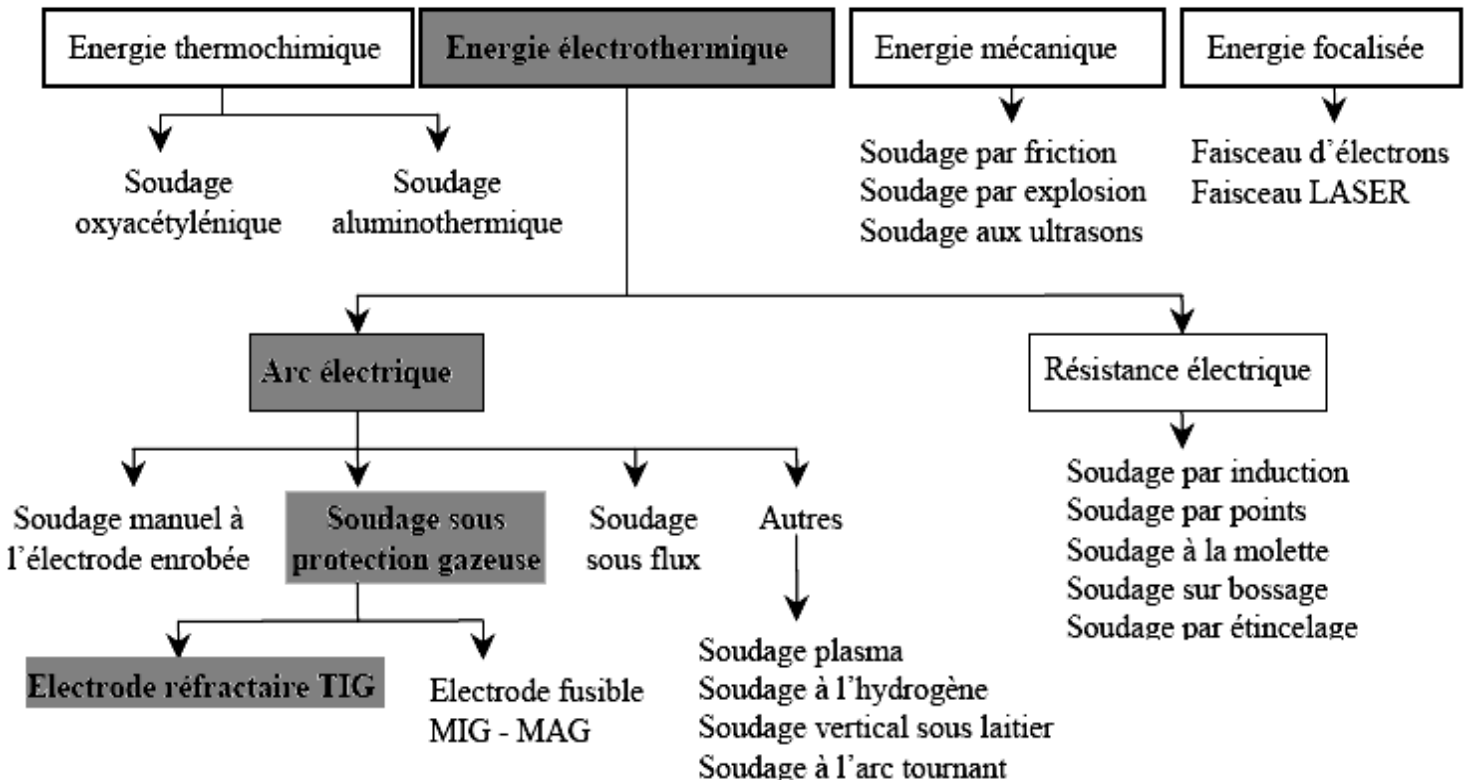


Figure II-2 : Chanfrein en "V" [10].

C'est le chanfreinage des bords ; et l'ouverture créée par les chanfreins juxtaposés offre un angle variable suivant la manière de souder ou le procédé suivie. Pour le soudage à arc l'angle est de 60 à 70°.

II – 2 – 4 –Les différents procédés de soudage

Tableau II-1 : Classification générale des procédés de soudage en fonction de l'énergie mise en jeu [14].



Le choix du procédé s'opère selon des critères bien définis : matériaux à souder, Facteurs technologiques, Critères de qualité, Critères économiques [15].

En ce qui nous concerne les procédés à arc électriques sont les plus adéquats :

Ce procédé se réalise à l'aide d'un arc électrique [une décharge électrique créée entre deux électrodes dans un gaz (ou dans une vapeur métallique issue des électrodes)] qui fournit l'énergie nécessaire pour faire fondre l'électrode (constituée de métal d'apport) qui va se solidifier en un dépôt solidaire avec les métaux de base. [16].

II – 2 – 4 – 1 – PROCEDE GTAW

GTAW= Gas Tungsten Arc Welding où bien T.I.G (Tungsten Inert Gas)
(Soudage à l'arc en atmosphère inerte avec électrode de tungstène)

- Le procédé consiste à faire appel à une électrode infusible (Tungstène, Zirconium ou au Thorium) qui jaillit au milieu de la buse, entourée d'un gaz de protection inerte (Argon ou Hélium), et tout cela sous une différence de potentiel créée par un générateur électrique de façon à se que la pièce soit reliée au pôle positif et le métal d'apport au pôle négatif.

Le métal d'apport est amené dans le bain de fusion au fur et à mesure de l'avancement de l'arc. Lorsque ce dernier est alimenté en courant continu, on doit placer impérativement la pièce à souder au pôle positif, afin d'éviter que l'électrode de Tungstène ne se désagrège sous l'effet des électrons émis par le bain de fusion.

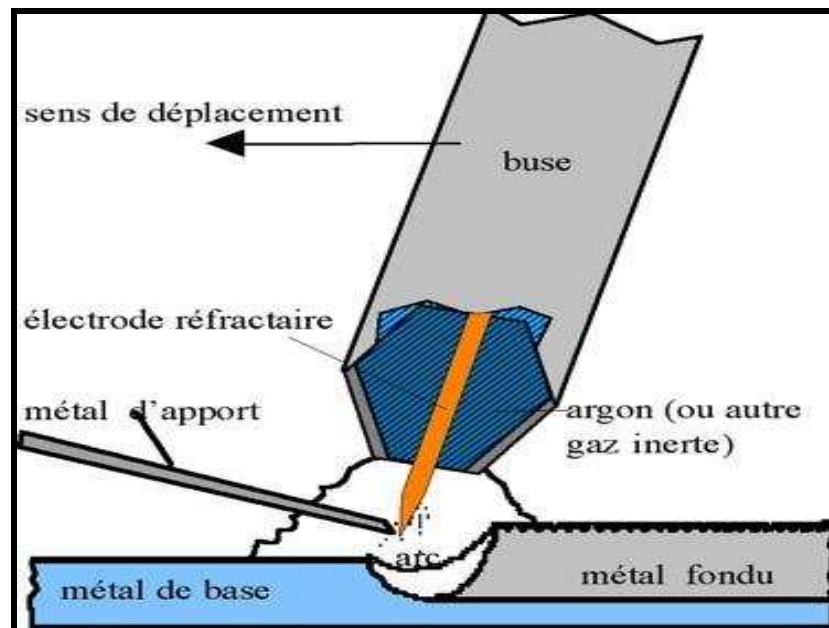


Figure II-3 : Illustration du procédé GTAW [17].

II – 2 – 4 – 1 – 2 – Les avantages

- Inertie chimique exceptionnelle.
- Possibilité de contrôler de façon indépendante tous les paramètres ce qui permet un contrôle efficace du bain de fusion et de la *dilution*.
- Possibilité de soudage d'une vaste gamme de matériaux sous réserve de trouver le couple (gaz fil) correspondant
- Le procédé GTAW permet d'assembler des aciers fortement alliés, des alliages : d'Aluminium, de Nickel, de Cuivre et de Magnésium.
- Automatisation possible.

II – 2 – 4 – 1 – 3 – Les inconvénients

- Préparation des assemblages plus soignée.
- Taux de dépôt et vitesses de soudage faibles, d'où le procédé n'est pas utilisé pour le soudage des matériaux nobles [17].

II – 3 – METALLURGIE DU SOUDAGE

II – 3 – 1 – Description d'un cordon de soudure

Le cordon de soudure est réparti en 3 parties essentielles :

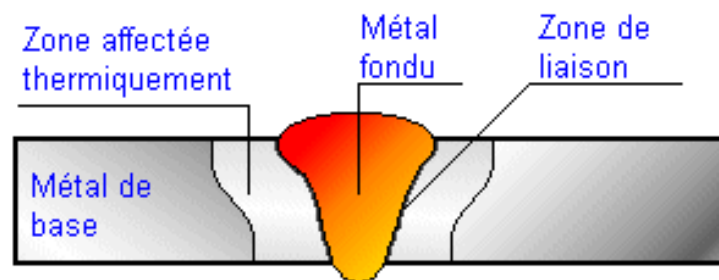


Figure II-4 : Cordon de soudure [18].

- Métal ou métaux de base (en fonction de leurs compositions chimiques): référence pour apprécier les différentes transformations intervenant lors du déroulement du processus de soudage.
- Zone fondue : refroidi rapidement depuis l'état liquide, cette zone est obtenue par la fusion du métal (ou métaux) de base avec la contribution plus ou moins importante du métal d'apport. " Zone fondue = Métal d'apport + Métal fondu ".
- Zone affectée thermiquement : suffisamment proche de la zone fondue de sorte que les différents cycles thermiques ont provoqué divers transformations structurales.
- Zone de liaison : fixe la frontière entre la zone fondue et la zone affectée thermiquement (Z.A.T) en d'autres termes elle correspond à la limite jusqu'à laquelle le métal de base a été porté à la fusion.

II – 3 – 2 – facteurs d'influence

Les propriétés et caractéristiques de ces zones varient bien évidemment sous l'influence de 2 facteurs principaux

II – 3 – 2 – 1 – Facteur thermique (ou effet thermique)

Constitue un point important dans l'opération du soudage, puisque elle nous donne la possibilité d'interpréter quantitativement les phénomènes métallurgiques que cette opération engendre et par suite de prévoir ces phénomènes pour en tenir compte dans le choix des procédés de soudage et des modes opératoires.

II - 3 - 2 - 1 - 1 - Cycles thermiques

Pour cela la connaissance des cycles thermiques est plus que nécessaire. Les cycles thermiques mettent en évidence la variation de la température atteinte en un point situé à une distance fixe de la ligne du cordon en fonction du temps.

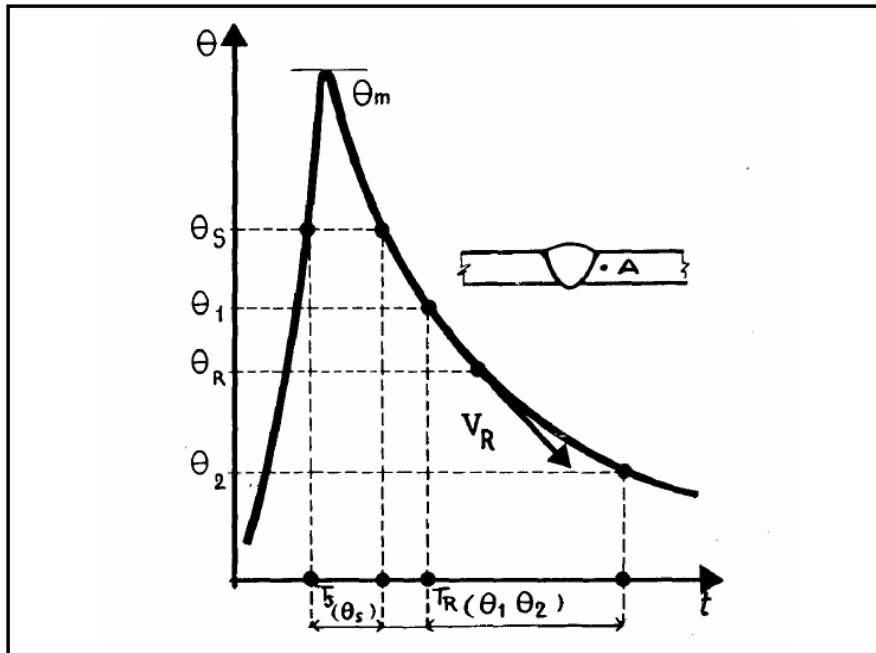


Figure II-5 : Courbe mettant en évidence $\theta = f(t)$ [19].

Cette courbe nous fournit des informations notamment sur

- La température maximale atteinte θ_m
- Le temps T_s de séjour au dessus d'une température.

La loi du refroidissement, traduite par le temps de refroidissement T_R entre deux températures θ_1 et θ_2 ou par la vitesse de refroidissement V_R à une Température θ_R .

Ce qui nous permettra de déterminer les modifications de structure ou des transformations survenues au refroidissement et / ou à l'échauffement

II – 3 – 2 – 1 – 2 – La Répartition thermique

*** On peut également déterminer à travers ces données la répartition thermique aux alentours du cordon de soudure, qui représente la variation de la température maximale atteinte θ_m en fonction de la distance x qui nous permettra de délimiter les étendues des différentes zones.

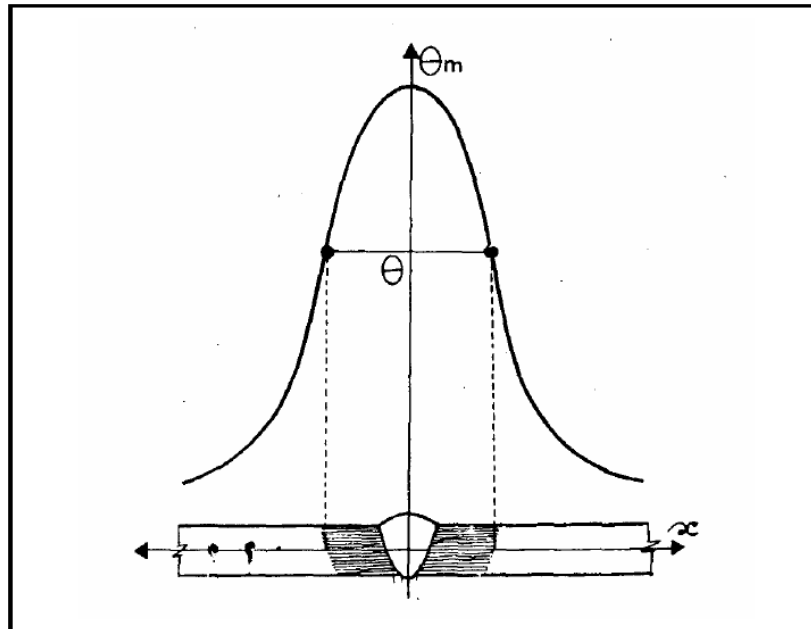


Figure II-6 : Courbe mettant en évidence $\theta_m = f(x)$ [19].

L'allure des cycles thermiques varie en fonction du positionnement du point x par rapport à la ligne de soudure S comme montré dans la figure ci-dessous.

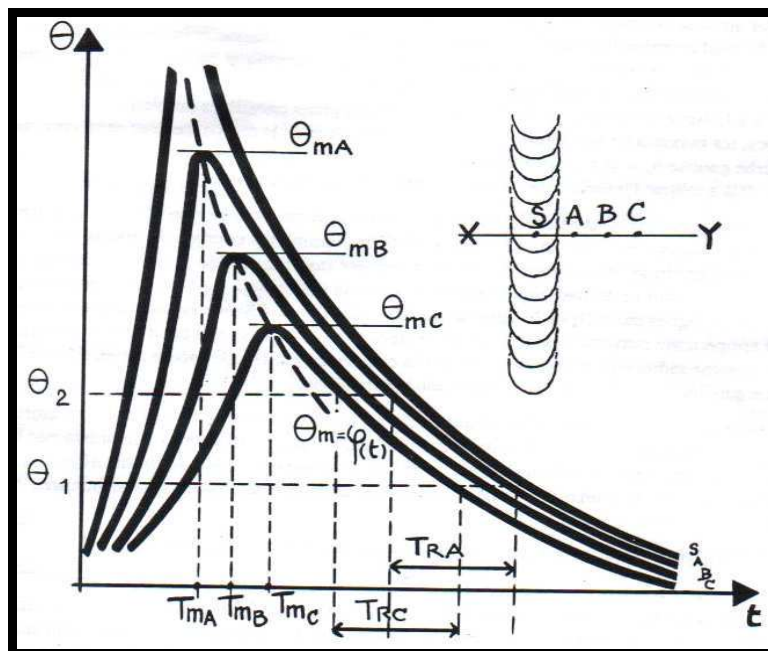


Figure II-7 : Cycles thermiques de différents points situés à une distance x du cordon de soudure [19].

II - 3 - 2 - 1 - 3 - Solide thermique

Pour récapituler Portevin et seférian on proposé un modèle qui prend en compte l'état instantané des températures atteintes aux alentours de la source de chaleur au moment de son passage par l'origine du repère orthonormé.

Le modèle est connu sous le nom de "SOLIDE THERMIQUE" dans ce modèle on prend en considération l'état quasi-stationnaire.

Notons que le solide thermique se comporte de façon similaire tout au long de la ligne de soudure en donnant lieu aux courbes qu'on observe ci-dessous :

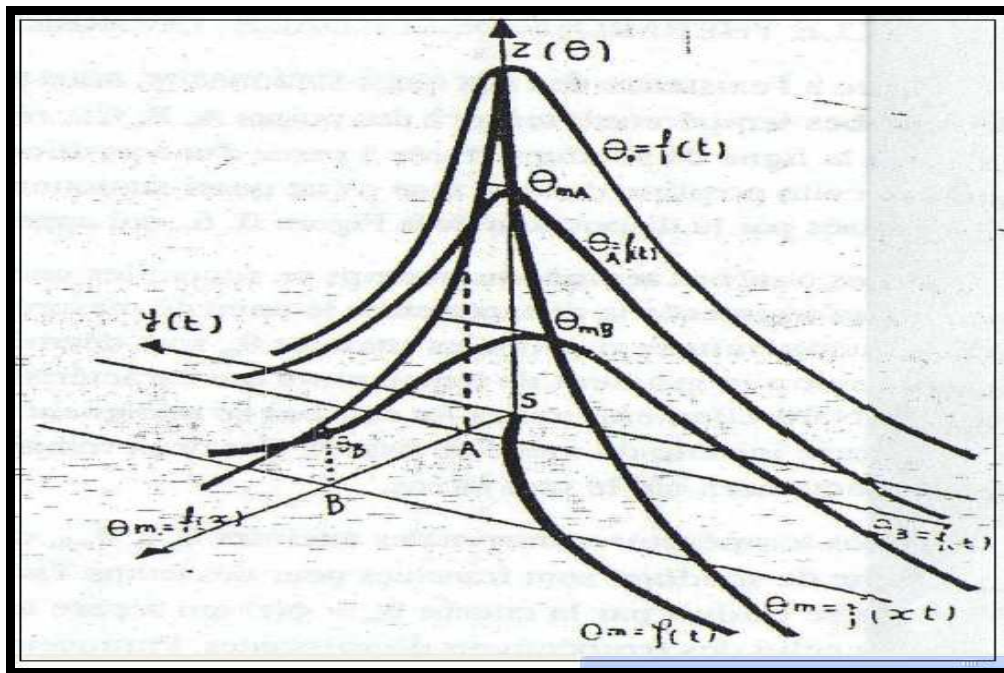


Figure II-8 : Solide thermique [19].

La projection du solide thermique sur le plan xoy donne la répartition des isothermes comme suit :

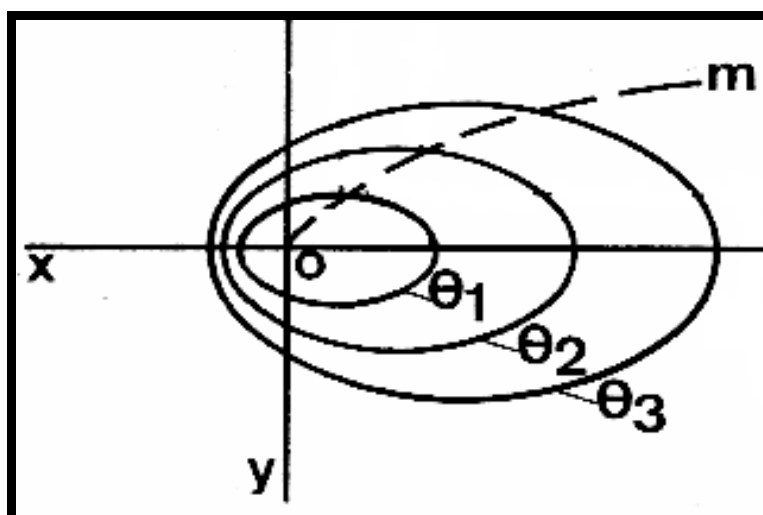


Figure II-9 : Les isothermes [5].

Elles donnent une indication sur le passage de la source de chaleur et permet de délimiter l'étendue des différentes zones au sein du cordon de soudure.

II – 3 – 2 – 1 – 4 – Soudage multi passes

Jusqu'ici l'étude s'est portée sur une soudure en une seule passe. Concernant le soudage multi passes ou poly passes il y a lieu de prendre en considérations d'autres paramètres tels que :

- la température initiale.
- le nombre, la disposition des passes et de leurs conditions d'exécution.
- l'intervalle de temps entre passe.
- la position par rapport à la soudure du point dont on suit la variation de température.

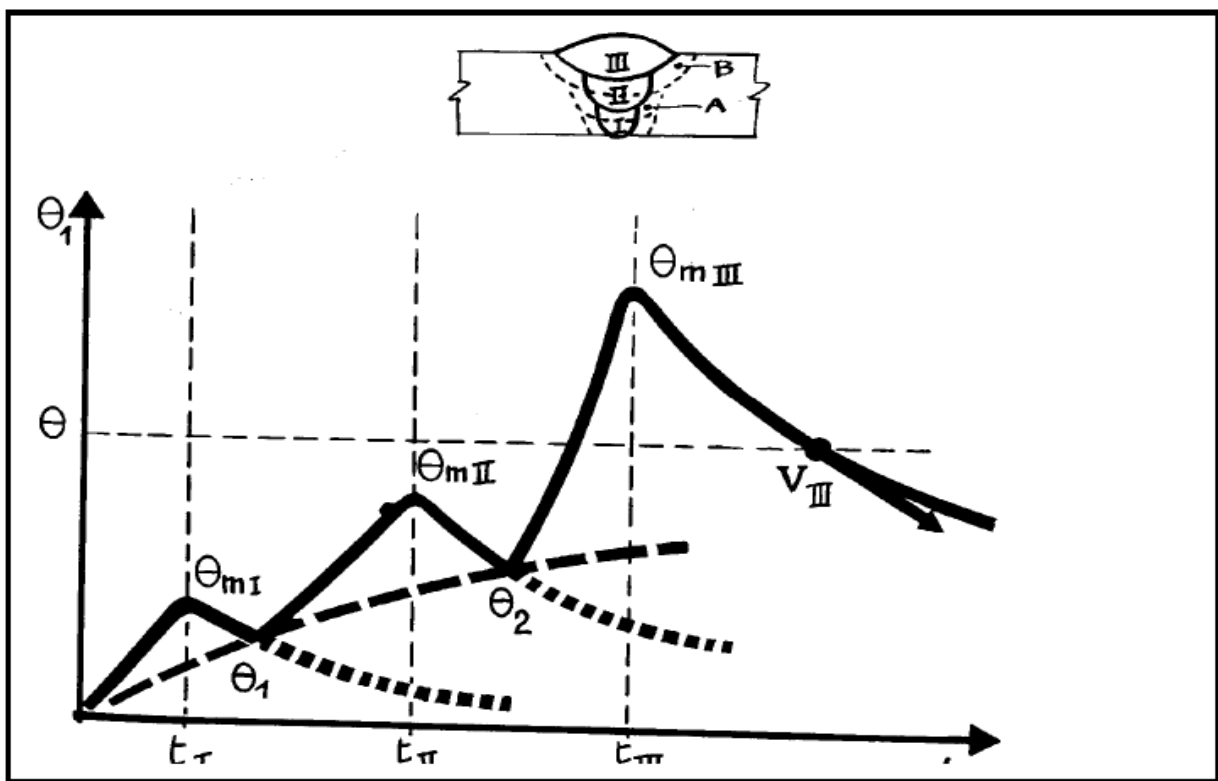


Figure II-10 : Les effets thermiques du soudage en plusieurs passes, dans le cas d'une soudure sur bords chanfreinés en V, exécutée en trois passes sans préchauffage [19].

II – 3 – 2 – 2 – La dilution

Ce facteur là a aussi un rôle à jouer sur les propriétés et comportements du cordon de soudure

Le métal fondu est constitué d'un mélange (Métal d'apport +Métal de base) en proportions respectivement proportionnelles à la surface extérieure au profil initial du chanfrein.

La dilution signifie la proportion du métal de base fusionnée entrant dans la composition du métal fondu Elle est exprimée comme suit :

$$D = \frac{v}{V} \quad (1).$$

Ou

v : volume du métal de base fondu.

V : volume globale du métal fondu. [24].

*** On peut exprimer ce rapport en fractions de surfaces, cela donne

$$D = \frac{SB}{ST} \quad (2).$$

Tel que SB : Surface du métal de base fondu.

ST : Surface globale du métal fondu.

Ce point sera traité ultérieurement de façon encore plus précise lors de l'identification de la structure. [19].

II – 4 – LES DIFFERENTES TRANSFORMATIONS DE PHASES LORS DU SOUDAGE

Durant le processus de soudage par fusion des aciers, les transformations qui se produisent dépendent de la composition des différents matériaux mis en jeu et des historiques thermiques subits par ces derniers d'où on aura des modifications qui vont s'opérer au niveau de la zone affectée thermiquement ainsi qu'au niveau de la zone fondue.

II – 4 – 1 – ACIERS DUPLEX :

II – 4 – 1 – 1 – Solidification et formation des structures :

Lors de la solidification des joints de soudures, une structure entièrement ferritique prend place ce n'est qu'en dessous de 900°C que l'austénite commence à précipiter au niveau des joints de grains de la ferrite. La solidification et formation de la ferrite s'effectue par une croissance épitaxiale à partir du métal de base en fonction du gradient thermique.

Quant à l'austénite sa formation débute au niveau des joints de grains (sites privilégiés de précipitation) ensuite il y a l'austénite du type widmanstätten qui fait apparition dans les sites intragranulaires. Notons que la précipitation de l'austénite est régie par la germination et croissance qui sont gouvernées par la diffusion.

Les cinétiques élevées de refroidissement ne favorisent pas la formation de l'austénite par contre des vitesses de refroidissement lentes permettent d'obtenir une proportion élevée d'austénite.

Etant donné que la germination est favorisée au niveau des joints de grains une densité élevée de ces derniers favorise la formation de l'austénite en quantités élevées sauf que cette éventualité est à écarter vu le grossissement des grains induit par l'apport énergétique du processus.

Une autre alternative consistant à enrichir les métaux d'apport en éléments gamagènes (Le "Nickel" en particulier) est préconisée.

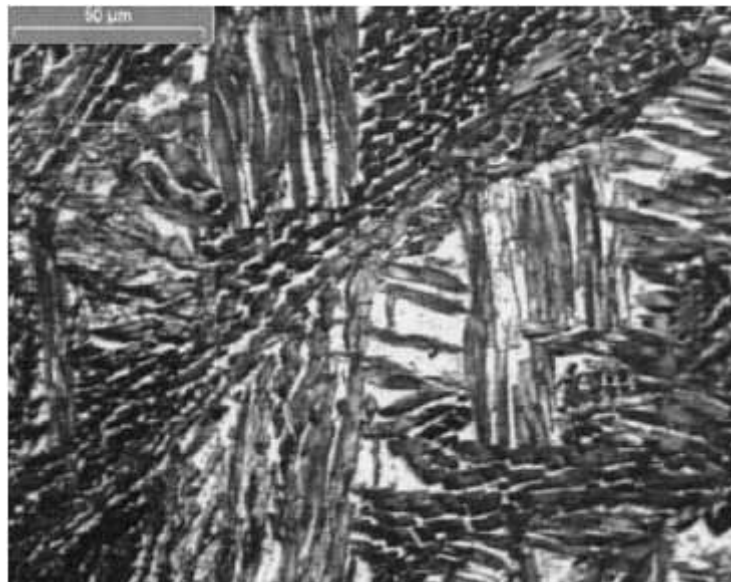


Figure II-11 : Illustration de la structure obtenue après refroidissement de la zone fondue [20].

Donc au final on aura une structure constituée de grains de ferrite primaire avec de l'austénite intergranulaire ou intra granulaire principalement précipitée en structure widmanstätten.

II – 4 – 1 – 2 – Changements structuraux durant le soudage :

*Pendant l'opération de soudage l'augmentation de la température provoque au niveau de la zone affectée thermiquement une transformation de l'austénite "γ" en ferrite "δ" accompagné d'une croissance des grains dont la taille et la croissance homogène jouent un rôle important lors des transformations de phases au court du refroidissement.

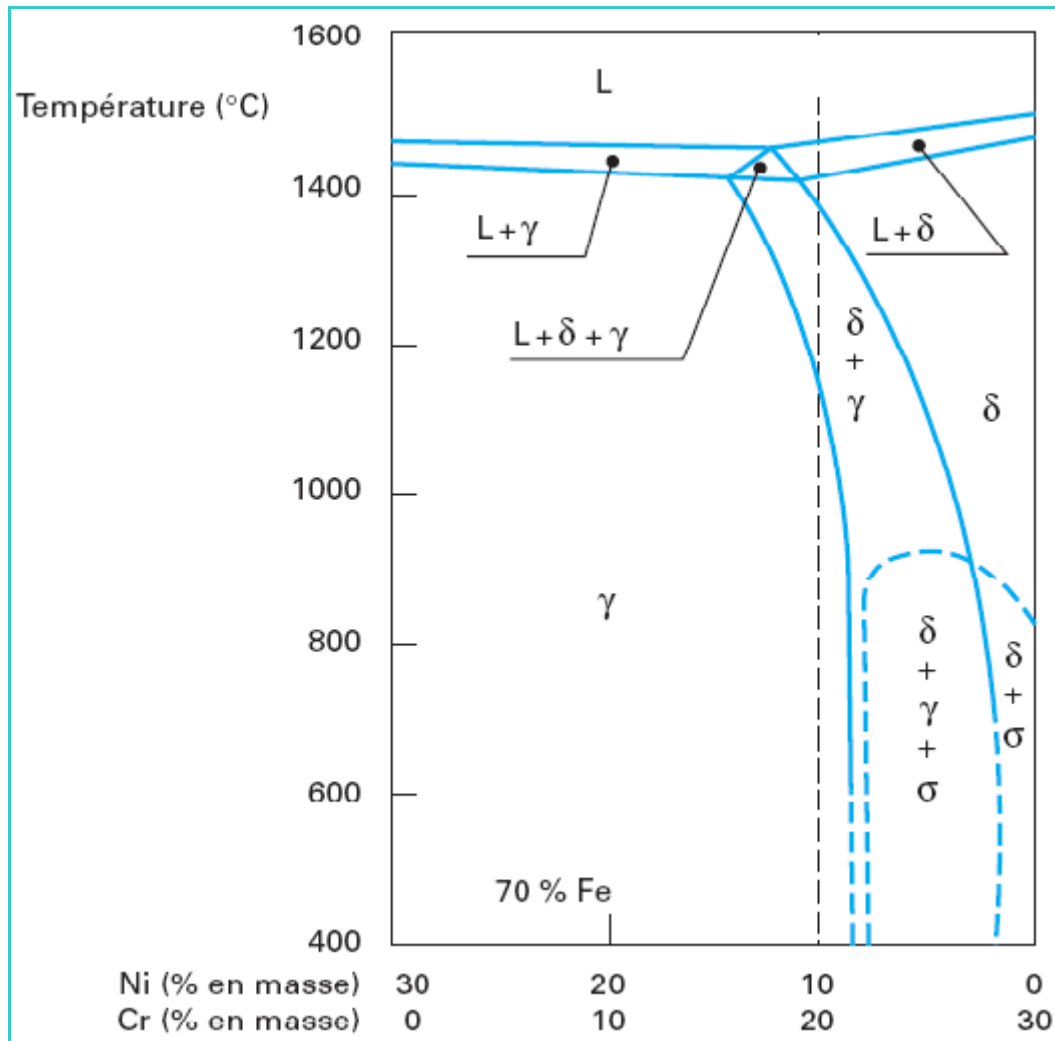


Figure II-12 : Coupe pseudo binaire du diagramme fer-chrome-nickel à 70% de fer [2].

* en plus de la transformation ferrite "δ" ↔ austénite "γ" les aciers duplex peuvent faire objet d'autres transformations tels que :

- précipitation des carbures de chrome du type M_7C_3 et $M_{23}C_6$
- précipitation des nitrures M_2N , MN
- précipitation de composés intermétalliques tels que la phase σ ,etc.

Seulement ces phases secondaires sont nocives pour le cordon de soudure de ce fait une vitesse de refroidissement élevée est nécessaire pour les éviter [20].

II - 4 - 2 - ACIERS AU CARBONE

II - 4 - 2 - 1 - Transformations au cours du soudage

Au voisinage de la zone fondue le métal de base subit les effets du cycle thermique de soudage qui provoque des transformations liées aux conditions de refroidissement du joint soudé.

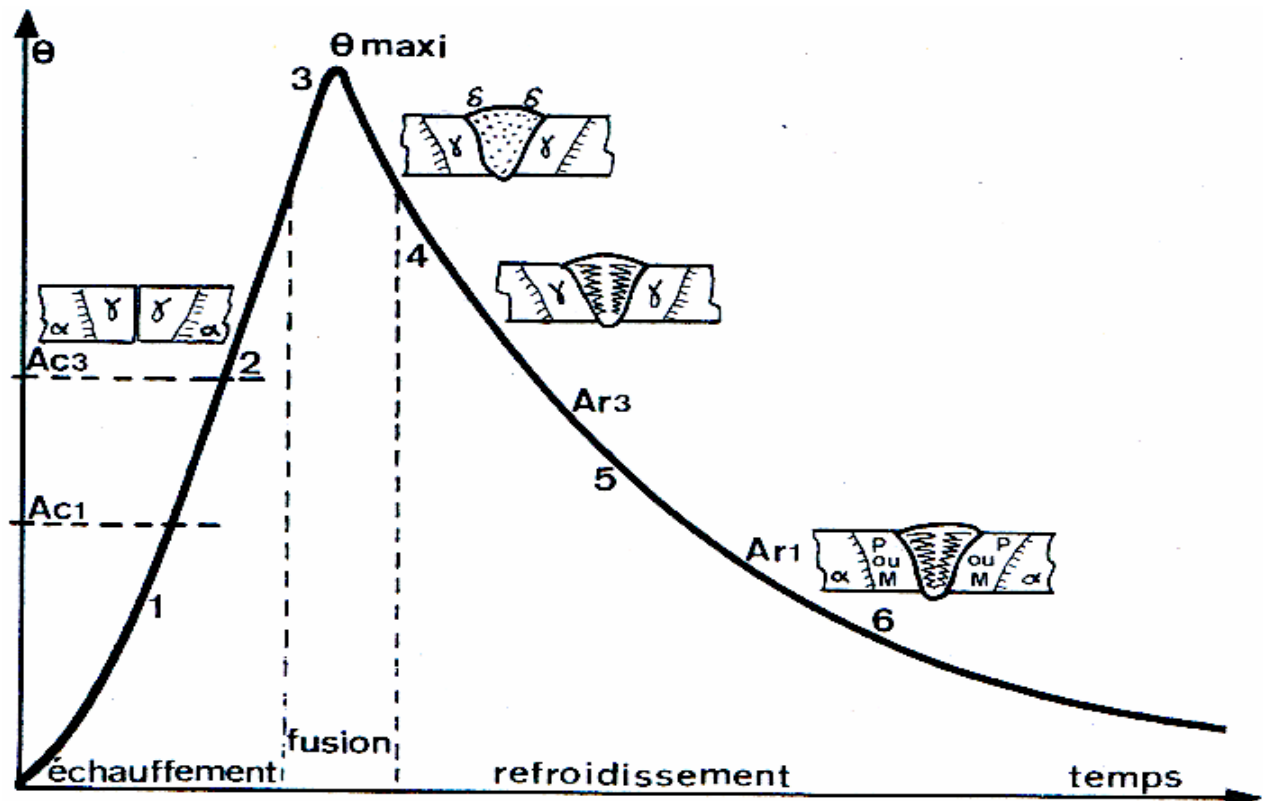


Figure II-13 : Cycle thermique de soudage et transformations structurales [21].

- 1 : Dilatation, plastification ; $Ac1$ cessation des états hors équilibre.
- 2 : Dilatation, plastification ; $Ac3$ début de l'austénitisation.
- 3 : (zone fondue) fusion, dilution du métal d'apport et du métal de base et changement de la structure (ferrite δ).
- 4 : solidification et formation des premières dendrites austénitiques accompagné d'un retrait, $Ar3$.
- 5 : transformations allotropiques (M ou, M+F+C ou, F+C) diffusion de l'hydrogène, ainsi qu'une présence de contraintes locales est constaté $Ar1$.
- 6 : Fin de transformation, contraction, contraintes résiduelles ; avec des risques de fissuration à froid.

II - 4 - 2 - 2 - Transformations lors du chauffage

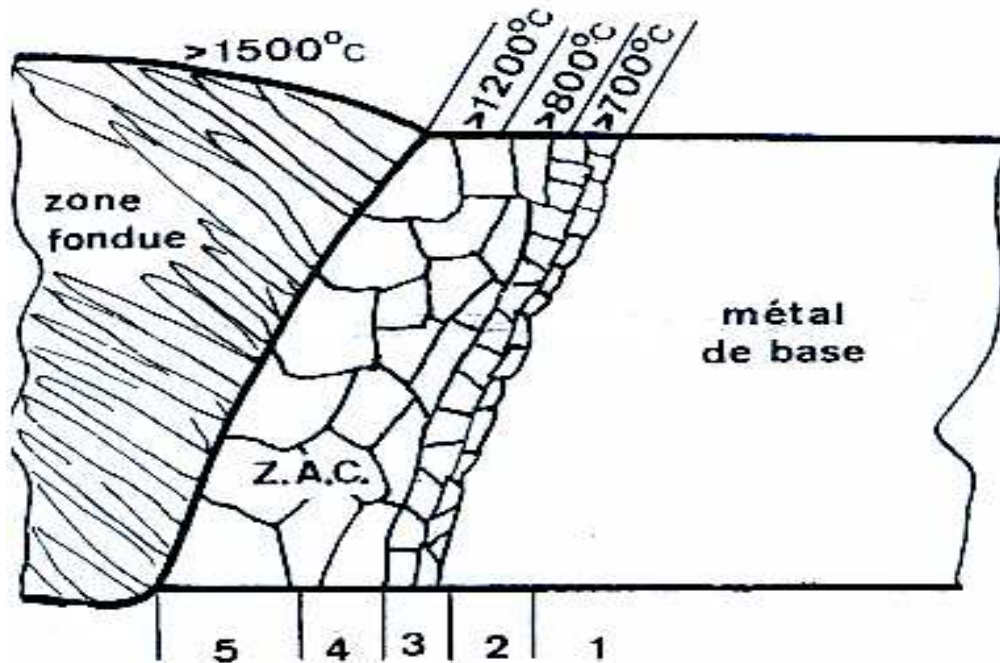


Figure II-14: Les différentes régions de la zone affectée par la chaleur et les différentes microstructures obtenues au voisinage de la zone fondue [21].

- 1 : portion où le métal de base n'a pas atteint une température de 600°C environ.
- 2 : $600^{\circ}\text{C} < \theta < \text{Ac}_1$, on observe quelques modifications tels que la globulisation des lamelles de Cémentite, la recristallisation pour le soudage de produits écrouis,... etc.
- 3 : $\text{Ac}_1 < \theta < \text{Ac}_3$ l'austénitisation partielle du métal donne une structure à grains très fins.
- 4 : $\text{Ac}_3 < \theta < 1200^{\circ}\text{C}$: structure à gros grains.
- 5 : au delà de 1200°C au contact de la zone fondue (zone de liaison), une structure à gros grains confère au métal une forte trempabilité ; d'où après refroidissement, des structures acciculaires grossières ou même parfois des structures de trempe. D'ailleurs dans cette région il subsiste un risque de fissuration à froid d'où l'impacte sur les caractéristiques mécaniques après soudage.

[21].

II – 4 – 2 – 3 – Transformations lors du refroidissement

Contrairement au chauffage les modifications structurales au court du refroidissement sont décrites à travers des diagrammes TRC établis spécialement pour le soudage :

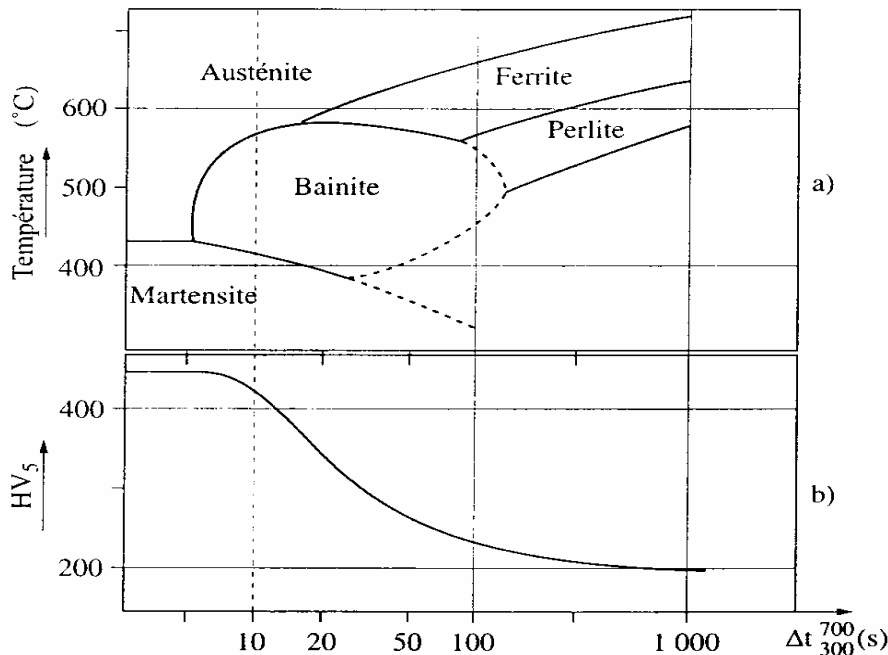


Figure II-15: Diagramme TRC spécialement élaboré pour le soudage [22].

En fonction de la cinétique de refroidissement la transformation de l'austénite s'opère de différentes manières :

- ❖ La structure martensitique dure (de réseau tetragonale) prend place ; pour des cinétiques rapides de refroidissement.
- ❖ Pour des cinétiques intermédiaires c'est la structure bainitique qui prend forme.
- ❖ Par contre pour de faibles vitesses de refroidissement l'austénite c'est le mode perlitique qui prend forme [19].

Notons que les conditions de soudage ainsi que les paramètres sont choisis de tel manière à obtenir une structure saine et adéquate de manière à assurer des propriétés mécaniques et métallurgiques voulues et d'éviter de surcroit toute structure nocive qui pourrait affecter le cordon de soudure.

II – 3 – CONCLUSION

Les aciers au carbone ainsi que les inoxydables ont une bonne soudabilité du moment où les conditions de soudage ainsi que les paramètres (composition du métal d'apport, vitesse de refroidissement, énergie de soudage) sont réunis.

Chapitre III

Etude de Soudabilité sur assemblages
hétérogènes

III – 1 – INTRODUCTION

Sous cette appellation sont rassemblés les assemblages de matériaux identiques au moyen de produits d'apport permettant d'obtenir un métal fondu de structure et donc de propriétés très différentes de celles du métal de base mais aussi, les assemblages de matériaux différents.

La soudabilité des matériaux métalliques est leur aptitude à permettre la réalisation pratique d'assemblages soudés dont les propriétés sont compatibles avec les conditions d'utilisations imposées. Elle est étroitement liée aux procédés et aux conditions de soudage mis en œuvre et elle dépend essentiellement des types et des propriétés des structures métalliques obtenues.

A ce sujet les soudeurs souhaitent en particulier prévoir les risques immédiats ou à venir qui vont rencontrer lors des opérations d'assemblage. Ils souhaitent en particulier savoir quel est le meilleur procédé à utiliser et, si un métal d'apport est nécessaire, quel est le meilleur métallurgiquement parlant.

III – 2 – Diagrammes de constitution

Partant des pouvoirs alphas et gammagènes des différents éléments, des diagrammes ont été tracés avec pour objectif de prévoir la structure du métal à l'état brut de soudage en premier lieu.

Parmi ces diagrammes on dénomme : celui de Schaeffler, Delong, Espy, WRC,.....etc.

Le plus répandu et le plus connu étant le diagramme de "Schaeffler" bien sur.

III – 2 – 1 – Diagramme de schaeffler

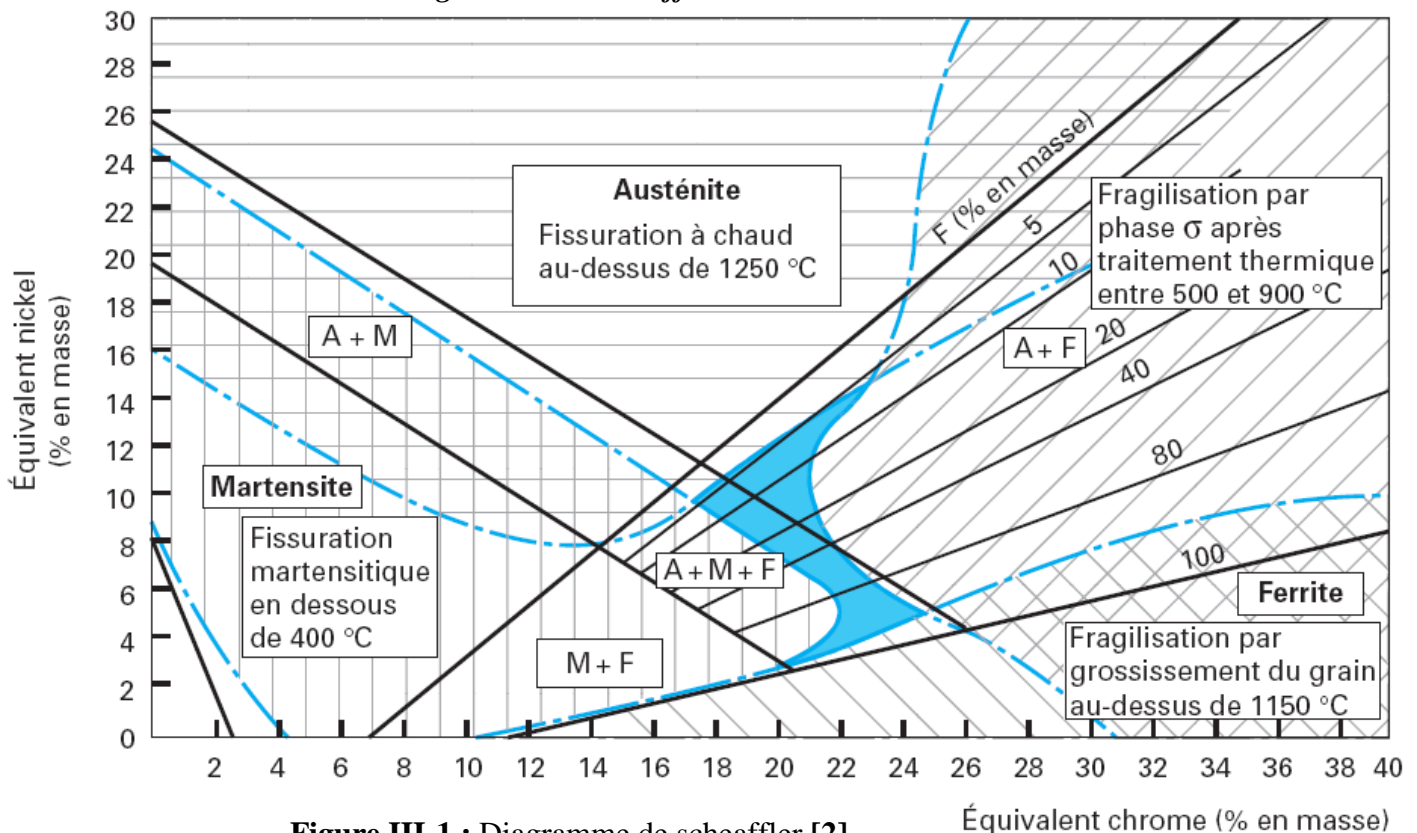


Figure III-1 : Diagramme de schaeffler [2].

Le seul inconvénient de ce diagramme est qu'il n'est pas adapté aux nuances à teneurs élevées en azote et/ou manganèse.

Le taux de ferrite peut être déterminé si l'analyse de la zone fondue est connue par la formule suivante :

$$\% \text{ ferrite} = 3 (\text{Creq} - 0,93 \text{ Nieq} - 6,7) [23]. \quad (3)$$

FORMULE DE SEFERIAN

III - 2 - 2 - Diagramme de Delong

La prise en considération par ce dernier de l'effet de l'azote en tant qu'élément gamma gène, a conduit à une légère rectification du diagramme de schaeffler (notamment au niveau du domaine "Austénite + Ferrite").

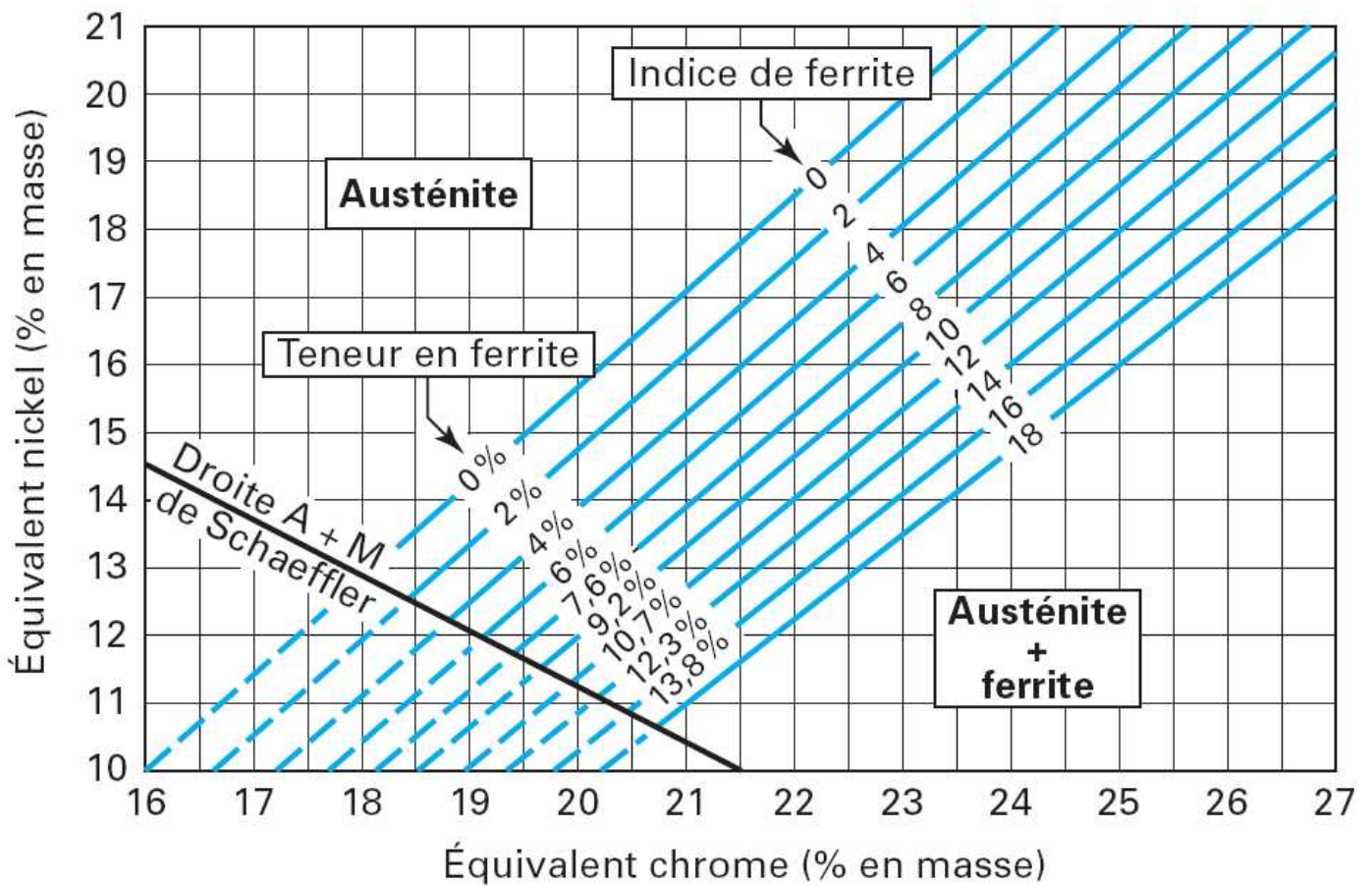


Figure III-2: Diagramme de Delong [2].

Néanmoins ce diagramme n'est pas utilisable pour le soudage hétérogène, et non adapté aux nuances fort en Manganèse et/ou Azote.

III – 2 – 3 – Diagramme d'Espy

Identique au diagramme de schaeffler ; à part que les formules des (Creq, Nieq) ont été légèrement affinées. Ce diagramme est bien adapté aux nuances à teneurs élevée en azote et en manganèse.

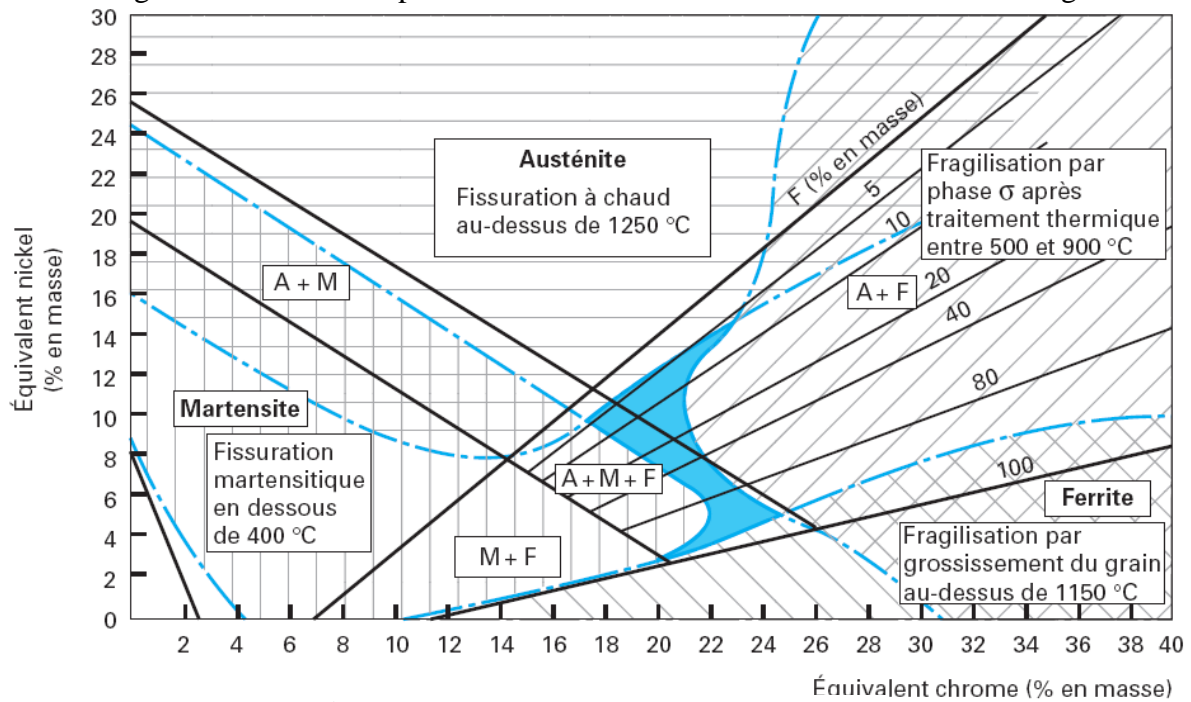


Figure III-3: Diagramme d'Espy [2].

III – 2 – 4 – Diagramme WRC92

Moins précis :

- Un nombre réduit d'éléments pour le calcul des CReq et Nieq.
- Un domaine d'application restreint le rendant mal utilisable pour le soudage hétérogène.

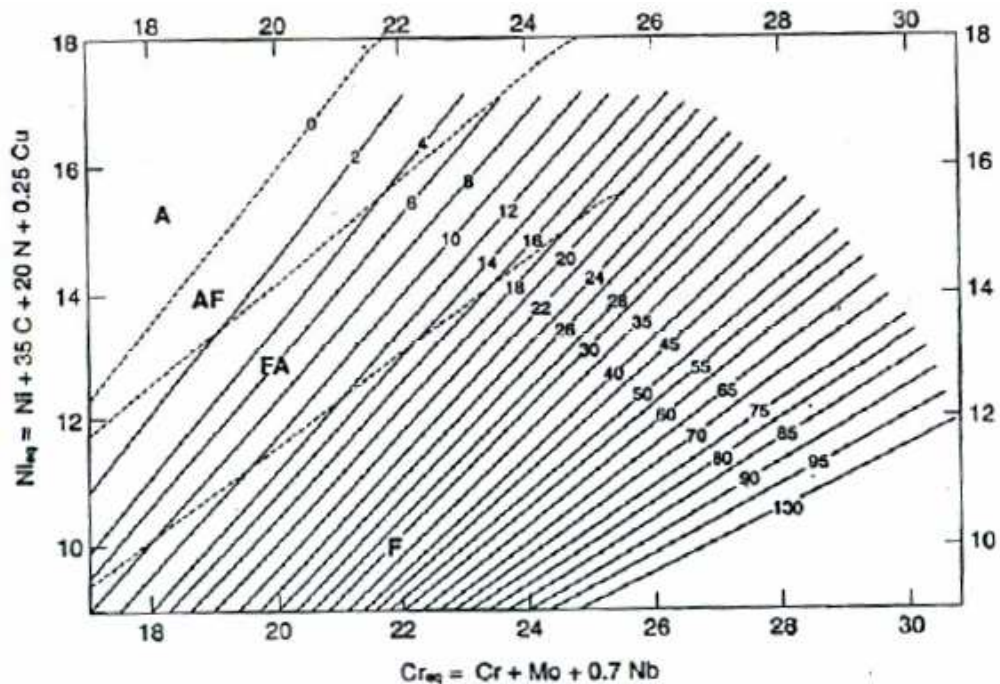


Figure III-4 : Diagramme WRC92 [2].

III – 2 – 5 – Formules de calcul des équivalents :

Tableau III-1 : Formules de calcul [9].

Diagramme	Cr eq	Nieq
Schaeffler	$\%Cr + \%Mo + 1,5 \%Si + 0,5 \%Nb.$	$\%Ni + 30 \%C + 0,5 \%Mn + 0,6 \%Cu.$
De Long	$\%Cr + \%Mo + 1,5 \%Si + 0,5 \%Nb.$	$\%Ni + 30 (\%C + \%N) + 0,5 \%Mn.$
Espy	$\%Cr + \%Mo + 1,5 \%Si + 0,5 \%Nb$ $+ 5 \%V + 3 \%Al.$	$\%Ni + 30 \%C + x(\%N - 0,045) + 0,87 + 0,33 \%Cu.$ $x = 30$ si $N = 0 / 0,20.$ $x = 22$ si $N = 0,21 / 0,25.$ $x = 20$ si $N = 0,26 / 0,35.$
WRC 1992	$\%Cr + \%Mo + 0,5 \%Nb.$	$\%Ni + 35 \%C + 20 \%N + 0,25 \%Cu.$

III – 2 – 6 – Comparaison des différents diagrammes :

Tableau III-2 : Comparaison entre les différents diagrammes [9].

Diagramme	Avantages	Inconvénients
Schaeffler	-Soudage hétérogène -Domaine d'application large	- Mn pris en compte jusqu'à 2 % max - Pas pour fort N (> 0,10 %) - Peu précis si ferrite > 20 %
De Long	-Homologué ASME -Homologué EN -% ferrite et FN	- Domaine limité :- $Cr_{eq} > 16$ - $Ni_{eq} > 10$ - ferrite < 20 %. - Pas pour fort Mn (> 2%). - Pas pour fort N (> 0,10%).
Espy	-Soudage hétérogène -Domaine d'application large -Nombreux éléments pris en compte Fort Mn et/ou fort N	Peu précis (ferrite > 20 %)
WRC 1992	-Normalisé en Europe (norme EN...) -Calcul simplifié	-Gradué en FN, pas de correspondance avec mesures en % ferrite -Peu d'éléments -Domaine limité : - $Cr_{eq} > 17$

III – 3 – Présentation du diagramme de "SCHAEFFLER"

Le diagramme de Schaeffler fournit des informations sur les propriétés de soudage des différents types de microstructure, en fonction de ce qu'ils contiennent en éléments d'alliage.

A l'aide du diagramme de Schaeffler on peut :

- ❖ Choisir un métal d'apport adapté, garant de bonnes qualités métallurgiques.
- ❖ prédire la structure de la zone fondue à l'état brut de soudage.
- ❖ Appréhender les différents risques métallurgiques lors d'un assemblage soudé.

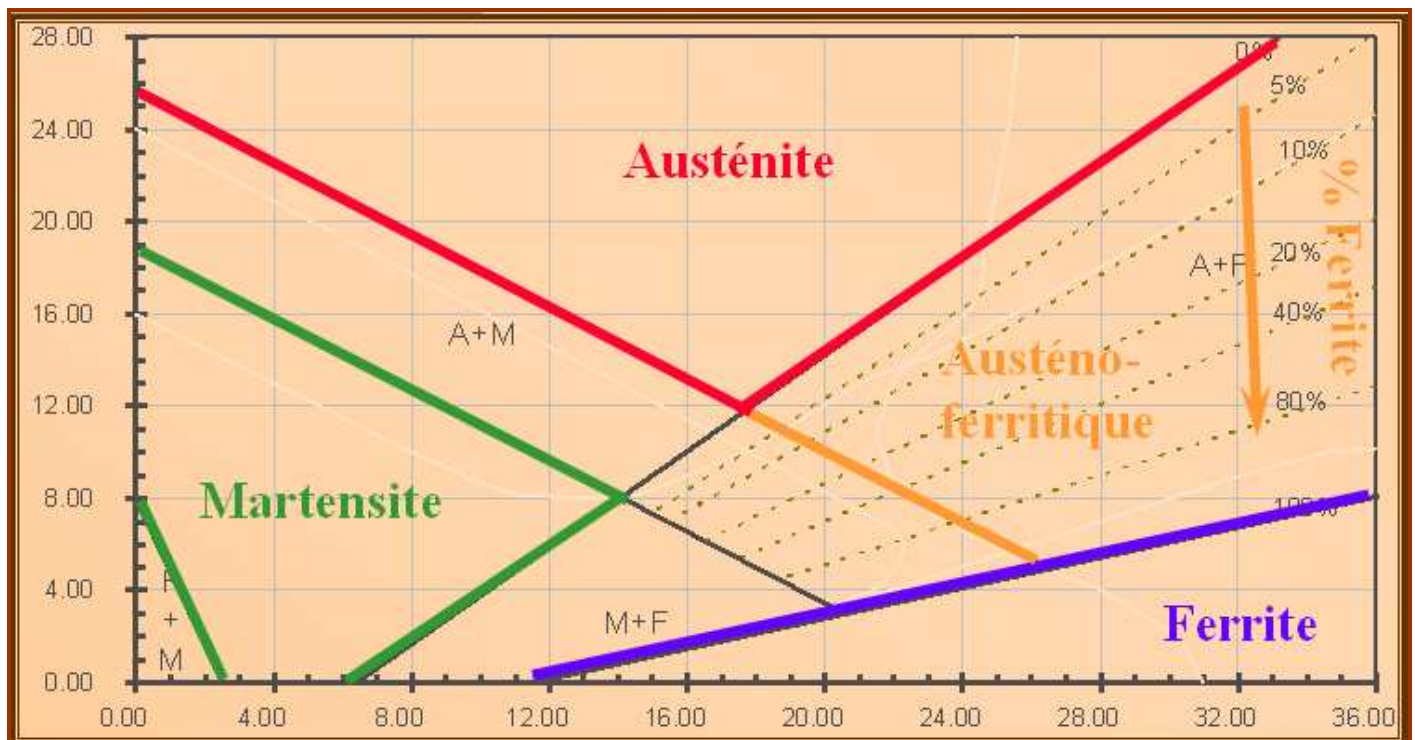


Figure III-5: Diagramme de schaeffler [18].

Ce diagramme est constitué de deux axes principaux

Axe des abscisses : qui représente l'équivalent en chrome (Eq Cr) qui met en évidence l'effet des éléments **alphagènes** [éléments stabilisateurs de la phase "alpha" (α)].

$$\mathbf{Eq(Cr) = \%Cr + \%Mo + 1,5 \times \%Si + 0,5 \times \%Nb. \quad (4)}$$

Axe des ordonnées : qui représente l'équivalent en Nickel (Eq Ni) qui met en évidence l'effet des éléments **gammagènes** [éléments stabilisateurs de la phase "gamma" (γ)].

$$\mathbf{Eq(Ni) = \%Ni + 30 \%C + 0,5 \times \%Mn. \quad (5)}$$

III – 4 – Caractéristiques métallurgiques

III – 4 – 1 – Différentes structures

Lors du soudage des aciers inoxydables on peut rencontrer différentes structures caractérisées par

Tableau III-3 : Caractéristiques des différentes structures [18].

Martensitique	Austénitique	Ferri tique	Austéno-Ferritique
<ul style="list-style-type: none"> - Une résistance à la rupture et une dureté élevée. - Ténacité appréciable. - Faible ductilité sauf pour les nuances à bas carbone. 	<ul style="list-style-type: none"> - Une bonne résistance à la corrosion inter granulaire. - Ténacité et ductilité appréciables. 	<ul style="list-style-type: none"> - Résistance à la corrosion inter granulaire. - Ténacité et ductilité appréciable. 	<ul style="list-style-type: none"> - Une résistance à la fissuration à chaud. - Une bonne résistance à la corrosion inter granulaire surtout pour les nuances à bas carbone. - Excellente ductilité et très bonne ténacité.

III – 4 – 2 – Identification des différentes zones à risques métallurgiques du diagramme de schaeffler

D’après les aspects que nous venons de voir on peut déduire qu’il existe des zone à risques métallurgiques

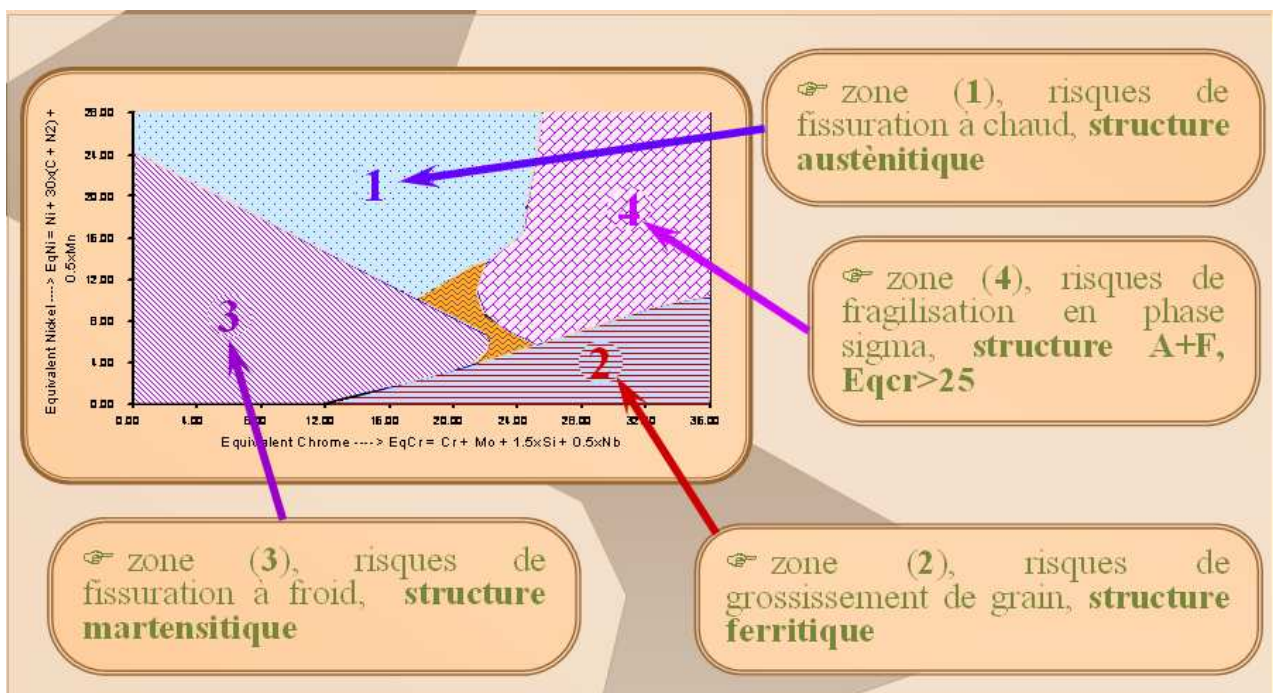


Figure III-6 : Zones à risques métallurgiques [18].

Pour réaliser un assemblage hétérogène, on aura toujours intérêt à choisir les produits d'apports de telle sorte que le point représentatif du métal fondu se situe dans le domaine correspondant aux risques métallurgiques les plus faibles c'est à dire "la partie inférieure" du domaine Austénite + Ferrite du diagramme de Schaeffler.

III – 5 – Détermination de la structure de la zone fondue à partir du diagramme

La structure du métal fondu dépend en premier lieu de la dilution (ou le taux de dilution), et des différents composants constituant les éléments à assembler.

III – 5 – 1 – La dilution

Comme défini précédemment elle signifie la proportion du métal de base fusionnée entrant dans la composition du métal fondu

Elle est exprimée comme suit :

$$D = \frac{v}{V}$$

Où v : volume du métal de base fondu.

V : volume globale du métal fondu. [24].

On peut exprimer ce rapport en fractions de surfaces, cela donne :

$$D = \frac{SMB}{ST}$$

Tel que : SMB : Surface du métal de base fondu.

ST : Surface globale du métal fondu.

Lorsqu'on a affaire à un soudage hétérogène une légère modification s'impose à savoir :

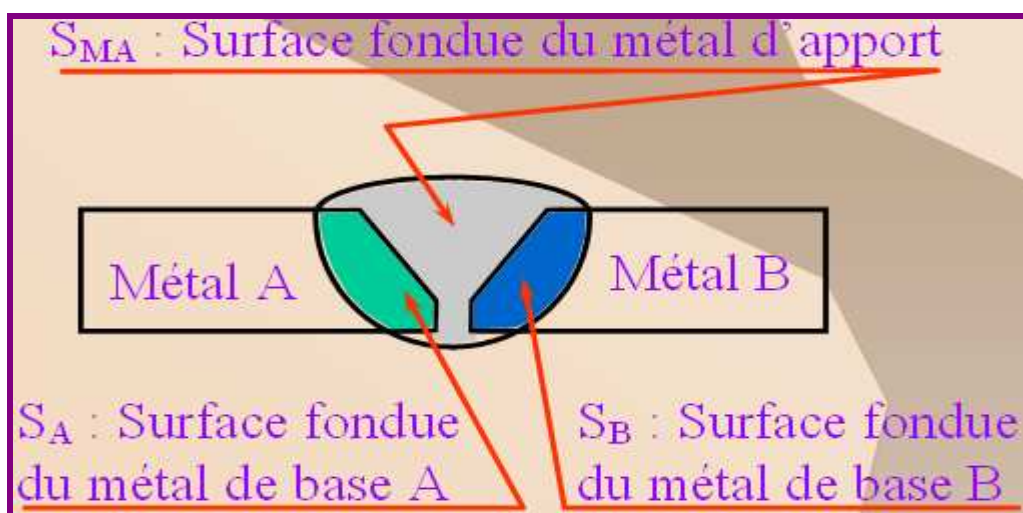


Figure III-7: Taux de dilution [18].

$$D\% = \frac{SA + SB}{SA + SB + SMA} \quad (6)$$

Ce paramètre nous donne la possibilité de déterminer la structure brute de soudage (structure de la zone fondue) à travers sa contribution à la construction graphique qui permet de déterminer le point figuratif du joint soudé.

III – 5 – 2 – Construction graphique

Elle comporte 3 étapes essentielles :

***1ère étape** consiste à positionner les points A, B, C, représentatifs des métaux de base A et B et du métal d'apport (respectivement).

****2ème étape** consiste à positionner le point C (point représentatif du mélange AB) à partir du point B.

$$\text{Tel que : } X = \left(\frac{dMA}{dMA + dMB} \right) * L_{AB} \quad (7)$$

$$\text{Ou : } dMA : \text{étant la dilution du métal A.} \quad dMA = \frac{SA}{SA + SB + SMA} \quad (8)$$

$$dMB : \text{étant la dilution du métal B.} \quad dMB = \frac{SB}{SA + SB + SMA} \quad (9)$$

L_{AB} : la distance entre les deux points A et B.

*****3ème et dernière étape** consiste à positionner le point JS dans le segment CE.

$$\text{Tel que : } Y = (d * LCE) / 100 \quad (10)$$

$$\text{Ou : } d \text{ est le taux de dilution } (d = dMA + dMB) \quad (11)$$

Une fois ces étapes accomplies on obtiendra le schéma montré ci-dessous :

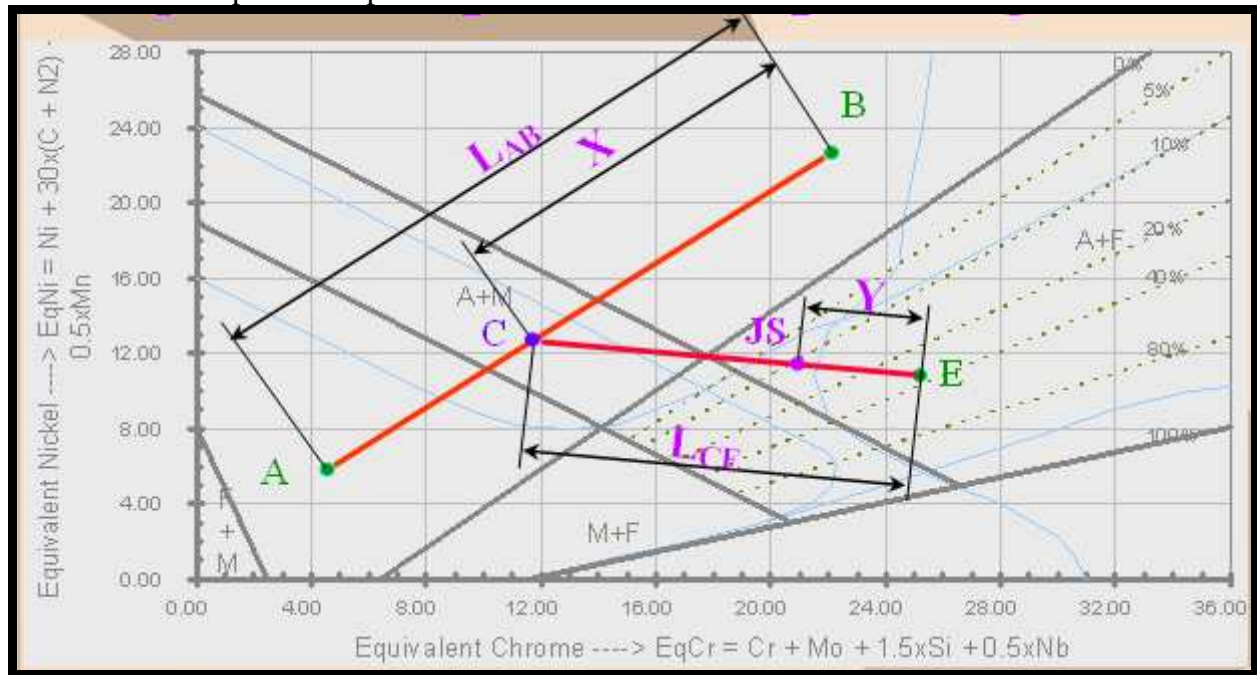


Figure III-8: Illustration de la conception graphique [18].

Le point JS est au barycentre des points C et E.

Le point JS nous permettra d'appréhender les risques métallurgiques et du coup de les éviter soit en modifiant les compositions chimiques des éléments mis en jeu soit en suivant une procédure de soudage adaptée.

Le point JS nous donne aussi la possibilité d'apprécier la structure du métal fondu et donc d'en déduire les différentes propriétés [18].

Le point JS nous permet aussi de déterminer le taux de ferrite dans la zone fondue, à partir des coordonnées de ce dernier ; à l'aide de la formule de seférian (issue du diagramme de schaeffler) :

$$\% \text{ ferrite } = 3 (Cr \text{ eq } - 0,93 Ni \text{ eq } - 6,7) \text{ [23]. } \quad (12)$$

III – 6 – CONCLUSION :

La procédure qui vient d'être décrite est tout à fait générale et peut donc être appliquée à tout assemblage hétérogène d'alliages ferreux. D'où il est intéressant de disposer d'un diagramme de Schaeffler afin de réaliser le bon choix de métal d'apport. Le produit adéquat apparaîtra le plus souvent de manière évidente dès que l'on aura placé le ou les points représentatifs des métaux de base [25].

On peut aussi à travers le point représentatif JS déterminer le taux de ferrite qui de plus est un paramètre très important surtout en ce qui concerne le soudage des aciers inoxydables duplex vu ses répercussions sur les propriétés de soudage. Telles que : la résistance, la ténacité, la résistance à la corrosion et la stabilité de phase à long terme.

De plus, la quantité de ferrite est un indicateur utile pour le mode de solidification, qui influence fortement la fissuration à chaud durant le soudage.

Chapitre IV

Utilité du Soudage hétérogène

Utilité du soudage hétérogène

Ce type d'assemblage est utilisé fréquemment pour les transitions (ouvrages concentrés / canalisation)

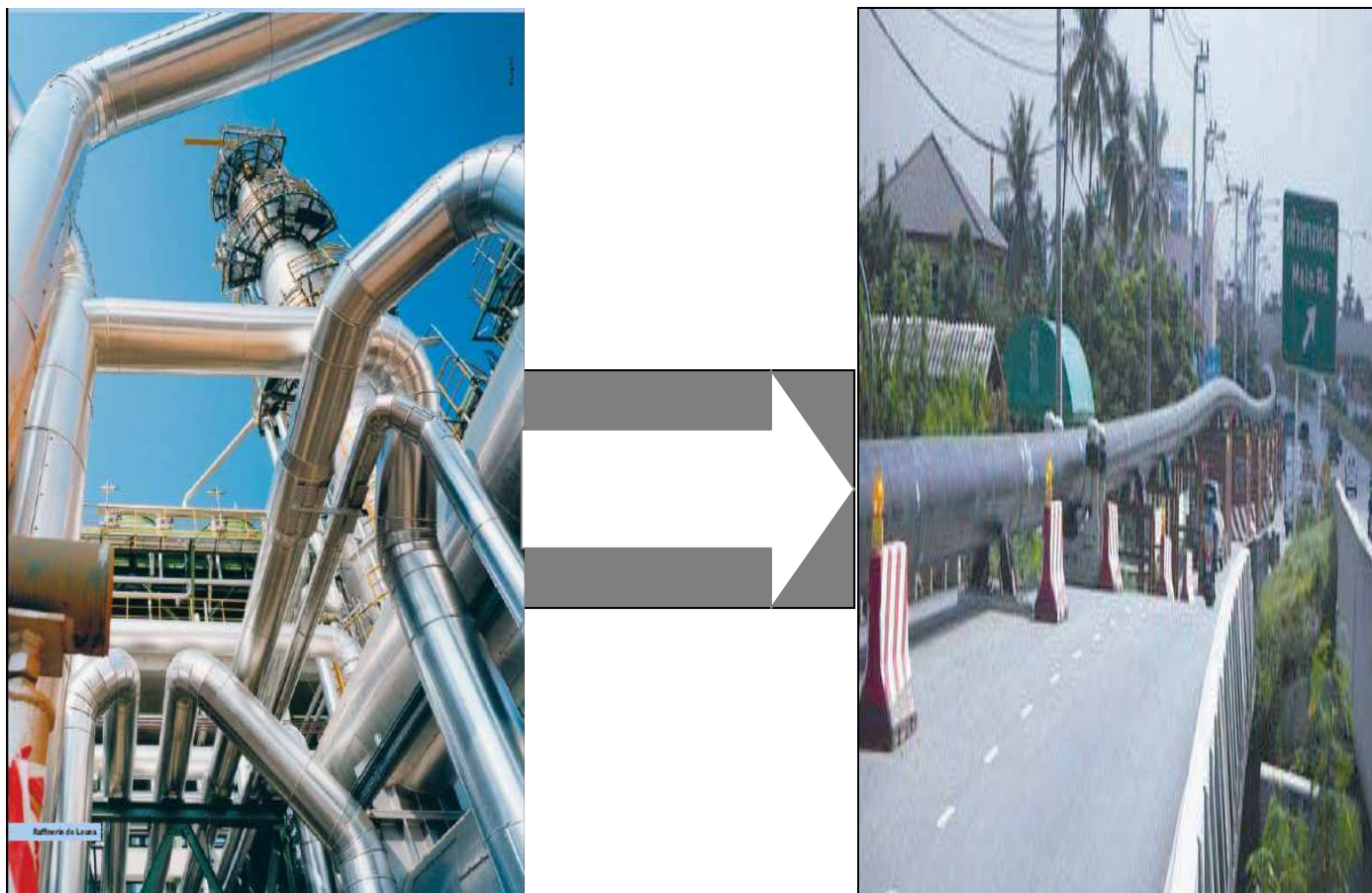


Figure VI-1 : Transition [26].

On peut rencontrer ce type d'assemblages dans les conduites aussi, notamment au niveau des coudes (soumis à des contraintes plus sévères comparé aux segments droits), d'où une ductilité plus importante est requise.



Figure VI-2 : Portions sous forme de coudes [26].

- On retrouve aussi ce type d'assemblage lors du soudage des tubes avec les supports de fixation (qui sont généralement élaborés en aciers de qualité moindre).



Figure VI-3 : Supports de fixation de pipelines [26].

Partie techniques expérimentales

I – IDENTIFICATION DES METAUX DE BASE

Dans notre cas il s'agit d'un soudage hétérogène d'où nous avons affaire à deux métaux de base différents. L'un étant un acier au carbone (A333 Grade 6 désignations ASTM).

- Et l'autre étant un acier inoxydable biphasé (A790 S32550 ASTM).

I – 1 – IDENTIFICATION DE L'ACIER INOXYDABLE

I – 1 – 1 – prélèvement de l'échantillon

L'échantillon sous forme d'une médaille (36 x 36) mm² est prélevé à partir d'un tube de 6" de diamètre et de 7,11 mm d'épaisseur.

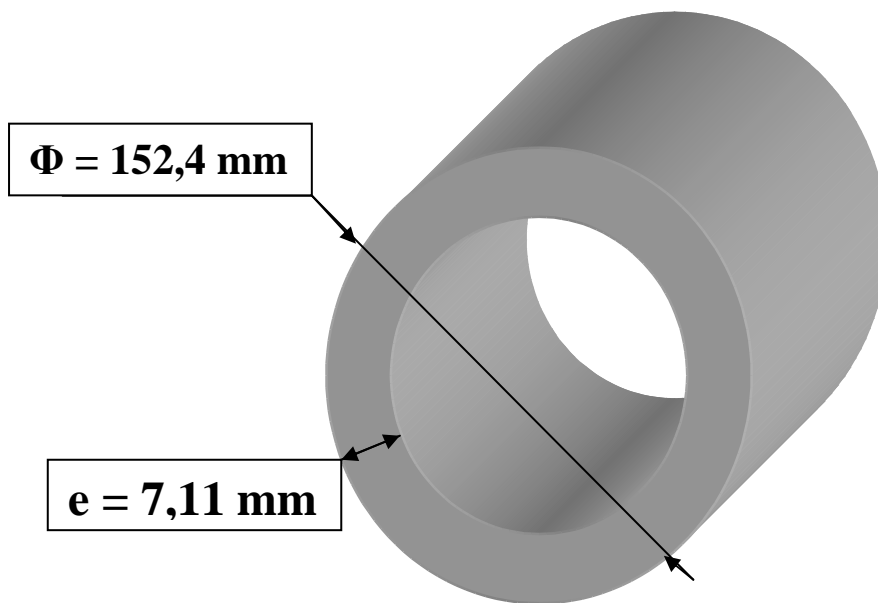


Figure I-1 : Coupon de prélèvement

Le découpage s'effectue à froid à l'aide d'une scie pour éviter tout échauffement qui pourrait modifier les propriétés et caractéristiques du matériau.

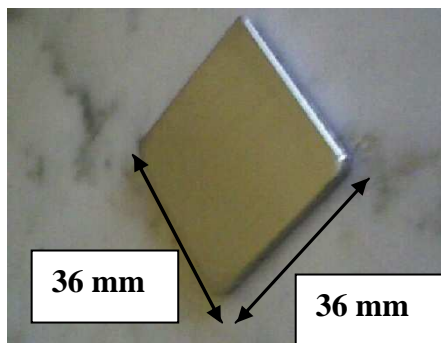


Figure I-2 : Echantillon obtenu.

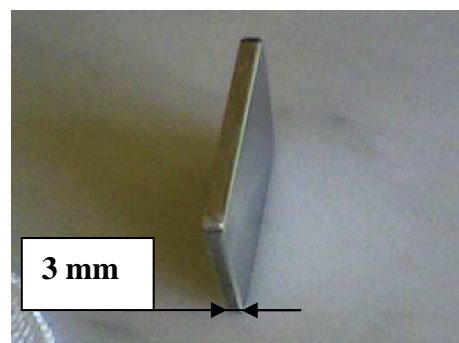


Figure I-3 : Echantillon obtenu.

Le découpage a été fait au niveau de L'entreprise nationale des grands travaux pétroliers.

I – 1 – 2 – Analyse chimique de l'échantillon

- I – 1 – 2 – 1 – Préparation de l'échantillon

**préparation préliminaire :* (au niveau de l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique.)

Cette étape consiste en un polissage grossier qui a comme but principale l'élimination des stries induites par la scie ainsi que l'amélioration de l'état de surface

Pour cela on a recourt à une polisseuse équipée d'un touret (assure un flux d'eau continue) et des disques d'abrasifs de granulométrie de (P 180 – P 400 – P 600 – P 800).

- l'opération s'effectue à une vitesse comprise entre 200 et 400 tr/min.
- à chaque changement de granulométrie l'échantillon subit une rotation de 90° pour éliminer les raies précédentes.
- La durée par granulométrie est de 2 à 3 minutes.



Figure I-4 : Polisseuse.

Une fois le polissage terminé l'échantillon est séché puis recouvert d'une couche de vernis pour éviter l'oxydation.

**préparation pour l'analyse :* L'échantillon est poli à l'aide d'un abrasif de granulométrie P 180 pour enlever la couche de vernis (45 sec) environ; suivi d'un polissage final à l'aide d'un abrasif ''P 400''.

- I – 1 – 2 – 2 – Exécution de l'expérience

La méthode utilisée pour l'analyse chimique est la fluorescence X.

La spectrométrie de fluorescence X (SFX ou FX, ou en anglais XRF pour X-ray fluorescence) est une méthode d'analyse chimique élémentaire utilisant une propriété physique de la matière, la fluorescence de rayons X.

Lorsque l'on bombarde de la matière avec des rayons X, la matière réémet de l'énergie sous la forme, entre autres, de rayons X ; c'est la fluorescence X, ou émission secondaire de rayons X.

Le spectre des rayons X émis par la matière est caractéristique de la composition de l'échantillon, en analysant ce spectre, on peut en déduire la composition élémentaire, c'est-à-dire les concentrations massiques en éléments.

L'analyse du spectre peut se faire de deux manières :

- ❖ par *analyse dispersive en longueur d'onde* (WD-XRF, wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrométrie) ;
- ❖ par *analyse dispersive en énergie* (ED-XRF, energy dispersive X-ray fluorescence spectrométrie). ... [23].

En ce qui nous concerne on a affaire à la première méthode.

La figure ci-dessous donne un aperçu sur le principe de fonctionnement de la technique :

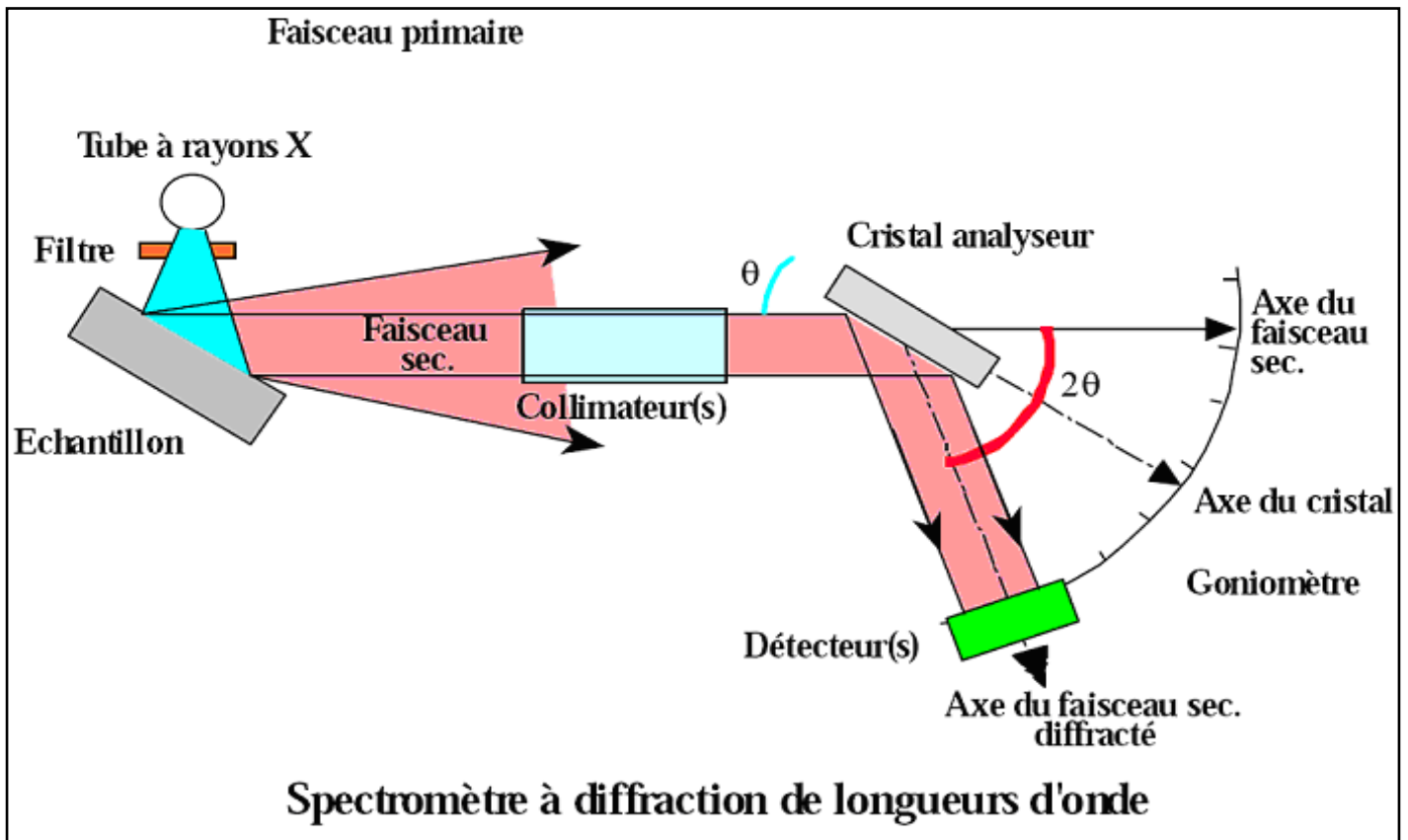


Figure I-5 : Illustration de la technique [27].

La préparation secondaire et l'exécution de l'expertise chimique se sont déroulées au centre de recherche et de développement (CRD) de boumerdés.

I – 1 – 2 – 3 – Analyse chimique par spectrographie

L'échantillon a fait objet d'une deuxième analyse chimique, à l'aide d'un spectromètre "LECO"

Cette méthode consiste à bombarder l'échantillon par un gaz inerte (argon). Et d'analyser le spectre des rayons émis par l'échantillon (cette méthode est destructive).

Cette méthode a été utilisée pour évaluer le taux de carbone car la méthode de fluorescence X ne donne pas des résultats tangibles pour ce qui est de cet élément.

I – 1 – 3 – Analyse métallographique de l'échantillon

Afin de mettre en évidence la structure de l'acier.

I – 1 – 3 – 1 – Préparation de l'échantillon

On prend une partie de l'échantillon analysé par la fluorescence X, on poursuit le polissage jusqu'à la finition en utilisant des feutres imbibés de suspension d'alumine diluées. De façon à obtenir à la fin un aspect miroir des échantillons.

Une fois le polissage fini l'échantillon est séché et nettoyé.

I – 1 – 3 – 2 – Attaque et observation

L'attaque s'est faite à l'aide de la solution "ACIDE OXALYQUE" (Attaque électrolytique).

Et l'observation à l'aide d'un microscope optique.

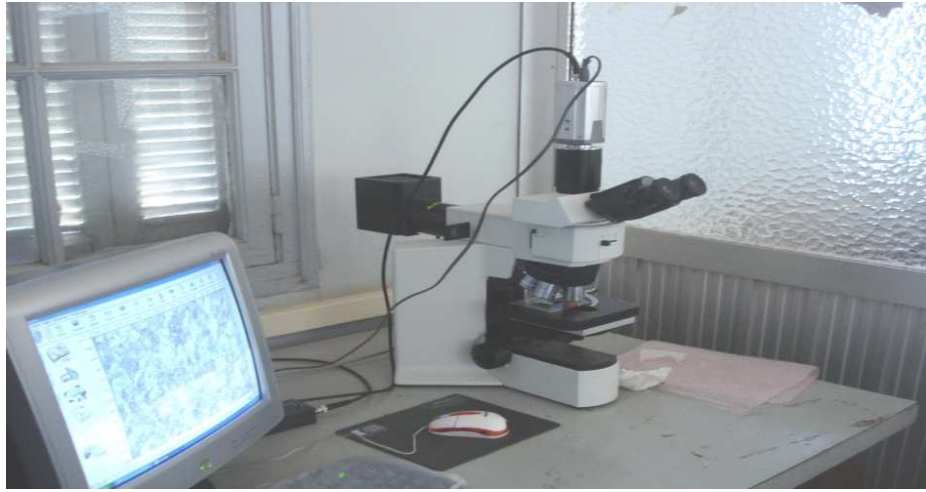


Figure I-6 : Microscope optique "OLYMPIUS 250".

L'examen métallographique s'est déroulé au niveau de l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique.

I – 2 – IDENTIFICATION DE L'ACIER AU CARBONE

On effectue le prélèvement à partir d'un tube de 6" de diamètre et de 7,11 mm d'épaisseur (les dimensions de l'échantillon ne sont pas importantes) et on fait analyser l'échantillon par la méthode de spectrographie optique.

II – IDENTIFICATION DU METAL D'APPORT

Le choix du métal d'apport doit assurer un compromis entre les propriétés et caractéristiques des deux métaux de base. Ce qui nous a amené à proposer un métal d'apport "**BIPHASE**" (**AUSTENOFERRITIQUE**) (ER 2209 pour le procédé TIG "Désignation ASTM") (voir aussi "CATALOGUE ESAB") annexe. Le métal d'apport a une structure beaucoup plus proche de l'acier duplex.

***Caractérisation du métal d'apport

- Classification : AWS A 5.9 - 06 "ER 2209".

- Propriétés mécaniques

Tableau II-1: Quelques valeurs caractéristiques du métal d'apport

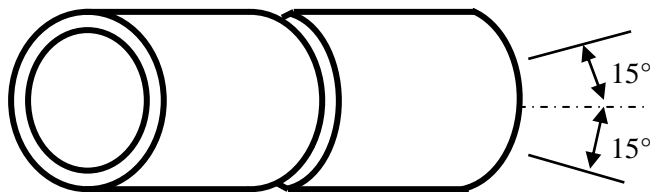
Propriétés	Limite d'élasticité $R_{p0,2}$ (N/mm ²).	Résistance à la rupture R_m (N/mm ²).	Allongement à la rupture A (%)
Métal d'apport	750	580	30

III – EXECUTION DE L'OPERATION DE SOUDAGE

Les deux coupons de 6'' de diamètre, et de 7,11 mm d'épaisseur sont soudés à l'aide du procédé **TIG** afin de garantir de bonnes propriétés au cordon, et pour réduire le plus possible les risques de formation de défauts.

De même le procédé **TIG** est caractérisé par un apport important en énergie, nécessaire pour la mise en solutions des aciers en questions.

Notons que la disposition des éprouvettes est suivant la position ''5G'' [ou les deux coupons sont positionnés horizontalement et le soudeur exécute l'opération en se déplaçant du bas vers le haut (soudure montante)].



Position 5G

Figure III-1 : position de soudage.

La distance entre l'électrode et la zone à souder doit être contrôlée, trop éloignée l'arc s'interrompt, trop près ou si contact il y a court-circuit et la pointe de l'électrode s'émousse. Il faut alors la «repointer» à la meuleuse ou à l'affûteuse

Le soudeur tient en main un fil (ou bien une tige) **de métal d'apport** pour former et alimenter le bain de fusion. De l'autre main il tient **la torche** pour établir l'arc avec **la pièce à souder**.

Matériel utilisé pour procédé GTAW

1. Un poste de soudage équipé de câbles.
2. Une source de gaz inerte équipée de tuyaux, détendeurs, etc.
3. Une source d'eau (pour certains types de torches),
4. Une torche sur laquelle les éléments sont branchés, sert aussi à diriger l'arc.



Figure III-2 : Dispositif (ENGTP)



Figure III-3 : Torche (ENGTP)



Figure III-4 : Soudage GTAW avec double protection gazeuse. (ENGTP)

Remarque : la double protection est maintenue pour les deux premières passes (pénétration + bourrage).

Plus de détails voir

SPECIFICATION DE LA PROCEDURE DE SOUDAGE (Annexe 4).

L'opération s'est déroulée au sein de l'Entreprise Nationale des Grands Travaux Pétroliers.

IV – ETUDE METALLOGRAPHIQUE

Réalisée à l'ECOLE NATIONALE SUPERIEUR POLYTECHNIQUE

IV – 1 – MACROGRAPHIE

Cette analyse met en évidence la structure métallographique homogène ou hétérogène d'une coupe transversale d'une éprouvette soudée de telles manières que le réactif chimique appliqué sur la surface polie de l'éprouvette révèle par dissolution à vitesses variables les hétérogénéités chimiques et physiques de la surface observée.

IV – 1 – 1 – Prélèvement de l'échantillon

Le prélèvement s'effectue dans le sens transversal de la soudure réalisée, à l'aide d'une meule sous eau afin de remédier à tout échauffement.

IV – 1 – 2 – Polissage de l'échantillon

Le pré-polissage de la surface à observer est réalisé par l'intermédiaire d'un touret sous eau et des disques abrasifs de granulométrie d'environ (P 120 – P 400 – P 600, successivement). Avec une vitesse de rotation comprise entre 150 et 300 tours/minutes.

L'échantillon subit une rotation de 90° à chaque changement de granulométrie pour effacer les raies précédentes de polissage. Il faut veiller à ce que 2 minutes soient consommées pour chaque granulométrie.

Un polissage de finition peut être réalisé avec une granulométrie de P 800 à P 1200 et des pates diamantées de 6 et 1 micron ou de l'alumine sur un drap ou feutre de polissage en velours.

IV – 1 – 3 – Attaque chimique

Celle-ci est réalisée à l'aide d'une solution chimique composée de :

- 56 g de KOH dans 100ml d'H₂O pour l'acier inoxydable (attaque électrolytique).
 - Tension :3V.
 - Temps : quelques secondes
- Le nital 4% (4ml d'éthanol dans 96 ml d'H₂O).

On attend quelques secondes après l'application de la solution ensuite on essuie l'échantillon, puis on procède à l'observation à l'œil nu ou à l'aide d'un simple scanner ou appareil photo.

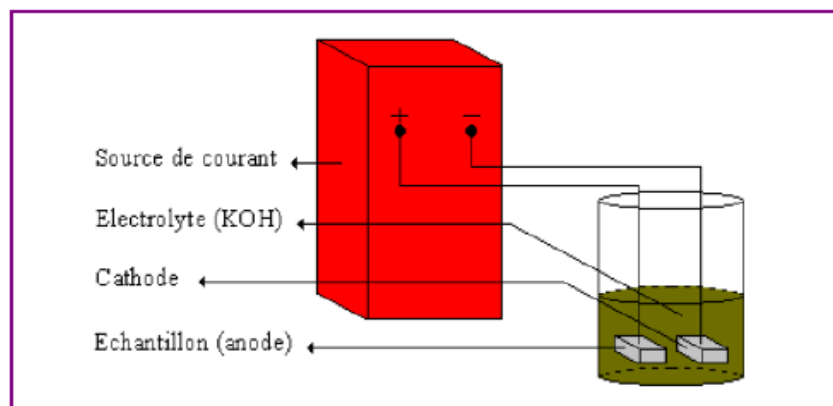


Figure IV-1 : Schéma + Dispositif de l'attaque électrolytique. (ENSP)

IV – 2 – MICROGRAPHIE

Même préparation que la macrographie mis à part que l'échantillon est placé dans le microscope optique, et à l'aide de l'appareil photo incorporé dans le microscope optique on fixe la résolution de l'image qui apparaît à l'écran et on choisie éventuellement la plage qui nous intéresse puis on procède à la prise des clichés.

V – CALCUL DU TAUX DE FERRITE

Dans cette partie on procède à la mesure du taux de ferrite au niveau de la zone fondue.

V – 1 – PAR LE DIAGRAMME DE SCHAEFFLER

Ce diagramme a été choisi parmi les diagrammes de prédiction.

V – 1 – 1 – Construction du diagramme

- ✚ On trace les droites qui délimitent les différents domaines de ce diagramme.
- ✚ On nome les domaines.
- ✚ Dans le domaine austéno-ferritique on trace les droites des différents taux de ferrite.

V – 1 – 2 – Calcul de la dilution

- ✚ On mesure les surfaces des sections à prélever des (métaux de base) avant l'exécution de l'opération de soudage. "On prend comme référence l'axe passant par le centre de l'écartement entre les deux extrémités des deux pièces à assembler"
- ✚ Après soudage on prend la portion concernée et on lui fait une macrographie.
- ✚ Après distinction des différentes zones du cordon (Les métaux de bases de La zone fondue) on calcule la surface de la zone fondue ainsi que les nouvelles surfaces des métaux de base respectives en gardant comme référence l'axe du cordon de soudure (pour écarter l'effet du retrait transversale).

$$SA = Sa_i - Sa_f \quad (13)$$

$$SB = SB_i - SB_f \quad (14)$$

Remarque : la détermination des surfaces se fait à l'aide d'un logiciel de traitement d'image.

- ✚ On détermine la dilution globale, et les dilutions partielles des deux métaux de bases.

Les formules des taux de dilution :

$$D\% = \frac{SA + SB}{SA + SB + SMA} \quad dMA = \frac{SA}{SA + SB + SMA} \quad dMB = \frac{SB}{SA + SB + SMA}$$

V – 1 – 3 – Détermination du point figuratif :

- ✚ D'abord on commence par placer les points figuratifs des métaux de bases ainsi que le métal d'apport.

En se basant sur les formules des Cr eq et Ni eq :

$$Eq (Cr) = \%Cr + \%Mo + 1,5 \times \%Si + 0,5 \times Nb.$$

$$Eq (Ni) = \%Ni + 30 \times \%C + 0,5 \times Mn.$$

✚ On détermine le point représentatif du mélange (A + B).

A l'aide de la formule suivante :
$$X = \left(\frac{dMA}{dMA + dMB} \right) * L AB.$$

✚ Et en dernier on procède à la mise en place du point figuratif du joint soudé JS.

A l'aide de la formule :
$$Y = (D * LCE) / 100.$$

A partir du point figuratif représentant le métal fondu on calcule le taux de ferrite à l'aide de la formule de seférian :

$$\% \text{ ferrite} = 3 (Cr eq - 0,93 Ni eq - 6,7).$$

V - 2 - PAR LE LOGICIEL D'ANALYSE D'IMAGE " IMAGE J "

La technique de traitement d'image a pour but de quantifier la phase ferritique. Pour cela on a choisi aléatoirement des micrographies de la zone fondue comme illustré sur la figure ci-dessous.

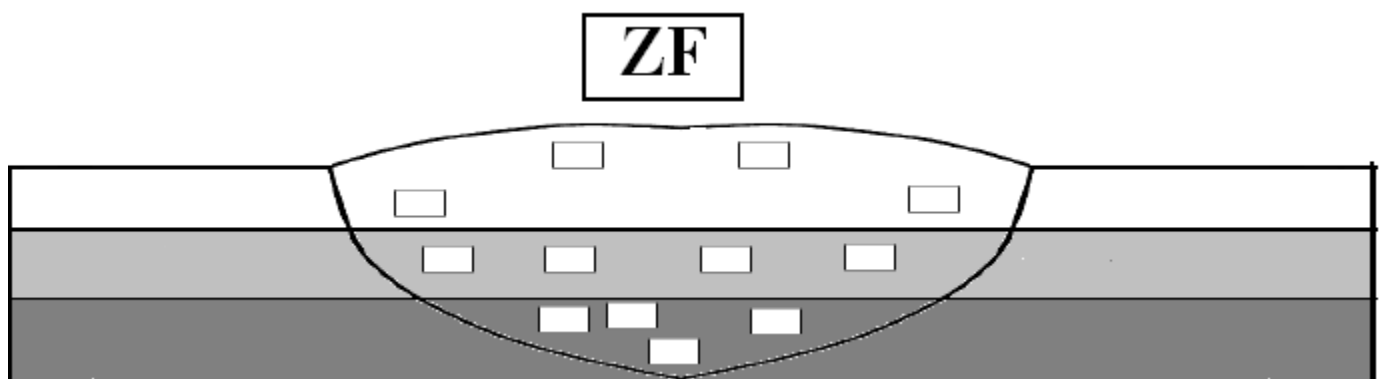


Figure V-1 : Prélèvement aléatoire des clichés.

On a utilisé pour quantifier le taux de ferrite les micrographies obtenues à partir de l'attaque électrolytique au (KOH) car cette attaque permet de colorer différemment les phases existantes. Le logiciel utilisé dans notre étude est le logiciel **Image J**.

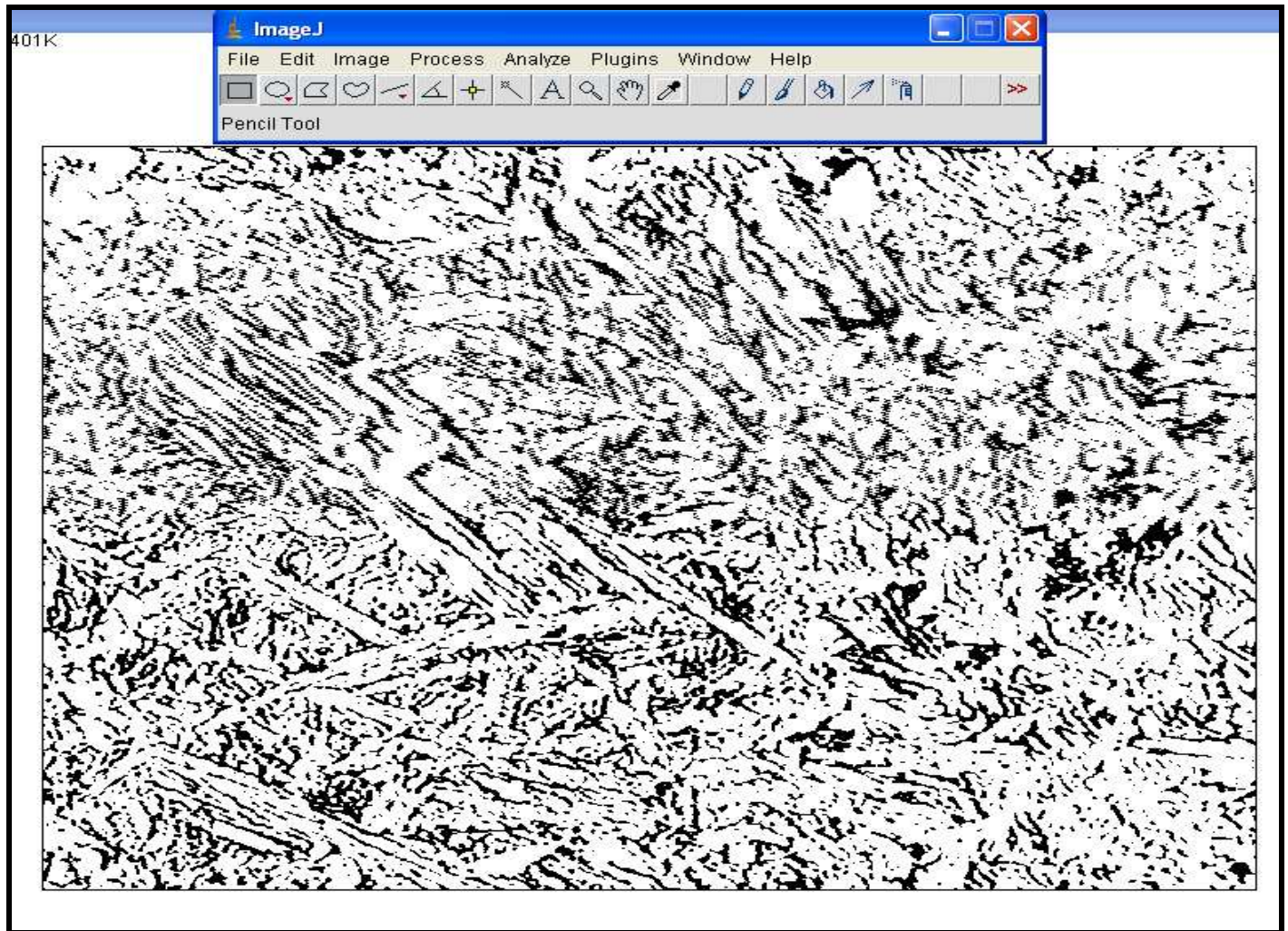


Figure V-2 : Logiciel de traitement d'image " IMAGE J ".

Ainsi, dans l'image initiale les deux phases (α et γ) apparaissent en couleurs différentes, ensuite, après ajustement de la luminosité et le contraste de l'image transformée (après traitement), on obtient une image finale binaire où apparaît la phase ferritique en une couleur noire et le reste en blanc (austénite).

Les étapes décrites ci-dessus sont illustrées ci-dessous :

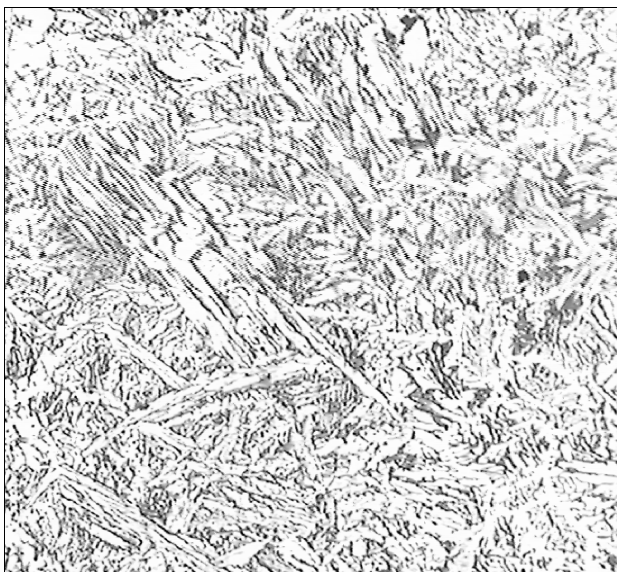


Figure V-3 : Avant traitement

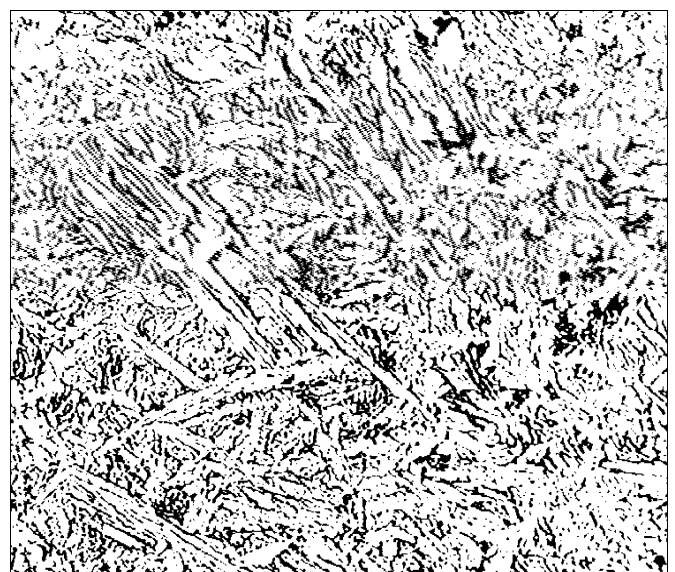


Figure V-4: Après traitement

VI – ESSAI DE RESILIENCE

Cet essai nous donne la possibilité d'étudier l'évolution de l'énergie de rupture en fonction de la variation de la température de façon à déterminer la température de transition. Il nous permet par la même occasion d'apprécier les faciès de rupture.

VI – 1 – Principe de l'essai

Un pendule est élevé à une hauteur donnée, on libère le pendule qui dans sa chute provoque la rupture de l'échantillon ensuite le pendule poursuit sa course et remonte jusqu'à une certaine hauteur.

En mesurant la différence de hauteur, on peut apprécier, avec assez de précision l'énergie absorbée par l'éprouvette pour obtenir la rupture.

La résilience est l'énergie exprimée en joule par unité de surface (cm^2), nécessaire pour produire la rupture de l'éprouvette.



Figure VI-1 : Appareil d'essai de résilience (ENGTP)

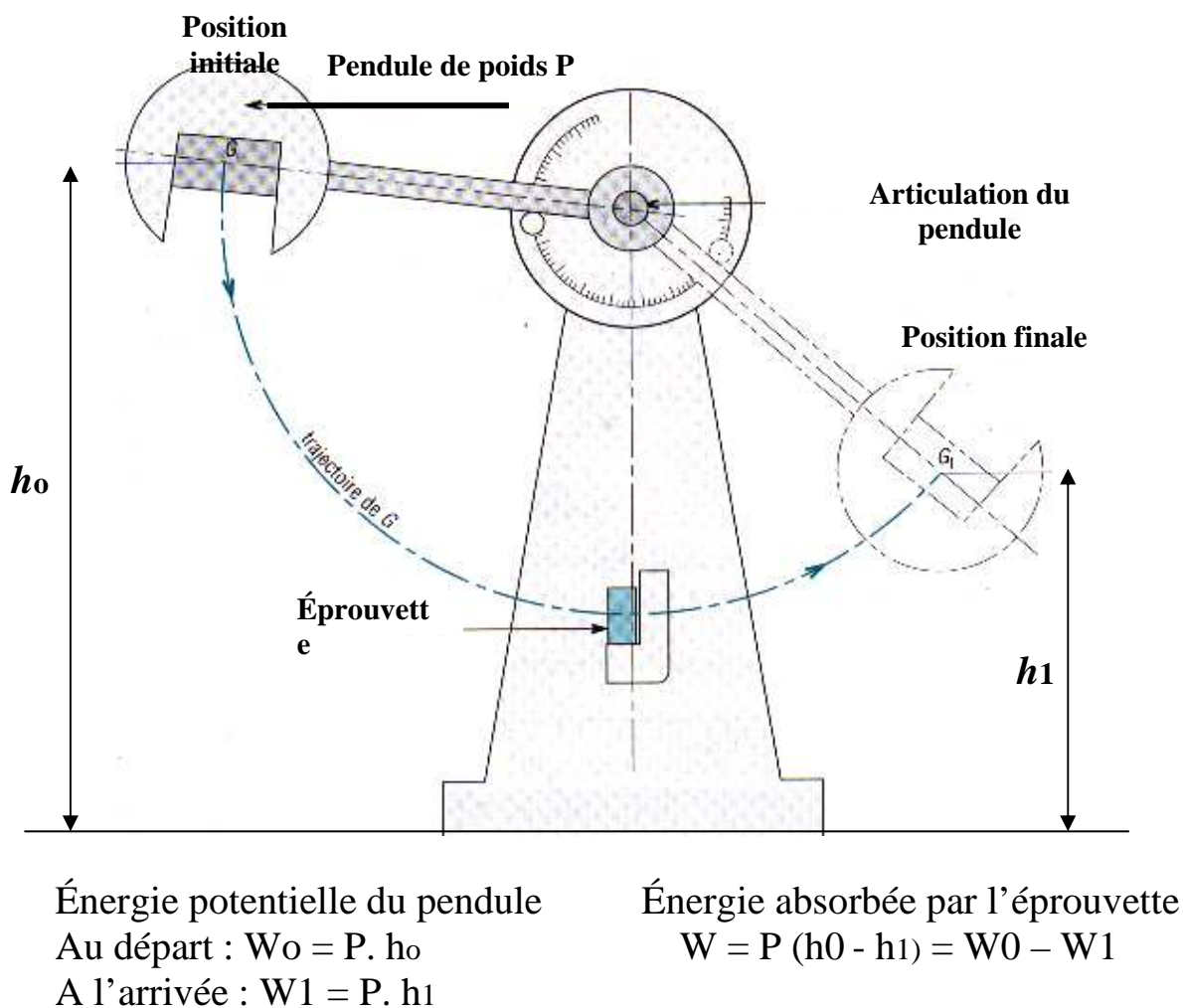


Figure VI-2 : dispositif de l'essai de résilience [28].

VI – 2 – Type d'éprouvettes utilisées et leur positionnement dans le joint soudé :

Le type d'éprouvette utilisé est l'éprouvette Charpy V.

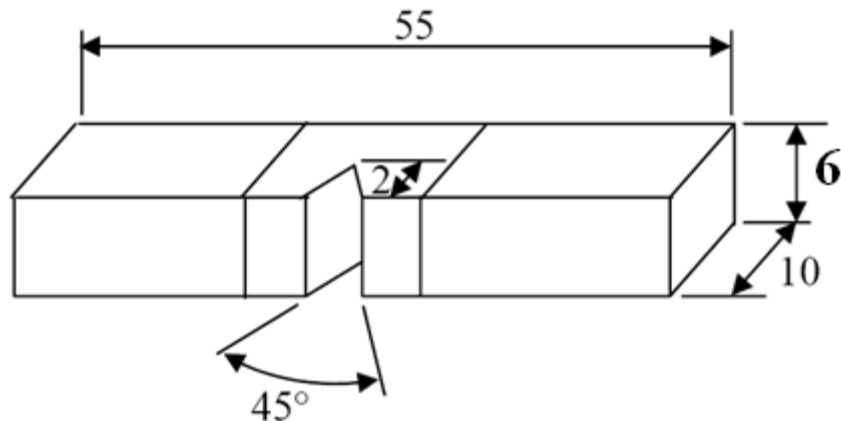


Figure VI-3: Les dimensions réelles de l'éprouvette

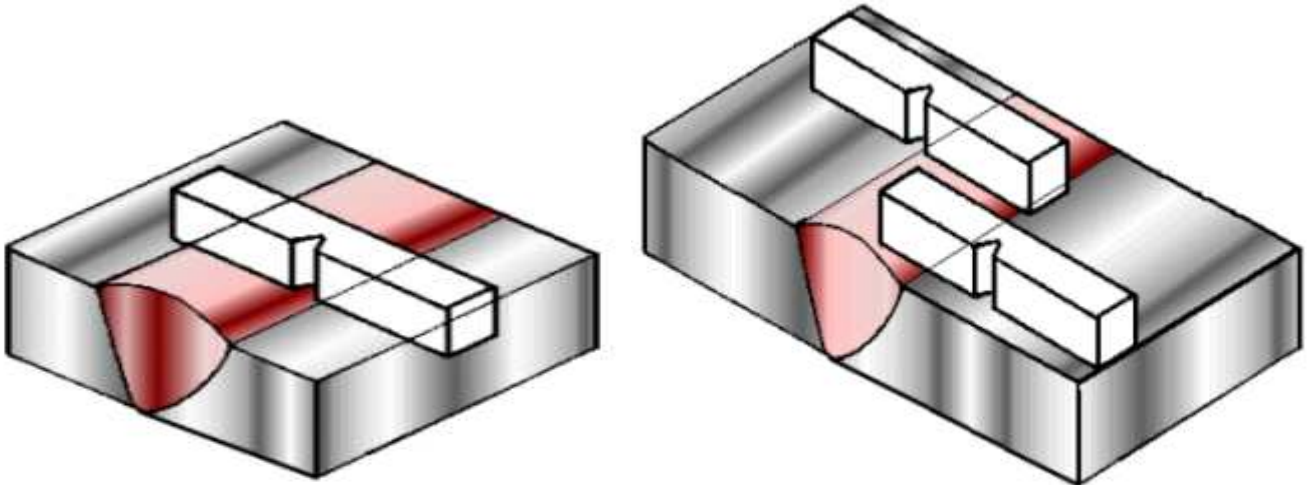


Figure VI-4 : Positionnement des éprouvettes.

Il y a aussi deux types d'essai de résilience :

1- essais à la température ambiante :

Il faut que les éprouvettes aient la température du milieu ambiant.

2- **essais à basse température** : les éprouvettes sont immergées dans un liquide Refroidisseur Azote (ou bien la neige carbonique) contenu dans un récipient muni d'un appareil d'évaluation de la température " thermocouple".



Figure VI-5 : Neige carbonique (ENGTP)

A travers cet essai nous nous fixons comme but la détermination de la température de transition pour les deux zone (zone fondue + zone affectée thermiquement coté acier au carbone)

Cet essai a été réalisé au niveau de L'entreprise Nationale Des Grands Travaux Pétroliers.

VII – ESSAI DE DURETE ET MICRODURETE

VII – Essai de dureté

L'essai de dureté est effectué pour le contrôle de pièces et pour l'évaluation de sa durée.

La dureté est la résistance qu'un corps répond à la pénétration par un autre corps plus dur. L'essai consiste à appliquer sur un métal à mesurer, un pénétrateur (dont la forme varie selon le type de l'essai) sous une charge F (variable).

La dureté H s'exprime par le rapport de la force sur la surface de l'empreinte $H = F / S$

Les chiffres de dureté sont sans dimension pour respecter le caractère conventionnel de l'essai

On distingue trois principaux essais :

- les essais Brinell (HB)
- les essais Rockwell (HR)
- les essais Vickers (HV)

Cette méthode permet d'apprécier la dureté ponctuelle, vu que l'empreinte est de faible dimension. On peut même considérer cet essai, dans la plupart des cas, comme non destructif.

VII – 1 – Principe

La mesure de dureté Vickers se fait avec une pointe pyramidale normalisée en diamant de base carrée et d'angle au sommet entre face égal à 136° . L'empreinte a donc la forme d'un carré ; on mesure les deux diagonales d_1 et d_2 de ce carré à l'aide d'un appareil optique. On obtient la valeur d en effectuant la moyenne de d_1 et d_2 . C'est d qui sera utilisé pour le calcul de la dureté.

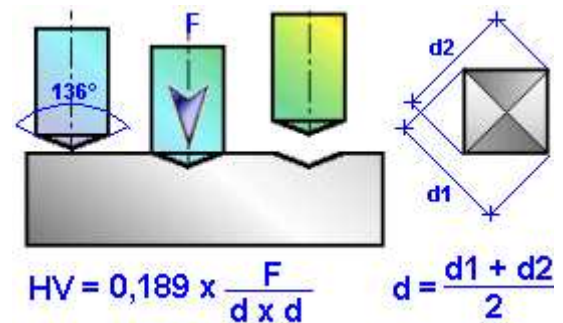


Figure VII-1 : Dimensions de l'empreinte Pyramidale et formules de calcul.



Figure VII-2 : Appareil de mesure de dureté (Vickers). (ENSP)

En ce qui nous concerne l'essai est effectué dans une coupe transversale au niveau d'un joint soudé en suivant trois profilés différents le premier étant en haut du joint (passe de finition), le deuxième au milieu du joint (passe de bourrage), et le dernier étant en bas du joint (passe de racine "ou pénétration").

Ceci va nous permettre d'apprécier l'évolution de la dureté dans les différentes zones du joint hétérogène à commencer par les métaux de base puis les zones affectées thermiquement des deux métaux respectifs et enfin la zone fondue.

L'intervalle entre deux empreintes varie en fonction des différents aspects de la structure.

Réalisée à l'ECOLE NATIONALE SUPERIEUR POLYTECHNIQUE

VIII – CARACTERISATION PAR LE M. E. B

Pour affiner l'investigation des microstructures et confirmer les résultats obtenus par Microscopie optique, on a été appelé à utiliser la Microscopie Electronique à Balayage (MEB) investigation réalisée au Centre de recherche et de développement de l'électricité et gaz (CREDEG), le microscope électronique utilisé est de type JEOL JSM- 6360 LV en utilisant le signal produit par l'émission d'électrons secondaires qui sont sensibles au micro relief de la surface optique. Il est couplé à un système de microanalyse (EDX). Les échantillons doivent présenter une conductibilité superficielle de l'électricité pour écouler les charges.

Le principe général du microscope électronique à balayage (M.E.B.) consiste à focaliser, à l'aide d'une sonde électronique, un faisceau très fin d'électrons (appelés électrons primaires) sur une aire réduite de la surface de l'échantillon, ainsi l'aire totale qu'on désire explorer est balayée point par point par le faisceau électronique.

L'interaction électrons – matière donne lieu à divers rayonnements spécifiques (électrons secondaires, électrons rétrodiffusés, électrons transmis, électrons Auger et rayons X) qui transportent des informations sur l'objet dont ils sont issus le traitement de ces rayons permet de déduire la description de l'objet traité.

L'observation des fasciés de rupture aussi a été réalisé par le (MEB).

Partie résultats et interprétations

Une fois les expériences accomplies on passe à la lecture et discussions des résultats obtenus.

I – 1 – RESULTATS DE L'ANALYSE CHIMIQUE (1)

Tableau I-1: Composition chimique de l'acier inoxydable analysé (méthode de fluorescence X).

Elément	Fe	Cr	Ni	Mn	Si	Cu	Co	V
Teneur (en % massique)	62,528	24,8934	6,8904	0,5356	0,5402	0,4814	0,0249	0,0503

Elément	S	P	Ti	Al	Mo	Nb	W	C
Teneur (en % massique)	0,0107	0,0143	0,0056	0,0188	3,2648	0,0138	0,6398	0,0350

I – 2 – RESULTATS DE L'ANALYSE MICROGRAPHIQUE

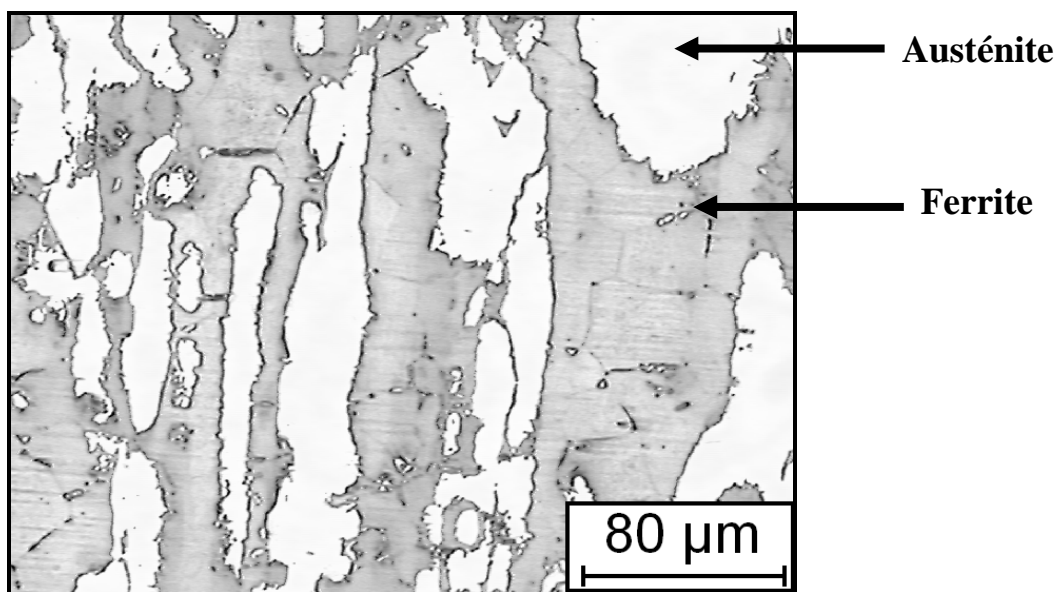


Figure I-1 : Microstructure de l'acier inoxydable.

I – bis – INTERPRETATION

D'après les résultats obtenues ci-dessus on en déduit que l'acier en question est un acier inoxydable duplex (*A 790. S 32550 ; désignation ASTM*) du fait de la teneur élevée en chrome ($\approx 25\%$) alpha gène et en Nickel également ($\approx 6,5\%$) gamma gène.

Ces taux confèrent à l'acier une structure biphasée, ainsi que la faible teneur en carbone qui permet de réduire les risques de précipitation des carbures ainsi que la formation de la martensite lors de la trempe.

II – RESULTATS DE L’ANALYSE CHIMIQUE (2)

Tableau II-1 : Composition chimique de l’acier au carbone analysé (par spectrographie optique).

Elément	C	Si	Mn	S	P	Mg	Ni	Cr
Teneur (en % massique)	0,190	0,100	0,72	0,003	0,020	0,005	0,080	0,050

Elément	Mo	Cu	Al	Pb
Teneur (en % massique)	0,022	0,007	0,015	0,001

II – bis – INTERPRETATION

C’est un acier au carbone faiblement allié au manganèse (qui lui confère la propriété de bonne résistance aux basses températures) à structure ferrito-perlitique.

III – 1 – RESULTATS DE L’EXAMEN MACROGRAPHIQUE

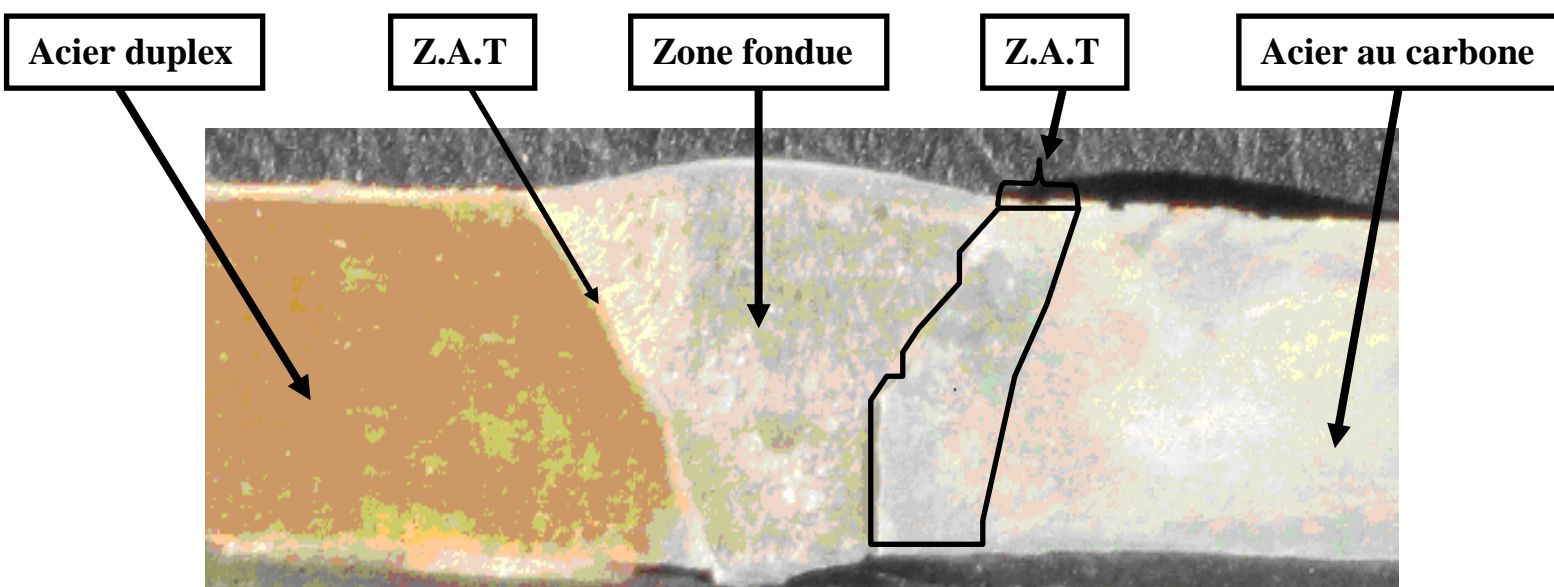


Figure III-1 : Macrographie du joint soudé.

III – 1 – bis – INTERPRETATION

La macrographie montre clairement une *hétérogénéité* du métal d'apport avec l'acier au carbone ce qui était prévisible vu la différence en termes de composition chimique et morphologie structurale ; par contre du côté duplex on observe une homogénéité presque parfaite (les deux métaux ont des structures et des nuances presque similaires à quelques proportions près) on note aussi l'absence de défauts qui peuvent engendrer la rupture ou la fissuration du cordon de soudage.

On constate du côté droit de la zone fondue (acier au carbone) un contraste ; qui représente un changement de structure au niveau du métal de base, c'est une zone un peu plus foncée que le métal de base "cette zone est surnommée Zone affectée thermiquement ou Z.A.T." Elle est relativement épaisse comparé a celle du côté acier inoxydable "duplex".

Cependant il subsiste une différence morphologique entre le métal fondue et les deux métaux de base. La mise en évidence de ce changement sera en plus clair dans la micrographie.

III – 2 – RESULTATS DE L'EXAMEN MICROGRAPHIQUE

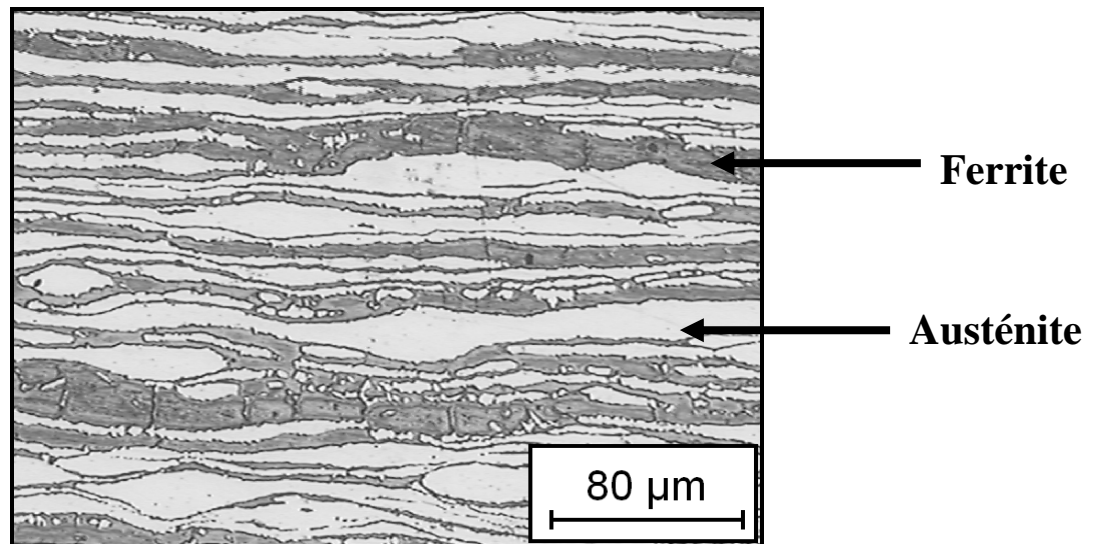


Figure III-2 : Micrographie optique du métal de base (acier duplex).

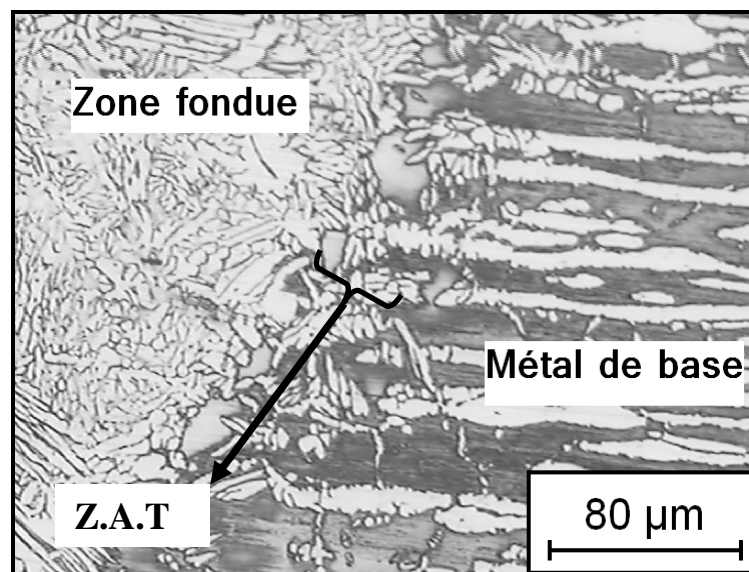


Figure III-3 : Micrographie optique de la ZAT du côté duplex.

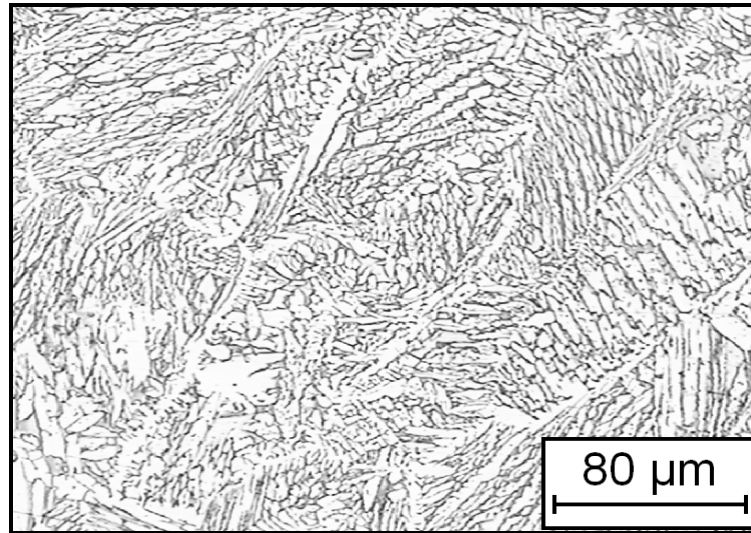


Figure III-4 : Micrographie optique du métal fondu.

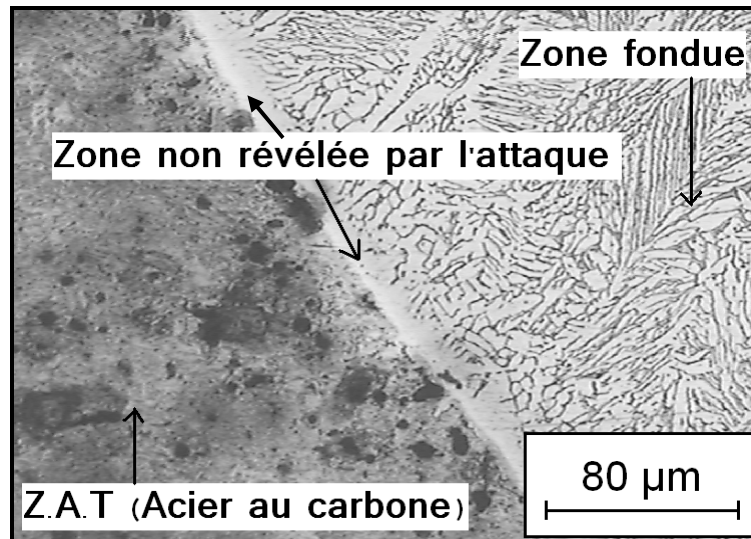
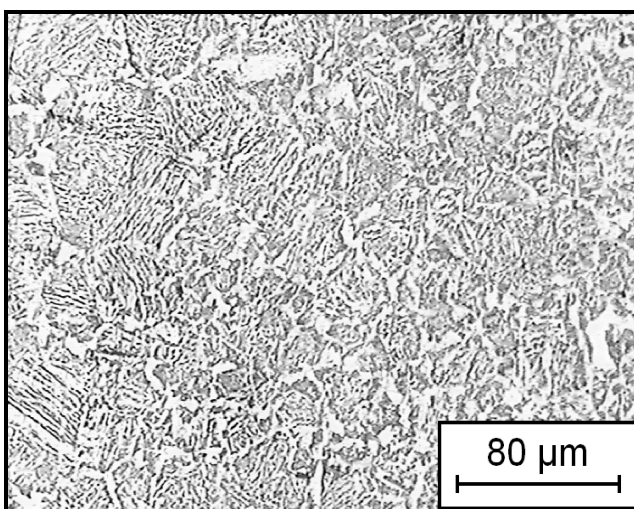
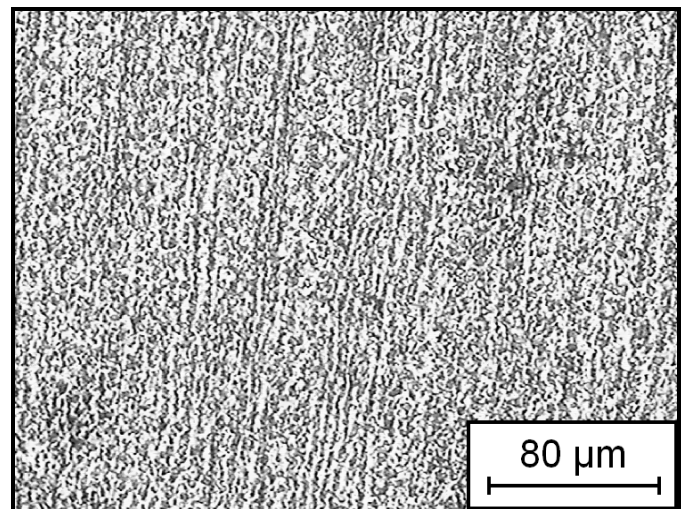


Figure III-5 : Micrographie optique de la zone de transition coté acier au carbone.



Zone 1



Zone 2

Figure III-6 : Micrographies optiques de la ZAT du coté acier au carbone.

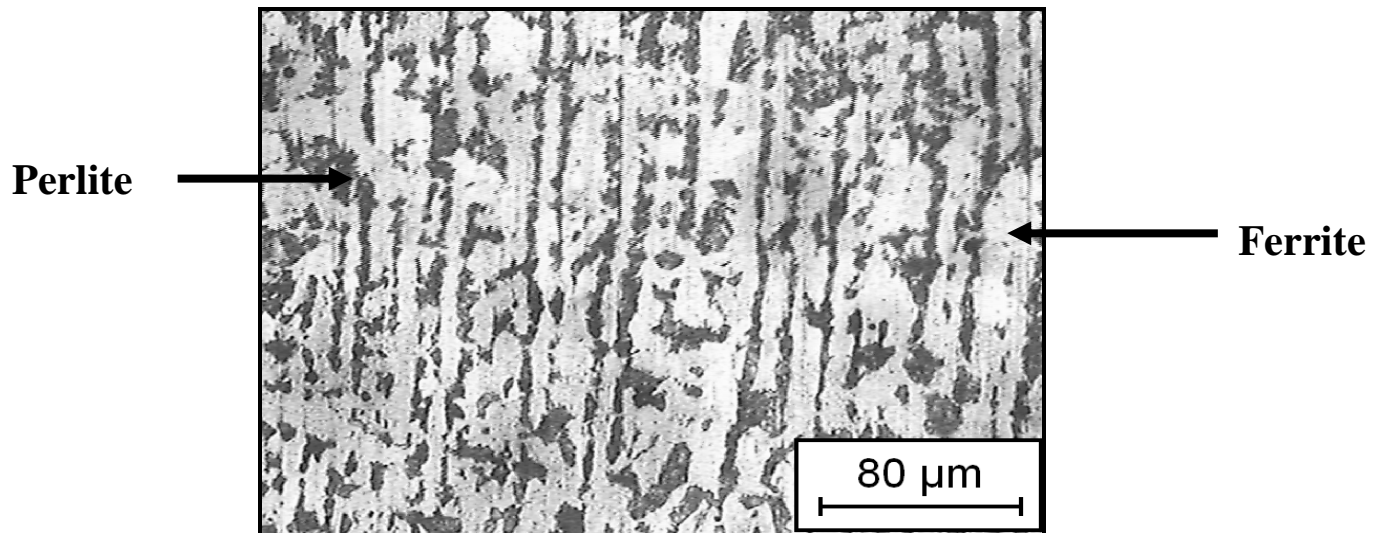


Figure III-7 : Micrographie optique du métal de base (acier au carbone).

III – 2 – bis – INTERPRETATION

🚧 **Figure du Métal de base (acier duplex).**

Le cliché montre clairement une mixture de deux phases austénitique + ferritique en proportions identique. Cette propriété est conférée grâce à l'équilibre en teneurs entre les deux éléments alphagènes et gammagènes. La figure montre un allongement dû au laminage du tube lors de l'élaboration.

🚧 **Figure de La Z.A.T du côté duplex**

Cette zone est très mince presque inexistante, on apprécie de même quelques dendrites formées par les conditions de refroidissement.

🚧 **Figure du Métal fondu**

- Structure dendritique aciculaire de Widmanstätten induite par un refroidissement rapide

Pour la première passe le taux de ferrite est moins important que celui de l'austénite à cause de : Conditions de soudage (le temps inter passes est court et la vitesse de refroidissement est lente à cause de la chaleur provenant de la 2^{ème} passe).

Par contre on a le taux de l'austénite dans la 2^{ème} passe est moins important que celui de la ferrite à cause de refroidissement rapide – refroidissement à l'air de la 2^{ème} passe. Le même raisonnement est suivi pour la troisième passe.

🚧 **Figure de la zone de liaison entre le métal de base (acier au carbone) et la zone fondue**

Cette zone est une sorte de barrière en forme de couche tout le long de la zone fondue, elle n'a pas été révélée par l'attaque chimique ; que ce soit le nital ou le KOH aucun d'eux n'a révélé la structure de cette zone

🚧 **Figure de la Z.A.T du côté acier au carbone**

Zone1

- On observe une structure à gros grains résultante de la transformation des gros grains austénitiques qui eux ont été induits par les températures élevées (supérieur à Ac3) de soudage

Zone2

- La figure montre une zone à grains fins, cette zone peut être divisée en deux parties l'une produite par des températures légèrement supérieures à Ac 3 et la deuxième qui est appelée zone de transformation partielle ou inter critique obtenue à partir d'une structure ferrite – perlitique qui subit une austénitisation partielle de la perlite à une température portée entre A_{C1} et A_{C3}, avec un début de globulisation des phases perlitique.

Figure du Métal de base (acier au carbone)

L'acier au carbone a une structure ferrite-perlitique avec une légère orientation suivant le sens du laminage, n'ayant pas subit de transformations structurales du fait de la faiblesse de la température à laquelle il a été chauffé.

IV – RESULTAS DU CALCUL DU TAUX DE FERRITE

Le taux de ferrite a été calculé par deux méthodes :

IV – 1 – PAR LE DIAGRAMME DE SCHEAFFLER

En introduisant les données dans l'application élaborée on obtient les résultats suivants :

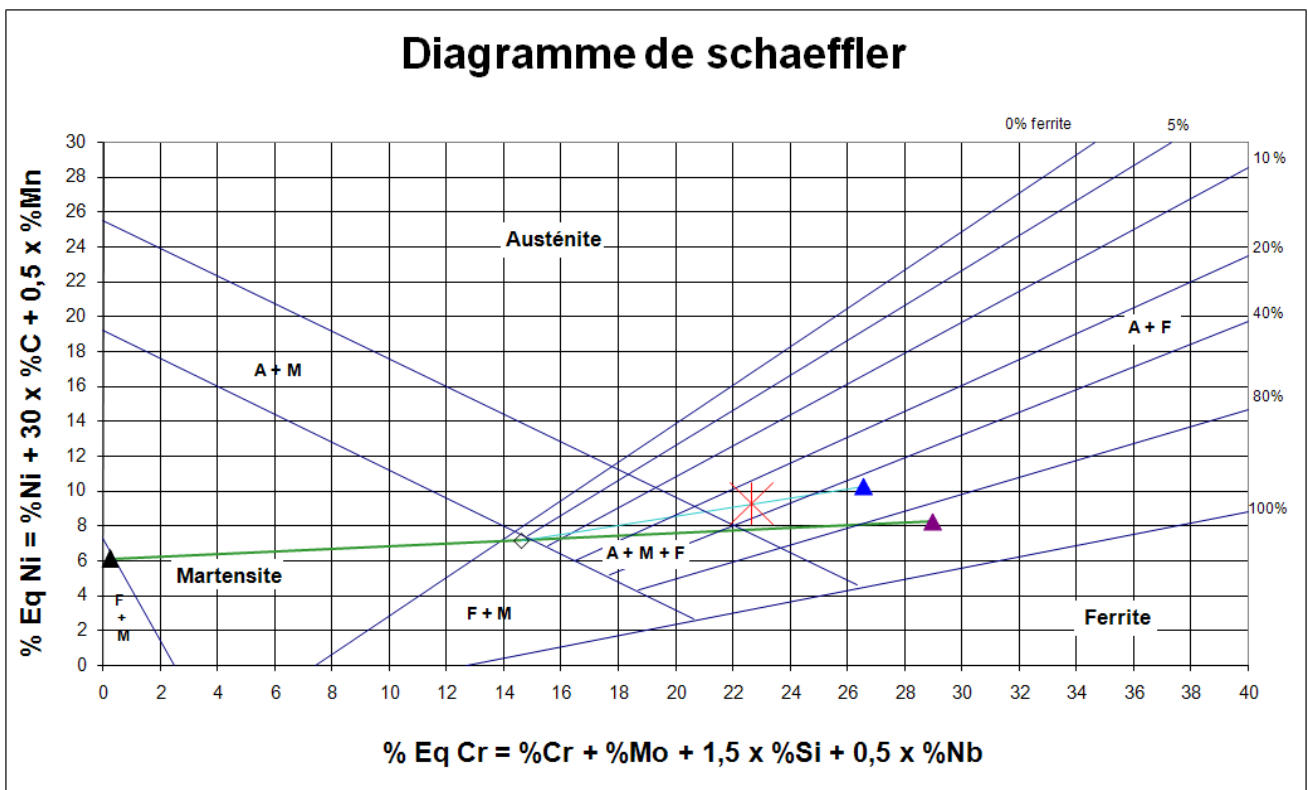


Figure IV-1 : Position du point figuratif sur le diagramme.

A partir des coordonnées du point figuratif du point JS le taux de ferrite est déduit par la formule de séférian

$$\% \text{ ferrite} = 3 (\text{Cr eq} - 0,93 \text{ Ni eq} - 6,7) [36].$$

On obtient : $\% \text{ ferrite global} = 22,06. \%$

IV – 2 – PAR LE LOGICIEL DE TRAITEMENT D’IMAGE (IMAGE J)

Après traitement du cliché fournit on obtient



Figure IV-2: Image traité.

La phase ferritique est colorée en noir et la phase austénitique est colorée en blanc. Le traitement de ces images donne le résultat suivant :

Tableau IV-1 : Taux de ferrite.

Face	1	2	3	4	5
% ferrite	23,386 %	27,936 %	21,089 %	23,517 %	27,564 %

Face	6	7
% ferrite	22,471 %	24,535 %

$$\% \text{ ferrite (moy)} = 25,071 \%$$

IV – bis – INTERPRETATION

La valeur du taux de ferrite obtenue montre bien qu'on est dans l'intervalle où les risques métallurgiques sont quasi nuls donc la structure de la zone fondue (austéno-ferritique "d'après le diagramme de schaeffler") est saine.

Ce qui veut dire que le métal d'apport utilisé à savoir (ER2209 "de structure duplex") est approprié pour lier ces deux métaux d'après le diagramme de schaeffler.

V – RESULTAS ET INTERPRETATIONS DES ESSAIS MECANQUES

V – 1 – ESSAI DE RESILIENCE

Les résultats sont présentés sous la forme d'un tableau comme suit :

Tableau V-1 : Résultats des essais de résilience pour la zone fondue des éprouvettes.

Température (°C)	-10	-20	-50	-60	-65	-70
Résilience (J/cm²)	202,5	191,67	163,67	164,5823	132,94	157,5

Température (°C)	-100	-150	-160	-178
Résilience (J/cm²)	200,87	62,71	69,17	28,96

Les valeurs obtenues sont reproduites sur un graphe comme suit :

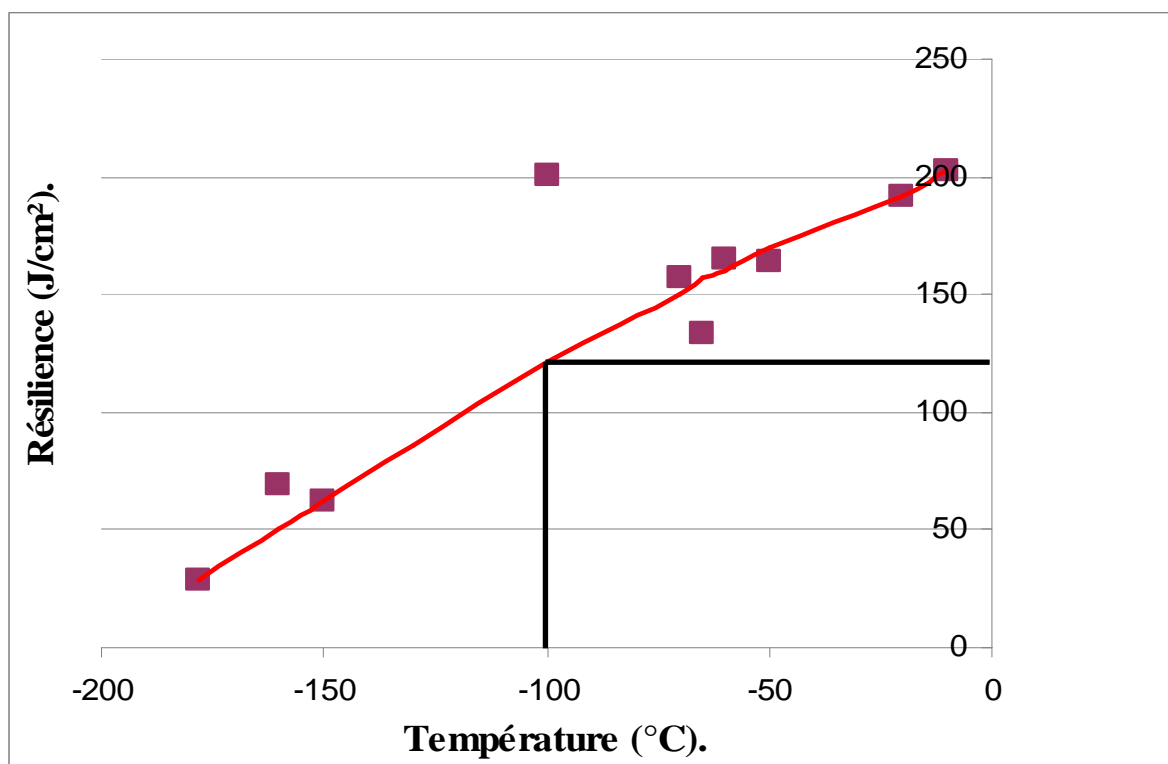


Figure V-1 : Courbe de résilience (zone fondue).

Tableau V-2 : Résultats des essais de résilience pour la zone affectée thermiquement des éprouvettes.

Température (°C)	-10	-20	-50	-60	-62	-63
Résilience (J/cm²)	207,5	197,3	192,29	135,432	121,67	99,79

Température (°C)	-65	-72,5	-80
Résilience (J/cm²)	28,96	52,71	20,7

Les valeurs obtenues sont reproduites sur un graphe comme suit :

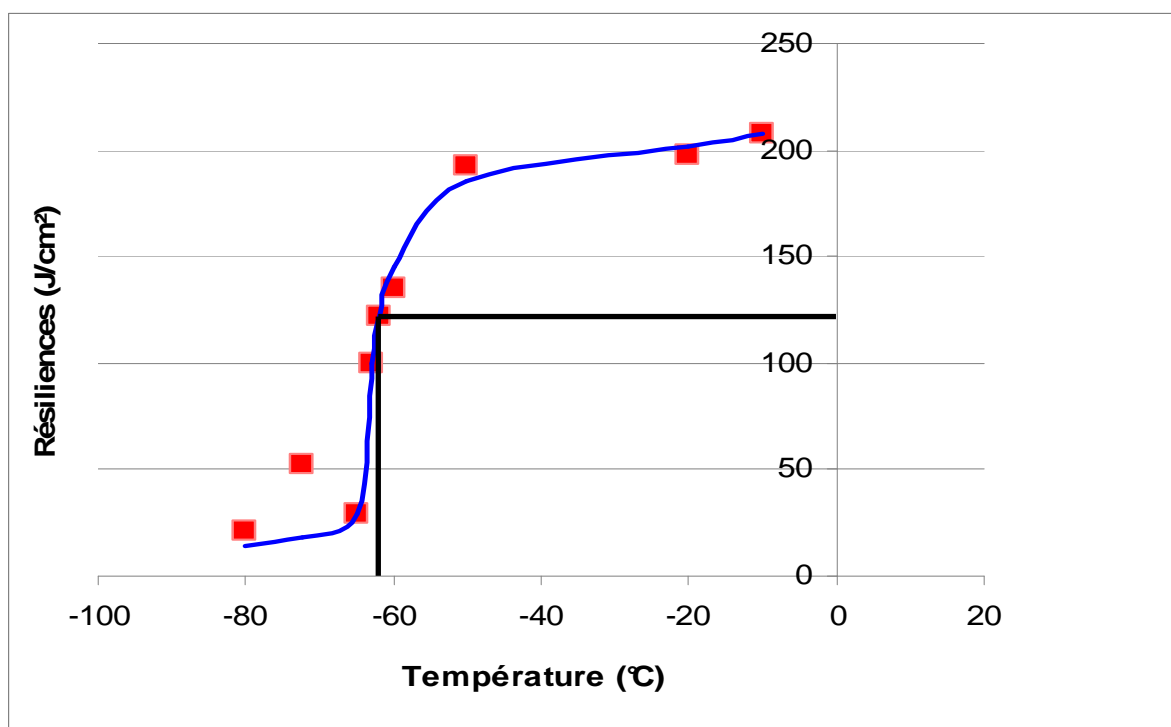


Figure V-2 : Courbe de résilience (zone affecté thermiquement coté acier au carbone).

V – 1 – bis – INTERPRETATION

Tout d’abord on constate que plus la température de l’essai est basse et plus l’énergie de rupture est faible (l’éprouvette résiste moins aux chocs), cela est due à la réduction du volume des mailles cristallines qui provoque la réduction du domaine plastique d’où la rupture est favorisée.

D’après la courbe la température de transition de la zone fondue est de (-100,00°C) ce qui nous amène à dire que le cordon a un bon comportement aux basses températures.

Concernant la zone affectée thermiquement la température de transition est de l’ordre de -63,53 °C Ce qui est un bon résultat comparé à la température de transition théorique du métal de base qui est de ‘’- 45 °C’’.

- On en déduit qu’en plus de la zone fondue la zone affectée thermiquement coté acier au carbone présentent une bonne ductilité

V – 2 – ESSAI DE DURETE

🚧 Micro dureté de la première passe :

Les valeurs de micro dureté sont portées sur un tableau comme suit :

Tableau V-3 : Valeurs de la micro dureté de la première passe.

Position	- 10	- 8	- 6	- 4	- 2,5	- 2,35	- 2
La dureté (Hv0,2)	260	373,8	270,9	335,5	278,4	282,6	316,2

Position	0	1	2	2,27	2,47	4	5,5
La dureté (Hv0,2)	311,6	325,6	325,6	313,2	307,1	312,3	312,2

Position	7	8,5	10,5	12,85	15
La dureté (Hv0,2)	294,3	250,2	262,25	224,45	213,2

Les valeurs représentées dans le tableau sont reproduites sur un graphe comme suit :

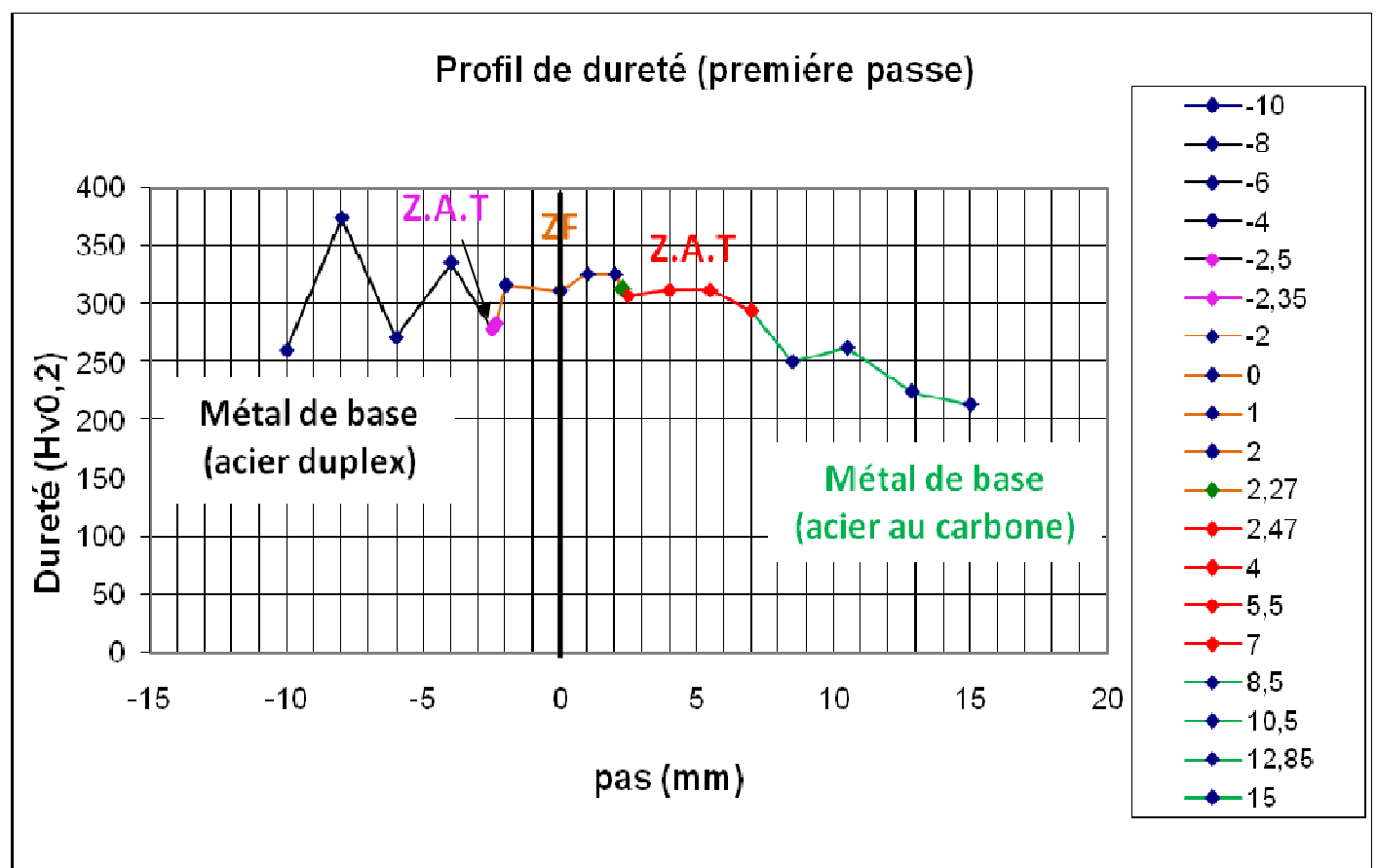


Figure V-3 : Profil de la Micro dureté de la première passe.

📍 Micro dureté de la deuxième passe

Les valeurs de micro dureté sont représentées sous forme de tableau comme suit :

Tableau V-4 : Valeurs de la micro dureté de la deuxième passe.

Position	- 9	- 7	- 5	- 3,64	- 3,25	- 3	- 2
La dureté (Hv0,2)	247	419,1	362,2	196	279,6	298,6	320,8

Position	0	2	3,5	3,96	4,17	6	8
La dureté (Hv0,2)	356,6	340,6	345,6	362,2	282,6	279,5	285,3

Position	10	11,5	13	15
La dureté (Hv0,2)	267,5	247	231,8	183,2

Les valeurs représentées dans le tableau sont reproduites sur un graphe comme suit :

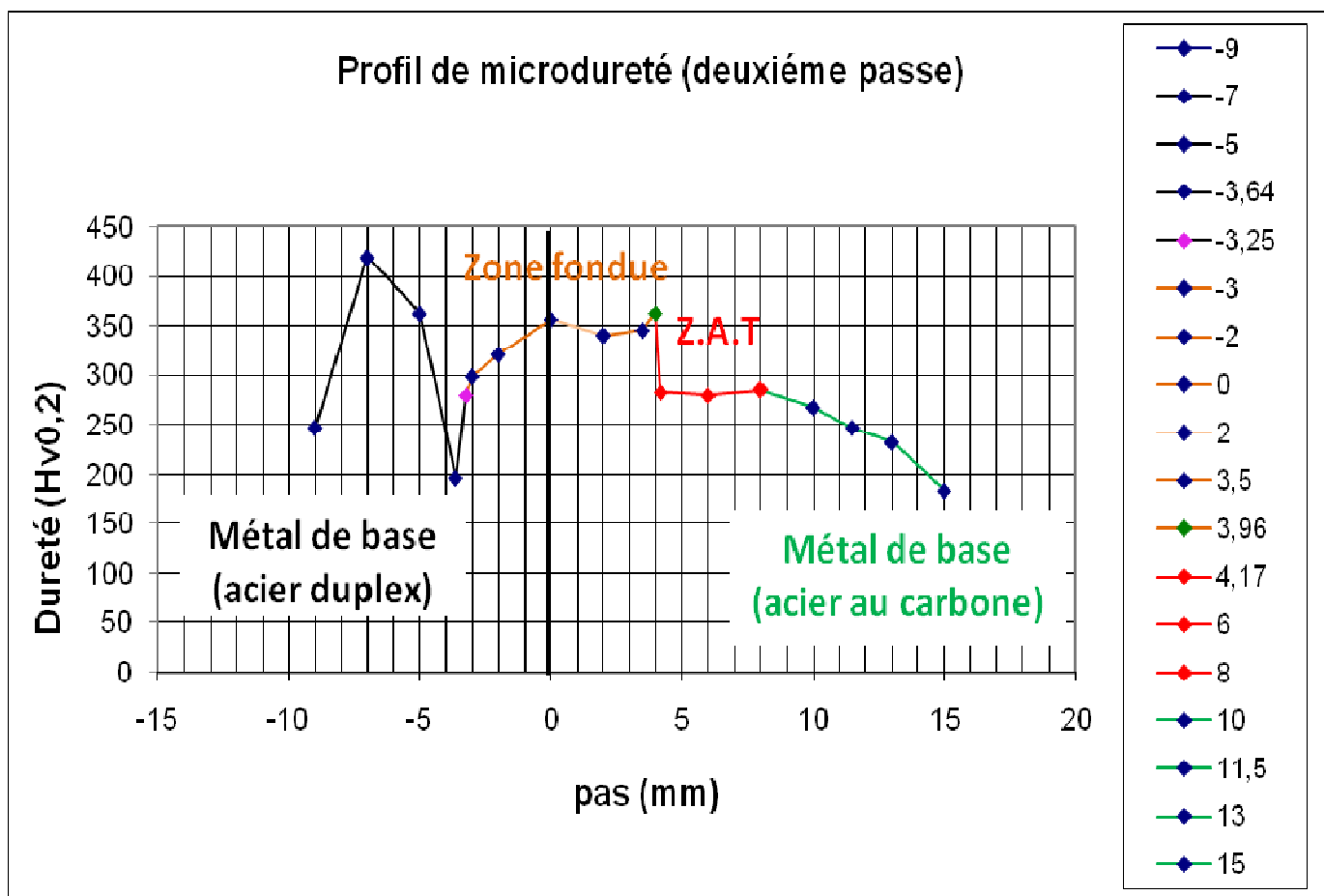


Figure V-4: Profil de la Micro dureté de la deuxième passe.

Micro dureté de la troisième passe

Les valeurs de micro dureté sont représentées sous forme de tableau comme suit :

Tableau V-5 : Valeurs de la micro dureté de la troisième passe.

Position	- 13,31	- 11,31	- 9,31	- 7,31	- 6,88	- 6,71	- 6,55
La dureté (Hv0,2)	227,5	379,8	354,4	385,9	335,5	- 330,5	385,9

Position	- 6,5	- 6,3	- 6	- 4	- 2	0	2
La dureté (Hv0,2)	330,5	311,6	333,5	286,2	351,1	356,6	330,5

Position	4	6	6,15	6,375	6,74	6,95	7,5
La dureté (Hv0,2)	330,5	335,5	412,1	339,6	231,8	229,6	300,3

Position	8,5	10	11	13	14	14
La dureté (HV0,2)	298	231,8	231,8	226,1	157,7	157,7

Les valeurs représentées dans le tableau sont reproduites sur un graphe comme suit :

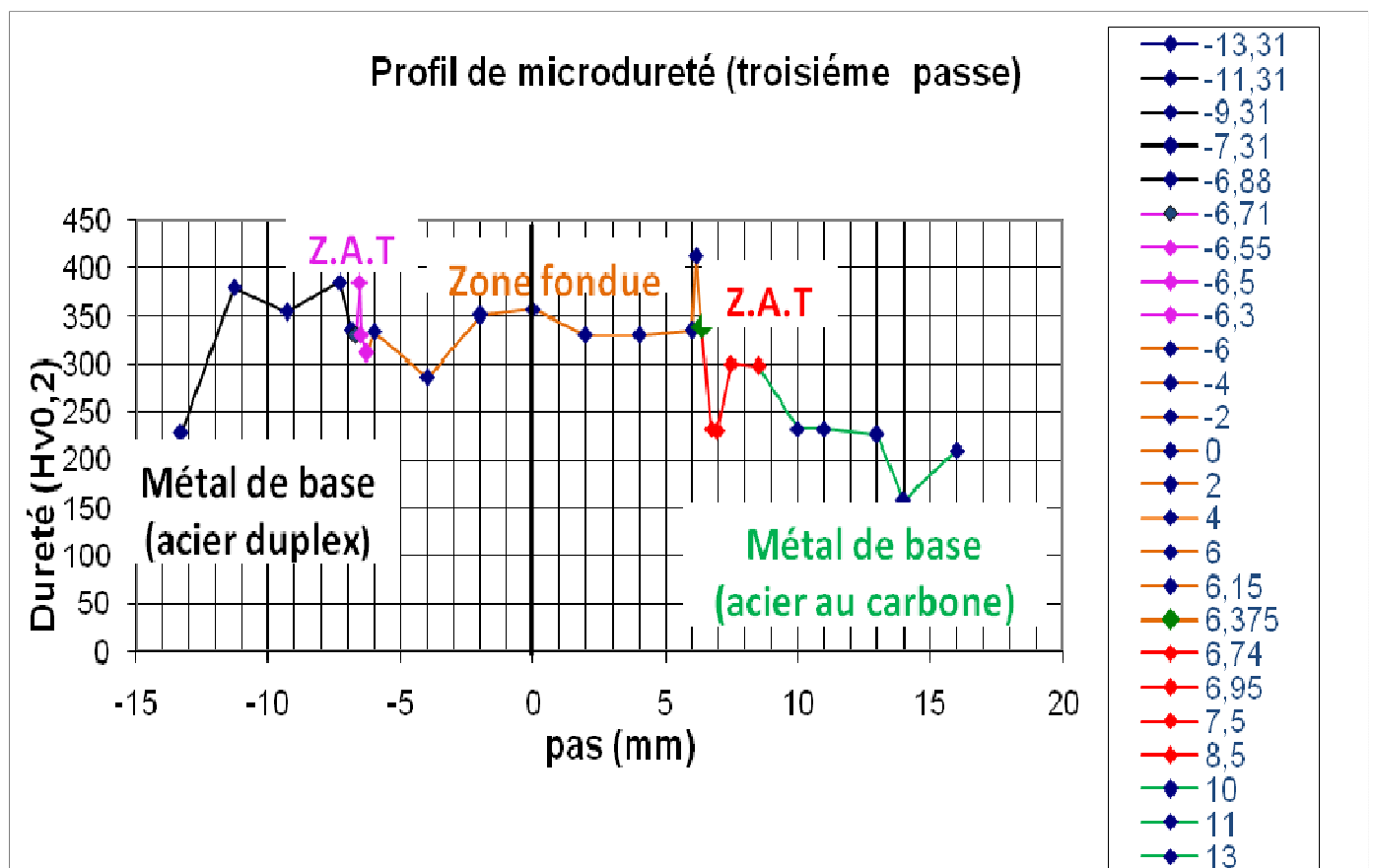


Figure V-5 : Profil de la Micro dureté de la troisième passe.

V – 2 – bis – INTERPRETATION

- Micro dureté de la première passe

On constate une légère diminution de dureté des phases de la zone fondue comparé à celles du métal de base duplex, cela est due d'un coté à la légère différence des propriétés entre le métal de base et le métal d'apport induite à cause de la différence de la composition chimique (25% Cr, 7%Ni , pour le métal de base ; et 22,5%Cr, 8,5%Ni pour le métal d'apport), et d'un autre coté à cause du refroidissement lent provoqué par l'effet thermique des passes ultérieures (ce qui favorise la formation de l'austénite qui est réputée être une phase ductile).

Le graphe montre que la dureté de l'acier au carbone est inférieure à celles du métal d'apport et du métal de base duplex (ce qui a été quantifié théoriquement avant l'exécution de la jonction).

- Micro dureté de la deuxième passe

Le même constat que la première passe sauf que le taux d'austénite est moins élevé pour ce cas là. Ce qui explique la légère augmentation de la dureté des phases de la zone fondue par rapport au cas précédent.

Signalons que la dureté des deux métaux de base ne change pas.

- Micro dureté de la troisième passe

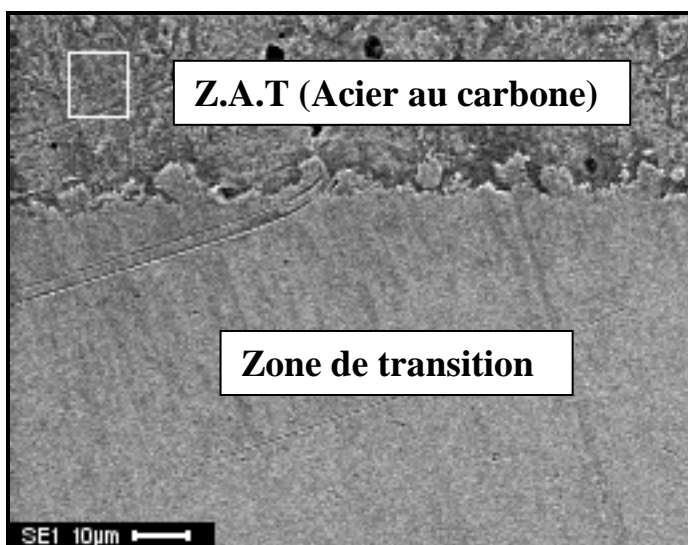
La dureté des phases du métal fondu augmente par rapport aux passes précédentes et cela est due au fait que le refroidissement est plus rapide que les passes précédentes (à l'air libre) donc l'austénite n'a pas suffisamment de temps pour se constituer en des proportions élevées ce qui fait que la ferrite est prédominante d'où les conséquences sur la dureté.

On note aussi une diminution de la dureté de la zone affectée thermiquement coté acier au carbone; ceci est expliqué par le grossissement des grains provoqué par les conditions de soudage à savoir que cette zone a été portée à des températures supérieures à Ac3.

VI – RESULTAS ET INTERPRETATIONS DE L'EXAMEN AU MEB.

VI – 1 – 1 – Observation de la zone de transition

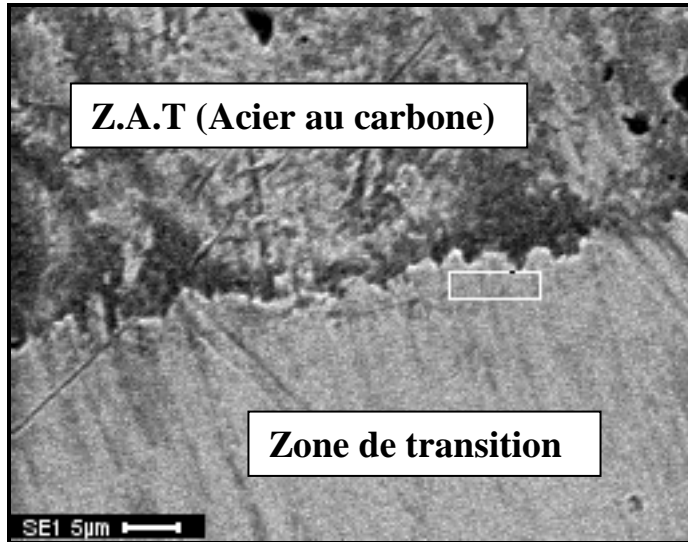
Tableau VI – 1: Composition chimique "coté ZAT"



<i>Elément</i>	<i>Wt%</i>
<i>CK</i>	13.36
<i>SiK</i>	00.46
<i>MnK</i>	01.85
<i>FeK</i>	84.34

Figure VI-1: Transition (Acier au carbone – zone fondue).

Tableau VI – 2: Composition chimique "coté zone de transition"

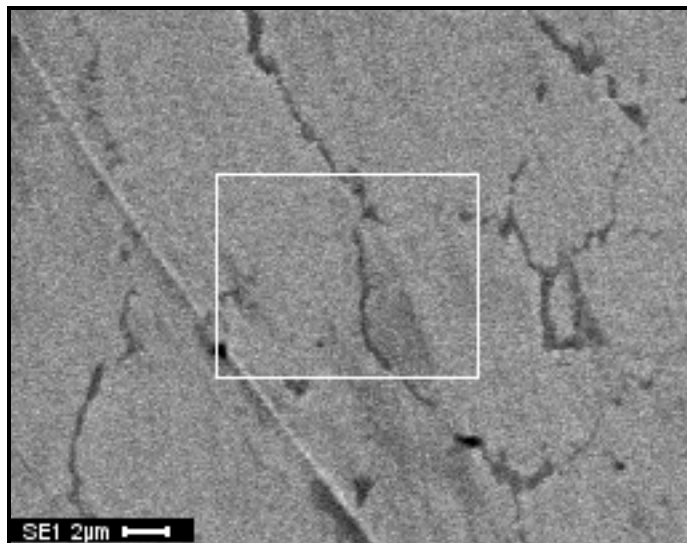


<i>Elément</i>	<i>Wt%</i>
<i>CK</i>	10.03
<i>SiK</i>	00.40
<i>SK</i>	00.34
<i>CrK</i>	03.00
<i>FeK</i>	86.24

Figure VI-2: Transition (Acier au carbone – zone fondue)''2''.

VI – 1 – 2 – Observation de la zone fondue

Tableau VI – 3: Composition chimique "zone fondue".



<i>Elément</i>	<i>Wt%</i>
<i>CK</i>	07.03
<i>MgK</i>	00.11
<i>AlK</i>	00.18
<i>SiK</i>	00.60
<i>SK</i>	01.29
<i>CrK</i>	16.58
<i>MnK</i>	01.08
<i>FeK</i>	67.70
<i>NiK</i>	05.44

Figure VI-3: Zone fondue.

Remarque : Les teneurs en carbone données par l'analyse ponctuelle sont erronées car l'appareil en question ne permet pas de quantifier précisément le taux de carbone, ces valeurs vont être utilisées à titre de différenciation

VI – 1 – bis – Interprétation

- Les figures (VI-1 et VI-2) montrent deux zones différentes : la zone affectée thermiquement Coté acier au carbone ''en noir'' et la zone de transition en blanc. La structure de cette dernière n'a pas été révélée par cet examen.

La zone affectée thermiquement est riche en carbone ce qui était prévisible vu la nuance initiale de l'acier ; par contre la zone de transition l'est moins ; concernant le chrome la zone affectée thermiquement est dépourvue de cet élément contrairement à la zone de transition qui elle contient une proportion non négligeable.

- La figure (VI-3) met en évidence la zone fondue avec une structure dendritique. Cette zone comme on peut le voir est riche en chrome surtout ainsi qu'en nickel et très pauvre en carbone comparé au deux zone précédentes.

Les résultats ci-dessus démontrent qu'il a bel et bien eu lieu une dilution du métal de base (Acier au carbone) dans la zone fondue, ce qui nous permet d'avancer que la continuité de l'assemblage est assuré.

Maintenant la présence du carbone et du chrome cote à cote provoquent' elle une formation de précipités nocifs ou pas ??? Une investigation plus approfondie est requise.

VI – 2 – Observation des faciès de rupture

VI – 2 – 1 – Au niveau de la zone fondue

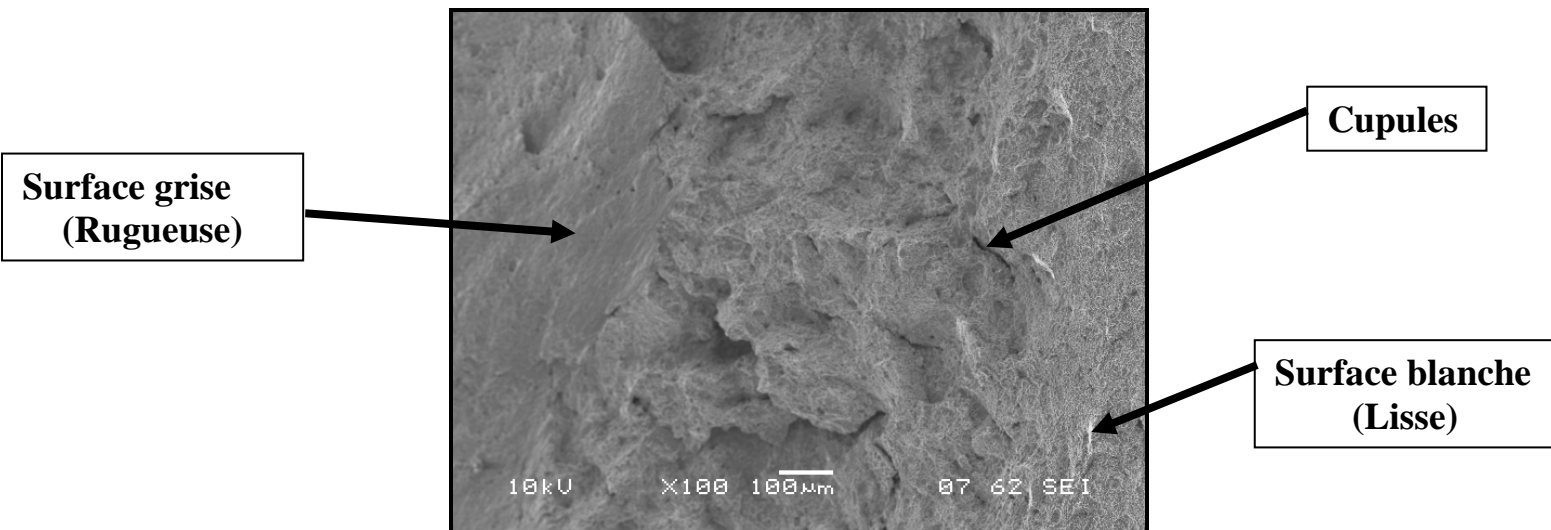


Figure VI-4: Essai réalisé à -10 °C.

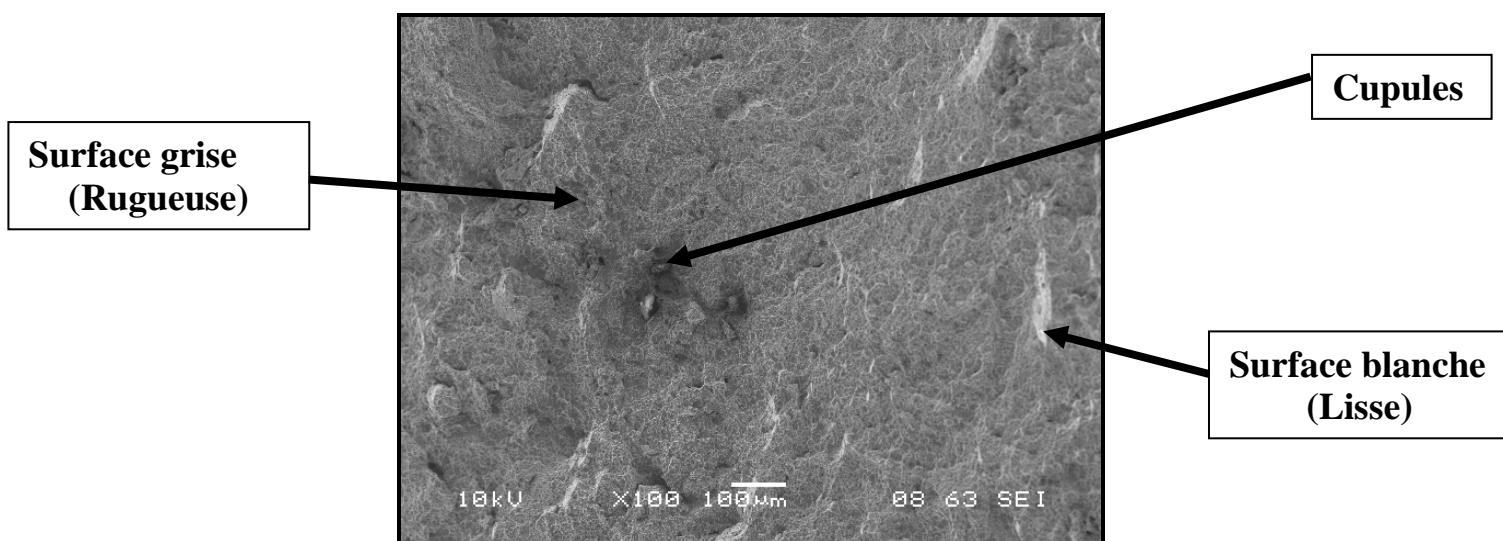


Figure VI-5: Essai réalisé à -65 °C.

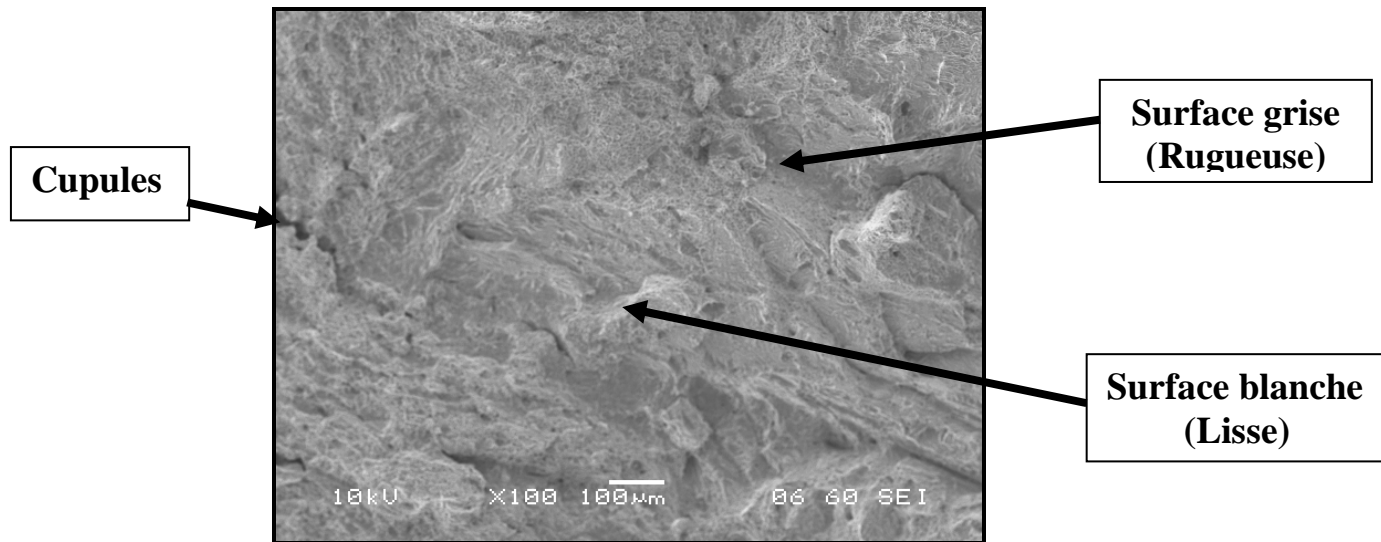


Figure VI-6: Essai réalisé à -150 °C.

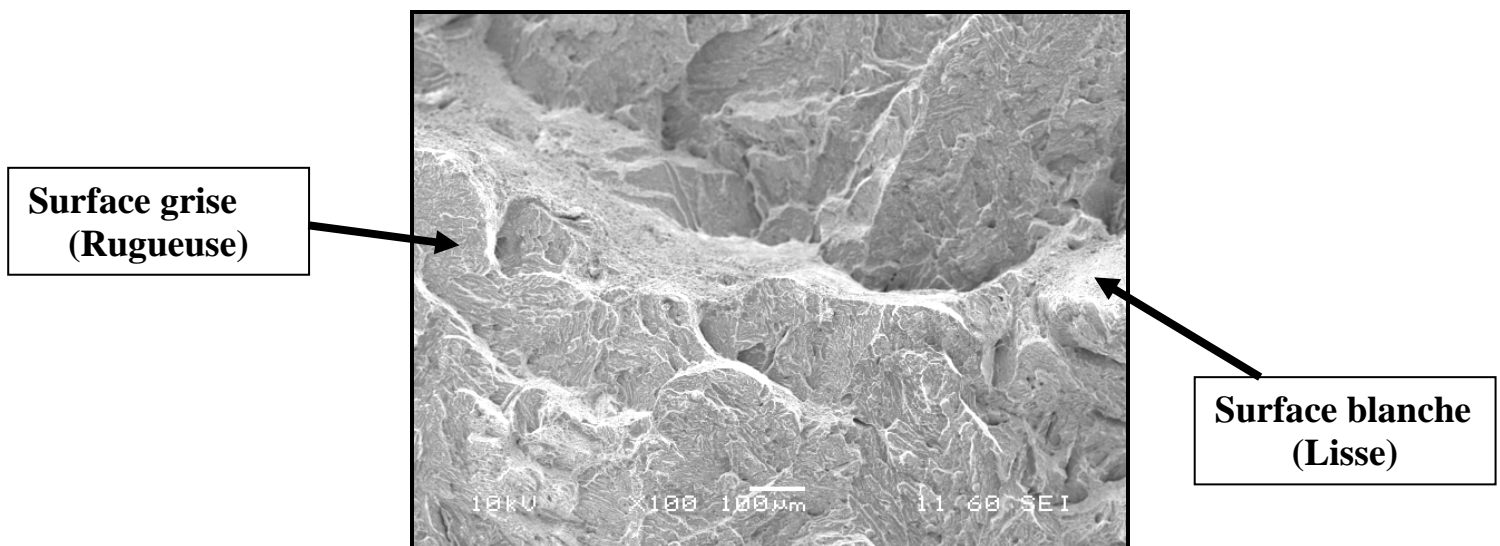


Figure VI-7: Essai réalisé à -178 °C.

VI – 2 – 1 – bis – Interprétation

Les figures ci-dessus montrent les différents types de ruptures en plusieurs températures dont les essais ont été effectués.

Pratiquement dans toutes les figures on distingue deux types de surfaces :

- Surfaces en blanc qui correspondent aux sommets des reliefs.
- Surfaces en gris qui symbolisent la zone du début de la rupture.

On peut également observer sur quelques figures des taches noires plus ou moins étendues, qui démontrent la présence de cupules qui sont synonyme d'arrachement de matière. Et à travers la densité de ces derniers dans les figures on peut trancher sur le type de rupture.

- Figure VI - 4 : la surface rugueuse en gris constitue la grande majorité de l'image, on apprécie également des cupules qui symbolisent un arrachement de matière. La rupture est considérée comme étant ductile.
- Figure VI - 5 : on apprécie la présence de cupules mais en moindre proportion, on constate d'autre part une augmentation de la fraction de la surface blanche, cela indique l'amorçage de la rupture fragile.
- Figure VI - 6 : la fraction de la surface blanche augmente considérablement et on constate une quasi inexistence de cupules ce qui marque fragilité de la rupture.
- Figure VI - 7 : la figure montre clairement que le matériau a subi une rupture fragile vu l'absence de cupules.

** A travers ces résultats on peut conforter la température de transition obtenue par l'essai de résilience à savoir qu'elle est comprise dans l'intervalle]-65°C – -150°C [.

VI - 2 - 2 – Au niveau de la zone affectée thermiquement (coté acier au carbone)

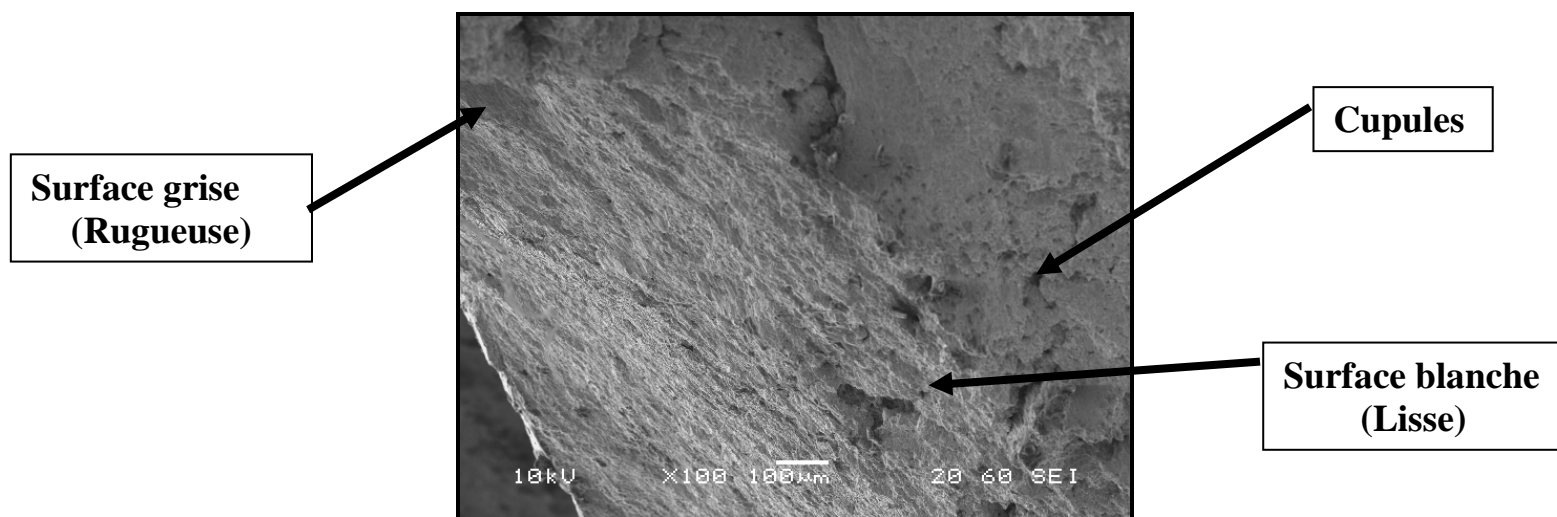


Figure VI-8: Essai réalisé à -10 °C.

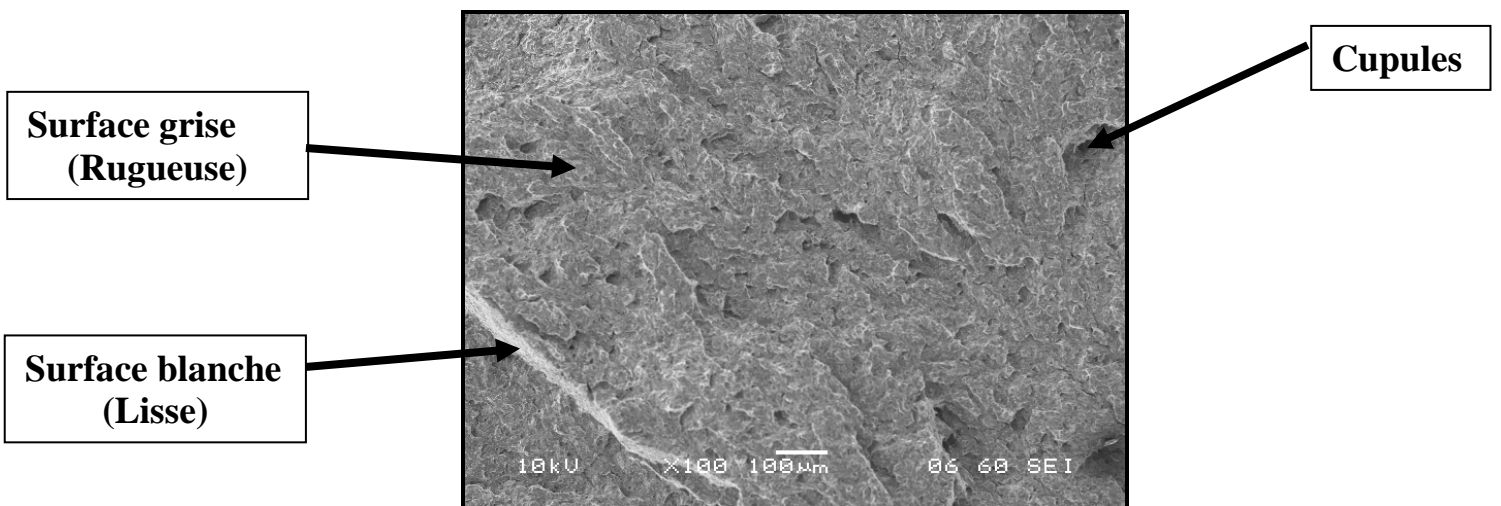


Figure VI-9: Essai réalisé à -60 °C.

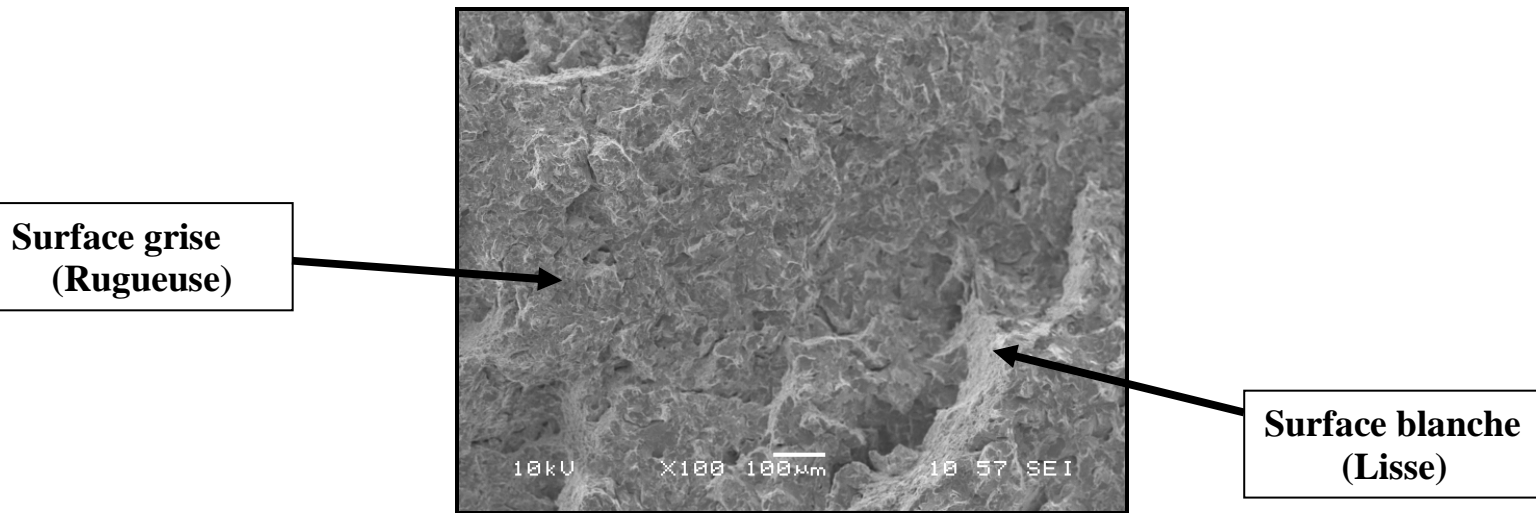


Figure VI-10: Essai réalisé à -65 °C.

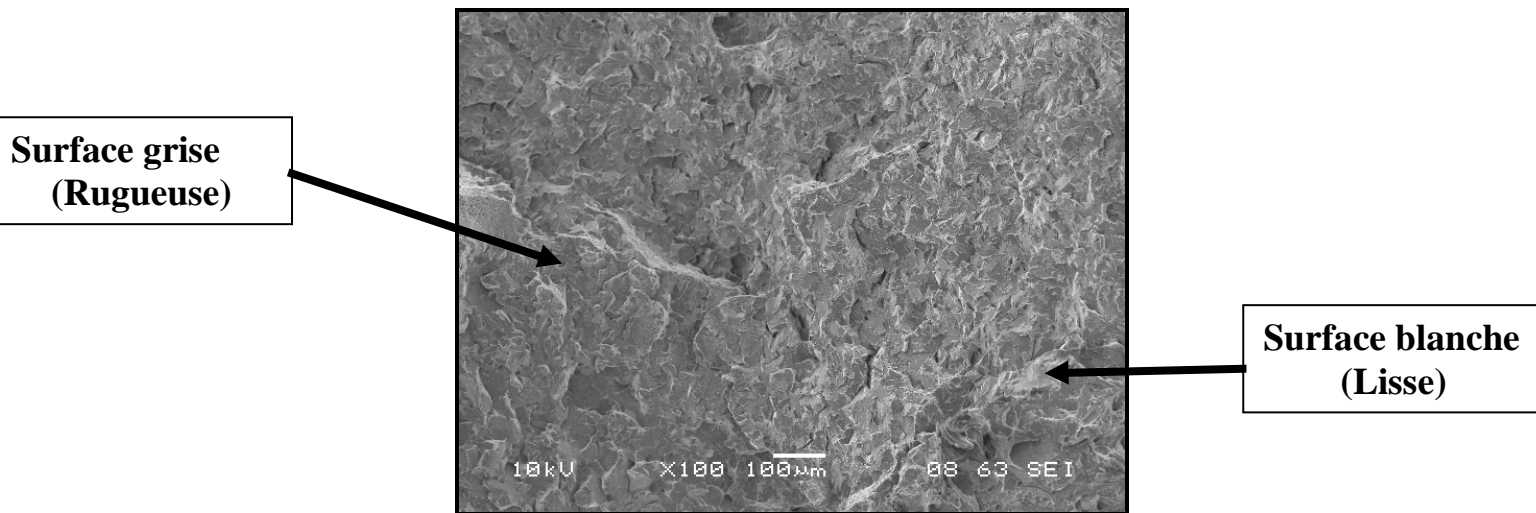


Figure VI-11: Essai réalisé à -80 °C.

VI - 2 - 2 - bis – Interprétation

Le constat est presque similaire à celui des figures de la zone fondue mis à part les températures d'essais qui varient.

- Figure VI - 8 : La rupture est ductile vu la présence marquée des cupules.
- Figure VI - 9 : Cette figure montre le début d'apparition de la rupture fragile à cause de la réduction considérable de la densité des cupules et l'émergence de la surface blanche au détriment de la surface rugueuse.
- Figure VI - 10 : La densité de cupules est très basse et la surface blanche occupe la majeure partie de l'image ce qui signifie que la rupture est fragile.
- Figure VI - 11 : La rupture est complètement fragile vu la densité élevée de la surface blanche et l'absence de cupules.

- ✓ Les fasciées de rupture confortent les résultats des essais de résilience puisqu'on assiste pour les températures choisies : -10°C , -65°C , -150°C , -178°C , pour la zone fondue et (-10°C , -60°C , -65°C , -80°C , pour la zone affectée thermiquement coté acier au carbone), à une dualité rupture ductile – rupture fragile indicateur de la température de transition.

Le manque de moyens de caractérisation nous laisse dire qu'une interprétation plus approfondie nécessiterait des investigations plus poussées.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

➤ Le travail réalisé nous a fourni les caractéristiques essentielles des soudures entre Acier Inoxydable biphasé et aciers au (carbone-manganèse). On note que le choix du métal d'apport à savoir Le fil "ER 2209" plus les conditions de soudage choisis sont adéquats pour ce type d'assemblage et ceci a été conforté par les essais mécaniques, et l'aspect microstructurale jusqu'à un certain degré.

- L'expertise métallographique a démontré qu'une hétérogénéité subsiste n'affectant en rien la Qualité du joint, ainsi une soudure sans zone affectée thermiquement (très convoité) a été obtenue du moins du coté duplex ce que montre clairement le cliché micrographique de la ZAT coté duplex.
- notons aussi que du coté acier au carbone l'épaisseur de la Z.A.T est très réduite par rapport à Celle qu'on aurait obtenue par le procédé de soudage à la baguette (SMAW).
- La structure brute de soudage est adéquate et saine et ceci a été clairement démontré par le Diagramme de schaeffler à travers le positionnement du point figuratif du joint soudé et du taux de ferrite correspondant puisque ce point se situe dans la zone dépourvue de risques métallurgiques.
- La zone fondue et la zone affectée thermiquement présentent un très bon comportement aux Basses températures ce qui est clairement mis en évidence par l'essai de résilience à travers les températures de transition à titre que cette température est de $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour la zone fondue et de $-63,53\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour la zone affectée thermiquement. Ceci montre clairement que le cordon de soudure en général présente un bon comportement aux basses températures ainsi qu'une ductilité très appréciable.
- Le cordon présente également une dureté appréciable.

**L'examen au Microscope Electronique à Balayage a démontré que la dilution de l'acier au carbone dans le métal fondu a bien eu lieu, d'où la continuité de l'assemblage. Reste que la zone de transition (Zone fondue – Acier au carbone) n'a pu être révélé à ce stade d'investigation.

Perspectives :

Il est évident que dans le cadre de ce travail nous nous sommes attaché à démontrer exclusivement la faisabilité de l'assemblage en question; qui n'a pas fait l'objet de vastes publications.

Ce travail pourra être poursuivi aux fins de traiter d'autres aspects liés à la résistance dans le temps de l'assemblage.

- Comme les phénomènes de : La fatigue thermique, Le vieillissement,

Et la corrosion ; notamment.

Références bibliographiques

Références bibliographiques.

[1] **J. Baralis, G. Maeder**

Précis de Métallurgie, (élaboration, structures- propriétés et normalisation), 5^{ème} édition, Nathan, 1990.

[2] **P.J. Cunat**

Aciers inoxydables : Critères de choix et structure, Techniques de l'ingénieur, M 4540, 2000.

[3] **B. Thomas, J.H.Schmitt.**

Durcissement des Aciers : Role de la microstructure, Techniques de l'ingénieur, m 4341, 2002.

[4] **C.W. kovach**

High performance stainless steel, Technical marketing resources, Inc, Pittsburg, PA, USA.

[5] **J.P. Bailon, J.M. Dorlot**

Des matériaux, presse internationale polytechnique troisième édition, (2001).

[6] Dursteel Mn, Aciers au manganèse, Produr, Maitrise des matériaux anti-usure.

[7] **M. Colombie et coll**

Matériaux métalliques, DUNOD Paris, 2000.

[8] **Guy David,**

Les Aciers Inoxydables, 1990.

[9] **R. BLONDEAU**

Procédés et applications industrielles du soudage, Paris, hermès science publications (2001).

[10] **S. zohir**

Influence de la vitesse de refroidissement sur les transformations structurales d'un acier inoxydable austénitique (304L) traité à hautes températures, ENSP (2006).

[11] **G. Murry**

Aciers, Généralités, Techniques de l'ingénieur, M 300, 2000.

[12] **R. Cazes**

Procédés de soudage : principes généraux et critères de choix, Technique de l'ingénieur, B 7700.

[13] **A. OULDAMER**

Soudage, Séminaire. E.N.P (2004).

[14] **R. Le gouic**

Précis de soudage brassage et techniques connexes, Eyroles, (1978).

[15] **C. Philip, SAF (Air liquid welding)**

CD-ROM d'enseignement sur la soudure.

[16] **R. Cazes**

Soudage à l'arc, Technique de l'ingénieur, B 7730 (1995).

[17] **Symap**

Guide soudage/chapitre_1 (Les matériels de soudage et de coupage thermique les plus courants)

[18] www.soudeur.com

[19] H. Granjon

Bases métallurgiques du soudage, Eyroles, Paris (1977).

[20] C. Bonnet

Le soudage, Métallurgie et produit, Air liquide, CTAS, 2001.

[21] R. Varisellaz

Soudage : éléments de conception et de réalisation, Dunod, (1982).

[22] IRSID

Courbes dureté-paramètre de refroidissement en condition de soudage, recueil établi en (1977).

[23] D. Sférian

Métallurgie de la soudure, dunod, paris, (1965).

[24] R. Castro, J.J. Cadenet

Métallurgie du soudage des aciers inoxydables et résistants à chaud, Dunod, Paris (1968).

[25] R.MESLER

Soudure autogène ; Editions EYROLLES (1980).

[26] fr.wikipedia.org. (Rubrique : projets et réalisations)

[27] Méthodes spectrométriques d'analyse et de caractérisation

Axe génie des procédés, centre SPIN, Ecole des mines St Etienne.

ANNEXES

ANNEXE 1

Présentation de l'E.N.G.T.P

Dénomination : Entreprise Nationale de Grands Travaux Pétroliers

Logo : E.N.G.T.P.

Statut : Société par actions

Régime juridique : Entreprise publique économique

Filiale du groupe : SONATRACH

Siège social : zone industrielle BP 09 - Reghaia - Alger



Siège de la direction générale

GTP est une société, filiale du groupe SONATRACH, qui offre des services de construction d'ouvrages destinés à la production, transformation et distribution des Hydrocarbures, la pose de canalisation à grande distance, l'engineering, le procurement, la maintenance industrielle, le soudage et le contrôle de soudage. Pour réaliser ses missions, GTP s'appuie sur un groupe à l'expérience nationale et internationale reconnue, le Groupe SONATRACH.

DOMAINES D'INTERVENTIONS

GTP intervient dans les secteurs suivants :

- Hydrocarbures.
- Chimie et pétrochimie.
- Energie.
- Matériaux de construction.
- Hydraulique.



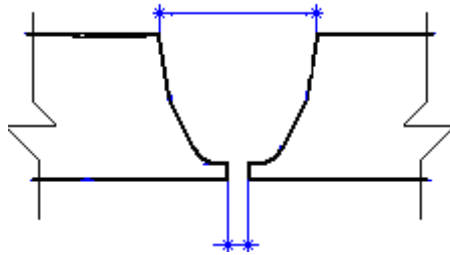
LES ACTIVITES DE G.T.P

GTP effectue toute sorte d'activités : **Engineering, Génie civil et bâtiments, Montage industriel, Préfabrication, Canalisation, Soudage, Contrôle et essais, Traitement thermique, maintenance industrielle.**

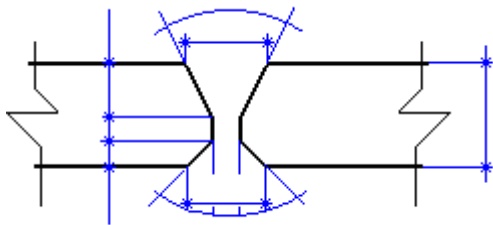
ANNEXE 2

Les différents types de chanfreins

En soudure électrique à l'arc des éléments ou des tôles de fortes épaisseurs, on peut adopter, dans certains cas, des chanfreins profonds en U ou "en calice", qui permettent, d'utiliser une quantité moindre d'électrodes.



Chanfrein en "U".

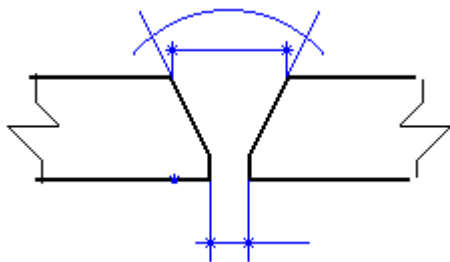


Chanfrein en "X" pour les tôles épaisses.



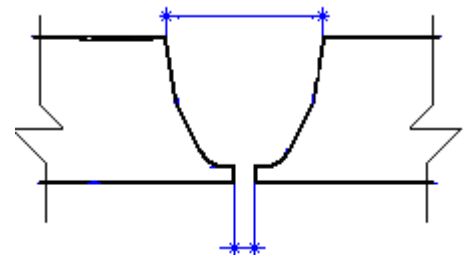
Chanfrein en "X" pour les fers massifs.

Tubes à épaisseur ≤ 20 mm.



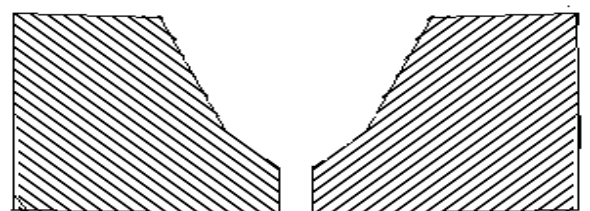
Chanfreins en "V".

Tubes à épaisseur > 20 mm.



Chanfrein en "U".

Ou bien :

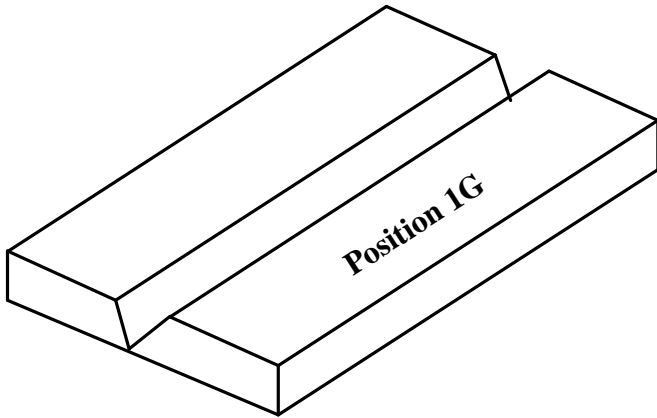


Chanfrein en "V" à double pente.

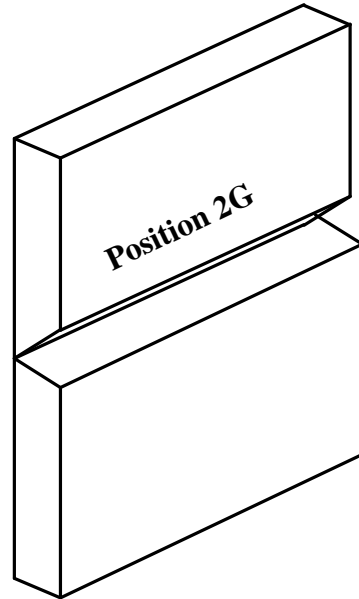
ANNEXE 3

3.4- LES DIFFERENTES POSITIONS DE SOUDAGE

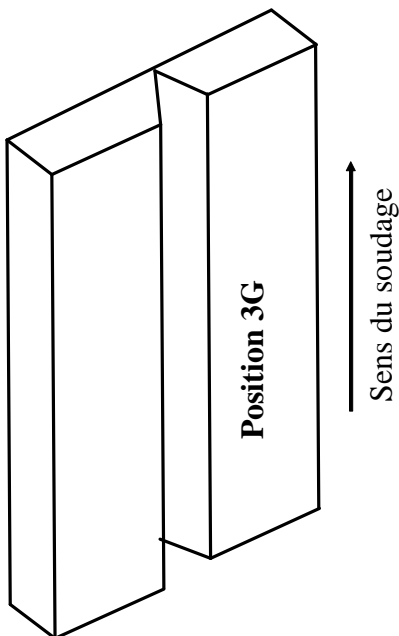
I – joints bout à bout avec chanfrein



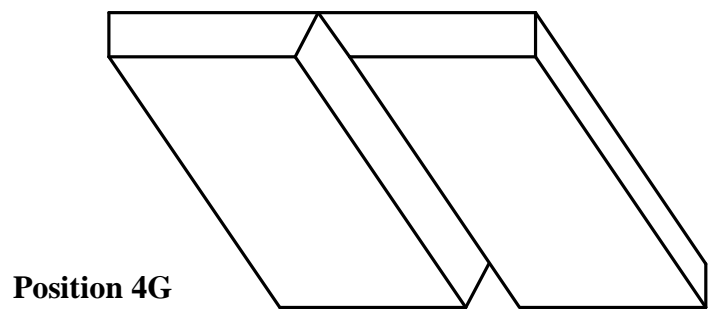
A plat



Corniche



Verticale montante



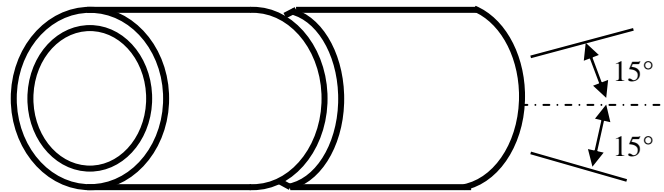
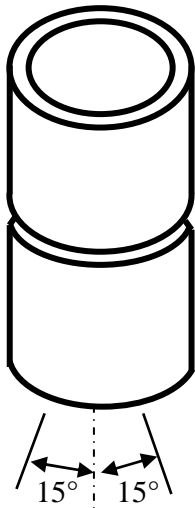
Plafond

II – Pour les tubes

Position numéro 1

Position numéro 2

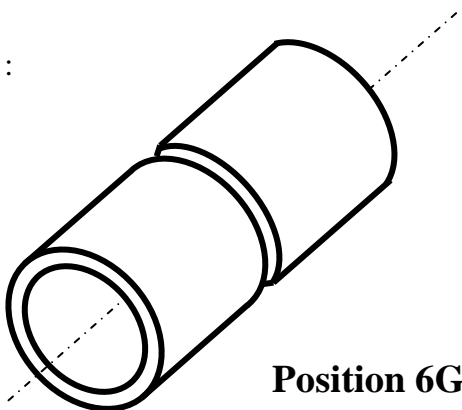
Position 2G



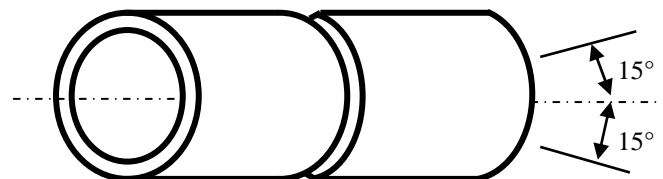
Position 5G

Position numéro 3

Position numéro 4



Position 6G



Position 1G

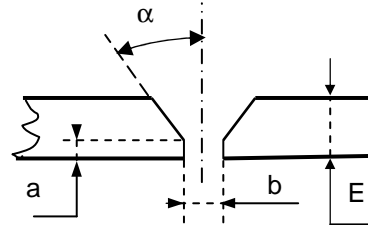
Le tuyau tourne sur un positionneur

**D.TEC****Welding Service**
Service Soudage**Welding Procedure Specification**

spécification de soudage

Sheet: 1/3
Feuille :**Nbr:**
N°:**Rév:****Date:**
Date :**Job Nbr:**
Affaire N°:**Project:**
Projet:**PFE "Soudage hétérogène (A790[Duplex]- A333[Acier au carbone]"****TITLE:**
Titre:**PROCEDURE DE SOUDAGE HETEROGENE****Welding Process(es)**
Procédé(s) de soudage**GTAW****Joint preparation:**

Conception du joint:

**Base Metal**

Métal de base

Type Nuance	Grade Grade	Carb. équiv.	Φ (")		Th / Ép.(mm)		P/Gr N°
			Min.	Max.	Min.	Max.	
A 333	Gr 6		6"		7.11		1.1
A790	S32550		6"		7.11		10H.1

Other :
Autres:**Joint design:**

Type de chanfrein:

V Angle $\alpha=37,5^{\circ}\pm 2,5^{\circ}$
Angle:**Strink:**

Talon:

a= 1,6 +/- 0,8 mm

Gap:

Ecartement

b= 3,2 +/- 0,8 mm

Backing material:

Nature supp. Envers

Form:

Forme:

Dimensions

Dimensions:

Preparation: Ends to be welded are prepared from origin or by cutting or beveling and grinding . They are cleaned from all excess of oxide, rust, grease or paint.Passes are only schematized . Exact pass dispositions depend on parameters of welding choose.Préparation: Les bords à souder sont préparés d'origine ou par découpage ou chanfreinage et meulage. Ils sont débarrassés de tout excès d'oxyde, rouille, graisse ou peinture. Les passes sont seulement schématisées. Les dispositions exactes des passes dépendent des paramètres de soudage choisis.**Filler metal:**

Métal d'apport:

(AWS - ASTM / Class)

Layer/Passe.	Root / Pén.	Fill / Bour.	Cap / Fin.	Bac/Rep
Class/Type	ER2209	ER2209	ER2209	
AWS-SFA	5.9 - 06	5.9 - 06	5.9 - 06	
F N°	6	6	6	
A N°	8	8	8	
Φ(mm)	2	2,4	2,4	

Flux : AWS Class**Other :**
Autres:**Other :**

Autres:

Shielding Gas :

Gas de protection:

Comp.

Comp.

Ar 99,99%

Flow Rate:

Débit: (l/min)

10

Backing gas Comp.

Protection envers comp.

Ar 99,99%

Backing Flow Rate:

Débit envers: (l/min)

12

Other :

Autres:

Protection envers jusqu'à la finition

Adjustement :

Fixation:

Method

Mode:

Par champs extérieur ou par pointage

Duration

Durée:

jusqu'à réalisation de 50% de la passe de pénétration



Welding Procedure Specification

Spécification de soudage

Sheet: 2/3
Feuille :

Nbr:
N°

Rév:

Welding Position:

Position de Soudage:

Layers/Passes	Root/Pén.	Fill/Bour.	Cap/Fini.
ASME Position	5G	5G	5G
Rot. Or/ou fix.	Fixe	Fixe	Fixe
Prog./Progrestitution	Up hill/Mont.	Up hill/Mont.	Up hill/Mont.

Rotation direction: N / A
Sens de rotation

Other :
Autres:

PreHeat:

Préchauffage:

Base métal	Wall Thickness /Epaisseur Parois
Metal de base	
All / Toutes	
Root pass Filler métal Diam. (mm) Diam. Métal d'apport passe de péné.	

Method: Propane Torche
Méthode: Torche propane
Inspection Thermochrome Pens
Contrôle : Crayons thermochromes
Other : Pyrometre
Autres: Pyromètre

Electrical characteristics & Welding Technique:

Technique d'exécution du joint et caractéristiques électriques

Layers / Passes	Root / Pénétration	Fill / Bourrage	Cap / Finition	Bac / Rep
Welding Process / Procédé de soudage	GTAW	GTAW	GTAW	
Welding Position / Position de Soudage	5G ↗	5G ↗	5G ↗	
Current & polarity / Courant & Polarité	DC (-)	DC (-)	DC (-)	
Filler métal / Métal d'apport	ER 2209	ER 2209	ER 2209	
Φ Electrode / Electrode (mm)	Tungstène (2)	Tungstène (2,4)	Tungstène (2,4)	
Φ Rod / Fil (mm)	2	2,4	2,4	
Amp. Range / Gamme d'intensités (A)	84	109	109	
Volt. Range / Gamme de tension (V)	10	10	10	
Flux / Flux				
Gas / Gaz	Ar 99,99%	Ar 99,99%	Ar 99,99%	
Flow Rate / Débit (l / min)	10 - 15 L/min	10 - 15 L/min	10 - 15 L/min	

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

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

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

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

Other :
Autres:

Interpasses Cooling Refroidissement entre passes

Between the root end the second passes: Entre
passe de pénétration et 2^{ème} passe:

Température / Température : 150 °C max

Time / Temps 4,5 min

Between other passes: Entre
autres passes:

Température / Température : 150°C

Time / Temps 4,5 min

Interruption Welding permitted at :
Interruption soudure autorisée à partir:

moitié du cordon

Other :
Autres:



Welding Procedure Specification

Spécification de soudage

Sheet: 3/3
Feuille :

Nbr:
N°:

Rév:

Beads Aspect:

Aspect des cordons:

The current of welding and the manner to deposit the metal will insure a complete fusion, without lack of fusion on faces of the bevel or the neighbor zone of the parent metal.

Le courant de soudage et la manière de déposer le métal assureront une fusion complète, sans manque de liaison sur les faces du chanfrein ou la zone voisine du métal de base.

It will have to satisfy to a visual examination conforms to requirement of codes.

Il devra satisfaire à un examen visuel conforme aux exigences du cahier des charges.

Other :

Autres:

Cleaning:

Nettoyage:

After each pass and after removal of the slag, all apparent defect is removed by brushing and/or grinding before the execution of the next pass.

Après chaque passe et après enlèvement du laitier, tout défaut apparent est enlevé par brossage et/ou meulage avant l'exécution de la passe suivante.

Other :

Autres:

Test & results interprétation:

Essais

et interprétation des résultats:

Tests of approval of the procedure and qualification of welders will be realized accordingly to the Code:

Les essais d'homologation de la procédure et de qualification des soudeurs seront réalisés conformément au code:

ASME SEC-IX Standard

La qualification des soudeurs sur joints bout à bout se fera également par examen radiographique

Other :

Autres:

Inspection:

Contrôle:

Visual / Visuel: **yes/oui**

Radiographic / Radiographique: **yes/oui**

Ultrasonic / Ultrason:

Penetrant / Ressuage:

Magnetic particles / Magnétoscopie:

Other : **Refer to Inspection specification**

Autres: Voir spécification de contrôle

Remarks :

Observations:

Specification approved (Date):

Spécification approuvée le:

/05/2009

By (Name):

Par (nom):

Checking:

Signature:

Stamp:

Cachet:

Certification Organism:

Organisme de réception:

ANNEXE 5

OK Tigrod 2209

GTAW
ER2209

Description

Bare, corrosion-resistant, duplex welding rods for welding austenitic-ferritic stainless alloys of the 22% Cr, 5% Ni, 3% Mo types. OK Tigrod 2209 has high general corrosion resistance. In media containing chloride and hydrogen sulphide, the alloy has high resistance to intergranular corrosion, pitting and especially to stress corrosion. The alloy is used in a variety of applications across all industrial segments.

Welding current

DC(-)

Classifications

SFA/AWS A5.9	ER2209
EN 12072	W 22 9 3 NL

Wire composition

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu
<0.03	0.5	1.7	22.5	8.5	3.3	<0.3

Typical mech. properties all weld metal

Yield stress, MPa	600
Tensile strength, MPa	765
Elongation, %	28

Charpy V

Test temps, °C	Impact values, J
+20	100
-20	85
-60	60

Approvals

Sepros	UNA 485179
UDT	DIN 8556
VdTÜV	

Packing data

Diameter, mm	Length, mm	Weight of rods/ box, kg
1.2	1000	5.0
1.6	1000	5.0
2.0	1000	5.0
2.4	1000	5.0
3.2	1000	5.0

**BON
COURAGE**