

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

**UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE**

**Projet de fin d'études
Pour l'obtention de diplôme de
Master en Matériaux et Traitements de surface**

Titre :

**Caractérisation des assemblages soudés
d'un acier inoxydable fortement allié**

Proposé et encadré par :
**Dr M.Temmar
M.F.Belamnouar**

Etudié par :
R.Moussouni

Année universitaire 2012/2013



DEDICACES

En guise de reconnaissance pour tout ceux que m'ont offert dans cette vie, pour leur aide prodigué sans comporter, pour leur sacrifices consentis avec abnégation qui m'ont permis de poursuivre mes études, pour leur éducation qu'ils m'ont inculqué patiemment afin de voir juste, je dédie ce modeste travail à ceux qui me sont les plus chers sur cette terre :

A ma très cher mère et mon très cher père que le Dieu les garde pour nous.

Je dédie également ce travail :

A ceux que j'aime le plus au monde : ma femme, mes sœurs et mes frères,

Nièces et neveux surtout les petites **Mohamed**, wafaa, Soulef et Kaouther;

A tous mes amis

M. Radhwane



REMERCIEMENT

Ce travail a été effectué au atelier de soudo-mécanique, laboratoire de métallurgie et au laboratoire des essai mécaniques du centre de recherche scientifique et technique en soudage et contrôle (C.S.C) à chéraga et au laboratoire de métallurgie de base centrale logistique (B.C.L) de beni meurad de Blida.

Je tiens à remercier mon promoteur monsieur TEMMAR MUSTAPHA docteur d'état, enseignant de l'université de Blida pour son aide et ses bons conseils.

Je remercie également mon Co-promoteur monsieur BELAMNOUAR MOHAMED FARID, attaché de recherche pour son aide, son suivi et sa disponibilité au niveau du centre.

Je remercier également :

Monsieur harzouz karim chef de laboratoire métallurgie BCL pour son aide.

Monsieur Sofiane responsable du laboratoire de métallurgie de csc pour son aide et leur compréhension.

Messieurs Nabil, HAKEM MAAMER, OMAR BOURDJAM, S. KERBACHE, S.LAYAZID, RACHID, LAMINE KABA et RACHID GARTOUFA pour leur aide précieux.

D'autre part je tiens à remercier tout l'ensemble de CSC qui ont participé de loin ou de proche pour que je réalise ce modeste travail.

J'adresse mes plus vifs remerciements à :

Pr. M .HADJI, Dr BRAHIMI, B.Bouyousfi , Mme HANNACHE et tout les enseignants de départements de mécanique, d'avoir assuré notre formations durant le cycle de cette spécialité.

Merci en fin et mes excuse a tous ceux que je n'aurais pas cités, d'avoir été la et d'avoir été participé.

R. MOUSSOUNI

INTRODUCTION GENERALE

Le transport pétrolière et gazière s'impose depuis les années trente, reconnu comme le moyen le plus sûr et économique, il se développe d'avantage suite à l'accroissement continu du besoin mondial en énergie et l'apparition de nouveaux consommateurs d'hydrocarbures sur le marché. L'ouverture de nouveaux champs de production a exigé l'expansion, l'entretien et le développement des parcs des pipelines qui se feront en fonction des augmentations des prix d'hydrocarbures, des tubes en acier et en fonction des progrès technologiques en construction et en soudage des pipelines, ce développement implique l'utilisation des nouveaux matériaux en acier inox qui allient à la fois une bonne résistance mécanique à froid, une bonne résilience, une résistance à la corrosion et qui apportent toutes les garanties nécessaires de sûreté et de sécurité pour les installations pétrolières.

Les procédés de soudage à l'arc utilisés dans l'assemblage des gazoducs conduisent à des modifications de microstructures et induisent des contraintes et distorsions résiduelles jouant un rôle important sur la tenue mécanique des assemblages. Le soudage présente alors deux grandes familles de problématiques :

■ Métallurgiques :

L'opération de soudage induit des modifications métallurgiques au niveau du joint soudé par son apport énergétique et parfois par l'apport de métal. La réalisation d'un ensemble soudé passe en général par la fusion locale des jonctions à assembler. L'existence même d'une zone fondue est à l'origine de modifications radicales de l'état interne de l'assemblage. La solidification de cette zone produit une microstructure particulière, distincte de l'état initial. Ces modifications vont affecter les microstructures de la zone fondue et des zones affectées thermiquement.

■ Mécaniques :

D'autre part, la zone affectée thermiquement appelée ZAT, siège de modification métallurgique, peut induire à des fragilités, des baisses de résistance mécanique, des manques de ductilité... Les modifications métallurgiques influent sur la tenue mécanique du joint soudé.

Du fait, ce dernier est soumis à diverses problématiques résultantes qui sont:

- Fragilisation par l'hydrogène: phénomène de fissuration à froid.

- Apparition de fissurations à chaud (liquation) en cours de solidification : retassures et fissurations intergranulaires.
- Tenue à la corrosion différente du métal de base: essentiellement due aux phénomènes de ségrégation.

Sous l'impulsion de l'industrie, un grand nombre de recherches destinées à prévoir les structures métallurgiques et à optimiser le mode opératoire de l'opération de soudage ont été conduites.

L'objet de notre étude qui s'inscrit dans ce cadre, est la mise en évidence de l'effet des énergies de soudage sur les structures métallurgiques et comportements mécaniques des soudures dans un alliage spécifique à la construction des pipelines SAF 2507. Deux objectifs ont été poursuivis:

- Détermination des propriétés métallurgiques dans les différentes zones caractéristiques du cordon de soudage,
- Evaluation de la tenue mécanique des assemblages soudés par la réalisation des filiations de microdureté, essais de traction et de résilience.

Le présent mémoire comporte quatre chapitres. Le premier chapitre est consacré à une revue bibliographique ayant trait aux généralités concernant la métallurgie des aciers inoxydables fortement alliée au Cr et Ni. Dans le second chapitre on a présenté de façon succincte le procédé de soudage à l'arc utilisé dans notre étude (SMAW et TIG).

Nous entamons le troisième chapitre, par une partie consacrée à la description du dispositif expérimental de soudage (conditions expérimentales, pipe à souder, préparation des surfaces), et les différentes techniques de caractérisations employées au cours de cette étude.

Le dernier chapitre est scindé en deux parties. En premier lieu, nous avons effectué une analyse métallurgique des cordons de soudure soumis au procédé de soudage SMAW. L'objectif de cette analyse est d'identifier la morphologie et type des phases en présence dans les différentes zones du cordon de soudure: la zone fondue (ZF) et la zone activée thermiquement (ZAT). Par ailleurs la réalisation de filiation de microdureté Vickers, essais de traction et résiliences renseignent sur le comportement mécanique du cordon de soudure (ZF et ZAT) qui est induit par la microstructure.

Enfin une conclusion générale dans laquelle nous mettons en évidence les points essentiels de la présente étude clôt ce mémoire.

ملخص

إن تركيب المعادن بواسطة اللحام يحتل مكانا هاما في الصناعة البترولية؛ وخصوصا المعادن المقاومة للصدأ وذلك لقابليتها الكبيرة للتلحيم بواسطة طرق التلحيم المناسبة، ونقترح من خلال هذا البحث دراسة تأثير عوامل التلحيم المتمثلة هنا في طاقة التلحيم SMAW على التغيرات التركيبية للحام الخاصة بالأنابيب المقاومة للصدأ، ولهذا فقد استعملنا دراسات مجهرية وطرق ميكانيكية لعينات ذات طاقات تلحيم مختلفة وأدرجنا مختلف النتائج وتفسيرها في الجزء الرابع لهذا العمل

كلمات مفتاحية

تلحيم TIG طاقة اللحام الصلادة الحديد المقاوم للصدأ، دراسة الشد. دراسة المرونة

RESUME :

L'assemblage des matériaux fortement alliés par soudure occupe une place importante dans l'univers de l'industrie pétrolière. Bien précisément les aciers duplex «comme le SAF2507» sont plus utilisables vu leur bonne soudabilité par tous les procédés conventionnels. On a proposé, au cours ce travail, d'étudier l'influence des paramètres de soudage SMAW, dans l'espoir de mettre en évidence les effets d'énergie de soudage SMAW sur l'évolution structurale des soudures dans les pipelines en inox, pour cela nous avons fait une caractérisation métallographique et des essais mécaniques sur des éprouvettes à différentes énergie de soudage. Les résultats et leur interprétation constituent la quatrième partie de ce travail.

Mots clé: soudage, aciers inoxydables, contraintes résiduelles, technique

ABSTRACT:

Materials welding assembly occupies an important place in the world of Oil industry. Precisely stainless steels "as SAF2507" are more usable because of their good weldability by all conventional processes. We propose, through this work to study the influence of welding parameters, hoping to show the effects of welding SMAW energy an evolution of solder's structural and for steels with high yield strength used in pipelines. we made a metallographic characterization and mechanical tests.

The results and their interpretation is the third part of this work.

Keywords: welding, stainless steel, residual stresses, successive layers removing technique.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERAL	1
----------------------------	---

CHAPITRE I
LES ACIERS INOXYDABLES

I. les aciers inoxydables.	3
I.1.DEFINITION.....	3
I.2.Historique	3
I.3. la formation de la couche anticorrosive	3
I.4.les familles des aciers inoxydables	4
I.4.1. acier inoxydables martensitique.....	4
I.4.2. Aciers inoxydables ferritiques	5
I.4.3. Aciers inoxydables austénitiques	5
I.4.4 Aciers inoxydables austéno-ferritiques.	6
I.5. Rôles des éléments d'addition.....	6
I.5.1. Le chrome	6
I.5.2 Le carbone.....	6
I.5.3. Le nickel	6
I.5.4. Le manganèse.....	6
I.5.5 Le molybdène et le cuivre.....	6
I.5.6. Le tungstène	7
I.5.7. Le titane.	7
I.5.8. Le niobium	7
I.5.9. Le silicium	7
I.6. Grands domaines d'utilisation des aciers inoxydable	7
I.6.1 Équipements pour l'industrie	7
I.6. 2 Électroménager ménager et coutellerie	7
I.6.3. Industrie automobile	8
I.6.4 Industrie des transports terrestres et maritimes	9
I.6.5. Tubes	9
I.6.6 Bâtiment	10
I.7. Diagrammes de phases	11
I.7.1. Système Fe-Cr.....	11
I.7.1.1. La boucle γ	13
I.7.1.2. Les phases « σ » et « α' ».....	13
I.7.2. Système Fe-Cr-Ni.....	14

CHAPITRE II**LE SOUDAGE**

II.1. Définition:	15
II.2. Procédés de soudage	15
II.2.1. Procédés par pression	15
II.2.2. Procédés par fusion	15
II.3. Soudage à l'arc	17
II.3.1. Procédé SMAW (Shielded Metal Arc Welding	18
II.3.2. Soudage à l'électrode Réfractaire (TIG).....	19
II.4. Les paramètres de soudage SMAW.	20
II.4.1. Préchauffage / interpasses.	20
II.4.2. L'électrode.....	20
II.4.3. L'énergie de soudage.	21
II.5. Structure d'une soudure.	21
II.6. La formation de la zone affectée thermiquement (ZAT)	22
II.7. Choix des matériaux à souder :	24
II.7.1. Choix du métal de base :	25
II.7.2. Choix du métal d'apport	25
II.7.3. Choix du type de chanfrein	25
II.8. Soudage des aciers inoxydables duplex.....	25
II.8.1 Diagramme de Schaeffler	26

CHAPITRE III**TECHNIQUES EXPERIMENTALES**

III.1. INTRODUCTION.....	28
III.2. Matériau de base.....	28
III.3. Matériau d'apport.....	29
III.4. Préparation des échantillons	29
III.5. Paramètres de soudage.....	30
III.6. Métallographie optique	30
III.7. CARACTERISATIONS MECANIQUES	31
III.7.1. Profils de Microdureté Vickers	31
III.7.2. Essai de traction.....	32

III.7.3. Essai de résilience.....	33
III.8. méthode de calcul de la taille des grains	34

CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

IV.1. INTRODUCTION	37
IV.2 EXAMENS MACROGRAPHIQUES.....	37
IV.2.1. La morphologie des joints de soudure:.....	38
IV.2.2. La macrographie des coupes transversales des joints de soudure :.....	39
IV.3. EXAMEN MICROGRAPHIQUE	40
IV.4. MICRODURETE	47
IV.5. ESSAIS DE TRACTION	48
IV.6. ESSAI DE RESILIENCE.....	50
CONCLUSION GENERALE	52

ANNEXES

BIBLIOGRAPHIE

Chapitre III.
TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Tableau III.1 : Composition chimique de SAF2507 en %	28
Tableau III.2 : Composition chimique du matériau d'apport 308L en %	29
Tableau III.3 : Paramètres de soudage (TIG).....	30
Tableau III.3 : Paramètres de soudage (SMAW).....	30
Tableau III.5 : Démonstration des étapes de calculs par Image J.....	35

Chapitre IV.
RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Tableau IV.1 : Les résultats des calculs par Image j.....	42
Tableau IV.2 : Représentations des micrographies des cordons SMAW.....	45

Chapitre I : les aciers inoxydables

Figure I.1. Formation de la couche passive.	4
Figure I.2. Diagramme d'équilibre Fe-Cr.	12
Figure I.3. Boucles gamma formées dans les divers systèmes binaires du fer	13
Figure I.4. Coupes pseudobinaires du diagramme d'équilibre ternaire Fe-Cr-Ni à des teneurs constantes en Fe	14

Chapitre II : le soudage

Figure .II.1 : Procédés de soudage classés selon les sources d'énergie.....	16
Figure II.2 : Energies spécifiques des différents procédés de soudage par fusion.....	17
Figure II.3 : Principe d'un arc électrique par fusion.	18
Figure .II.4 : Principe de soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW).	18
Fig. II-5: Procédé de soudage T.I.G.	19
Figure II.6 : Structure d'une soudure.	22
Figure II.7 : Différents types de microstructures en ZAT en fonction des cycles thermiques.	23
Figure II.8 : Présentation schématique des différentes parties constitutives d'un joint soudé.	23
Figure II.9 Diagramme de Schaeffler.	26

Chapitre III. ETUDE EXPERIMENTALE

Figure III.1 représentation du Pipe étudié	29
Figure III.2 représentation Chanfreinage.....	29
Figure III.3: Microscopie optique de type leitz.....	31
Figure III. 4 : Éprouvettes des essais de traction.....	32/33
Figure III.5. Éprouvette avec entaille.	33
Figure III.6. Mouton pendule ou mouton de Charpy.....	34

Chapitre IV.RESULTAT ET INTERPRETATION

Figure IV.1: Morphologie des joints de soudure.....	38
Figure IV.2. Macrographie d'éprouvettes.....	39
Figure IV.3. Image montrant les zones étudiées.	40
Figure .V.4 . Cordon TIG de l'échantillon N°1 passive.....	41
Figure IV.5. Métal de base.....	41

Figure IV.6. Micrographies de cordon TIG.....	43
Figure .IV.7 : Montrant l'axe X0 des profils de microdureté.	47
Figure .IV.8 : filiations de microdureté des éprouvettes.	47
Figure. IV.9 : Graphe de l'allongement en fonction d'énergie de soudage.....	49
Figure. IV.10 : Graphe de résistance mécanique en fonction d'énergie de soudage.	49
Figure. IV.11 .Zone de rupture des éprouvettes E1, E5, et E3.	49
Figure. IV.12 Graphe de résilience en fonction d'énergie de soudage.....	51

LISTE DES SYMBOLES

RM	Résistance à la rupture [MPa]
σ_e	La limit d'élasticité [GPa]
Re	La limite d'élasticité [MPa]
d	Taille du grain
ZAT	Zones affectées thermiquement
Al ₂ O ₃	L'alumine
TIG	Electrode réfractaire de tungstène
Mig/mag	Electrode fusible
SMAW	Shielded metal arc welding)
E	Entrée d'énergie [KJ / mm]
U	Tensions [V]
I	Courant [A]
V	Vitesse [mm / min]
AC1	La fin de la transformation austénitique
AC3	Le début de la transformation austénitique
T	Température [°C]
t	Temps [min]
Nital	D'acide nitrique
H _v	Micodureté VICKERS
Csc	Centre de soudage et de contrôle
Hwdm-1	Une machine d'essai
C.a.m.s	Un logiciel d'acquisition d'image
Psw	Type d'une machine d'essai de résilience par choc selon charpy
α°	Angle de frappe
β	Angle
L	Langueur du bras [mm]
W	Travail [j]
M	Masse [kg]
g	Gravity [m/s ²]
p	Perlite
γ	Austenite
EqCr	équivalent Chrome
EqNi	équivalent Nickel
M	La martensite
F	La ferrite
A	L'austénite
A+F	L'austéno-ferrite
α	ferrite
KCV	Energies [j/cm ²]

I. Les aciers inoxydables

I.1. Définition

Les aciers inoxydables jouent un grand rôle dans d'innombrables domaines : Industrie mécanique et pétrolière, agroalimentaire, chimie, transports, médecine, chirurgie, etc. Ce sont des alliages de fer et de carbone, auxquels on ajoute essentiellement du chrome qui, au-delà de 10,5 % en solution (selon la teneur en carbone) dans la matrice, provoque la formation d'une couche protectrice d'oxyde de chrome qui confère à ces aciers leur inoxydabilité.

I.2. Historique

L'inox a été découvert, dans les années 1890, par l'allemand Hans Goldschmidt qui développa les premières nuances d'aciers au chrome à bas carbone. Entre 1904 et 1909, divers chercheurs, notamment le français Léon Guillet, étudièrent et mirent aux point différents alliages Fe-Cr-Ni. En 1911, l'allemand Philip Monnartz, mit en évidence l'influence de la teneur en chrome des alliages vis-à-vis de leur résistance à la corrosion [1].

Le passage au stade industriel est attribué à Harry Brearley pour les aciers inoxydables martensitiques. Il serait à l'origine de la première élaboration réalisée à Sheffield en 1913. Un mérite analogue reviendrait aux allemands Benno Strauss et Eduard Maurer pour la production des aciers inoxydables austénitiques et aux américains Frederick Becket et Christian Dantsizen pour celle des aciers inoxydables ferritiques. La première description de la passivité des aciers inoxydables est attribuée à l'allemand Philipp Monnartz. Les recherches ultérieures ont notamment porté sur le rôle des éléments d'alliage. Elles ont conduit à la mise au point des nuances à durcissement structural dont les propriétés aux températures élevées ont été mises en évidence par Pierre Chevenard.

Enfin, c'est au début des années 1930 que J. Hochmann a découvert les nuances biphasées austéno-ferritiques appelées de nos jours duplex. Si la période comprise entre 1904 et 1920 a été riche en travaux de laboratoire, il a fallu attendre presque un demi-siècle pour atteindre un stade véritablement industriel [1,2].

I.3. La formation de la couche anticorrosive :

Pour une teneur en chrome supérieur à 12 %, une fine couche protectrice d'oxyde de chrome, dite couche de passivation, se forme à la surface de l'alliage [1]. Celle-ci donne à ces alliages une bonne résistance à la corrosion, permettant ainsi de répondre aux problèmes de tenue en milieu agressif (eau de mer, environnements chimiques et pétrochimiques, ...).

D'abord, le phénomène de corrosion des métaux est de nature électrochimique: le métal retrouve son état thermodynamiquement stable, l'état oxydé. En présence d'un milieu oxydant

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

Le fer, constituant majoritaire des aciers, s'oxyde facilement ; le produit de corrosion, la rouille, s'effrite ou se dissout dans l'eau, ce qui crée une dégradation de la pièce. À chaud, la diffusion des atomes oxydant dans l'épaisseur du métal peut compliquer encore le problème.

Une des manières d'éviter la corrosion consiste à mettre une quantité importante de chrome (Cr) dans l'acier (plus de 10,5 % en masse) : le chrome réagit avec le dioxygène de l'air et forme une couche d'oxyde de chrome Cr_2O_3 : $4 \text{Cr} + 3 \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{Cr}_2\text{O}_3$ Cette couche, compacte, adhérente et donc protectrice, est appelée « couche passive » : elle forme une barrière séparant l'acier de son milieu. En temps normal, elle est invisible car très fine. Ainsi, contrairement à son nom, l'acier n'est pas inoxydable : il s'oxyde rapidement, mais forme un oxyde protecteur, contrairement à la rouille [3].

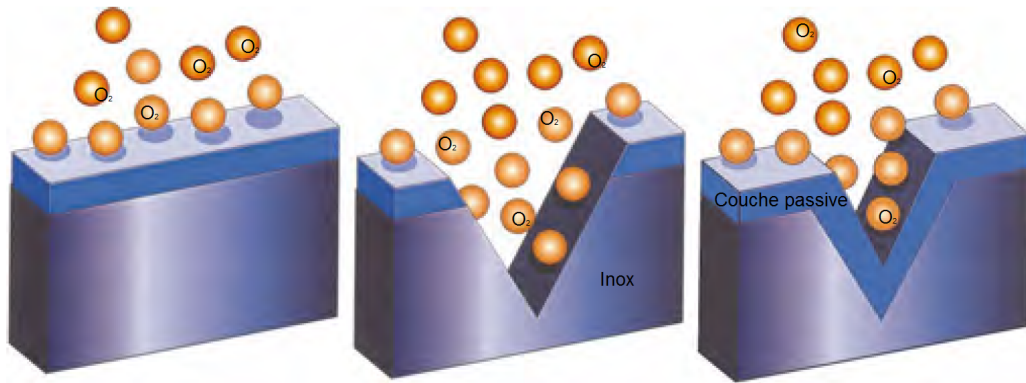


Figure I.1. Formation de la couche passive [3]

I.4. Les Familles des aciers inoxydables

Les aciers inoxydables sont classés en quatre grandes familles en fonction de leur composition et de leur structure cristallographique. On distingue les aciers ferritiques, les aciers martensitiques, les aciers austénitiques et les aciers austéno-ferritiques.

I.4.1. Aciers inoxydables martensitiques

La phase martensite est d'une grande dureté, donc peu ductile. Il s'ensuit que les aciers inoxydables martensitiques ne sont pas adaptés au formage à froid ; ils sont surtout utilisés en coutellerie où la mise en forme relève essentiellement du matriçage ou de l'estampage. On peut néanmoins considérer qu'ils peuvent subir des pliages légers (on peut redresser une lame de couteau tordue).

I.4.2. Aciers inoxydables ferritiques

Les aciers inoxydables ferritiques contiennent de 11 à 27% de chrome et peu de nickel. Ils ne peuvent pas être durcis par traitement thermique mais peuvent l'être modérément par écrouissage. Ces aciers sont magnétiques et ont une ductilité moyenne et une bonne résistance à la corrosion et à l'oxydation [4].

Ils ont, comme leur nom l'indique, une structure ferritique qui les rapproche des aciers doux préalablement étudiés ; ils se prêtent donc bien à l'emboutissage. On distingue deux catégories :

- les aciers dits semi-ferritiques
- les aciers stabilisés au titane ou au niobium

Les aciers ferritiques peuvent être, à des degrés variables, sujets à deux défauts d'aspect apparaissant après formage, qui peuvent obliger à polir les pièces atteintes : la vermiculure due à la présence d'un palier de limite d'élasticité et le cordage, ou encore chiffonnage, qui consiste en une hétérogénéité de déformation longitudinale résultant de ségrégations. Les aciers stabilisés y sont moins sensibles.

Il est souhaitable de ne pas mettre en forme ces aciers à des températures inférieures à 20 ou 30°C car ils présentent alors un risque de fragilité.

Leurs utilisations principales se retrouvent dans les articles ménagers, l'électroménager (cuves de lave-linge), les éviers (emboutis avec un film plastique mince pour éviter leur endommagement), les ballons à eau chaude, etc.

I.4.3. Aciers inoxydables austénitiques

La particularité de ces aciers réside en deux caractéristiques découlant de leur structure :

- la phase austénitique, cubique à faces centrées, possède de nombreux systèmes de plans de glissement actifs, ce qui lui confère une grande ductilité et l'absence de fragilité même aux températures cryogéniques ;
- cette austénite est instable à la température ordinaire et tend à se transformer, durant la déformation, en martensite (en fonction du taux de nickel et de carbone). L'apparition de ce constituant dur renforce l'alliage et lui permet de supporter de très grandes contraintes, donc recule l'apparition de la rupture (d'où un grand allongement).

Les aciers austénitiques trouvent de nombreuses applications du fait de leur exceptionnelle résistance à la corrosion, de leur aspect et de leur résistance mécanique : matériel ferroviaire, chaudronnerie, décoration, éviers profonds, matériel sanitaire, matériel de cuisson, échangeurs, nucléaire, etc. [5].

I.4.4. Aciers inoxydables austéno-ferritiques

On les appelle aussi Duplex. Ils contiennent beaucoup de chrome (plus de 20 %) et peu de nickel (4 à 8 %) et ne sont pas, de ce fait, complètement austénitiques. Ils sont surtout destinés au moulage.

Leurs caractéristiques mécaniques sont très élevées et les destinent à des applications structurales telles que les chaudrons de voitures de chemin de fer. Leur ductilité relativement limitée ne permet que le cintrage, pliage ou profilage.

Il semble cependant que leur avantage économique et leur très bonne résistance à la corrosion intergranulaire et par piqûres doivent conduire à un plus large développement dans les années à venir [5].

I.5. Rôles des éléments d'addition

I.5.1. Le chrome

C'est l'élément qui donne aux aciers inoxydables leur résistance à la corrosion. Conformément à la norme européenne EN 10088-1[6], un acier est classé acier inoxydable s'il contient au minimum 10,5 % en masse de chrome et moins de 1,2 % de carbone.

I.5.2. Le carbone

Dans les aciers inoxydables, la teneur en carbone est limitée à un maximum de 1,2 % en masse afin d'éviter la formation de carbures [7] (notamment de carbures de chrome qui est un composé chimique très stable avide de chrome) qui sont préjudiciables au matériau. Par exemple, le carbure $Cr_{23}C_6$ qui peut apparaître dans l'austénite a un effet négatif vis-à-vis de la corrosion intergranulaire (appauvrissement très important en chrome aux abords des carbures formés provoquant la perte du caractère d'inoxidabilité par captation du chrome) [8].

I.5.3. Le nickel

Le Nickel favorise la formation de structures homogènes de type austénitique. Il apporte les propriétés de ductilité, de malléabilité et de résilience. A éviter soigneusement dans le domaine du frottement.

I.5.4. Le manganèse

Il est un substitut du nickel. Certaines séries d'alliages austénitiques ont été développées permettant de faire face aux incertitudes d'approvisionnement du nickel [2].

I.5.5. Le molybdène et le cuivre

Ces deux éléments qui améliorent la tenue dans la plupart des milieux corrosifs, en particulier ceux qui sont acides, mais aussi dans les solutions phosphoriques, soufrées, etc. Le molybdène accroît la stabilité des films de passivation.

I.5.6. Le tungstène

Le W améliore la tenue aux températures élevées des aciers inoxydables austénitiques.

I.5.7. Le titane

Il doit être utilisé à une teneur qui dépasse le quadruple de la teneur en carbone. Il évite l'altération des structures métallurgiques lors du travail à chaud, en particulier lors des travaux de soudure où il prend la place du chrome pour former un carbure de titane (TiC) avant que ne se forme le carbure de chrome préservant de ce fait le caractère inoxydable de l'acier en évitant l'appauvrissement en chrome de la matrice aux abords des zones carburées.

I.5.8. Le niobium

Le point de fusion du niobium beaucoup plus élevé que le titane et présente des propriétés semblables. Il est utilisé dans les métaux d'apport pour soudage à l'arc électrique en lieu et place du titane qui serait volatilisé pendant le transfert dans l'arc électrique.

I.5.9. Le silicium

Cet élément cristallogènes joue également un rôle dans la résistance à l'oxydation, notamment vis-à-vis des acides fortement oxydants (acide nitrique concentré ou acide sulfurique concentré chaud [6]).

1.6. Domaines d'utilisation des aciers inoxydable**1.6.1 Équipements pour l'industrie**

Les équipements pour les industries chimiques/pétrochimiques, agroalimentaires et pharmaceutiques sont pour l'essentiel des appareils chaudronnés travaillant généralement à la pression atmosphérique mais qui, dans le cas des réacteurs, peuvent être soumis à des pressions élevées.

La résistance à la corrosion de la nuance doit être élevée ce qui justifie, dans certains cas, d'utiliser des alliages austénitiques comportant une addition de molybdène de l'ordre de 2,0 % (X2CrNiMo17-12-2) voire de 3,5 % (X2CrNiMoN18-15-4). Si l'on craint un possible phénomène de corrosion sous contrainte, l'emploi d'une nuance austéno-ferritique de type X2CrNiMoN22-5-3 est recommandé [2].

A ces considérations de résistance à la corrosion, il faut ajouter qu'il est absolument nécessaire que les matériaux mis en œuvre possèdent une bonne soudabilité opératoire ainsi qu'une bonne soudabilité métallurgique.

1.6.2 Électroménager et coutellerie

Ce vaste domaine du ménager et de l'électroménager (appareils électroménagers, ustensiles ménagers, platerie, couverts) n'est pas homogène en termes de choix de nuance. Par contre, quelle que soit la nuance retenue, elle devra présenter un état de surface permettant un lavage

facile afin d'éviter tout risque de rétention d'origine bactérienne. En général, le niveau de résistance à la corrosion peut être qualifié de moyen. Par contre, certaines pièces sont sévèrement embouties. Dans ce cas, le recours à une nuance austénitique (alliage : Fe-Cr-Ni) de type X5CrNi18-10 est absolument nécessaire. Pour les éléments peu conformés et assemblés mécaniquement ou par collage, l'emploi de la nuance X6Cr17 est généralement suffisant pour résister à la corrosion du milieu environnant [2].

Si les assemblages sont réalisés par soudage, il faut alors utiliser une nuance ferritique stabilisée du type X3CrTi17.

Dans le domaine de la coutellerie, la qualité de coupe de la lame est l'élément déterminant. Pour ce faire on utilisera un alliage martensitique contenant au moins 0,2 % de carbone (X20Cr13) de manière à obtenir, après traitement de trempe, une structure entièrement martensitique dont la dureté est suffisante pour assurer une bonne coupe. Les nuances dont la teneur en carbone est supérieure permettent, à priori, des duretés plus élevées à condition que le traitement thermique de trempe soit parfaitement réalisé.

1.6.3 Industrie automobile

Il s'agit du système d'échappement, de décoration, d'organes de sécurité et d'éléments de structure. Dans la ligne d'échappement d'une voiture automobile, la nuance ferritique X2CrTi12 reste majoritaire. Pour des considérations d'esthétique relatives à des parties visibles et éviter la prise d'une patine [2].

Aussi bien pour la partie froide de la ligne d'échappement (c'est à dire la zone du silencieux) soumise à l'agression de condensats acides que pour la partie chaude (c'est-à-dire celle proche du catalyseur et celle voisine du bloc moteur), on utilisera des nuances à 17 % de chrome stabilisés au titane et /ou au niobium.

Pour la partie chaude, les résistances à l'oxydation, au fluage et à la fatigue thermique peuvent imposer l'utilisation d'alliages austénitiques réfractaires du type X18CrNiSi20-12 ou X12CrNi23-13.

La décoration automobile est du domaine exclusif des nuances ferritiques à 17 % de chrome avec ou sans addition de molybdène et stabilisées au niobium pour les éléments devant être profilés puis cintrés.

Dans les organes de sécurité, l'application principale est le gonfleur pour « air bag ». C'est en général une pièce réalisée par usinage à partir de barres ou par emboutissage à partir de flans en acier inoxydable austénitique X5CrNi18-10. [2]

Les pressions de gonflage ayant tendance à augmenter, il est parfois nécessaire d'utiliser des nuances austéno ferritiques du type X2CrNi23-4.

Certains éléments de structures sont maintenant réalisés en acier inoxydable. Grâce à ses caractéristiques mécaniques élevées, à l'état écroui, c'est la nuance X2CrNiN18-7 qui est recommandée.

Il existe dès à présent des applications portant sur des réalisations tubulaires complètes appelées « cage d'oiseau » (space frame, en anglais). Elles concernent aussi bien des voitures particulières que des véhicules de loisir.

1.6.4 Industrie des transports terrestres et maritimes

Il s'agit des wagons et voitures ferroviaires, des conteneurs citernes et citernes routières, et des conteneurs frigorifiques.

Dans ce secteur l'allègement est un critère de premier ordre notamment dans le cas des voitures ferroviaires majoritairement réalisées à l'aide de la nuance X2CrNiN18-7 qui permet d'obtenir, d'une part, des limites d'élasticité élevées à l'état écroui et, d'autre part, une excellente soudabilité[2].

Pour les wagons mais également pour les ossatures des conteneurs, on utilise une nuance à 12 % de chrome (X2CrNi12) dont la limite d'élasticité est supérieure à 320 N/mm², dont le peinturage est facile et qui de plus présente une bonne soudabilité.

Qu'il s'agisse des conteneurs citernes ou des citernes routières, compte tenu de la variété des produits transportés, on utilise essentiellement des nuances austénitiques au molybdène : (X2CrNiMo17-12-2 ou X6CrNiMoTi17-12-2).

Quant à l'intérieur des conteneurs frigorifiques, il est réalisé à partir de tôles fines en acier inoxydable austénitique X5CrNi18-10.

1.6.5 Tubes

Pour les tubes destinés au transport de fluides appelés aussi tubes corrosion, la nuance la plus utilisée est l'austénitique X2CrNi18-9. Pour les milieux plus agressifs, on utilisera la nuance austénitique X2CrNiMo17-12-2 et, dans certains cas particuliers, l'alliage austéno-ferritique X2CrNiMoN22-5-3.

La majorité des tubes utilisés étant soudés longitudinalement, il sera alors nécessaire de leur faire subir un traitement d'hypertrempe afin qu'il recouvre leur structure métallurgique d'origine. Si ce traitement est fait sous atmosphère oxydante, il sera suivi d'une opération de décapage et d'un traitement de passivation.

Si le traitement d'hypertrempe est réalisé sous atmosphère neutre ou légèrement réductrice, l'opération de décapage étant inutile, seule sera effectuée l'opération de passivation.

Pour les tubes destinés à la décoration, on utilise surtout la nuance X5CrNi18-10.

Dans ce cas, il n'est pas nécessaire d'effectuer les traitements décrits précédemment (hypertrempe, décapage, passivation) mais l'extérieur du tube sera poli « en ligne » dans le sens travers, à l'aide de bandes abrasives oscillantes.

Les tubes pour applications structurales sont réalisés à partir de feuillards épais, notamment dans la nuance ferritique X2CrNi12. Leur section est généralement carrée ou rectangulaire.

La soudure longitudinale est en général polie dans le sens long par une bande abrasive.

Il existe une dernière catégorie de tubes destinés à équiper des échangeurs de chaleur (condenseurs, réchauffeurs, évaporateurs, etc.). Compte tenu du fait que la conductivité thermique des nuances ferritiques est 1,7 fois plus élevée que celle des austénitiques, on les préférera à ces dernières. Les deux alliages les plus utilisés sont le X3CrTi17 et le X2CrMoTi29-4 pour les échangeurs fonctionnant à l'eau de mer[2].

1.6.6 Bâtiment

Il s'agit d'un très vaste domaine dans lequel l'acier inoxydable est utilisé aussi bien à l'extérieur (couverture, murs rideaux, entrées d'immeubles, mobilier urbain) qu'à l'intérieur des immeubles (décoration, escaliers mécaniques, cage d'ascenseurs, escaliers).

On le trouve également sous la forme de conduits de fumée rigides ou souples lorsqu'il s'agit de réhabilitation de cheminées anciennes.

Dans le domaine de la couverture, on trouve aussi bien des nuances ferritiques (depuis 17 % jusqu'à 29 % de chrome avec ou sans addition de molybdène) que des nuances austénitiques du type X5CrNi18-10 mais dans tous les cas, l'aspect du produit doit être mat.

Cet aspect est obtenu soit directement au laminage, soit après revêtement d'une fine couche d'étain.

Dans le domaine de la décoration, on trouve une très grande variété d'aspects de surface : brillant, mat, poli, gravé, etc., afin de répondre aux souhaits des architectes.

Malgré sa très remarquable résistance au feu, l'acier inoxydable est encore peu utilisé dans les structures. Il s'agit pourtant d'un domaine où ses caractéristiques mécaniques « à chaud » permettent de l'employer sans avoir recours à des protections thermiques.

I.7. Diagrammes de phases

Les aciers inoxydables sont essentiellement des alliages Fe-Cr ou Fe-Cr-Ni à teneur en carbone variant de 0,02% à 1% selon les nuances. Bien qu'un certain nombre d'autres éléments d'addition soient ajoutés pour améliorer la tenue à la corrosion ou les propriétés mécaniques, l'essentiel des propriétés des aciers inoxydables est lié à la connaissance des diagrammes de phases.

Remarquant que certains éléments d'alliages ont un effet alphagène, C-A-D : qu'ils favorisent la formation d'une structure cristallographique cubique centrée comme le Cr, Mo, Si, Ti, Nb, V, W, A, et que d'autres ont un effet gammagène, C-A-D qu'ils favorisent la formation d'une structure cristallographique cubique à faces centrées comme le Ni, C, Co, Mn, Cu.

Les diagrammes d'équilibre peuvent être utilisés pour décrire les transformations de phases et leurs stabilités dans les aciers inoxydables.

I.7.1 Système Fe-Cr

Le fer pur existe sous deux variétés cristallographiques dont la nature et le domaine d'existence sont résumés ci-après :

- A température ambiante, la structure est cubique centrée, le fer se trouve sous sa forme ferritique α , il est alors magnétique.
- A 912°C, il subit une première transformation allotropique, et jusqu'à 1394°C, il se trouve sous sa forme austénitique γ , de structure cubique à faces centrées, amagnétique.
- Au-delà de 1394°C, il retrouve une structure identique à celle de l'ambiante, c'est la ferrite δ , magnétique.

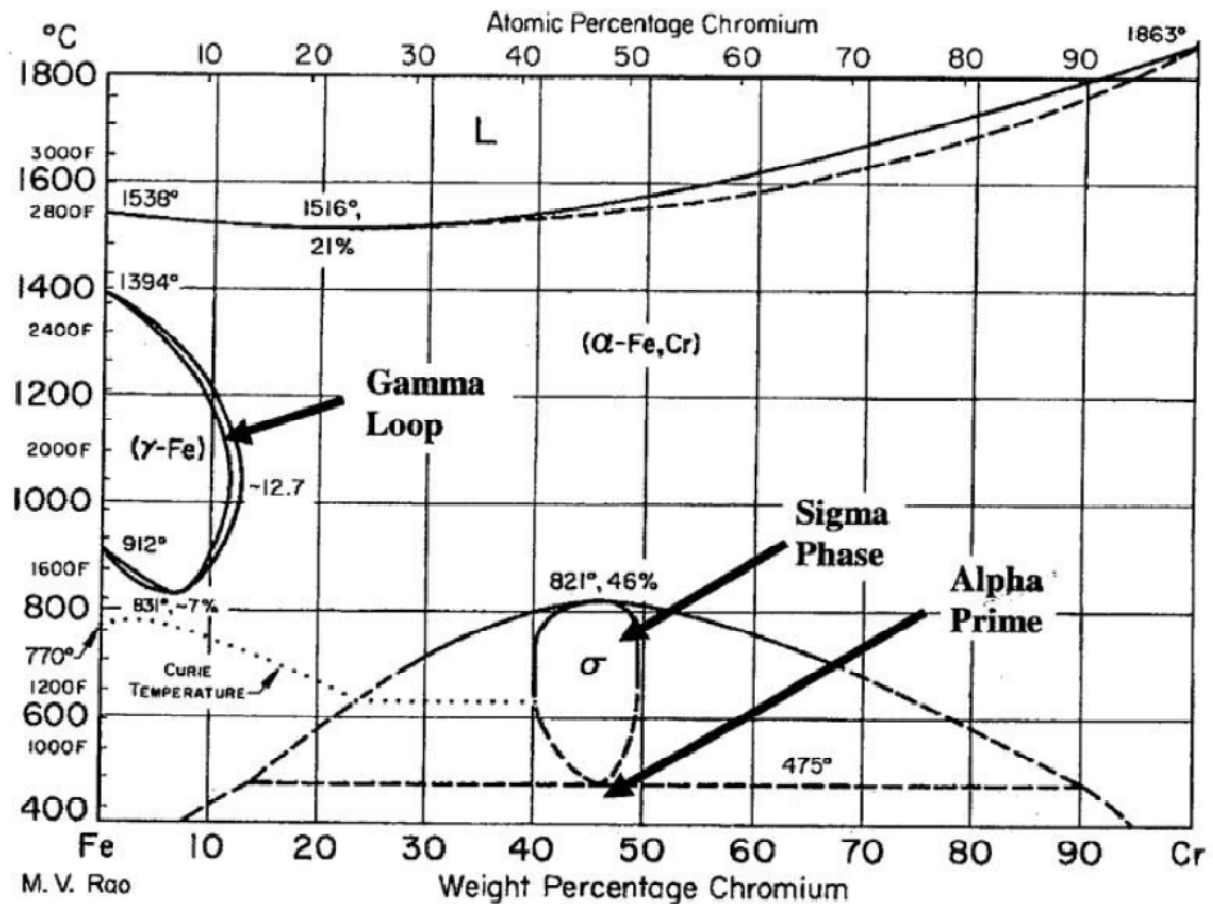


Figure I.2. Diagramme d'équilibre Fe-Cr [7].

Etant donné que le chrome est le principal élément d'alliage, la figure I.2 ci-dessus représentera le point de départ de l'étude de la stabilité de phases des aciers inoxydables. On remarque

- la solubilité complète du chrome dans le fer aux températures élevées et que tous les alliages Fe-Cr se solidifient sous forme de ferrite.
- Aux faibles teneurs en chrome, il y a formation de la « boucle γ » dans l'intervalle de température 912 – 1394°C
 - % Cr > 12,7 : les alliages Fe-Cr dont la teneur en chrome est supérieure à 12,7% sont ferritiques aux températures élevées.
 - % Cr < 12 : les alliages Fe-Cr dont la teneur en chrome est inférieure à 12% sont austénitiques aux températures comprises dans la boucle γ .
 - $12 < \% \text{ Cr} < 12,7$: dans ce cas, les deux phases α et γ coexistent [7].

I.7.1.1 La boucle γ

Quand la teneur en Cr atteint à peu près 12%, la ferrite est complètement stable de la température ambiante jusqu'au point de fusion, ce qui engendre en contre partie un rétrécissement du domaine austénitique produisant ainsi la « boucle γ ». La figure I.3 ci-dessous montre que d'autres éléments stabilisateurs de la ferrite comme le vanadium ou le molybdène agissent de la même manière que le chrome lorsqu'il est allié au fer donnant ainsi des boucles gamma (γ) [8].

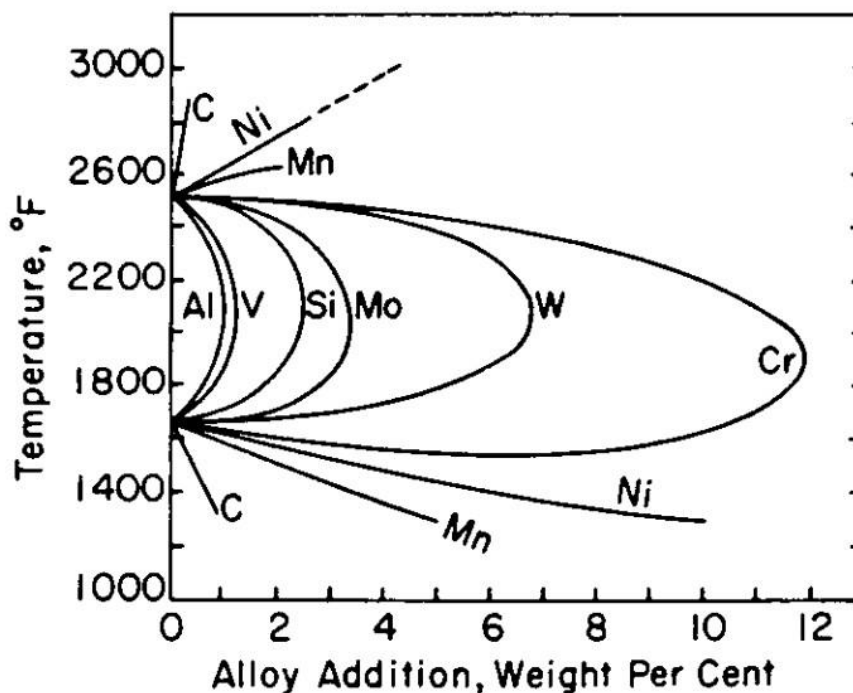


Figure I.3. Boucles gamma formées dans les divers systèmes binaires du fer [8].

I.7.1.2 Les phases « σ » et « α' »

Dans la figure I.2 là où est mentionné « σ » (au centre en bas) la structure cristalline n'est pas cubique centrée comme pour la ferrite, mais elle est tétragonale, elle s'avère être très fragile, par conséquent, cette phase sigma est à éviter. Sa formation est un problème dans les traitements thermiques des aciers inoxydables qui ont une forte teneur en chrome.

On note aussi la présence d'une ligne discontinue à 475°C d'où l'appellation du phénomène « fragilisation à 475°C » qui est due à la formation d'un riche précipité en chrome dans la matrice α appelé alpha prime (α'), ce dernier engendre des fragilisations sévères dans les alliages qui contiennent plus de 14% de chrome [7,2].

I.6.2. Système Fe-Cr-Ni

En effectuant des coupes dans le diagramme ternaire Fe-Cr-Ni à des teneurs constantes en fer (50%, 60%, 70%, 80% et 90%) on obtient des diagrammes pseudo-binaires comme le montre la figure I.4 ci-dessous, à partir de laquelle en déduit que :

- Les alliages riches en chrome se solidifient en ferrite
- Les alliages riches en nickel se solidifient en austénite
- Cependant, de nombreux alliages Fe-Cr-Ni se solidifient en deux phases, ferrite et austénite. Pendant la solidification de ces alliages, le liquide coexiste avec la ferrite et l'austénite [8].

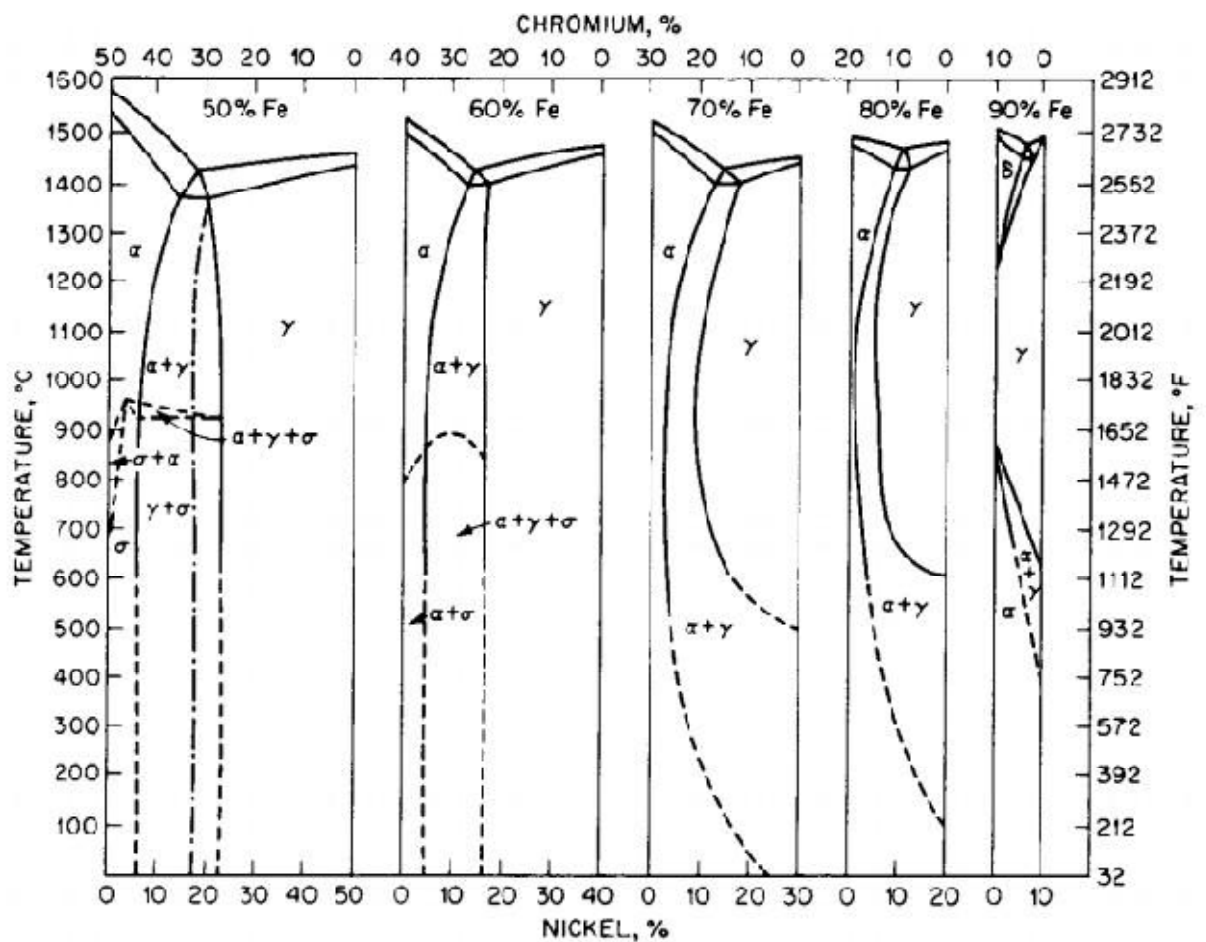


Figure I.4. Coupes pseudobinaires du diagramme d'équilibre ternaire Fe-Cr-Ni à des teneurs constantes en Fe [8].

II.1. Définition:

Le soudage est un procédé d'assemblage définitif exécuté sur des pièces métalliques qui s'impose pour diverses raisons dimensionnelles, structurelles, constructives, économiques et autres, il entre en compétition avec d'autres modes d'assemblage tels que: Le vissage, sertissage, le rivetage, car c'est le seul procédé qui procure une assez appréciable continuité mécanique, physique et surtout métallurgique entre les pièces assemblées, soit par chauffage, soit par intervention de pression, soit par l'un et l'autre avec ou sans métal d'apport dont la température de fusion est de même ordre de grandeur que celle du métal de base.

II.2. Procédés de soudage :

Expérimentalement, il existe plusieurs procédés permettant le soudage de deux pièces métalliques, le plus répandu est le soudage par arc électrique ou un champ électrique important entre deux électrodes provoque des transitions d'électrons. Il existe cependant d'autres procédés tels que le soudage par laser, soudage par fusion (Soudage aux gaz), soudage aluminothermique, soudage par pression comme (le Soudage par résistance et Soudage à la forge). Ces nombreux procédés peuvent être répartis en deux groupes :

II.2.1. Procédés par pression

L'application d'un effort l'un contre l'autre des éléments à assembler joue un rôle fondamental. Cette action impose généralement le serrage de l'ensemble à réaliser dans la gorge d'un équipement exerçant l'effort.

Parmi les procédés de soudage par pression, nous pouvons citer [9]:

- Soudage à la forge,
- Soudage par friction,
- Soudage par diffusion.

II.2.2. Procédés par fusion

Réalisés généralement par une fusion des métaux à joindre qui provoque la formation d'un alliage comme dans le cas des métaux dissemblables ou de l'utilisation d'un métal d'apport de composition voisine ou différente de celle du métal de base (cas du soudage chalumeau, à l'arc...). La grande variété des procédés de soudage existants peut être également classée en fonction de la nature des énergies mise en œuvre (figure II.1) [10].

Par ailleurs, les procédés de soudage par fusion peuvent aussi être classés suivant l'intensité de la source d'énergie qui induit des différences de caractéristiques importantes sur les cordons de soudure (figure II.2). L'énergie spécifique de chaque procédé agit sur la pénétration, qui est le

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

Les procédés de soudage par fusion les plus répandus pour l'assemblage sont le soudage à l'arc avec électrode de tungstène (procédé TIG), le soudage MIG, le soudage plasma, le soudage par faisceau d'électrons et le soudage par faisceau laser.

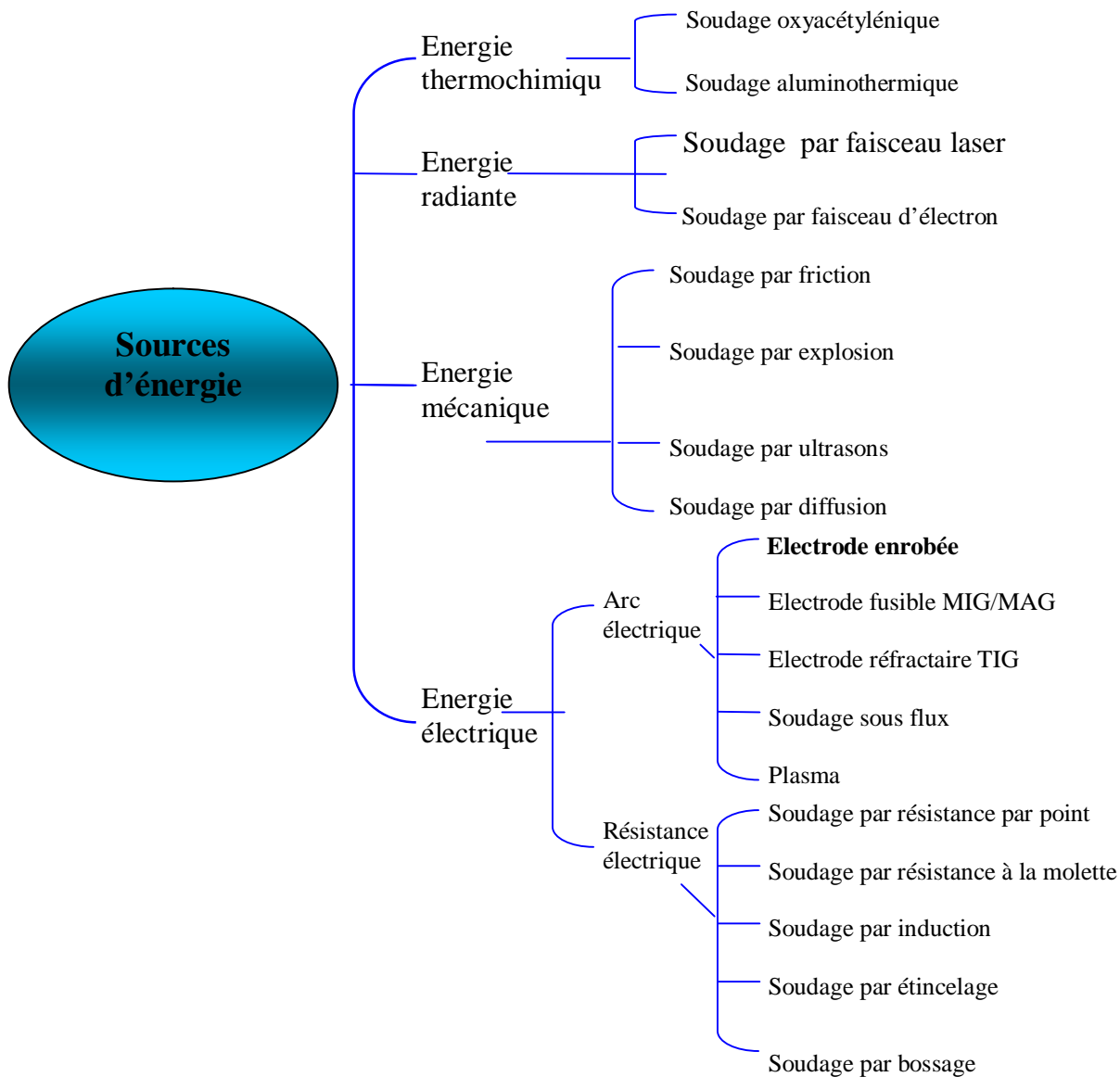


Figure .II.1 : Procédés de soudage classés selon les sources d'énergie [10]

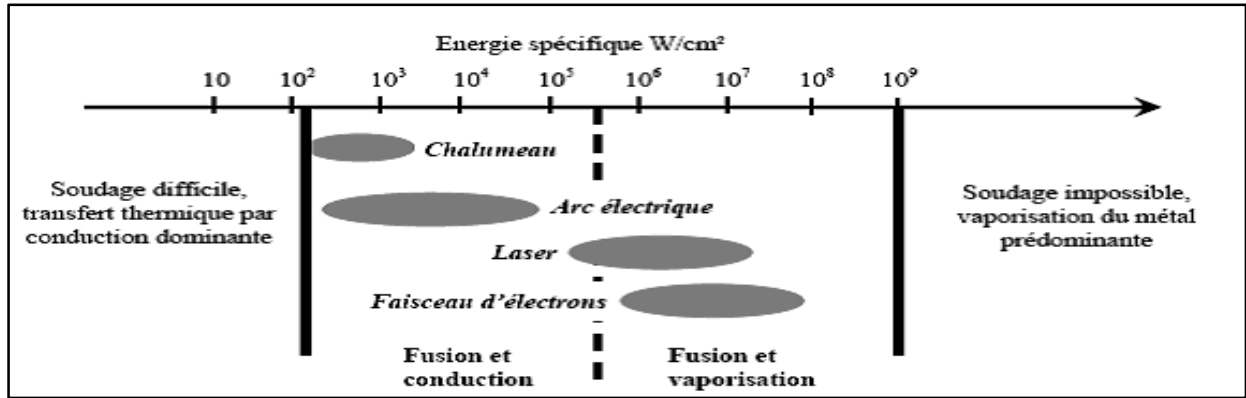


Figure II.2 : Energies spécifiques des différents procédés de soudage par fusion [10]

Les procédés de soudage par fusion les plus répandus pour l'assemblage sont le soudage à l'arc avec électrode de tungstène (procédé TIG), le soudage MIG, le soudage plasma, le soudage par faisceau d'électrons et le soudage par faisceau laser.

Dans notre travail, on ne s'intéresse qu'au procédé mettant en jeu un arc électrique.

II.3. Soudage à l'arc

Le terme « soudage à l'arc » définit un procédé de soudage par fusion des bords et addition d'un métal d'apport (souvent contenu dans l'électrode ou le fil-électrode).

Dans un processus de soudage, le métal de base est fondu avec le métal d'apport, ce qui crée le bain de fusion. Dans le soudage à l'arc l'apport de la chaleur utilisé pour former le bain de métal fondu est assuré ici par un arc électrique, et la liaison a bien lieu par solidification du métal fondu sur le métal de base, soit sans métal d'apport soit sur tout avec métal d'apport [11],[12]. L'arc doit pouvoir s'amorcer facilement et, ensuite, rester stable. Pour faciliter son amorçage aussi bien que pour le stabiliser, on a recours à des éléments chimique facilement ionisables qui sont introduits dans le plasma d'arc. Ces éléments peuvent provenir les composés fusibles et volatils inclus dans les produits solides qui formeront le laitier ou des gaz distribués pour protéger le métal fondu [11,12].

Lors du soudage à l'arc, le courant circule à travers un conducteur qui relie le poste de soudage à l'électrode. Il forme un arc électrique en traversant l'espace libre entre l'électrode et le métal de base, puis il poursuit sa course en passant par le câble de masse pour retourner au poste de soudage [12].

Un arc électrique est donc un gaz ionisé dans lequel circule un courant électrique ; l'arc se forme entre la pointe de l'électrode et la pièce à souder, comme l'illustre la figure II.3.

Dans un procédé de soudage à l'arc, on utilise aussi souvent un flux solide ou en poudre ou un gaz, qui sert à protéger le bain de fusion de l'air ambiant [12].

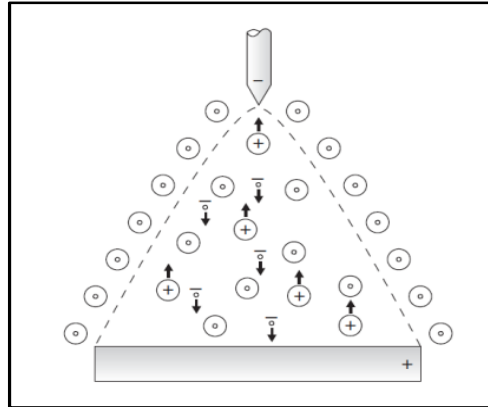


Figure II.3 : Principe d'un arc électrique [12]

II.3.1. Procédé SMAW (Shielded Metal Arc Welding)

Le soudage manuel avec électrode enrobée est surtout utilisé pour toute sorte de petites soudures, des petites séries, de la géométrie non standard etc. La portabilité et le faible coût de l'équipement sont les avantages de cette méthode. Principalement, des aciers de construction non et faiblement alliés et, pour une moindre part, les aciers inoxydables sont soudés avec les électrodes enrobées.

Le procédé SMAW est très populaire, entre autres dans certaines tâches spécialisées telles que, par exemple, des récipients et des tuyaux sous pression, des réservoirs de stockage, des ponts et des bâtiments ou des navires et des wagons. Il offre une bonne mobilité et la possibilité de souder à l'extérieur sans précaution particulière, notamment pour effectuer des réparations ou du travail sur un chantier.

Le procédé de soudage à l'arc avec électrode enrobée est relativement simple. Un poste de soudage est connecté à une électrode enrobée et à une pièce de métal à souder, ce qui provoque la création d'un arc électrique, libérant l'énergie nécessaire pour fondre le métal d'apport (contenu dans l'électrode) sur le métal à souder (figure II.4). Le flux recouvrant l'électrode sert à protéger le bain de fusion de la contamination atmosphérique [12].

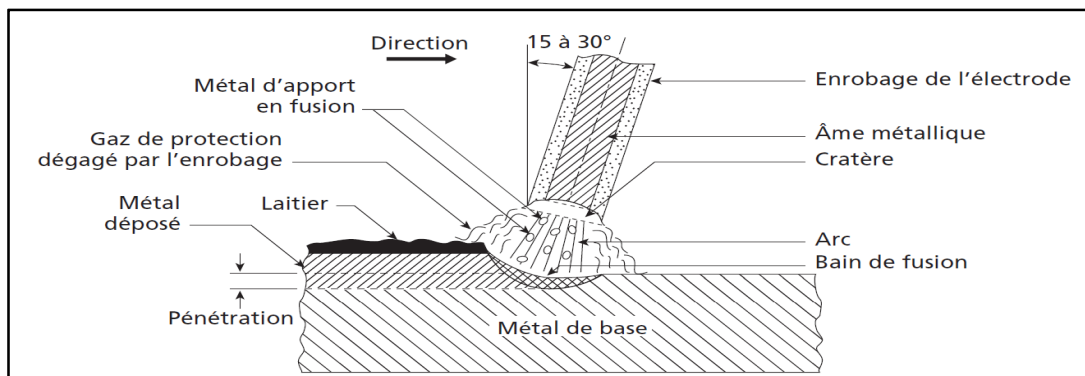


Figure II.4 : Principe de soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW) [12]

II.3.2. Soudage à l'électrode Réfractaire (TIG)

Le soudage à l'électrode réfractaire est communément appelé soudage TIG (Tungsten Inert Gas). Dans les pays anglo-saxons, on le désigne également par GTAW ou Gas Tungsten Arc Welding . On le désigne souvent en France par soudage à l'argon. [20]

Ce procédé utilise une électrode réfractaire en tungstène, placée dans l'atmosphère d'un gaz inerte, tels l'argon, l'hélium ou l'hydrogène, ce gaz protège le métal de l'oxydation. La chaleur de l'arc formé entre l'électrode et le métal fait fondre les bords du métal. On peut ajouter un métal d'apport à la soudure, sous la forme d'une barre métallique nue au niveau de l'arc ou du point de soudure. Ce procédé peut s'appliquer, quasiment, à tous les métaux et produit une bonne qualité de soudure. Néanmoins, la vitesse de soudage est beaucoup plus lente que dans les autres procédés (figure : II.5) [19]

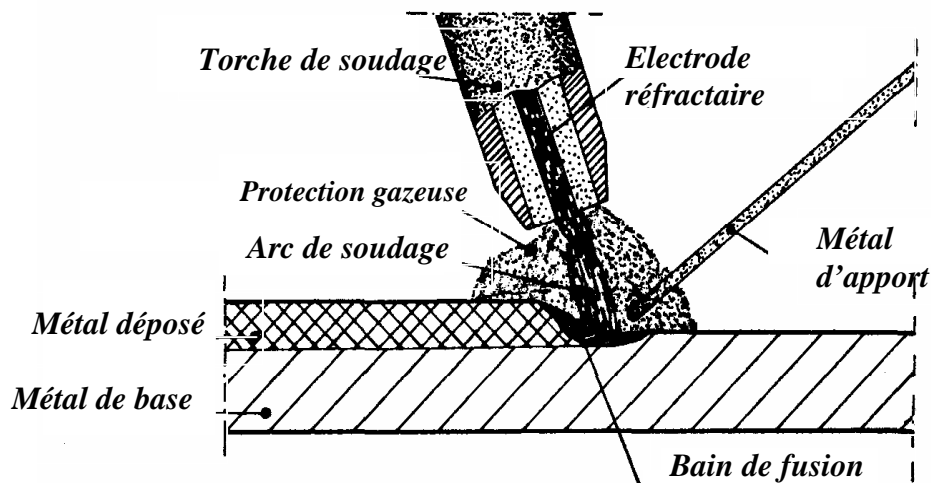


Fig. II.5: Procédé de soudage T.I.G.

II.4. Les paramètres de soudage SMAW

II.4.1. Préchauffage / interpasses

Dans la zone affectée thermiquement peut se former une structure très dure si l'on dépasse une certaine valeur de carbone (C). Ce « durcissement » dans la ZAT est d'autant plus élevé, que la vitesse de refroidissement dans cette zone est rapide, c'est-à-dire que plus la zone de soudage est importante et chaude et sera refroidie par la zone avoisinante. Le préchauffage a pour objectif de réduire ce « durcissement », et l'on doit respecter la température de travail des aciers avant l'opération de soudage. Plus il est préchauffé haut en température, sa vitesse de refroidissement sera lente. En opérant de la sorte, on évite la formation de zones dures, fragiles et sensibles à la fissuration [13].

II.4.2. L'électrode

L'électrode est une baguette qui comporte une âme métallique (métal d'apport) et un enrobage, l'électrode joue le rôle de la cathode.

Il existe trois types d'électrodes enrobées utilisées pour le soudage SMAW. On trouve des électrodes basiques, rutiles et cellulosiques. Chaque électrode contient le métal d'apport en son centre et est recouverte d'un flux.

- L'âme métallique comporte des éléments d'alliage qui doivent assurer une grande part des caractéristiques désirées de la soudure, elle conduit le courant, apporte le métal et forme le cordon.
- L'enrobage entoure l'âme métallique, c'est un mélange complexe [14] :
 - Minerais (Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , Fe_2TiO_3 ,.....)
 - Silicates (KAlSiO_2 , KAlSi_3O_3 ,.....)
 - Du graphite.
 - Des bases (CaCO_3 , MgCO_3 ,.....)

L'enrobage joue plusieurs rôles [15] :

- **Rôle électrique** : libérer des électrons.
- **Rôle métallurgique** : émettre des gaz et des vapeurs qui chassent l'air et limitent le risque d'oxydation.

En se diluant dans le cordon l'enrobage peut être une autre source d'élément d'alliage.

- **Rôle mécanique** : comme la température de fusion de l'enrobage est inférieure à la température de fusion de l'âme, l'enrobage joue le rôle d'un canal à l'âme en fusion ce qui procure une bonne qualité du cordon.

Le type de métal de base, la position de soudage, l'aspect du cordon désiré, la pénétration de soudage nécessaire sont des facteurs à considérer lors du choix de l'électrode. Les enrobages ne sont pas tous de la même épaisseur et cela influence le cordon de soudure produit [12].

II.4.3. L'énergie de soudage

L'apport d'énergie contrôle la chaleur générée par soudage et il est en relation avec le courant, la tension et la vitesse de soudage. On peut calculer ce rapport en utilisant l'équation suivante [15]:

$$E = \frac{U * I * 60}{V * 1000}$$

Où E = entrée d'énergie (kJ / mm)

U = tension (V)

I = courant (A)

v = vitesse (mm / min.).

II.5. Structure d'une soudure

L'opération de soudage est assimilable à une opération locale d'élaboration métallurgique. L'effet local du cycle thermique (fusion des métaux de base et d'apport) provoque une modification de la structure cristalline qui dépend à la fois de la composition chimique (pourcentage de carbone, de chrome, de silicium,...) et de la vitesse de refroidissement, la soudure ainsi réalisée comporte plusieurs zones (Fig. II.6) [15] :

1. La zone du métal de base :

Le métal n'a pas été porté à une température suffisante pour subir une transformation de structure. L'opération de soudage n'a aucune conséquence métallurgique sur cette zone.

2. La zone affectée thermiquement :

ZAT, ($T^{\circ} > A_{c3}$) se trouve en bordure de la zone fondue, sur une largeur plus ou moins importante, la ZAT a été soumise à l'élévation de température sans être portée à fusion, la vitesse de refroidissement conditionne la structure cristalline de cette zone [15].

3. Zones fondues :

- ❖ La zone de liaison :

Partie du métal de base participant à la réalisation du joint. Son volume détermine le taux de dilution.

❖ La zone fondue :

Zone de remplissage dont la section dépend directement de la nature du chanfrein et de l'épaisseur à souder.

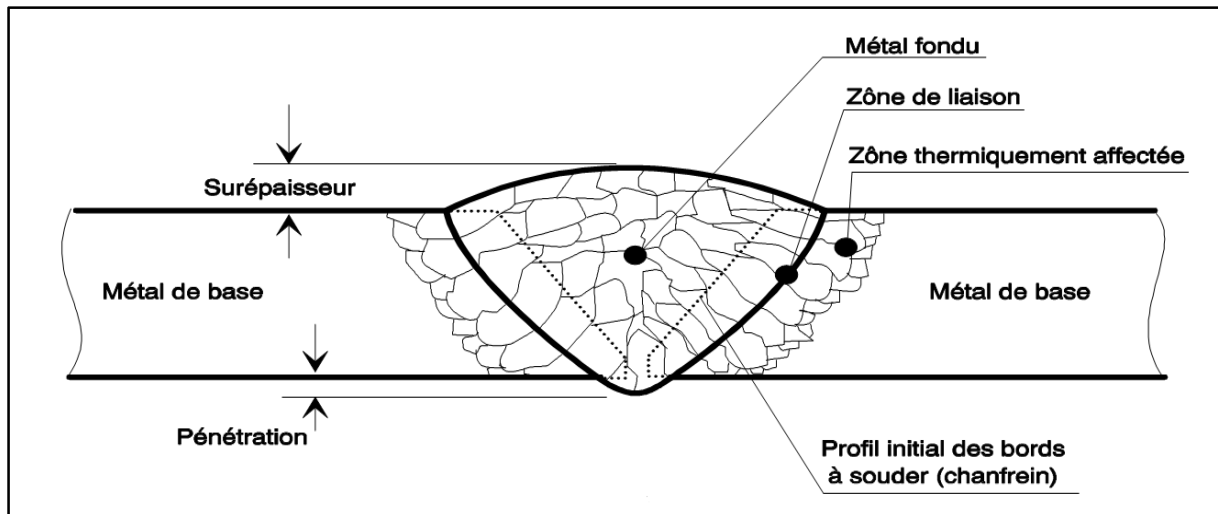


Figure II.6 : Structure d'une soudure [17]

II.6. La formation de la zone affectée thermiquement (ZAT)

D'après les observations, on peut identifier dans la zone affectée thermiquement deux zones bien différentes au niveau du comportement mécanique :

- ❖ La zone à gros grains, C, adjacente au métal fondu possède une structure bainitique formée à partir de grains d'austénite d'environ $50\mu\text{m}$ de diamètre, qui peuvent contenir des composés martensite-austénite résiduelle (zone 1, 2 et 4 de la Figure II.7);
- ❖ La zone à grains fins, F, possède une taille de grains d'austénite initiale d'environ 2 à $20\mu\text{m}$ de diamètre (zone 2 de la Figure II.7)

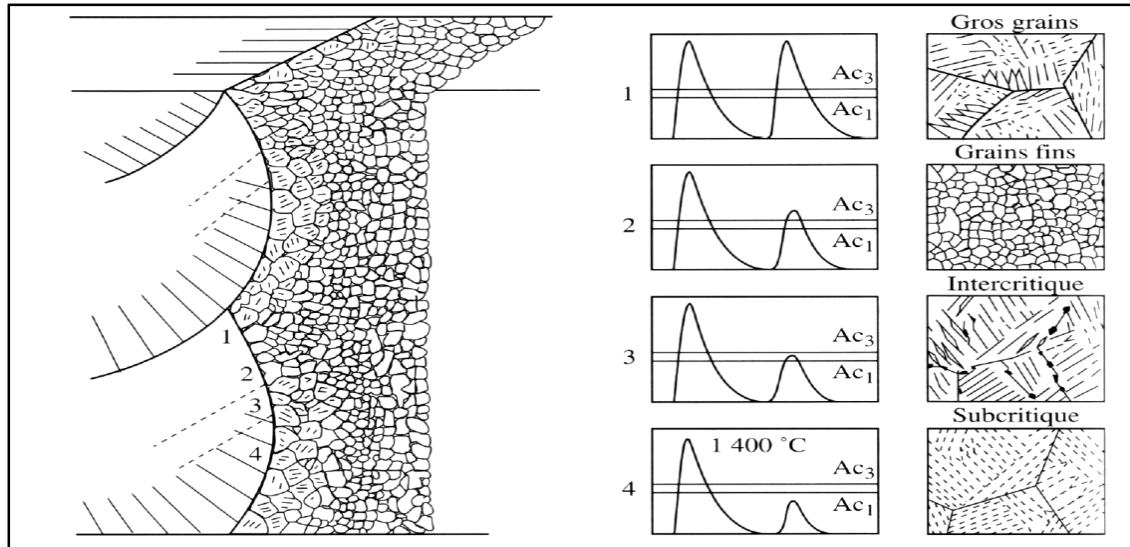


Figure II.7 : Différents types de microstructures en ZAT en fonction des cycles thermiques, D'après [17,18]

Pour mieux comprendre l'existence de la ZAT, considérons par exemple, le cas du soudage mono-passe d'un acier à 0,15 % de carbone. Le diagramme de phases à l'équilibre utilisé ne permet pas de prévoir la nature des phases au voisinage de la ligne de fusion, mais permet de raisonner qualitativement sur les modifications structurales.

En se rapprochant du métal fondu, on trouve une succession de zones (Figure II.8) :

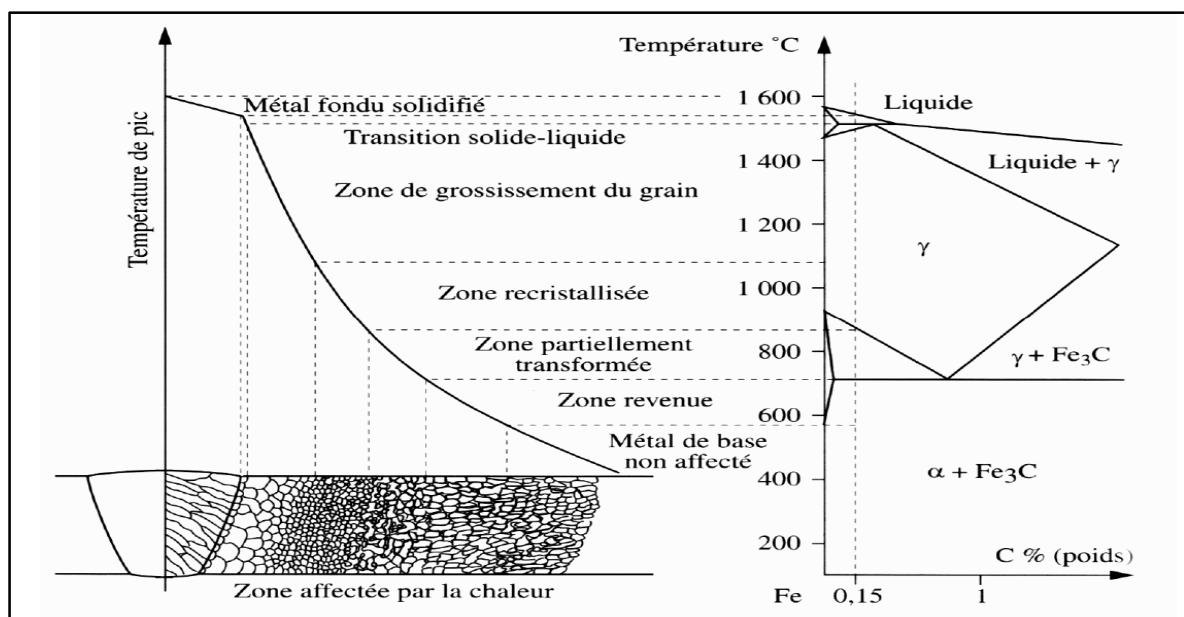


Figure II.8 : Présentation schématique des différentes parties constitutives d'un joint soudé, d'après [16,18]

- Le métal de base n'ayant pas subi de transformation de phase au chauffage, c'est-à-dire ayant été chauffé à une température inférieure au point de transformation AC_1 (727 °C) A l'équilibre, il s'agit donc d'une structure composée de ferrite et de carbures de fer Fe_3C (ou cémentite) ou plus précisément de perlite, agrégat lamellaire de ferrite et de cémentite.
- Une zone subcritique, où l'on ne constate pas encore de changement de phase. Cependant, lorsque la température atteinte est suffisamment importante (par exemple $>600^\circ C$), certains Phénomènes tels que le revenu, la globalisation des lamelles de cémentite, la recristallisation dans le cas de soudage sur produit écroui.
- Une zone de transformation partielle (ou intercritiques), portée entre AC_1 et AC_3 ($\sim 830^\circ C$) pour la composition considérée. Dans ce domaine coexistent la ferrite et une phase nouvellement formée, l'austénite, C'est à partir de cette zone ($> AC_3$) que débute la zone affectée par la chaleur.
- A partir de la température AC_3 et jusqu'à $1495^\circ C$ environ, la transformation en austénite est totale. La nouvelle structure ainsi formée remplace et « efface » toute trace de la structure ferritique antérieure. C'est au sein de cette zone qu'intervient un grossissement du grain austénitique: de très petite taille à des températures légèrement supérieures à AC_3 , celui-ci peut atteindre quelques centaines de microns pour les plus hautes températures. Dans ce cas, on parle de zone à gros grains, (par exemple lorsque la taille du grain austénitique excède quelques dizaines de microns).
- Une zone portée partiellement à l'état liquide, où coexistent une phase ferritique solide δ et une phase liquide. De très petite taille (et donc difficile à observer micro graphiquement), cette zone constitue la zone de liaison entre le métal de base et le métal fondu. Sur le diagramme d'équilibre, celle-ci correspond à l'intervalle de température entre le début et la fin de la fusion (intervalle solidus-liquidus).

II-7.Choix des matériaux à souder :

II-7-1-Choix du métal de base :

Le choix du métal de base n'est abordé ici que sous le seul aspect de la soudabilité; il ne s'agit donc pas du choix de la nuance de l'acier qui est fait par le bureau d'étude, lors du dimensionnement de la construction. Les méthodes, permettant de choisir le métal de base, ne prennent généralement en compte que le risque de rupture fragile, les autres aspects de la soudabilité étant supposés envisagés au cours de l'exécution des assemblages.

II-7-2-Choix du métal d'apport :

Le métal d'apport doit être choisi de manière telle qu'il permette d'obtenir des joints présentant un maximum d'homogénéité, sur le plan des propriétés mécaniques, de la composition chimique et des structures métallurgiques. Il est cependant difficile d'obtenir une homogénéité complète, étant donné les différences d'élaboration du métal fondu et du métal de base : le métal fondu présente en effet les propriétés d'un métal brut de coulé tandis que les propriétés du métal de base dépendent des traitements mécaniques et éventuellement thermiques qu'il a subis.

- **Choix des caractéristiques mécaniques et du type d'enrobage :**

En général, les électrodes doivent être choisies en fonction de leurs caractéristiques mécaniques et de la composition chimique du métal déposé qui doit correspondre à celle du métal de base.

- **Choix de diamètre :**

Généralement le diamètre des électrodes est choisi selon l'épaisseur des pièces soudées et de la position de soudage [19].

II-7-3.Choix du type de chanfrein :

La qualité d'une soudure dépend fortement de la bonne pénétration du premier cordon qui est elle-même influencée par l'épaisseur du méplat du chanfrein.

L'écartement des bords des chanfreins a également une influence sur la qualité du premier cordon déposé. Si cet écartement est trop petit, il risque de conduire à un manque de pénétration et d'augmenter le coût de la reprise à l'envers; par contre, s'il est trop grand, le cordon peut présenter des trous dus aux effondrements locaux du bain de fusion [19,14].

II.8. Soudage des aciers inoxydables duplex

La diversité des applications des aciers inoxydables (et surtout les aciers inoxydable duplex) nécessitent l'utilisation de procédés de soudage très divers tels que les procédés de soudage à l'arc, les procédés de soudage à haute densité d'énergie et même des procédés de brasage.

La diversité des aciers inoxydables existants nécessite une bonne connaissance de leur soudabilité métallurgique afin de choisir le procédé de soudage le plus adapté. Les aciers inoxydables austénitiques peuvent poser des problèmes de fissurations à chaud, les aciers inoxydables ferritiques sont sensibles au grossissement de grains, les aciers austéno-ferritiques nécessitent certaines précautions de soudage, les aciers inoxydables à durcissement structural sont l'objet de pertes importantes de leurs caractéristiques mécaniques après soudage. Un choix adéquat des procédés et des procédures de soudage peut éviter des nombreux problèmes.

II.9. Diagramme de Schaeffler

La composition chimique d'un cordon de soudure dépend des compositions chimiques des métaux d'apport et des métaux de base, ainsi que de la proportion de chacun de ces métaux.

La structure cristalline dépend de la forme des cristaux dans le cordon de soudure, des conditions de refroidissement, d'un traitement thermique éventuel après soudage.

Le diagramme de Schaeffler permet de choisir un métal d'apport et de garantir de bonnes qualités métallurgiques. Le diagramme de Schaeffler permet aussi de prévoir les risques métallurgiques pour l'assemblage.

Il est présenté avec en abscisses l'équivalent Chrome (EqCr), et en ordonnées l'équivalent Nickel (EqNi).

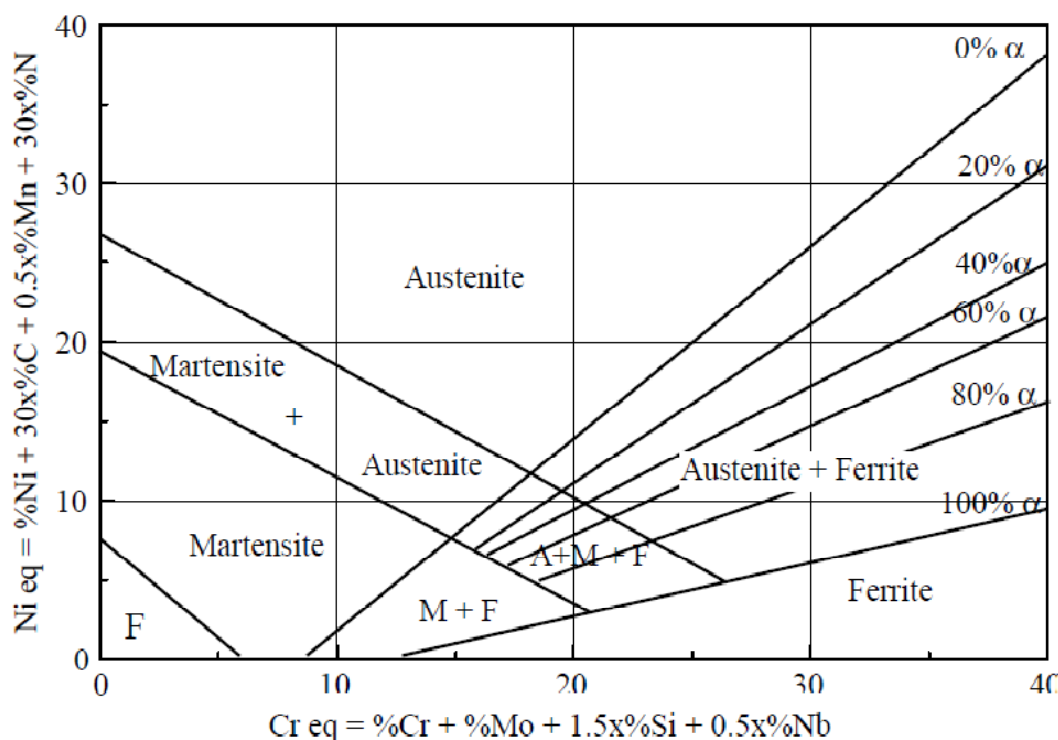


Figure II.9. Diagramme de Schaeffler [20]

Le diagramme de Schaeffer est divisé en 4 zones qui représentent les différentes structures rencontrées pour le soudage des aciers inoxydables.

Ces différentes structures sont :

- 1) La martensite (M)
- 2) L'austénite (A)
- 3) La ferrite (F)
- 4) L'austéno-ferrite (A+F)

C'est sur la base de la classification des éléments d'alliages en éléments alphagènes et gammagènes que Schaeffler a pu développer des formules par les quelles les éléments de chaque groupe peuvent être exprimés en tant qu'équivalents Cr ou Ni.

- Equivalent chrome : $\% \text{Cr} + \% \text{Mo} + 1,5 (\% \text{Si}) + 0,5 (\% \text{Nb})$
- Equivalent nickel : $\% \text{Ni} + 30 (\% \text{C}) + 0,5 (\% \text{Mn}) + 0,3 (\% \text{N})$

Les régions du diagramme représentent les microstructures qui peuvent être observées pour chaque classe d'aciers inoxydables. La méthode de Schaeffler permet cependant une évaluation sommaire de la microstructure comme fonction de la composition de l'acier, elle ne tient pas compte de l'influence de la vitesse de refroidissement et de la durée des traitements thermiques [21].

III.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les techniques expérimentales que nous avons utilisés pour caractériser les joints de soudure obtenus à la fois à l'état initial.

Plusieurs techniques ont été mises en œuvre pour estimer l'évolution des propriétés mécaniques des soudures pour différentes intensités.

III.2. Matériau de base

L'acier étudié est le X2CrNiMoN 25-7-4 (SAF2507), On l'utilise pour les conduites de transport d'hydrocarbure et de gaz, il se présente sous la forme d'un tube de 6'' (168.3 mm) et de 7.5 mm d'épaisseur (Tableau.1.), il répond au critère de la spécification technique ASME B31 [22].

L'analyse chimique de matériau a été faite au niveau de la base centrale logistique de Beni Merad –Blida (B.C.L) :

Elément	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	W
(%)	0.031	0.380	0.56	0.034	0.010	25.26	7.33	3.81	0.0037	0.59	0.469
Elément	V	Nb	Ti	Co	Sb	B	Zr	Sb	Sn	Zn	Zr
(%)	0.055	0.066	0.0074	0.054	0.018	0.0025	0.008	0.017	0.0074	0.022	0.0083
Elément	Pb	Mg	Ce	Ca	La	Se	N	Fe			
(%)	0.002	0.033	0.026	0.008	0.004	0.002	0.166	61.0			

Tableau III.1 : Composition chimique de SAF2507 en %



Figure III.1: représentation du Pipe étudié

III.3. Métal d'apport

Le matériau de base va être soudé à l'arc électrique en 03 passes par deux procédés de soudage avec un métal d'apport de type 308L de diamètre de 2.5mm, de manière permettant d'obtenir des joints avec un maximum d'homogénéité de la structure métallurgique (Tableau III.2).

Elément	C	Si	Mn	Ni	Cr	P
308L	0.019	0.46	1.72	10.10	20.25	0.013

Tableau III.2 : Composition chimique du matériau d'apport 308L en %

III.4. Préparation des échantillons

Avant de passer par la procédure de soudage, il faut passer par l'étape de chanfreinage selon la norme ASME [23] (fig III .2).

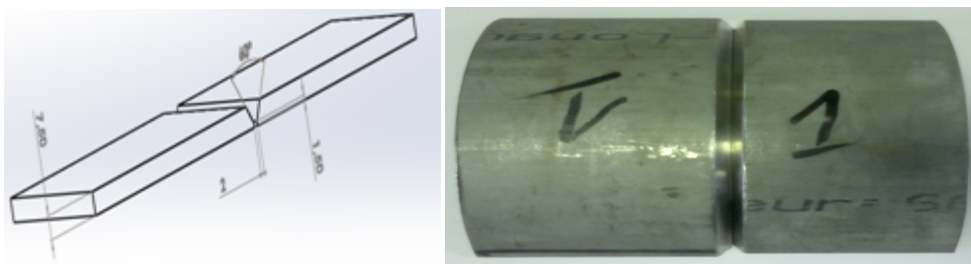


Figure III.2 : Chanfreinage

III.5. Paramètres de soudage

Nous avons utilisé deux procédés de soudage TIG (Paramètres fixes) pour la première passe et SMAW la deuxième et la troisième passe.

On a découpé notre pipe en six échantillons pour faire varier l'intensité de courant de six Intensité différentes de procédé SMAW, tout on essaye de fixer les autres paramètres.

Le tableau suivant (Tableau III.3) donne les principaux paramètres de TIG utilisée dans notre étude.

Procédé	Tension(V)	Intensité(A)	Vitesse de soudage (mm/min)	Fréquence (Hz)	Début de gaz (l/min)
TIG	12	75	66	50	5

Tableau III.3 : Paramètres de soudage (TIG)

Le tableau suivant (Tableau III.4) donne les principaux paramètres de SMAW. L'électrode est consommée à différentes vitesses choisies, le laitier du métal fondue, La source du courant alterné et la vitesse d'avance du fil est considéré constante pour chaque passe.

Échantillons	E1	E2	E3	E4	E5	E6
Intensité moyenne : I_{moy} (A)	60	80	100	120	135	150
N° passes	02	02	02	02	02	02
Temps d'interpasse (s)	180	180	180	180	180	180
Tension moyenne (V)	25	27	30.5	32	35	37.5
Vitesse de soudage (mm/min)	59.33	83.43	106.5	115.05	127	140.6
t (s)	90.5	65.3	50.4	46.6	42	38.2
Énergie de soudage (KJ/mm)	1.5	1.65	1.72	2.01	2.23	2.37

Tableau III.4 : Paramètres de soudage (SMAW)

III.6. Métallographie optique

La métallographie optique permet d'obtenir des microstructures des zones soudées, telles que la texture, la dimension des grains et les différentes phases présentes.

L'obtention des surfaces pour l'observation métallographique nécessite une suite d'opérations allant du prélèvement des échantillons jusqu'à l'attaque chimique. Après le

découpage nous passons les échantillons sur une polisseuse à papier abrasif. C'est une opération mécanique qui permet d'avoir des états de surface semblable à celui d'un miroir.

Dans un premier temps, nous faisons un prépolissage qu'il s'effectue en plusieurs étapes avec des papiers à grains abrasif de plus en plus fins (180, 400, 600, 800, 1200, 2400 et 400) qui tourne avec une vitesse de 150 tr/mn, cette opération se fait sous eau pour éviter l'échauffement de l'échantillon.

Le polissage de finition est un polissage à grains d'alumine à une granulométrie de 0.5 μm , l'alumine soit répartie sur le papier feutre. Après chaque polissage les échantillons sont nettoyés de tout résidu.

Le réactif chimique utilisé pour notre acier (acier fortement allié au Cr) est le glycéro-nitrique (10ml d'acide nitrique, 30 ml d'acide HCl et 30ml de Glycérol) une fois étalée sur la surface de l'échantillon, un temps de maintien de 20 à 30 seconds est respecté; cette opération doit être suivie d'un rinçage à l'eau distillée.

Pour les observations, nous avons utilisés un microscope optique, de type "Leitz" (figure III.3) d'un grossissement allant jusqu'à 1000. Ce microscope est relié à l'ordinateur avec logiciel d'acquisition et de traitement d'image.



Figure III.3: Microscopie optique de type leitz

III.7. CARACTERISATIONS MECANIQUES

III.7.1. Profils de Micro-dureté Vickers

Afin d'évaluer le comportement mécanique des zones affectées thermiquement (ZAT), les plaques soudées ont été caractérisées par un profil de microdureté Vickers. Les profils dans ce cas concernent également le métal de base. Les échantillons prélevés pour ces analyses sont de 100 mm de longueur centrée autour de la ZAT.

L'appareil utilisé est un micro-duromètre de type « HWDM-1 » relié à un ordinateur avec un logiciel d'acquisition d'image "C.A.M.S" qui se trouve au niveau du Laboratoire de la division de métallurgie de Centre de Soudage Cheraga.

Les conditions opératoires sont les suivantes :

- ❖ La surface à étudier doit être préparée (polissage et attaque chimique).
- ❖ La charge appliquée (200 gf) progressivement sans chocs, ni vibrations est maintenue à sa valeur finale pendant 20 secondes.
- ❖ En déplaçant la tête avec un pas de 0.5mm lorsque la pointe est située dans la zone affectée thermiquement (ZAT) et 1mm lorsqu'elle se déplace dans le métal de base de part et d'autre de la ZAT.

A noter que pour chaque échantillon trois profils de micro-dureté de largeur et de pas identique ont été réalisés.

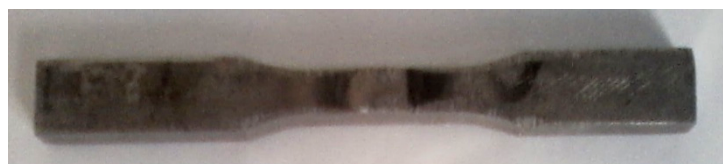
III.7.2. Essai de traction

L'essai de traction constitue un des essais les plus utilisés pour la caractérisation mécanique des soudures. Etant purement uniaxial, il permet de déterminer de nombreuses grandeurs normalisées, comme la contrainte à la rupture, la contrainte maximale, l'allongement à la rupture, etc. nécessaires dans les calculs de structure.

Les essais de traction ont été réalisés au niveau du Laboratoire de (B.C.L base centrale logistique de beni merad w de blida). Un montage approprié à la détermination de la loi de comportement en traction axiale nécessite des efforts (perpendiculaire à la soudure) et de mise au point des différents éléments composant ce montage (les mores, le réglage ...).

On dispose pour ces essais d'une machine de traction hydraulique de type « MAB » reliée à un logiciel approprié « MERLIN INSTRO ».

Pour cet essai nous avons confectionnés les éprouvettes de traction selon [24] voir figure III.4.



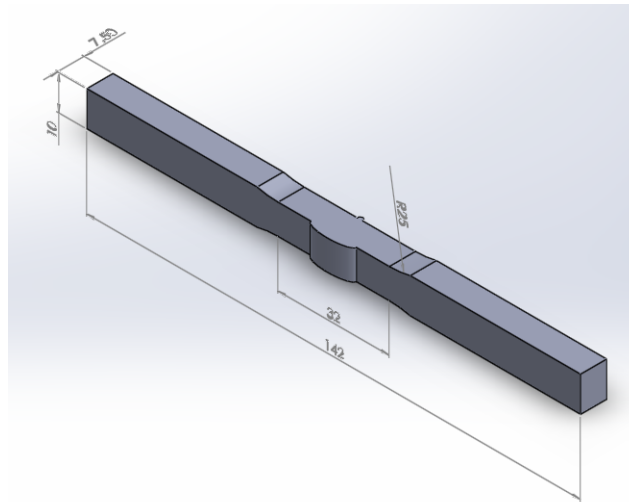


Figure III. 4 : *Éprouvettes d'essais de traction [25]*

III.7.3. Essai de résilience

L'essai qui demeure le plus utilisé pour évaluer la sensibilité à la rupture fragile au niveau des joints soudés est l'essai de résilience. Il présente l'avantage d'être très simple et qui portant sur des éprouvettes un entaille de petites dimensions (figure III.5) offre la moyenne d'une détermination localisée et permet donc d'effectuer des comparaisons en fonction de la position de l'entaille au sein de la soudure essayée [25].

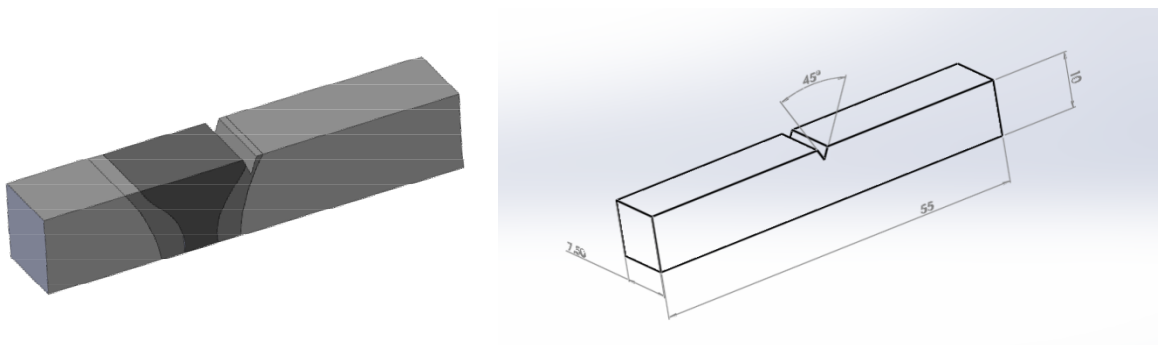


Figure III.5 : *Éprouvette de résilience avec entaille [25]*

L'essai de résilience, effectué sur un appareil appelé mouton pendule ou mouton de Charpy (Figure.III.6), mesure l'énergie consommée lors de la rupture forcée d'une éprouvette avec entaille (Figure III.5). Ceci se fait typiquement en mesurant la perte d'énergie d'un pendule qui est lâché en chute libre et qui casse éprouvette et suivre son chemin, cette perte d'énergie s'appelle « résilience » d'un matériau.

Elle est définie par :

$$\text{Résilience} = \frac{\text{Energie absorbée par la rupture [Joule]}}{\text{Section au droit de l'entaille [cm}^2\text{]}}$$

La machine d'essai est un mouton pendule de type 'PSW', il sert à conduire des essais de résilience par choc selon CHARPY (Figure.III.6).

Le mouton pendule a une puissance de travail égale à 300 joules avec un angle de levage max (α angle de frappe) égale à 160° , il pèse 20,394 Kg, la longueur du bras de $L=770\text{mm}$. Le mouton pendule se compose de la cabote en fonte, de roulement à friction réduite pour le pendule et du bras de levage avec déclenchement de sécurité (manœuvré à l'aide des deux mains).

Après rupture de l'éprouvette, le mouton pendule qui n'est pas encore stabilisé est arrêté à l'aide du frein électromagnétique en actionnant le bouton poussoir. L'énergie dépensée pour rompre une éprouvette est donnée par la formule [13] :

$$W = M \cdot g \cdot L \cdot (\cos\alpha - \cos\beta) \quad [\text{J}]$$

$$\text{KCV} = W/S \quad [\text{J/cm}^2]$$

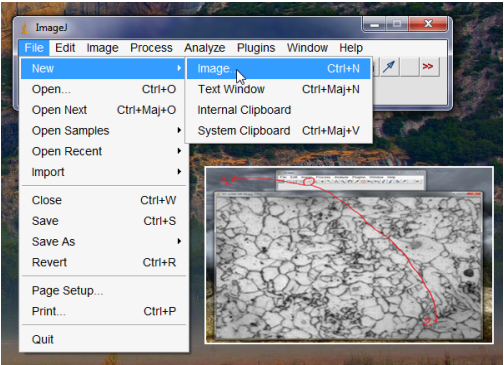
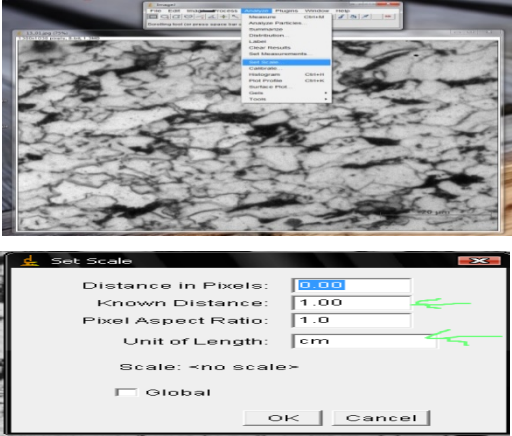
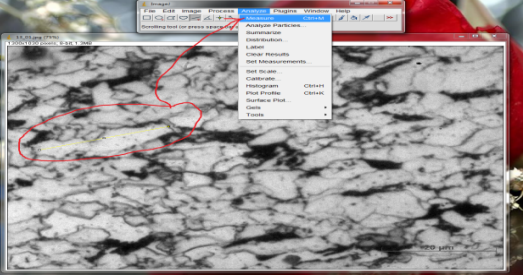
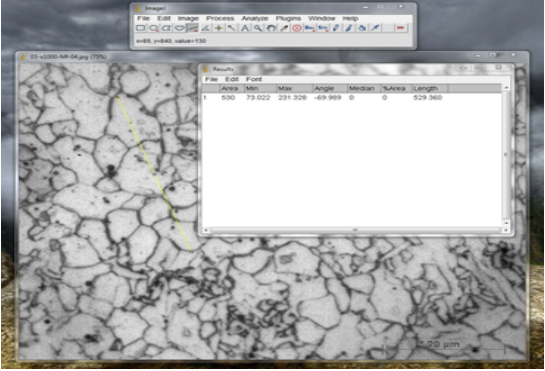
Cette énergie dans notre machine est donnée directement sur un écran gradué.



Figure III.6 : Mouton pendule ou mouton de Charpy

III.8. METHODE DE CALCUL DE LA TAILLE DES GRAINS

C'est une étude quantitative à l'aide d'un logiciel 'IMAGE J'. Pour calculer la taille des grains à partir de ce logiciel, on suit les étapes suivantes :

Etape	Représentation
<p>le choix des images : il faut un grossissement de 1000μm ou plus, pour des calculs très précis.</p> <p>la forme des images doit être soit : Tiff ou Bip</p> <p>File / open / sélectionné la photo/ ouvrir</p>	
<p>Dès qu'on a la photo on doit calibrer l'échelle</p> <p>ANALYZE / SET SCALE /</p> <p>Puisque on a 100 μm, on introduit cette valeur dans la deuxième case 'known distance'.</p> <p>Et l'unité c'est le μm pas le cm donc on remplace le cm par le μm dans la quatrième case 'unit of length'.</p>	
<p>Donc on peut mesurer la taille de n'importe quel grain.</p>	
<p>Quand on appuis sur 'measure' on aura un tableau qui affiche le résultat, dans ce cas, la longueur de grain par exemple.</p> <p>Pour calculer la taille moyenne on sélectionne un segment qui contient un certain nombre de grains et on divise la longueur de ce segment par le nombre de grains qu'il contient; pour avoir la taille moyenne.</p>	

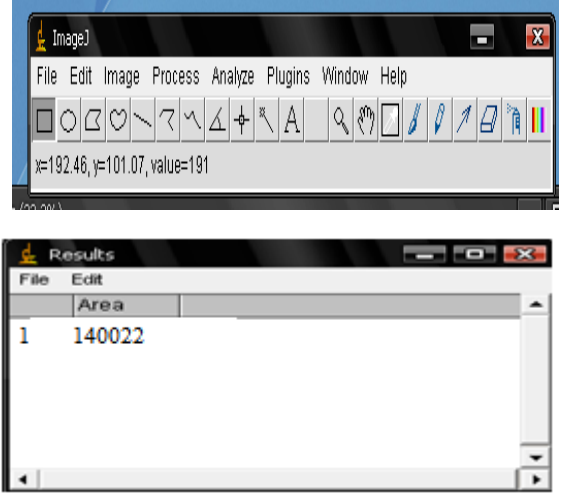
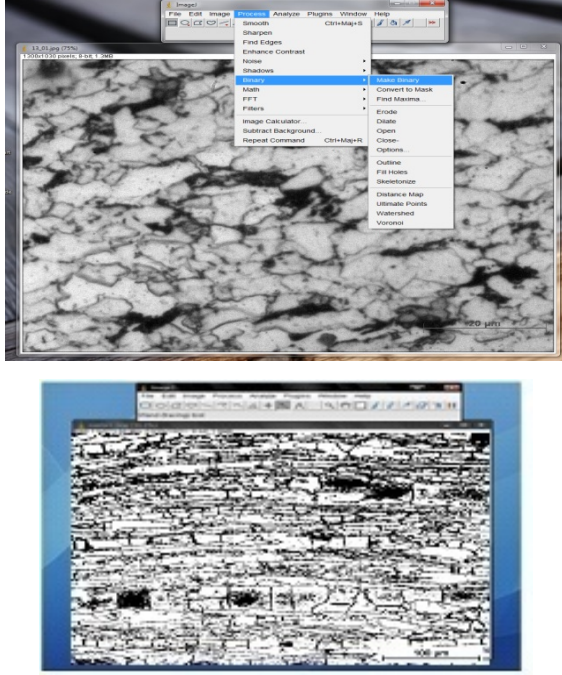
<p>Pour avoir la surface on sélectionne la première case et on appuis sur la photo comme suite :</p> <p>Analyze / Measure</p> <p>On aura le tableau des résultats.</p> <p>Dans notre cas la surface est :</p> <p style="text-align: center;">$140022 \mu\text{m}^2$</p>	
<p>Pour calculer la fraction massique : on va jouer sur le contraste pour avoir seulement deux couleur ça nous permet d'identifier les deux phases dont on va calculer leur fraction</p> <p style="text-align: center;"><i>Process / binary / threshold.</i></p> <p>Pour calculer la fraction massique de la phase noire on sélectionne la 10^{ème} case comme suit :</p> <p style="text-align: center;">Et pour afficher le résultat :</p> <p>Pour avoir la fraction on devise la surface de la phase noire par la surface totale.</p>	

Tableau III.5 : Démonstration des étapes de calculs par Image J

IV.1. INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré à l'étude expérimentale d'acier SAF 2507 et les différents résultats relatifs à la micrographie et aux essais mécaniques. Le chapitre est structuré comme suit :

En premier lieu, on fait une vision générale sur l'état de matériaux ainsi le cordon de soudure, ensuite, on s'intéresse à la micrographie réalisée par un microscope optique pour avoir des images micrographiques montrant les différentes phases, la taille et l'orientation des grains ; pour pouvoir ensuite les comparer avec les résultats obtenus à l'aide des essais mécaniques (micro dureté, résilience et traction).

IV.2. EXAMENS MACROGRAPHIQUES

L'examen macrographique révèle l'existence de trois zones dans les six échantillons soudés (figure IV.1), à savoir :

- ❖ La zone de métal fondue MF
- ❖ La zone affectée thermiquement ZAT
- ❖ Le métal de base MB

IV.2.1. La morphologie des joints de soudure:

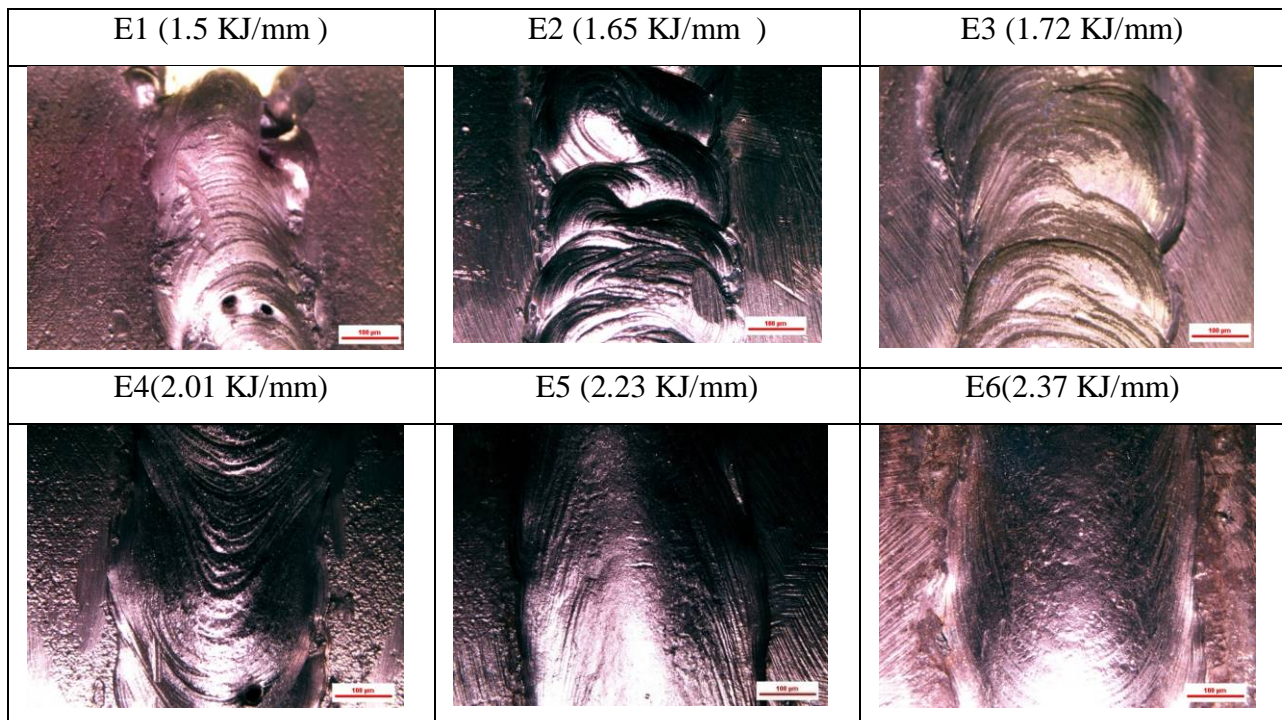
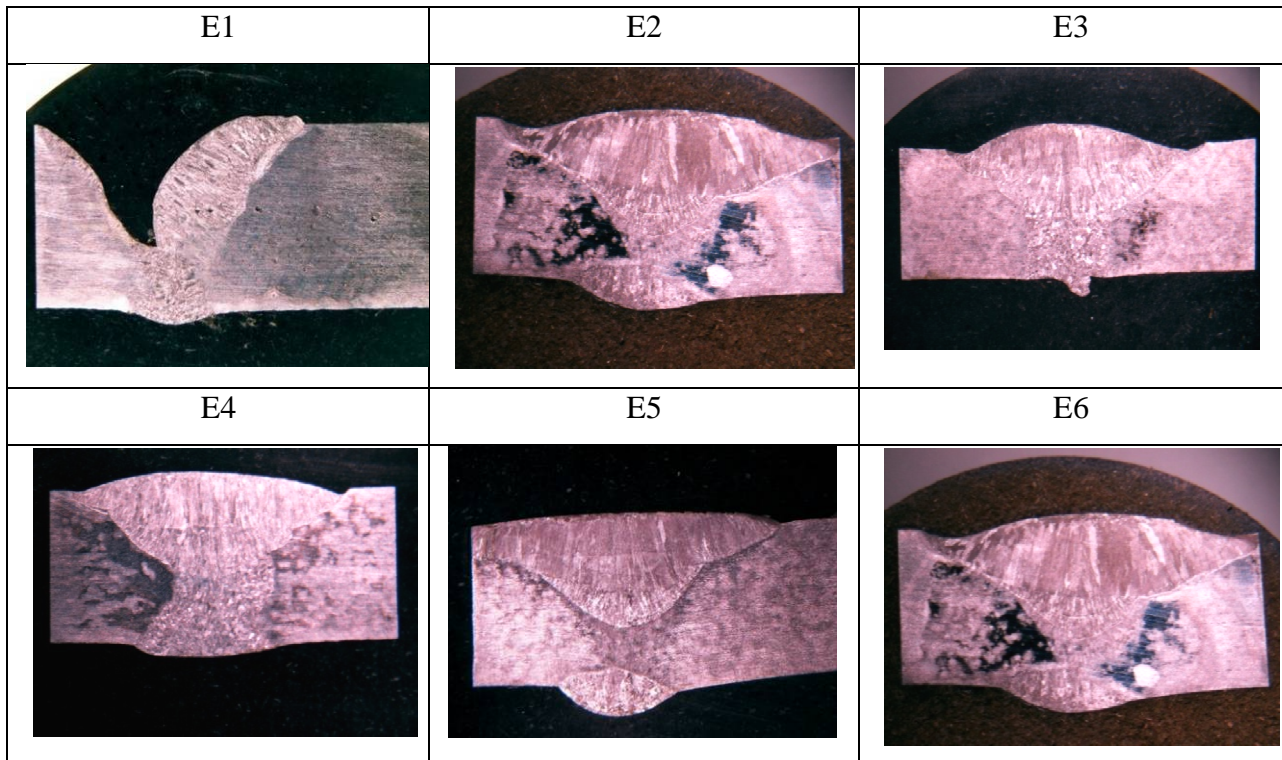


Figure IV.1: Morphologie des joints de soudure

- Les cordons obtenus sont généralement des formes de surface très distinctes. L'aspect de surface est homogène tout au long de chaque cordon. Sur l'E1, la surface du cordon est souvent perturbée. On a détecté la présence de caniveaux, des porosités et de projections de matière entraînant des surépaisseurs locales. Ce phénomène est lié à la manque de fluidité de métal d'apport qui présente un aspect de surface rugueux.
- Dans l'E2, le bain de fusion s'effectue par des bandes spirales, et chaque fois en augmente l'énergie de surface ces bande vont disparaître, et la forme du bain de fusion devient plus allongé.
- Avec l'augmentation d'énergie de soudage qui engendre la facilité de dissous de l'arc L'E6 a une viscosité de métal fondu considérable.

IV.2.1. La macrographie des coupes transversales des joints de soudure :



Figures IV.2 : Macrographie d'éprouvettes

Ces examens nous permis de conclure que, le cordon de soudure a une pénétration satisfaisante et il exempt de défaut, ils confirment les examens visuels qui dévoile un cordon régulier et de beau aspect.

Remarquons que :

- Il manque de métal à la surface du cordon Echantillon 1 ; ce manque est dans quelque région localisé (voir figure), ce manque correspond à un détachement difficile des gouttes de métal fondu.
- Le mode de solidification de métal fondu va suivre la croissance des dendritiques orientées vers la torche.

IV.3. EXAMEN MICROGRAPHIQUE

Le soudage peut donner lieu pour un même acier à une multitude de microstructures toutes aussi différentes les unes des autres et dans l'apparition dépend de plusieurs paramètres : procédé utilisé, emplacement de la zone étudiée par rapport au bain de fusion, épaisseur de la pièce et éventuellement de traitement thermique après soudage effectué. Ils ont pour but principal, la mise en évidence de la structure de l'échantillon et des inclusions lors de l'observation au microscope optique.

Dans le processus de soudage, La rapidité des chauffages au cours des cycles thermiques de soudage engendre un déplacement, au-dessus des conditions d'équilibre, des domaines de température dans lesquels se développent les transformations ; ce qui ne permet pas d'utiliser les diagrammes d'équilibre pour prévoir la nature exacte des différentes phases au voisinage de la ligne de fusion. Il est commode de raisonner à partir de ce type de diagramme pour interpréter qualitativement les modifications microstructurales. On se placera dans le cadre des aciers fortement alliés, en examinant le diagramme (Fe-Cr-Ni) en parallèle avec les températures maximales atteintes dans un joint soudé.

Dans notre cas ; tous les microstructures dans le métal de base (MB) sont à dominance ferrito-austénitique et la zone affectée thermiquement (ZAT) pour quelques échantillons mais dans la forme et le type de la ferrite dépend de l'emplacement de la zone étudiée par rapport au bain de fusion (zone fondue MF) (tableau IV.1).

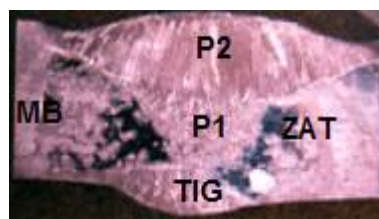


Figure IV.3 : Image montrant les zones étudiées



Figure IV.4 : Cordon TIG de l'échantillon N°1

En général, sur le reste des micrographies des échantillons soudés prises pour différentes zones montre que les énergies de soudage appliqués a une très forte influence sur la métallurgie de métal fondu et la zone affectée thermiquement (ZAT).

D'une part, le tableau IV.2 montre que : notre matériau de base a une structure biphasée composée de ferrite complétée d'environ 50 % d'austénite, la zone fondue TIG ayant une structure lamellaire de dureté de 270 Hv.

D'autre part, dans le cordon de soudure multi passe, la zone affectée thermiquement (ZAT) révèle deux zones : Une zone à gros grains (proche du métal fondu) et une zone à grains fins. La première zone à une microstructure constitue de bénite granulaire et de ferrite polygonale à gros grains.



Figure IV.5 : Métal de base

Les résultats de calcul de la taille des grains ferritique et austénitique de métal de base sont regroupés dans le tableau IV.1 :

Métal de base	
Aire totale = $140022 \mu\text{m}^2$	
Aire de ferrite = $38477 \mu\text{m}^2$	
Fraction massique de ferrite = 0.2747	
Fraction massique de l'austénite = 0.7252	
Ferrite	Austénite
$L_1 = 153 \mu\text{m}$ (6 ferrite)	$L_1 = 54.79 \mu\text{m}$ (6 Austénite)
$T_{\text{moy}} = 25.5 \mu\text{m}$	$T_{\text{moy}} = 9.13 \mu\text{m}$
$L_2 = 109 \mu\text{m}$ (5 ferrite)	$L_1 = 61.95 \mu\text{m}$ (7 Austénite)
$T_{\text{moy}} = 21.8 \mu\text{m}$	$T_{\text{moy}} = 8.81 \mu\text{m}$
$L_3 = 92 \mu\text{m}$ (4 ferrite)	$L_1 = 67.79 \mu\text{m}$ (4 Austénite)
$T_{\text{moy}} = 23 \mu\text{m}$	$T_{\text{moy}} = 16 \mu\text{m}$
$L_4 = 104 \mu\text{m}$ (3 ferrite)	$L_1 = 76.13 \mu\text{m}$ (5 Austénite)
$T_{\text{moy}} = 34.66 \mu\text{m}$	$T_{\text{moy}} = 15.22 \mu\text{m}$
Taille moyenne globale (μm)	Taille moyenne globale (μm)
26.24 μm	12.29 μm

Tableau IV.1 : Les résultats des calculs par Image j

D'après les résultats qu'on a obtenus il a été confirmé que la phase ferritique gère bien notre structure et la taille moyen de ferrite est plus grand que la taille moyen de l'austénite.

Les échantillons soudés précédemment polis sont alors attaqués chimiquement au réactif de glycérol afin de révéler leur microstructure. Chaque échantillon possède une microstructure, des tailles de grains et mode de refroidissement de métal d'apport différents, dans l'état d'énergie de soudage considéré.

La première passe par le procédé TIG (paramètre fixes) permet d'obtenir les microstructures suivantes :

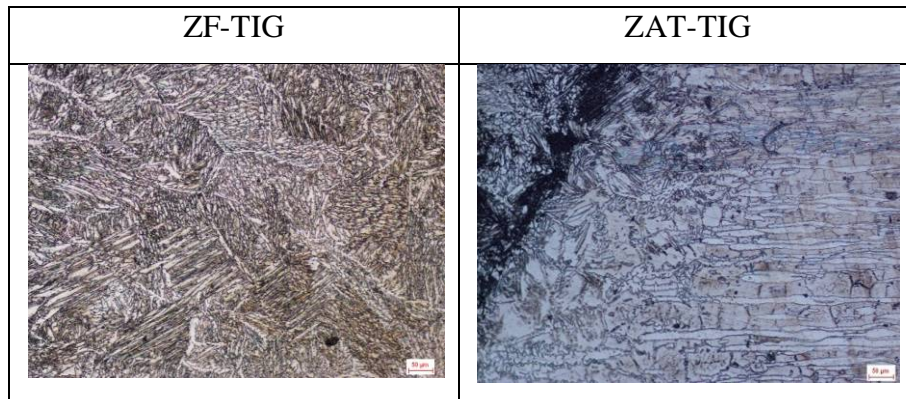

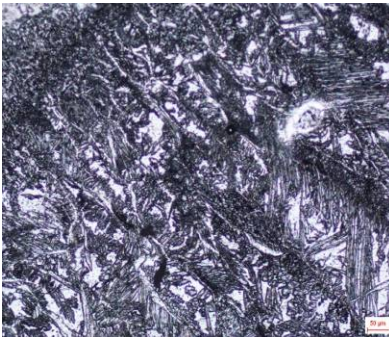

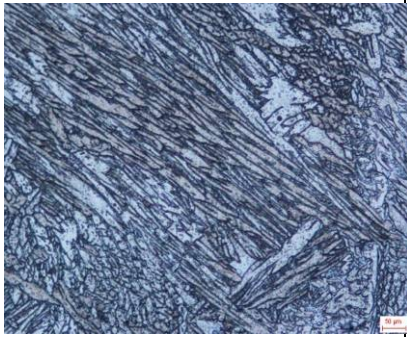
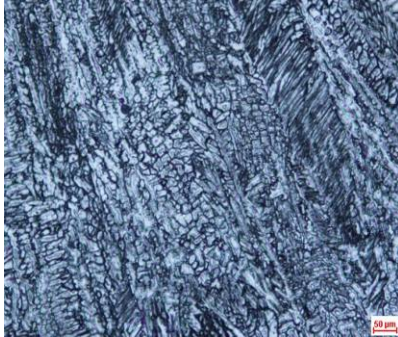

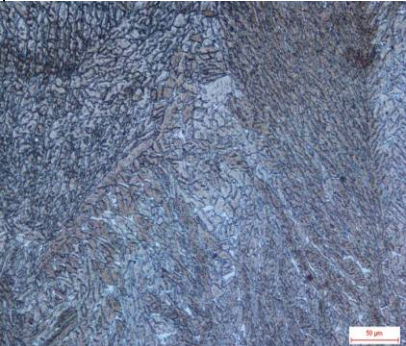


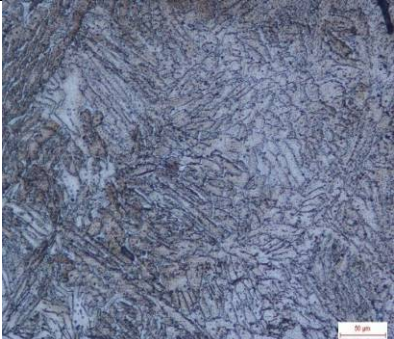
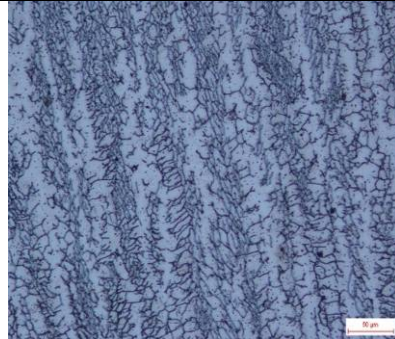

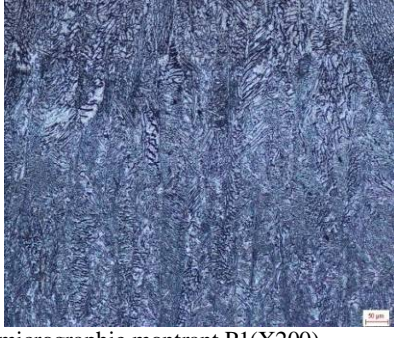
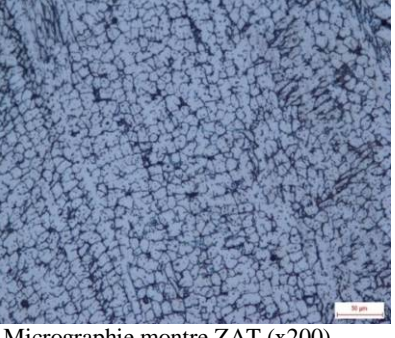



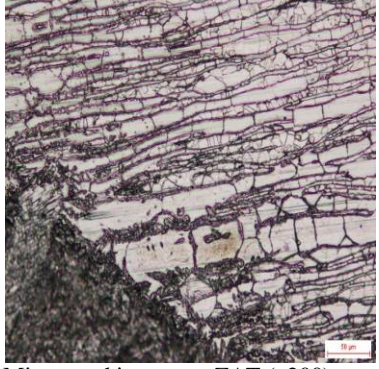


Figure IV.6 : Micrographies de cordon TIG

Les micrographies des échantillons obtenues par un microscope optique sont regroupées dans Le (tableau IV.2) qui montre les différentes microstructures des échantillons selon les énergie de soudage étudiées dans les trois zone : P1, P2, ZAT :

E1 (1.5 KJ/mm)		
 Micrographie montrant P1(x200)	 Micrographie montre P2 (x200)	 Micrographie montre ZAT (x200)
E2 (1.65 KJ/mm)		
 micrographie montrant P1(X200)	 Micrographie montre P2 (x200)	 Micrographie montrant ZAT (X100)
E3 (1.72 KJ/mm)		
 micrographie montrant P1 (x200)	 Micrographie montre P2 (x200)	 micrographie montrant ZAT(x200)

E4 (2.01 KJ/mm)		
		
micrographie montrant P1(X200)	Micrographie montre P2 (x200)	Micrographie montre ZAT (x200)
E5 (2.23 KJ/mm)		
		
micrographie montrant P1(X200)	Micrographie montre ZAT (x200)	Micrographie montre ZAT (x100)
E6 (2.37 KJ/mm)		
		
micrographie montrant P1(X200)	Micrographie montre P2 (x200)	Micrographie montre ZAT (x200)

Tableaux IV.2 : Représentations des micrographies des cordons SMAW

A partir de ces microstructures obtenues on peut tirer les points suivants :

En ZAT :

- La ZAT se distingue par la présence de 2 phases : l'austénite et la ferrite et présence de nombre très important des macles,
- La ZAT proche du métal de base MB correspond à une zone recuite, Où elle n'a pas subi à une augmentation de température très importantes, elle garde la forme d'une microstructure laminée,
- La ZAT proche du métal fondu MF correspond à une zone surchauffée, lors de l'augmentation importante de température par le procédé de soudage, elle avait une perte relative de sa structure laminée et finalement on trouve des grains sous forme équiaxe,

En MF :

- L'augmentation de l'énergie de soudage va augmenter également la taille des dendrites et de l'espacement inter-dendrites
- Les dendrites vont suivre le sens de refroidissement lors de soudage
- Dans les énergies de soudage très importantes, les dendritique se transforme partiellement à des grains très fins

IV.4. MICRODURETE

Pour obtenir des résultats satisfaisant, on prend une position dans chaque éprouvette sur l'axe X_0 figure IV.7 avec un pas de 1 mm se qu'il nous permis de voir l'influence d'énergie de soudage sur la microdureté des échantillons.

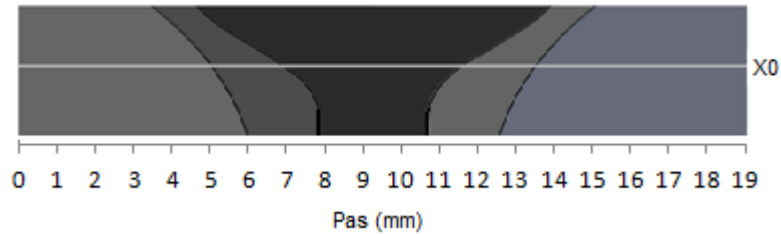


Figure IV.7 : Montrant l'axe X0 des profils de microdureté

A partir des résultats qu'on a obtenus préalablement on a tracés les graphes de micro dureté. ainsi les graphes sont divisés en trois zones selon les trois composant de la soudure (MB, ZAT, MF) d'échantillons (figure IV.8). Les graphes E1 (1.5 KJ/mm), E2 (1.65 KJ/mm), E3 (1.72 KJ/mm), E4 (2.01 KJ/mm), E5 (2.23 KJ/mm) et E6 (2.37 KJ/mm) présentent les filiations de micro dureté des échantillons dans X0.

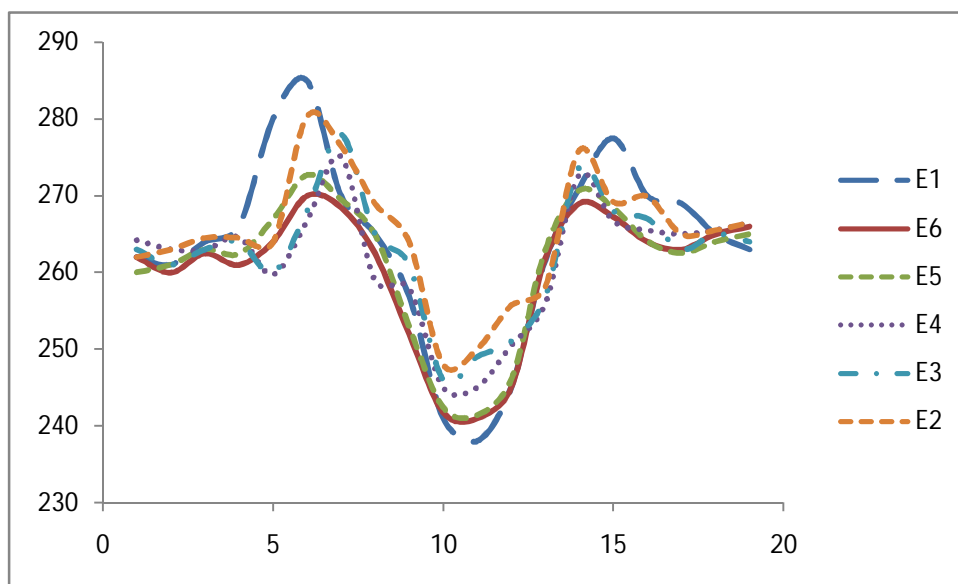


Figure IV.8 : filiations de microdureté des éprouvettes

A partir de ces graphes de profils de microdureté on tire les conclusions suivantes :

- Les six échantillons subissent un adoucissement dans la ZAT et MF, quand on augmente l'énergie de soudage.
- Le E1 subi un durcissement en ZAT et une grande fragilisation au MF (Voir Figure IV.1)
- Les six échantillons représentent presque même allure durcissement au niveau de MB.

IV.5. ESSAI DE TRACTION

Un consensus existe sur le fait que l'augmentation de l'énergie de soudage a un effet positif sur les propriétés de résistance mécanique, en abaissant la limite élastique et la charge à la rupture par effet de relaxation.

échantillon	R _m (MPa)	ε _r (%)
1 (1.5 KJ/mm)	28.71	0.06
2 (1.65 KJ/mm)	75.35	0.12
3 (1.72 KJ/mm)	74.37	0.12
4 (2.01 KJ/mm)	76.59	0.12
5 (2.23 KJ/mm)	85.58	0.13
6 (2.37 KJ/mm)	67.85	0.14

Tableau IV.3: Résultats de traction des éprouvettes

Les résultats des essais de tractions sont représentés par des données (figure IV.9 et figure IV.10), dont l'allure générale laisse apparaître et R_m (MPa).

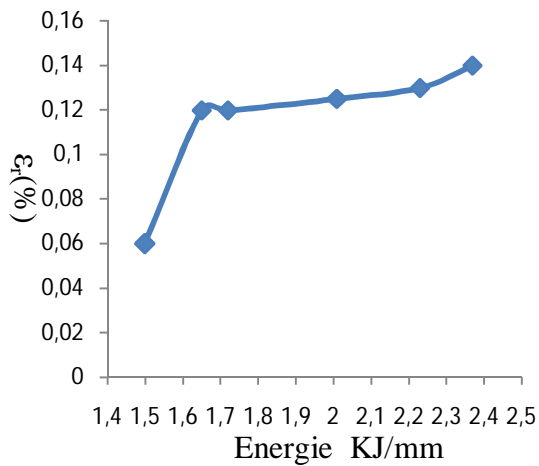


Figure IV.9 : Graphe de l'allongement en fonction d'énergie de soudage

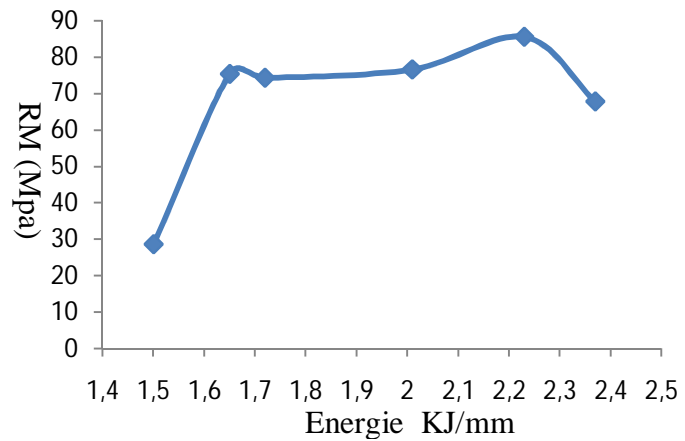


Figure IV.10 : Graphe de résistance mécanique en fonction d'énergie de soudage

Ces données montrent bien que le comportement des éprouvettes n'est pas le même, selon les nouveaux états métallurgiques et thermomécaniques engendrés par le procédé de soudage :

- Une augmentation légère dans la contrainte maximale et la déformation des éprouvettes, avec une diminution de la résistance maximale R_m (tableau IV.3).
- Les énergies de soudage ont augmenté le tenu des déformations totales des éprouvettes, ainsi l'augmentation de la plasticité des éprouvettes est remarquable.



Figure IV.11 .Zone de rupture des éprouvettes E1, E5, et E3

Dans cette figure (*Figure IV.11*) et après la rupture des éprouvettes on observe les résultats suivants :

- que les essais de traction mènent à une rupture de E1 en MF, E2 –E3 E4 en ZAT, E5 et E6 en MF,
- On peut constater que l'éprouvette E5 a des bonnes caractéristiques mécaniques par rapport aux autres éprouvettes.

IV.6. ESSAI DE RESILIENCE

Nos essais de résilience ont pour objet de déterminer la résistance des soudures à la rupture sous l'effet d'un choc par l'intermédiaire de l'énergie de rupture (K), la résistance que l'on vise à étudier ici est un peu commun avec la résistance observée dans un essai de traction statique. Dans l'essai de traction la déformation est graduellement imposée à l'éprouvette. La soudure a ainsi assez de temps pour réagir et s'adapter au changement. En service, notre matériau soudé est souvent soumise à des chocs brutaux (à des températures supérieures à 40°C). Pour cette situation, les valeurs observées dans un essai de traction ne donnent pas toujours satisfaction et peuvent même être trompeuses.

L'énergie de soudage a une influence directe sur la résilience de la ZAT. Cette influence est représentée sur la Figure IV.12, le tableau VI.4 présente les échantillons avec les différentes énergies de soudage.

Energie (KJ/mm)	Résilience (Kg m /cm ²)
1,5	8,3
1,65	65,86
1,72	93,9
2,01	108,3
2,23	119,07
2,37	143

Tableau IV.4 : Résultats des essais de résiliences

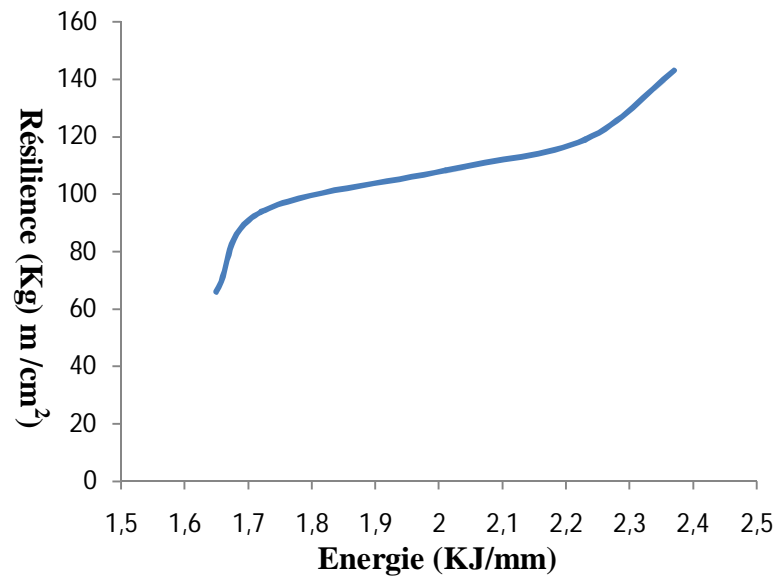


Figure IV.12 : Graphe de résilience en fonction d'énergie de soudage

Enfin au vu de la courbe représentant l'effet d'énergie de soudage sur les propriétés de résilience il apparait clairement qu'un petit écart de l'énergie de soudage engendre une variation très importante des propriétés de résilience et de ténacité des éprouvettes.

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire constitue une base de compréhension du phénomène généré par les énergies de soudage SMAW sur le comportement mécanique et métallurgique des alliages inoxydables super duplex. Il s'inscrit dans le cadre des travaux de recherches entrepris au sein du Laboratoire de DSTC du Centre national de recherche en soudage et contrôle.

L'objectif principal de ce travail est de contribuer à analyser le comportement MB-ZAT-MF en terme de caractérisation de l'état de chaque de trois composants (phases, morphologie, répartition, taille, fraction volumique, solidification / germination du métal fondu et composition chimique) avec des caractérisations macro-microscopique, et analyses de microdureté,

Ainsi, des essais mécaniques sont consacrés à évaluée les résistances mécaniques (à la traction, au choc) des paramètres de soudage choisis (énergies de soudage), donc les principaux résultats peuvent être tiré d'ici sont ;

❖ En terme technique :

- L'utilisation des faibles énergies de soudage en mode (SMAW) va entraine des caniveaux, des porosités et des fragilisations dans le cordon de soudure,
- L'augmentation d'énergie de soudage engendre une facilité de dissous de l'arc et une viscosité de métal fondu considérable.

❖ En terme métallurgique :

- La croissance des dendritiques du métal fondu sont orientées vers la torche
- Chaque énergie de soudage a une mode de refroidissement de métal fondu différent,
- L'augmentation d'énergie de soudage favorise l'augmentation de la taille des grains ferritiques.

❖ En terme mécanique :

- L'augmentation de l'énergie de soudage a un effet positif sur les propriétés de résistance mécanique, et la déformation à la rupture,
- En générale, Les énergies de soudage (de l'ordre de 2 à 2.3 KJ/mm) améliorent la résistance au choc dans la ZAT,

Des essais expérimentaux ont permis de caractériser les conditions de soudage

Cette étude sur le comportement des soudures SMAW dans le cadre d'une thèse touche maintenant à la fin. Généralement, Dans cet axe de recherche, nous avons réussi à avancer dans la compréhension des phénomènes générés par les procédés de soudage à l'arc. Cependant, tout n'est pas résolu et quelques questions sont apparues au fur et à mesure de nos travaux.

Il faut s'orienter vers un system robotique de soudage SMAW pour permettre de calculer la vitesse de soudage précis dans chaque instant,

Il serait intéressant de prévoir un chargement mécanique cyclique simultanée pour approcher au plus près des conditions réelles de sollicitation des structures. Ce chargement est déduit par des grands nombres de cycle qui ne sont pas abordé ici.

La chute considérable dans les caractérisations mécanique des énergies faibles peuvent être modifiée par :

- La considération d'autres procédé tel que le TIG ou MIG-MAG afin d'obtenir une soudure sans défauts.

L'utilisation des moyens de caractérisation au niveau soudage ou de essais mécanique sera obligatoire pour suivre la solidification de métal, les contraintes résiduelles, l'analyses des facies de rupture déduire les phases et les précipitations dans la soudure.

Il serait également intéressant de protéger les essais contre l'interaction avec autres facteur comme:

- Le glissement de l'éprouvette au cours d'un essai et la performance des mors d'essai;
- La dispersion des résultats.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Castro, R. "Historique des aciers inoxydables", Les éditions de physique. 1990.
- [2] P.J CUNAT. "Aciers inoxydable : Critères de choix et structure". Techniques de l'ingénieur, fasc. M 4540, (Mars 2000).
- [3] Euro-inox " Le décapage et la passivation de l'acier inoxydable", The european Stainless Steel Development , 2eme eddition- serie matériaux et application 2007.
- [4] THE IRON AND STEEL SOCIETY "Steel products manual: Stainless Steels". (1999)...
- [5]Alain COL. "Tôles pour mise en forme", Techniques de l'Ingénieur, Edition bm7518 , 2013.
- [6] EN 10088-1 "Aciers inoxydables. - Partie 1 : liste des aciers inoxydables".
- [7] Michel Dupeux, "Aide mémoire sciences des matériaux", éditions Dunod, Paris, (ISBN 978-2-10-005458-9), p. 212.
- [8] J. Barralis, G. Maeder, "Métallurgie, élaboration, structures-propriétés, normalisation, collection ", AFNOR, p. 103,2005.
- [9] P. F. Mendez, T. W. Eagar, "Welding Processes in Aeronautics", Advanced Materials & Processes, May 2001, p.39-43.
- [10] R. Blondeau, "Procédés et applications industrielles du soudage", Hermès Science publication, Paris (2001).
- [11] Z. Li, S. L. Gobbi, "Laser Welding techniques for lightweight structures", Journal of Materials Processing Technology 70, 1997, p.137-144.
- [12] Comité de la fabrication métallique industrielle "PROCÉDÉS DE SOUDAGE (MANUELS ET SEMI-AUTOMATIQUES) " Chapitre2, 2009
- [13] M. A. TOUFIK, "Influence des traitements thermiques sur la rupture fragile des cordons de soudure", Thèse Doctorat, Université Med Boudiaf de M'sila, 2004
- [14] Roland CAZES Soudage à l'arc Techniques de l'Ingénieur, **B 7 730-7,2000.**
- [15] E. KEEHAN, "Effect of Microstructure on Mechanical Properties of High Strength Steel Weld Metals ", Department of Experimental Physics, Göteborg University-Sweden, 2004.
- [16] K. EASTERLING, "Introduction to the Physical Metallurgy of Welding", Editions Butterworths, 1983.
- [17] R. BLONDEAU, "Métallurgie et mécanique du soudage, Mécanique et Ingénierie des matériaux", Lavoisier, 2001
- [18] M. TOYODA, "Fracture toughness evaluation of steel welds", Review part II. University of Osaka, 1989

- [19] ESAB Guide pratique du soudeur électrode enrobée (MMA), Usage interne – Propriété ESAB , 2009.
- [20] American Iron and Steel Institute “Welding of Stainless Steels and Other joining Methodes”, Handbook series N° 9002, 2005.
- [21]. A.F PADILHA, P.R RIOS. “ Decomposition of Austenite in Austenitic Stainless Steels”. pp. 325-337. ISIJ International, Vol. 42, N°4. (2002).
- [22] ASME B31.3. “Process Piping Guide” Revision 2 Engineering Standards Manual PD342 Rev. 2, 2010.
- [23] ASME (Qualification Standard for Welding and Brazing), An International Code of ASME Boiler and Pressure Vessel Committee on welding and Brazing, USA, 2010
- [24] ASTM. "Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials", Designation: E 8 – 00. PA 19428-2959, 2000, United States.
- [25] ISO 148: Acier «teste d’impact sur échantillons iso en V» NF EN ISO 148-2 avril 2009