

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



DEPARTEMENT DE METALLURGIE

Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Master

Caractérisation mécanique d'une soudure
d'acier au carbone ASTM A333 grade 6.

Mr Nazim MOHAMMEDI

Composition du Jury :

Président :	Mr M.E. DJEGHLAL	Professeur ENP
Promoteur :	Mr M. LARIBI	Professeur ENP
Examineur :	Mr H. YOUSFI	Professeur ENP
Examineur :	Mr. A. KASSER	Maître de conférences A. ENP

ENP 2016

Dédicace :

Je dédie ce travail à :

Ma tendre Maman et mon cher Papa,

Ma petite sœur Ferial,

Toute ma famille,

Mes amis et mes proches,

Khalil low K MMR, pour toutes nos
parties perdues ;

Boelam ElJilali qui a toujours été
présent pour moi quand je n'allais pas
bien,

Et très spécialement à la personne qui
m'a toujours soutenu Amira.

M.Nazim

REMERCIEMENTS

Je remercie Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a données durant toutes ces années d'études.

Je tiens à remercier notre encadreur Monsieur M.LARIBI, pour avoir accepté de nous encadrer, pour son indéniable soutien et ses valeureux conseils au cours de la réalisation de notre mémoire.

Je remercie également les ingénieurs de l'entreprise EN-GTP, particulièrement Madame Fouzia, et Monsieur Y. Himeur pour leur accueil chaleureux, leur aide précieuse, et le temps qu'ils nous ont consacré tout au long de notre projet.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance aux membres du jury : Monsieur M.E DJEGHLAL, Monsieur A. KASSER et Monsieur H. YOUSFI, respectivement président du jury et examinateurs, de m'avoir fait l'honneur d'évaluer mon travail.

Mes remerciements s'adressent à tous les enseignants qui ont contribué de près ou de loin à notre formation.

Je ne saurais oublier de remercier toutes les personnes qui nous sont chères, en particulier mes parents, ma sœur et mes amis, pour l'aide, la confiance et le soutien dont ils m'ont fait preuve.

الملخص:

الهدف من هذا العمل هو وصف ميكانيكيا تلحيم الفولاذ بالكربون SATAM333 ملحم بتقنية WATG .
الدراسة العملية تهدف إلى وصف عينات من هذا الفولاذ ميكانيكيا من خلال التجارب المدمرة
والغير مدمرة.
بعد اجراء التجارب يظهر ان عملية التلحيم موافقة للمعيار XIEMSA فهي اذن مقبولة.
الكلمات الدالة: الفولاذ بالكربون,AMTSA333, تلحيم WATG ,XIEMSA .

Abstract :

The purpose of this work is to characterize mechanically the welding of a carbon steel ASTM A333 de grade 6 welded with GTAW method.

The experimental study aims to characterize specimens of the carbon steel mechanically by using destructive and none destructive tests.

At the end of the work , it was shown that the weld conforms to ASME IX , and was therefore accepted .

Key words: carbon steel, ASTM A333, GTAW method, ASME IX.

Résumé :

Le but de ce travail est de faire une caractérisation mécanique d'une soudure d'acier au carbone ASTM A333 de grade 6 soudé avec le procédé GTAW.

L'étude expérimentale vise à caractériser des échantillons de cet acier mécaniquement par des tests destructifs et non-destructifs.

A l'issue des travaux réalisés, il a été montré que la soudure est conforme à la norme ASME IX, et a été donc accepté.

Mots clés : Acier au carbone, ASTM A333, procédé GTAW, ASME IX

Table des matières

Liste des tableaux :	7
Liste des figures :	8
Introduction générale :	9
I. Les aciers au carbone :	11
I.1 Diagramme fer-carbone :	11
I.2 Classification des aciers au carbone :	13
I.3 Acier ASTM A333 grade 6 :	13
II. Le soudage	15
II.1 Introduction au soudage :	15
II.2 Les facteurs métallurgiques guidant le choix du procédé de soudage :	15
II.3 Soudage GTAW :	16
II.3.1 Présentation du procédé :	16
II.3.2 Matériels utilisés :	16
III. Matériaux et techniques expérimentales	21
III.1 Présentation dumatériau :	21
III.1.1 Etude du métal de base :	21
III.2 Préparation du joint de soudure :	21
III.3 Réalisation de la soudure :	22
III.3.1 Procédé GTAW :	22
III.3.2 Paramètres de soudage :	22
III.4 Tests destructifs :	23
III.4.1 Essai de traction :	23
III.4.2 Essai de résilience :	24
III.4.3 Essai de pliage :	25
III.4.4 Essai de dureté :	26
III.5 Tests non destructifs :	28
III.5.1 Spectrométrie :	28
III.5.2 Analyse visuelle :	28
III.5.3 Observation macroscopique :	29
III.6 Polissage :	29
IV. Présentation et interprétation des résultats	31
IV.1 Essai de traction :	31
IV.2 Essai de résilience :	32
IV.3 Essai de pliage :	32
IV.4 Test de dureté :	33

IV.5 Observations macroscopiques :.....	36
Conclusion générale :	37
Bibliographie :	38

Liste des tableaux :

Tableau I.1 Classification des aciers au carbone.....	13
Tableau III.1 Composition chimique en pourcentage massique (%) du métal de base.	21
Tableau III.2 Propriétés mécaniques du métal de base.....	21
Tableau III.3 Paramètres de soudage utilisés.	23
Tableau III.4 Dimensions des éprouvettes prélevées.....	24
Tableau III.5 Dimensions des éprouvettes prélevées pour l'essai de pliage.....	26
Tableau IV.1 Résultats obtenus du test de traction.....	31
Tableau IV.2 Résultats obtenus du test de résilience.....	32
Tableau IV.3 Résultats du test de pliage.....	32
Tableau IV.4 Résultats de l'essai de dureté.....	34

Liste des figures :

Figure I.1 Diagramme Fer carbone.	12
Figure II.1 Vue explosée d'une torche à souder TIG [3].	17
Figure II.2 Variation du ratio nettoyage-pénétration pour le soudage avec courant alternatif à onde carrée.	18
Figure II.3 - exemple de cycle de soudage simplifié et étendu.	19
Figure III.1 Forme du joint de soudure et le nombre de passe.	22
Figure III.2 - Schéma d'éprouvettes de résilience : a) Charpy en U; b) Charpy en V.	25
Figure III.3 En haut la forme du pénétrateur, en bas l'empreinte obtenue.	27
Figure III.4 L'éprouvette utilisée pour l'essai de dureté avec les différents points d'application du test.	27
Figure IV.1 Courbe de traction T1	31
Figure IV.2 Courbe décrivant l'évolution de la dureté en fonction de la zone	35
Figure IV.3 Photographie de la soudure attaquée au Nital.	36

Introduction générale :

L'entreprise EN-GTP a été sollicitée par le groupement TouatGaz qui est une association entre SONATRACH et le groupe ENGIE pour la réalisation des soudures des pipelines et la vérification de leurs conformité relative au projet TouatGaz, qui consiste en l'exploitation d'un gisement gazier dans la région de Touat à proximité de la ville d'Adrar dans le désert du Sahara pour une production de 4.5 milliards de mètre cube de gaz naturel par an à partir de 2017. Des pipelines de 14.27mm d'épaisseur ont été soudés par le procédé GTAW (Gas tungsten arc welding). Les essais nécessaires pour valider la conformité des soudures aux normes exigées ont été réalisés dans le laboratoire de l'entreprise EN-GTP.

Dans ce présent mémoire, nous présenterons le travail que nous avons fait en trois parties :

- 1- Une première partie qui représente une synthèse bibliographique
- 2- Une deuxième partie intitulée partie expérimentale, dans laquelle on a présenté les différents essais et test et qu'on a effectué ainsi que leurs déroulements et le matériel utilisé pour les réaliser.
- 3- Une troisième partie où on a exposé, interprété et discuté les résultats obtenus.

Pour finir, j'ai clôturé mon mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I : Les aciers au carbone

I. Les aciers au carbone :

L'acier au carbone est un acier dont le principal composant d'alliage est le carbone, entre 0,12 et 2,0 %, les autres éléments d'alliages étant en quantité très faible.

Plus la teneur en carbone s'élève, plus la résistance de l'acier peut être augmentée par traitement thermique, au détriment de sa ductilité.

Les aciers au carbone représentent environ 90 pour cent en volume de l'acier utilisé. Ils ont un large domaine d'application dans le secteur de la construction des ponts, conteneurs, poutres, tôles de châssis de voiture, bateaux, pipeline ...etc. Vu ces applications, les exigences principales aux aciers au carbone sont une résistance mécanique élevée, une bonne ductilité, une ténacité élevée et une soudabilité facile.

A température ambiante, les aciers au carbone sont dans une structure ferritique – perlitique et la fraction volumique des deux phases dépend de la teneur en carbone. Plus la teneur en carbone est élevée, donc plus la fraction volumique de carbures est élevée et plus la résistance mécanique augmente.

Du fait des variations de solubilité du carbone, ce dernier est mis en solutions dans le fer γ , puis il se trouve rejeté sous forme de précipité de Fe_3C , ou de cémentite lors du refroidissement. L'alliage Fer/Carbone est durci par ces carbures. Cette précipitation dépend de la température et du temps.

I.1 Diagramme fer-carbone :

Le diagramme d'équilibre Fer-carbone est très utile pour comprendre les aciers, les fontes et les traitements thermiques. Il est limité à droite par la cémentite Fe_3C (6.67%C) et fait apparaître les deux grandes familles de métaux ferreux : les aciers (entre 0.008%C et 2%C) et les fontes (de 2%C à 6.67%C).

a. Les transformations

Le diagramme Fer-carbone contient trois réactions isothermes caractérisées par des paliers :

1. Eutectique à 1147°C : il marque la température minimale d'existence du liquide.
2. Eutectoïde à 723°C (A1). Il marque la fin de la transformation au chauffage de la perlite en austénite. Au-dessus de 723°C, la perlite n'existe plus
3. Péritectique à 1487°C, mais d'importance négligeable de point de vue industrielle.

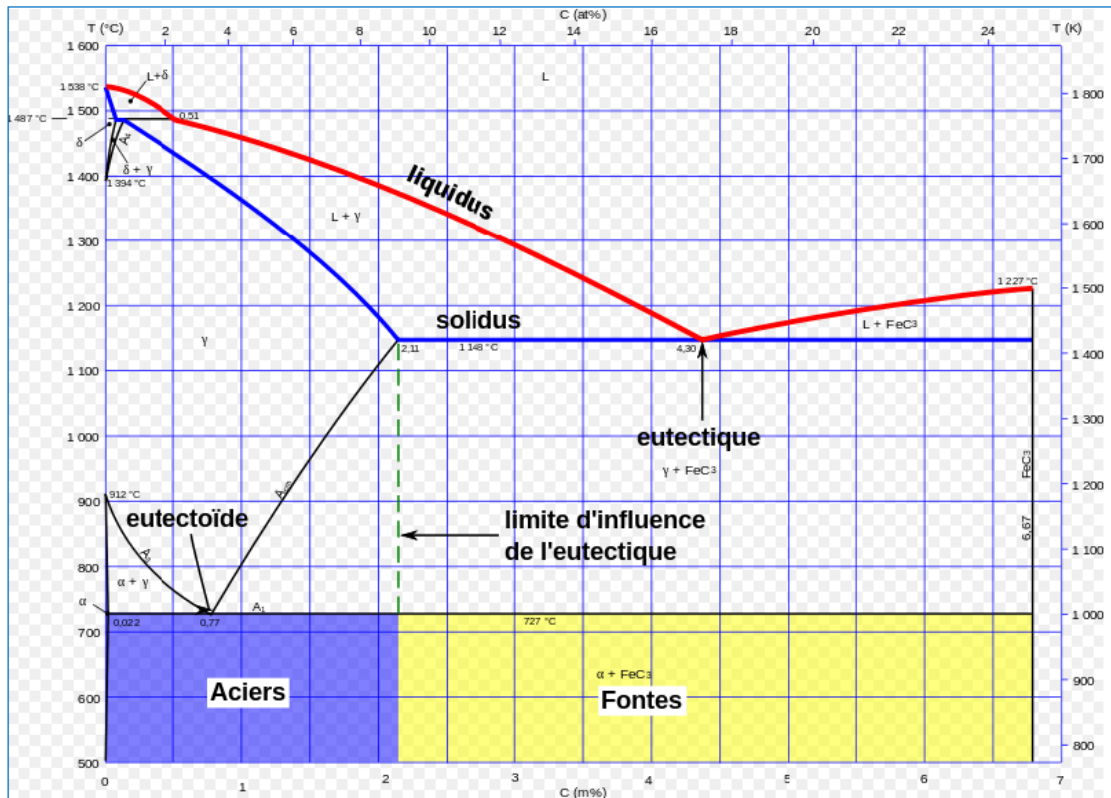


Figure I.1 Diagramme Fer carbone.

b. Courbes

A_{cm} : indique la fin de la dissolution après dissociation, de la cémentite dans l'austénite lorsque celle-ci existe.

A_0 : (210°C) précise la température de la transformation magnétique de la cémentite.

A_1 : précise la fin de la transformation au refroidissement de l'austénite. L'austénite n'existe plus au-dessous de cette ligne.

A_2 : (point de Curie $\approx 768^\circ\text{C}$) précise la température de la perte de magnétisme du Fer α . en générale ce point ne figure pas sur le diagramme Fer-C.

A_3 : précise la fin de la transformation au chauffage de la ferrite en austénite. La ferrite n'existe plus au-dessus de cette ligne.

A_4 : précise la fin de la transformation au chauffage de l'austénite en ferrite δ et/ou liquide. L'austénite n'existe plus au-dessus de cette ligne.

On peut trouver $Ac_3, Ac_4...$ pour indiquer que le point est tracé en chauffage, ou Ar_3, Ar_4 lorsqu'il s'agit de refroidissement

I.2 Classification des aciers au carbone :

Les aciers au carbone peuvent être classés selon leur taux de carbone comme suit :

Tableau I.1 Classification des aciers au carbone

Nuance	C (%)	R _m (MPa)	Emplois
Extra-doux	$C < 0.15$	330-420	Tôles pour carrosserie, pièce de forge ...
Doux	$0.15 < C < 0.20$	370-460	Charpente métallique, profilé, boulon ...
Demi-doux	$0.20 < C < 0.30$	480-550	Pièces de machine pour application mécanique ...
Demi-dur	$0.30 < C < 0.40$	550-650	Petit outillage, organe de transmission ...
Dur	$0.40 < C < 0.60$	650-750	Pièces d'outillage, rails ...
Extra-dur	$C > 0.60$	>750	Outils d'usinage et découpe ...

Outre que le carbone, les ces aciers contiennent des éléments d'addition et des impuretés dont leur présence découle de leur mode d'élaboration leur pourcentages limite est de : 1.2% pour le manganèse, 0.6% pour le silicium, 0.06% pour le soufre, 0.06% pour le phosphore.

I.3 Acier ASTM A333 grade 6 :

Cet acier est généralement utilisé pour les pipelines dans des installations à haute pression et à basse température. Ils sont aussi utilisés là où il est nécessaire de garantir une bonne résilience à des températures variantes.

Chapitre II : Le soudage

II. Le soudage

II.1 Introduction au soudage :

Avant le 19^{ème} siècle, le seul procédé d'assemblage des pièces métalliques était le forgeage, mais avec les avancées technologiques, il était devenu possible de stocker de l'oxygène et de l'acétylène en toute sécurité, et qui une fois mélangés, donnent des températures élevées et suffisantes qui peuvent atteindre 3100°C, permettant un bain de métal en fusion qui se solidifie en refroidissant pour constituer le joint entre les pièces à assembler.

Après ce succès, plusieurs autres procédés avec d'autre source d'énergie ont vu le jour tel que le soudage par résistance et le soudage à l'arc, qui utilisent l'énergie électrique pour atteindre des températures très élevées. Les premières électrodes fabriquées étaient en acier, mais elles ont rapidement dû être remplacées par des électrodes en carbone de Bernardos pour le soudage à l'arc. L'électrode enrobée n'a été inventé qu'en 1904 par un suédois nommé Oskar Kjellberg. Le soudage à l'arc, le soudage par résistance et le soudage sous protection gazeuse ont été inventés avant la Première Guerre Mondiale.

A la fin des années 1930, de nouveaux procédés remplacent le soudage à l'arc traditionnel avec l'électrode fusible, le plus utilisé était le soudage à l'arc submergé (AS) dans lequel l'arc est plongé dans un flux granuleux.

En 1940, les Etats-Unis invente la protection par gaz inerte et l'utilisation d'une électrode en tungstène qui permet la soudure sans matériau d'apport, le procédé est appelé soudage TIG (Tungsten Inert Gas).

Le soudage avec gaz de protection inerte hélium ou argon, dit MIG, n'apparaît que quelques années plus tard, le remplacement des gaz inerte par le CO₂, à cause de sa disponibilité et son faible coût, crée le procédé MAG (Metal Active Gas)

D'autres méthodes plus avancées voient le jour en 1958, comme le soudage par faisceau d'électrons (Soudage FE) qui permet une pénétration étroite et profonde à la fois, mais il présente néanmoins un inconvénient majeur qui est la nécessité d'une chambre à vide qui pourrait contenir tous les équipements nécessaires ainsi que la pièce à souder.

Il existe aujourd'hui plusieurs procédés de soudage plus modernes les uns que les autres comme : le soudage électrogaz, soudage laser, soudage par faisceau d'électrons, soudage aluminothermique, soudage par ultrasons, soudage par plasma ...etc.

II.2 Les facteurs métallurgiques guidant le choix du procédé de soudage :

Les aciers inoxydables se soudent par les mêmes procédés de soudage, et aussi bien, que les aciers au carbone, mais pour garantir aux assemblages les propriétés spécifiques du métal de base, il faut adapter ces procédés en tenant compte des propriétés physiques et métallurgiques particulières du métal. Cette facilité de soudage a contribué au développement de leur emploi dans des domaines variés.

Vu que les aciers inoxydables se soudent par les mêmes procédés que les aciers au carbone, on a une assez grande gamme de choix de procédé, mais il existe plusieurs facteurs qui permettent d'avoir un meilleur rendement et une meilleure qualité soudage.

Les facteurs qui déterminent le choix d'un procédé sont les suivants [1] :

- Le type d'assemblage à réaliser : forme de l'assemblage, performances en service, aspect du cordon ;
- L'épaisseur ;
- La nuance, ou les nuances, dans le cas d'assemblage de métaux dissimilaires, des pièces à souder.

Tous les procédés devront satisfaire à la triple règle suivante :

- Protéger le bain contre l'oxydation ;
- Éviter l'introduction de carbone dans la soudure
- Régler le régime thermique de manière à limiter le grossissement des grains et la précipitation des carbures.

II.3 Soudage GTAW :

II.3.1 Présentation du procédé :

Le soudage GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) ou plus connu sous le nom de TIG (Tungsten Inert Gas) est un procédé de soudage à l'arc, dans lequel l'arc jaillit entre la pièce à souder et une électrode de tungstène infusible qui se trouve au milieu de la buse de soudage, cet arc éclate dans une atmosphère de gaz inerte (le plus souvent de l'Argon ou de l'Hélium) qui est transporté à l'aide d'une buse à gaz fixée à l'extrémité du pistolet de soudage, ce gaz a pour rôle de protéger l'électrode et le métal fondu [2].

On peut utiliser un métal d'apport, soit sous forme de baguettes à manier manuellement soit sous forme de fil d'apport pour le soudage automatique. Ce procédé est généralement utilisé pour le soudage des tuyaux et des plaques tabulaires sur les échangeurs de chaleurs. Il est souvent utilisé pour les aciers inoxydables et les alliages légers mais il convient pour tous les matériaux soudables (exception faite pour le zinc et le plomb) ainsi que pour tous les types de joints et positions. L'arc résultant de la manipulation est stable et maîtrisé parfaitement.

II.3.2 Matériels utilisés :

Dans le soudage GTAW on utilise [3] :

- Un pistolet à souder ;
- Un générateur haute fréquence pour l'amorçage de l'arc ;
- Une alimentation électrique ;
- Un gaz de protection ;
- Un équipement de contrôle.

II.3.2.1 Pistolet à souder :

Il est utilisé en cas de soudage manuel et doit donc être facile à manier, il en existe deux types :

- Pistolet à refroidissement à air ($I_{\max} = 200A$).
- Pistolet à refroidissement à eau ($I_{\max} = 400A$)

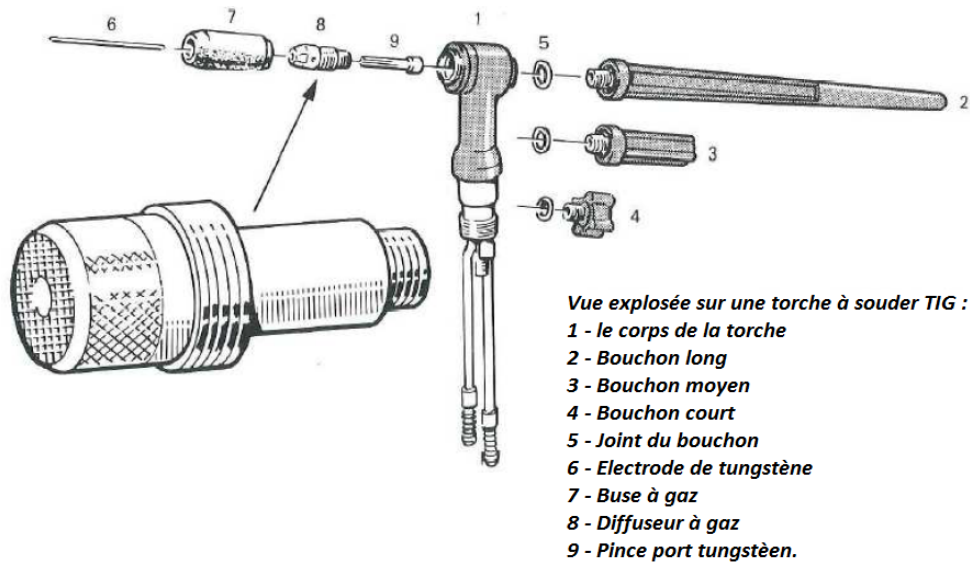


Figure II.1 Vue explosée d'une torche à souder TIG [3].

II.3.2.2 Générateur haute fréquence :

Avec ce procédé d'amorçage, l'électrode n'entre pas en contact avec la pièce à souder. Une tension élevée d'amorçage produite par le générateur HF (haute fréquence) amorce l'arc électrique et crée alors un chemin conducteur de courant à basse tension [4]. Il n'y a aucun risque d'inclusion de tungstène dans la soudure, utilisé pour des applications de soudage de précision et de qualité élevées. Mais cette méthode présente néanmoins l'inconvénient de provoquer de fortes interférences électriques.

II.3.2.3 Alimentation :

Le type de courant qui alimente ce procédé dépend de la composition de l'électrode utilisée, en courant continu (CC) la grande partie de la chaleur est concentrée sur l'électrode (pôle positif) et non sur la pièce. Cette polarité est utilisée pour le soudage des épaisseurs minces afin d'éviter les déformations et la brûlure de la plaque. Pour ce type de polarité, les ions positifs du gaz ionisé sont accélérés vers le métal de base en découpant la couche d'oxyde sur ce dernier. L'effet des électrons émis consiste disperser et évacuer cet oxyde une fois fragmenté[5].

Cette polarité est efficace pour son effet de nettoyage, surtout dans le cas des métaux et alliages ayant une couche d'oxyde stable. Par exemple : l'aluminium, le magnésium, le bronze-aluminium, etc.

Néanmoins, il est à noter que ce type de polarité risque de produire une surchauffe au niveau de l'électrode de tungstène ce qui peut même entraîner la fusion de sa pointe. Cette situation requiert donc l'usage d'électrodes de tungstène de diamètres plus ou moins larges pour

résister davantage à l'effet de surchauffe. Dans le soudage GTAW, l'électrode est souvent reliée au pôle négatif du générateur pour éviter sa surchauffe dans le cas des tôles épaisses.

En 1970, du courant alternatif (CA) à onde carrée a été utilisé pour ce type de soudage, cette onde permettait un passage à zéro très rapide et donc dispensait de l'utilisation d'un générateur haute fréquence, elle donnait aussi le contrôle sur la pénétration et la désoxydation.

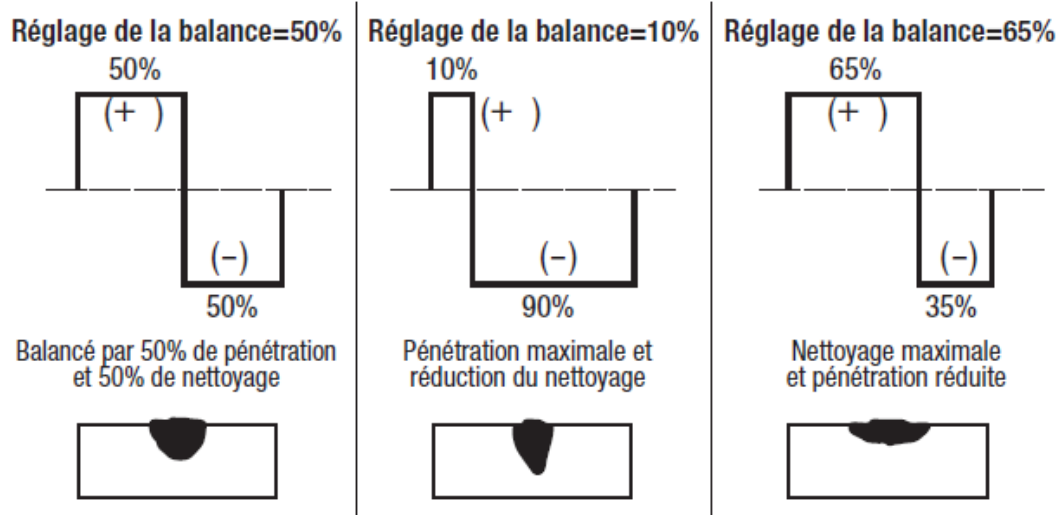


Figure II.2 Variation du ratio nettoyage-pénétration pour le soudage avec courant alternatif à onde carrée.

II.3.2.4 Gaz protecteur :

Dans le soudage GTAW, le gaz protecteur est choisi selon les matériaux des pièces à souder[5], on retrouve alors pour :

- Les aciers :

Le gaz de protection utilisé pour le soudage des aciers non alliés, faiblement alliés ou inoxydables est l'argon pur dans le cas d'un soudage manuel ou mélangé avec de l'hélium ou de l'azote dans le cas d'un soudage automatique.

Dans le cas des aciers inoxydables ou facilement oxydables, on utilise un gaz de protection de racine pour éviter l'oxydation de l'envers de la soudure, ce gaz est un mélange d'azote et d'hydrogène.

- Aluminium :

Pour l'aluminium ou les alliages d'aluminium on utilise souvent d'argon mélangé à de l'hélium, ce dernier améliore le transfert de chaleur pour les matériaux épais, augmente la tension de l'arc et donc la vitesse de soudage.

- Cuivre :

L'argon reste adéquat pour le soudage du cuivre et alliage de cuivre aussi dans toutes les positions mais un préchauffage est nécessaire à cause de la grande conductivité thermique de ce métal.

- Titane :

Dans le cas du titane, un gaz de protection pur à 99,99% au moins est obligatoire et avec une plus grande quantité que les autres métaux, il peut être de l'hélium ou de l'argon.

II.3.2.5 Équipement de contrôle :

Pendant le soudage mécanisé, le fonctionnement du générateur, la durée de pré-gaz et post-gaz du gaz de protection destiné à empêcher l'oxydation de l'électrode, sont contrôlés automatiquement, on peut aussi contrôler la descente du courant pour assurer un remplissage optimal.

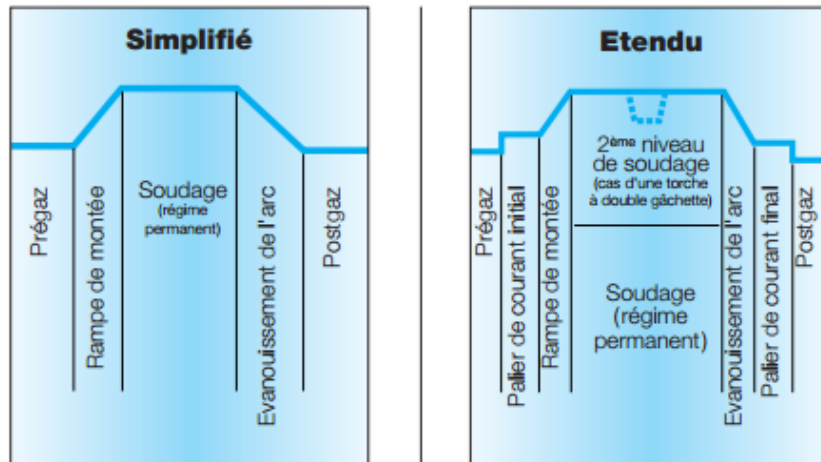


Figure II.3 - exemple de cycle de soudage simplifié et étendu.

Chapitre III : Matériaux et techniques expérimentales

III. Matériaux et techniques expérimentales

III.1 Présentation dumatériau :

III.1.1 Etude du métal de base :

L'acier ASTM A333 de grade 6 est un acier au carbone avec la composition chimique dans suivant :

Tableau III.1 Composition chimique en pourcentage massique (%) du métal de base.

Carbone	Manganèse	Phosphore	Soufre	Silicium	Nickel	Chrome
0,30	0,90	0,025	0,025	0,10	-	-

Cette acier est considéré comme un acier demi-doux vu sa teneur en carbone qui est comprise entre 0.20% et 0.30. Le grade 6 est nous indique que les pipelines sont utilisables à de basse température et à haute pression.

Le document fourni par le fabricant nous informe aussi sur les propriétés mécaniques du métal de base, qui sont plus au moins bonne et qui sont données dans le tableau suivant :

Tableau III.2 Propriétés mécaniques du métal de base.

Limite élastique $R_{p0,2}$ [MPa]	Résistance à la rupture R_m [MPa]	Allongement A[%]
240	415	30

III.2 Préparation du joint de soudure :

Avant chaque opération de soudage, les deux pièces à souder doivent être soigneusement nettoyé et exempté de tout corps gras. Les pièces devront subir un dégraissage suivi d'un décapage mécanique ou parfois chimique (dans le cas des alliages légers).

Les bords sont débarrassés de tout excès d'oxyde, rouille, graisse ou peinture. Selon l'épaisseur des pièces on choisit si le soudage se fait sur des bords droits ou sur des bords chanfreinés. Une finition mécanique est obtenue par meulage à la brosse métallique ou à la laine d'acier.

Dans notre cas les deux bords sont chanfreinés (figure III.1) avec un écartement $b = 2.5$ mm et un angle de chanfrein $\alpha = 60^\circ$

III.3 Réalisation de la soudure :

III.3.1 Procédé GTAW :

La soudure de la tuyauterie à l'acier inoxydable est réalisée avec le procédé GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) ou plus communément appelé TIG, ce procédé à l'arc consiste à faire jaillir l'arc entre la pièce à souder et une électrode de tungstène infusible, cet arc éclate dans une atmosphère de gaz inerte qui est transporté à l'aide d'une buse à gaz fixée à l'extrémité du pistolet de soudage.

La soudure est réalisé avec un poste de marque LINCOLN High Frequency Current en courant alternatif (AC), avec une électrode de tungstène thorié dans une atmosphère d'argon pur à 99,995%.

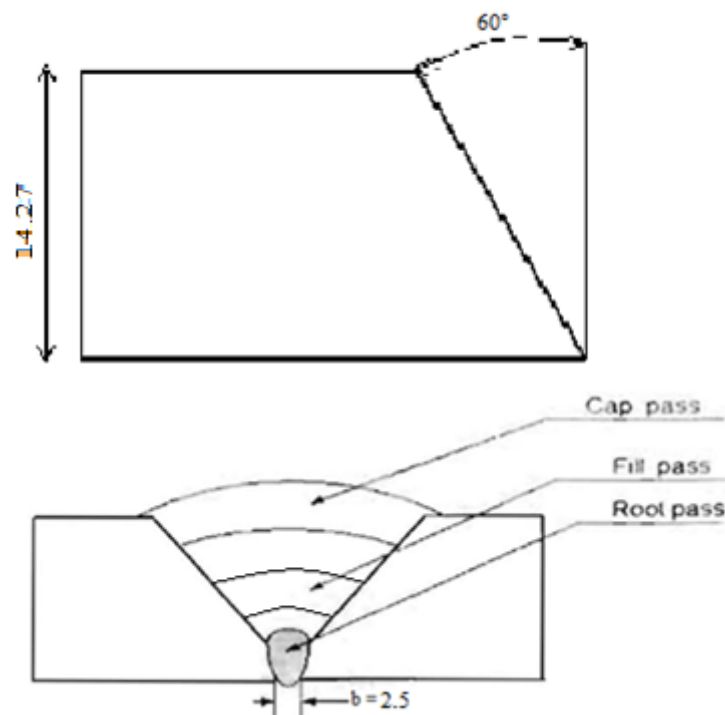


Figure III.1 Forme du joint de soudure et le nombre de passe.

III.3.2 Paramètres de soudage :

Après un préchauffage à 20 °C et la mise en place des tous les paramètres, notre soudure est réalisée en 2 passes à cause de l'épaisseur du tuyau qui est de 3,4 mm, une fois la première passe finie, la température entre les deux passes est de 115 °C car on laisse s'écouler 4 minutes avant d'entamer la passe suivante, le tout sous une même atmosphère d'argon à 99,995%, on retrouve alors les différents paramètres de soudage pour chaque passe dans le tableau suivant :

Tableau III.3 Paramètres de soudage utilisés.

N° de passe	Courant de soudage			
	Intensité (Amp)		Tension (volt)	
	I _{min}	I _{max}	U _{min}	U _{max}
1	110	130	10,5	11,5
4	120	150	11,1	12,5

Après chaque passe et après enlèvement du laitier, tout défaut apparent est enlevé par broissage et/ou meulage avant l'exécution de la passe suivante. Les brosses et disques doivent être identifiés pour les utilisations sur Acier inox uniquement. Le courant de soudage et la manière de déposer le métal assureront une fusion complète sans manque de liaison sur les faces du chanfrein et la zone voisine du métal de base. Il devra par la suite satisfaire à un examen visuel conforme aux exigences des codes et standards en vigueur.

III.4 Tests destructifs :

Afin de s'assurer de la fiabilité de notre soudure et sa conformité avec la norme ASME IX exigée, nous devons, de plus des tests non destructifs, effectuer des tests destructifs pour déterminer les caractéristiques mécaniques du cordon de soudure.

III.4.1 Essai de traction :

L'essai de traction est nécessaire pour prévoir le comportement du matériau dans les conditions réelles d'utilisation, il détermine son aptitude à se déformer quand il est soumis à des efforts. Deux paramètres rentrent en jeu dans ce cas, l'effort F et l'allongement Δl , l'essai se fait selon le paramètre recherché, on mesure la force F en variant l'allongement Δl , ou inversement, on mesure l'allongement Δl en variant la force F . Afin de mieux caractériser le matériau et d'interpréter les courbes obtenues, on introduit la notion de contrainte σ et de déformation ε comme suit :

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

$$\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right)$$

l_0 : L'allongement initial du corps de l'éprouvette (partie reliant ses deux têtes).

III.4.1.1 Préparation de l'éprouvette :

Les éprouvettes de traction sont normalisées, que ça soit pour les métaux en barres ou les métaux en feuilles comme suit :

Tableau III.4 Dimensions des éprouvettes prélevées.

Repère	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	Section (mm ²)
T1	19,02	14,27	275,03
T2	18,68	14,27	267,76

III.4.1.2 Mode de traction :

Pour effectuer cet essai destructif, nous avons utilisé une machine universelle de marque Wolpert UTM d'une capacité de 1000 kN composé d'un extensomètre pour mesurer l'allongement et d'un dynamomètre pour mesurer l'effort. L'essai se pratique à température ambiante 20 °C, en imposant une déformation croissante à vitesse constante et en mesurant l'effort nécessaire à cette déformation. L'essai se fait pour les deux éprouvettes jusqu'à rupture, les résultats sont ensuite prélevés depuis l'écran de l'ordinateur relié à la machine.

III.4.2 Essai de résilience :

La résistance à la rupture se mesure traditionnellement par un essai de traction comme dit précédemment, mais ses résultats ne nous informent pas sur la résistance à un choc brutal, car dans l'essai de traction classique, l'effort est imposé graduellement à la pièce et laisse le temps à cette dernière de s'adapter et de réagir, cela nous induit en erreur quant à la résistance au choc de la pièce, ce problème se présente souvent pour les matériaux fragiles qui contiennent des défauts interne ou de surface tels que : les inclusion, les fissures et les retassures, mais aussi pour les matériaux ductiles qui subissent des chocs extrêmement brutaux. C'est pour cette raison qu'un essai dit essai de résilience ou essai Charpy a été mis en œuvre, il consiste à rompre une éprouvette préalablement entaillée sous l'impact d'un « mouton-pendule ». Ce test nous informe sur l'énergie absorbée par la rupture et donc sur la résilience du matériau (énergie absorbée ramenée à la surface en J/cm²) ainsi que sur l'expansion latérale de l'éprouvette suite à la rupture.

III.4.2.1 Prélèvement des éprouvettes :

Il existe deux types d'éprouvettes pour le test de résilience : éprouvette Charpy U et éprouvette Charpy V, mais les dimensions globales des éprouvettes reste le même, on retrouve alors 55mm de longueur et 10x10mm en section, l'entaille diffère de par sa forme qu'elle soit en V ou en U elle est toujours faite au milieu de l'éprouvette soit à 27,5mm d'un des deux extrémités comme montré sur (figure IV.4)

Pour notre essai de résilience, nous avons effectué le prélèvement de six éprouvettes dites réduites de dimension 10 x 10 mm, de deux zones différentes de la pipe, trois d'entre elles provenaient de la zone du métal fondu et les trois autres de la zone affectée thermiquement. Nous avons par la suite usiné l'entaille en V au milieu de l'éprouvette.

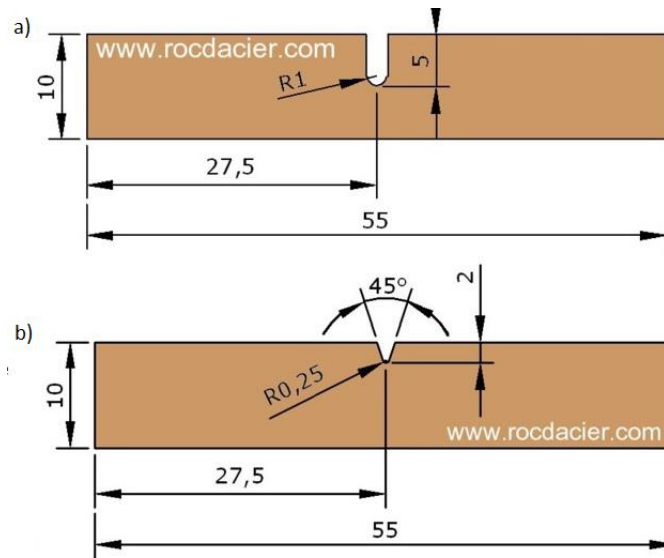


Figure III.2 - Schéma d'éprouvettes de résilience : a) Charpy en U; b) Charpy en V.

III.4.2.2 Méthode utilisée :

Pour effectuer le test de résilience sur nos échantillons d'acier au carbone dans les normes, nous avons dû refroidir nos éprouvettes à l'aide de neige carbonique jusqu'à une température égale à $-54\text{ }^{\circ}\text{C}$, le refroidissement s'est fait dans un pot métallique en mesurant la température du bain au fur et à mesure qu'on ajoutait de la neige carbonique, une fois le bain à la bonne température, nous avons plongé nos éprouvettes entaillées dans le pot.

Après quelques minutes de refroidissement, nous avons placé une éprouvette dans l'emplacement dédié à cette dernière dans une machine de marque Instron Wolpert de type PW 30 ayant comme échelle 300 Joules, en s'assurant que l'entaille préalablement faite était bien placée au milieu du champ de l'impact à l'aide du « couteau du mouton », nous avons ensuite fermé la porte de sécurité et enclenché le pendule, après impact, nous avons relevé l'énergie absorbée depuis l'écran numérique ou l'affichage analogique de la machine.

III.4.3 Essai de pliage :

L'essai consiste à soumettre une éprouvette ayant trois points d'appui à une déformation plastique sur un mandrin jusqu'à l'obtention d'un angle spécifique généralement entre 120° et 180° . Lors du pliage la partie extérieure de l'éprouvette subit une déformation plastique en traction, ce qui permet l'apparition des défauts de la soudure. Ces défauts peuvent être repérés facilement avec l'œil nu, si les défauts ont une longueur égale ou supérieure à 3 mm la soudure n'est pas qualifiée.

Le diamètre du poinçon utilisé pour notre test est égale à $d_{\text{poinçon}} = 40\text{mm}$.

III.4.3.1 Prélèvement des éprouvettes :

Les éprouvettes destinées à l'essai de pliage sont très faciles à réaliser, elles sont prélevées dans le sens perpendiculaire à la soudure et sont rectilignes de section pleine, la soudure doit être exactement au milieu de l'éprouvette, pour notre essai on a préparé quatre échantillons pour effectuer quatre essais, deux pliages envers, et deux pliages endroit, les éprouvettes ont les dimensions suivantes :

Tableau III.5 Dimensions des éprouvettes prélevées pour l'essai de pliage.

Repère	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	Type de pliage
T1	14,27	10	Coté
T2	14,27	10	Coté
T3	14,27	10	Coté
T4	14,27	10	Coté

III.4.3.2 Méthode utilisée :

L'essai a été réalisé avec la même machine utilisée pour l'essai de traction, à savoir la machine universelle de marque Wolpert UTM. L'éprouvette utilisée ne doit pas être forcément fixée, on la positionne, bien centrée, sur les deux points d'appui de bas, et on active le poinçon qui commence à descendre jusqu'à atteindre un angle de pliage compris entre 120° et 180°, après cela on remonte le poinçon et on retire l'éprouvette et on effectue un contrôle visuel sur la partie sollicitée par la traction.

III.4.4 Essai de dureté :

La dureté représente la résistance d'un matériau à la pénétration d'un matériau plus dur que lui. Il existe plusieurs types d'essai de dureté comme :

- L'essai de dureté Vickers ;
- L'essai de dureté Brinell ;
- L'essai de dureté de Rockwell.

L'essai le plus utilisé dans les laboratoires est l'essai de Vickers, le pénétrateur utilisé dans cet essai est un diamant pyramidal à base carrée comprenant des angles à facettes de 136°. L'essai est très simple, il suffit d'appliquer une charge avec le pénétrateur sur l'éprouvette qu'on a, l'empreinte obtenue est ensuite utilisée pour calculer la valeur de la dureté.

La valeur de dureté Vickers est calculée de la façon suivante :

$$HV = k \frac{F}{S} = 0.102 \frac{2F \cdot \sin \frac{\theta}{2}}{d^2} = 0.1891 \frac{F}{d^2}$$

Avec :

$$k = \frac{1}{g_n} = \frac{1}{9.8} \approx 0.102$$

F : la charge de l'essai.

S : la surface de l'empreinte.

d : la longueur moyenne des deux diagonales en mm, $d = \frac{(d_1+d_2)}{2}$.

θ : l'angle des facettes du pénétrateur (136°)

g_n : l'accélération de la pesanteur.

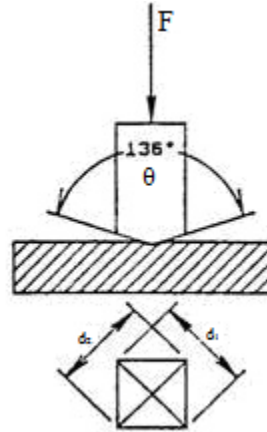


Figure III.3 En haut la forme du pénétrateur, en bas l'empreinte obtenue.

III.4.4.1 Prélèvement des éprouvettes :

Pour les essais de dureté on a besoin d'éprouvette simple qui comporte : la zone de soudage, la zone affectée thermiquement et la zone non-affectée thermiquement comme dans la (figure 7) suivante :

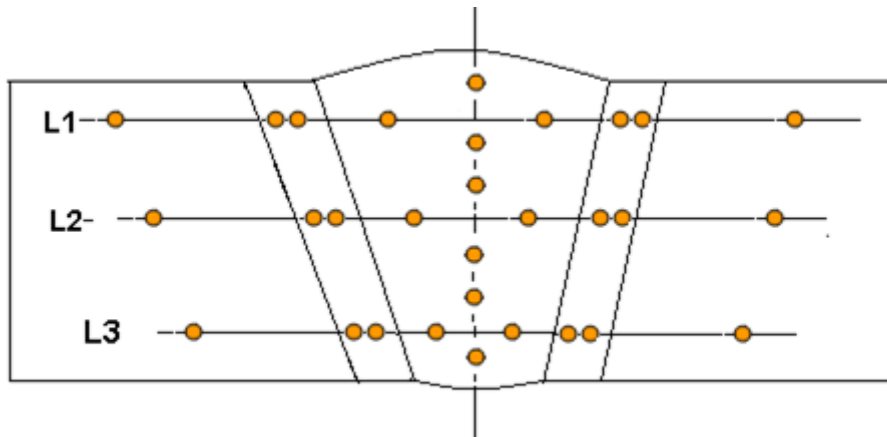


Figure III.4 L'éprouvette utilisée pour l'essai de dureté avec les différents points d'application du test.

III.4.4.2 Méthode utilisé :

Pour effectuer l'essai de dureté on a utilisé la machine INNOVATEST Nemsis 9000 (figure IV.11), qui comporte un porte-outil, contenant un pénétrateur et plusieurs lentilles de microscope, et un écran d'affichage. On met l'éprouvette on place et démarre l'essai en appuyant sur Start sur l'écran d'affichage, après que l'opération de pénétration se termine le porte-outil tourne automatiquement pour mettre en place la lentille du microscope, en s'aidant

de l'écran d'affichage on ajuste les deux diamètres de l'empreinte, le résultat s'affiche sur l'écran.

III.5 Tests non destructifs :

III.5.1 Spectrométrie :

L'analyse spectrométrique des matériaux est devenue un outil indispensable dans les laboratoires de contrôle qualité, ces tests non destructifs vise à vérifier la conformité de la composition chimique ainsi que la teneur des éléments dans les matériaux après élaboration ou après commande, notre métal de base est importé d'inde comme dit précédemment, c'est pour cette raison que dans cette partie du projet, nous avons effectué une identification positive des matériaux (PMI) à l'aide d'un spectromètre de marque OXFORD instruments PMI-Master pro 2. Le principe de ce type d'instrument consiste à bombarder la surface de l'échantillon à analyser avec un faisceau d'ions (dans notre cas des ions d'argon), une partie alors de la surface est pulvérisée et ionisée, ces ions secondaires sont ensuite accélérés vers un spectromètre de masse qui nous affichera la composition en éléments sur l'écran LCD.

Les échantillons utilisés pour ce test n'ont pas de dimensions précises comme pour les tests destructifs. Le test est facile à faire et dure que quelques secondes, et se fait comme suit : on pointe tout d'abord le pistolet attaché au spectromètre vers notre échantillon en veillant à bien le coller à ce dernier afin d'assurer la trajectoire des ions de bombardement, on appuie ensuite sur le bouton du pistolet en maintenant notre position jusqu'à ce que le test se termine, enfin on prend note des résultats affichés sur l'écran LCD du spectromètre. On refait le test trois ou quatre fois dans des zones différentes plus ou moins rapprochées sur l'échantillon pour garantir les résultats affichés.

III.5.2 Analyse visuelle :

L'analyse visuelle est tout simplement l'inspection du cordon de soudure à l'œil nu ou à l'aide d'une loupe, cette inspection vise à envoyer, au service de réparation, les pièces ayant des défauts bien apparents sur leurs surfaces, on trouve une multitude de défauts, parmi eux il y a :

- les soufflures vermiculaires qui sont assez volumineuses pour une vue à l'œil nu, elles peuvent être causées par un courant d'air, un manque de gaz de protection ou la présence d'une substance grasseuse.
- Les inclusions : se sont tous les corps étrangers qui peuvent venir se coller à la surface du cordon de soudure pendant le soudage.
- La pollution ferreuse : c'est une corrosion des aciers inoxydables causé par la destruction de la couche superficielle, elle est due à l'utilisation d'outils qui ne sont pas en acier inoxydable.
- Les retassures et les criques, qu'elles soient à la racine ou au cratère.
- Les morsures et les caniveaux et les défauts de forme.
- Effondrement et autres trous...etc.

Les pièces ayant réussi le test visuel sont envoyées vers le laboratoire de test non-destructif pour des analyses plus approfondies, les autres sont mises hors circulation et sont envoyées pour réparation.

III.5.3 Observation macroscopique :

L'observation macroscopique permet l'observation de la pièce dans son ensemble pour évaluer son état de surface.

Les pièces utilisées pour l'observation optique n'ont pas de dimensions normalisées. Afin de réaliser cette étape du projet, nous avons eu recours au polissage des pièces en question et plus particulièrement du plan de coupe longitudinal de la soudure.

Pour l'acier au carbone ASTM A333 Gr 6, nous avons préparé une solution dite attaque Nital contenant : 5mL d' HNO_3 et 100 mL d'éthanol, nous avons ensuite trempé nos échantillons dans la solution pendant 50 secondes, pour finir avec un lavage rapide à l'eau et un séchage au compresseur à air.

III.6 Polissage :

Le polissage est une étape inévitable dans la caractérisation de notre acier inoxydable. Cette opération précède chaque essai de microdureté, dureté, électrochimie ainsi que les observations microscopiques, car elle élimine les impuretés, les graisses et les rayures présentes sur la surface. Le polissage peut être manuel ou automatique, mécanique ou chimique, tout dépend de la forme de la pièce et du degré de précision requis.

Chapitre IV : Présentation et interprétation des résultats

IV. Présentation et interprétation des résultats

IV.1 Essai de traction :

Comme dit précédemment, nous avons accompli un test de traction sur deux éprouvettes en feuilles de sections 275,03 et 267,76 mm², ce test a été exécuté à température ambiante. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau IV.1 Résultats obtenus du test de traction

N°	Dimension éprouvette			Domaine plastique		Observations
	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	Section (mm ²)	F _m	R _m (MPa)	
T1	19,02	14,46	275,03	162626,70	591,31	Rupture hors soudure
T2	18,68	14,38	267,76	160342,80	598,84	Rupture hors soudure

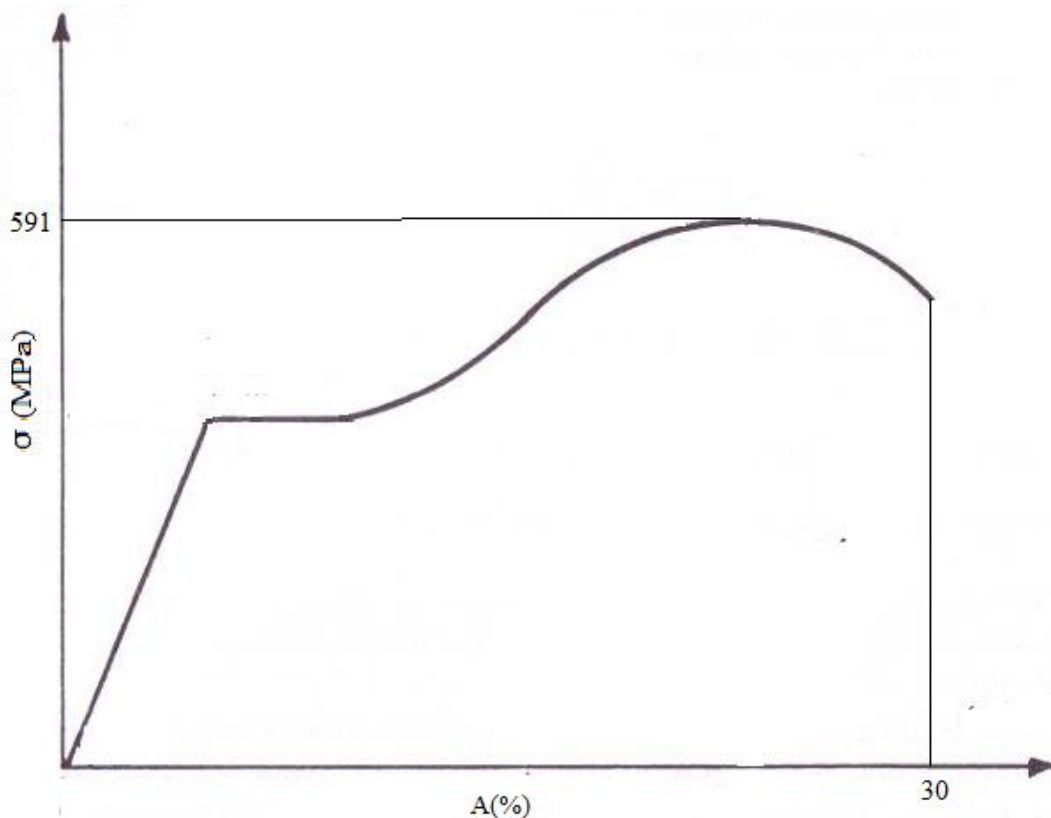


Figure IV.1 Courbe de traction T1

On remarque une croissance rapide jusqu'à 280 MPa qui est la limite élastique de notre pièce. La deuxième partie est le domaine plastique, c'est-à-dire la déformation irréversible de l'éprouvette, le matériau se comporte plastiquement une fois la limite élastique dépassée. On remarque dans cette partie des courbes que la contrainte augmente moins rapidement avec la déformation jusqu'au point B et sa pente tend vers 0, cela est dû à l'augmentation de la longueur

de l'éprouvette au détriment de la section et donc le matériau résiste moins. Après avoir atteint la limite à la rupture qui est de 591.31 MPa la courbe décroît doucement puis subitement. La même courbe est observée pour T2.

IV.2 Essai de résilience :

Afin de vérifier la fiabilité de la soudure, et évaluer son impact sur les caractéristiques mécaniques de base des pipelines, un test de résilience a été appliqué comme dit précédemment, ce test nous permet d'évaluer le risque de rupture du matériau et plus précisément de la soudure dans les conditions de travail, pour cela, le métal a été refroidi jusqu'à - 54 °C pour éviter une déformation plastique des matériaux ductile qui ne conduit pas forcément à une rupture et donc à des résultats erronés, les résultats obtenus sont classifiés dans le tableau suivant :

Tableau IV.2 Résultats obtenus du test de résilience.

N°	Type d'essai	Localisation de l'entaille	Dimension éprouvette (mm)	T° de l'essai (°C)	Energie absorbée (J)	Valeur moyenne (J)
1	V	ZF	10 x 10	-54	71,4	66,67
2	V	ZF	10 x 10	-54	64,3	
3	V	ZF	10 x 10	-54	64,3	
1	V	ZAT	10 x 10	-54	141,7	154,37
2	V	ZAT	10 x 10	-54	155,1	
3	V	ZAT	10 x 10	-54	166,3	

On remarque que pour les mêmes températures, les résultats obtenus pour les éprouvettes entaillées en zone fondue sont relativement faibles par rapport à ceux obtenus pour les éprouvettes entaillées en zone affectée thermiquement moyennant 66,67 J pour la ZF et 154,37 J pour la ZAT. On peut donc conclure que la ZAT est plus résiliente que la zone fondue.

IV.3 Essai de pliage :

L'essai de pliage est un test destructif dont les résultats sont évalués à l'œil nu, nous avons appliqué le test sur 4 éprouvettes de dimensions normalisées citées précédemment, le tableau suivant résume les observations après le test :

Tableau IV.3 Résultats du test de pliage.

N°	Epaisseur (mm)	Largeur (mm)	Diamètre du poinçon (mm)	Type du pliage			Observations
				envers	endroit	endroit	
1	10	14,27	40			X	Rien à signaler
2	10	14,27	40			X	Rien à signaler
3	10	14,27	40			X	Rien à signaler
4	10	14,27	40			X	Rien à signaler

Après avoir effectué des observations visuelles on remarque l'absence de fissure, les soudures sont donc acceptées.

IV.4 Test de dureté :

Le test de dureté Vickers est l'un des tests destructifs appliqué à notre échantillon afin de mieux caractériser la soudure même si la norme ASME 9 ne l'impose pas, pour accomplir cet essai, la surface doit être plane et lisse, exempte d'oxyde, de corps étrangers et de lubrifiant nous avons alors appliqué un polissage en utilisant des papiers verre de polissage avec des grosseurs de grains allant jusqu'à 1200 μm . la charge utilisée dans ce test est de 10 Kgf.

Nous avons mesuré la dureté sur 30 points sur 3 lignes horizontales, et une ligne verticale dans la zone fondue. On présente dans le tableau ci-dessous les résultats obtenus lors de l'essai de dureté :

Tableau IV.4 Résultats de l'essai de dureté.

Zone	L1 Point Nbr	HV₁₀
MB	1	159,30
	2	161,18
	3	167,13
ZAT	4	174,77
	5	181,51
	6	184,52
	7	187,07
	8	188,33
	9	190,76
ZF	10	158,71
	11	160,38
	12	183,02
	13	204,35
	14	206,35
	15	206,82
	16	209,86
	17	216,14
	18	216,79
	19	218,75
	20	220,50
	21	223,86
ZAT	22	182,04
	23	184,97
	24	187,92
	25	192,19
	26	202,00
	27	211,07
MB	28	167,62
	29	171,34
	30	174,24

On trace à l'aide du logiciel Excel, la courbe décrivant l'évolution de la dureté en fonction de la position, on obtient le graphe suivant :

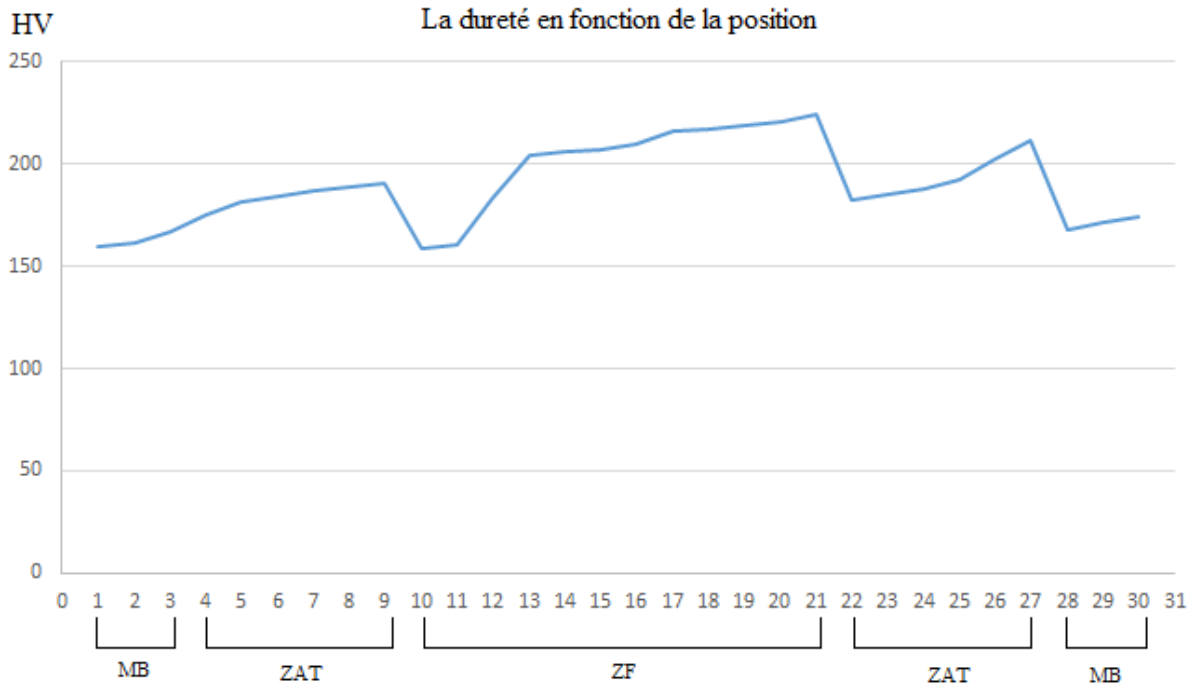


Figure IV.2 Courbe décrivant l'évolution de la dureté en fonction de la zone

On constate à partir de la courbe, que les duretés sont différentes et varient en fonction des zones, on retrouve dans un premier temps une dureté plus ou moins basse du métal de base qui varie entre 159,3 et 210,05 HV pour croître une fois dans la ZAT jusqu'à 211,07 HV, elle reprend ensuite de l'élan dans la zone fondue avec un pic d'une valeur de 223,86 HV.

La zone fondue a une dureté assez élevée par rapport aux autres zones à cause de sa microstructure fine. Néanmoins on remarque aussi que dans cette zone il y a une chute de dureté sur quelques points, cela est dû à la présence de défauts qui diminuent la dureté comme les porosités et les soufflures.

IV.5 Observations macroscopiques :

Après avoir accompli le polissage, l'attaque chimique au Nital, nous avons pris une photographie de l'échantillon afin de déterminer s'il y a des défauts non-apparent à l'œil nu sur la soudure, le résultat obtenu est sur la figure suivante :

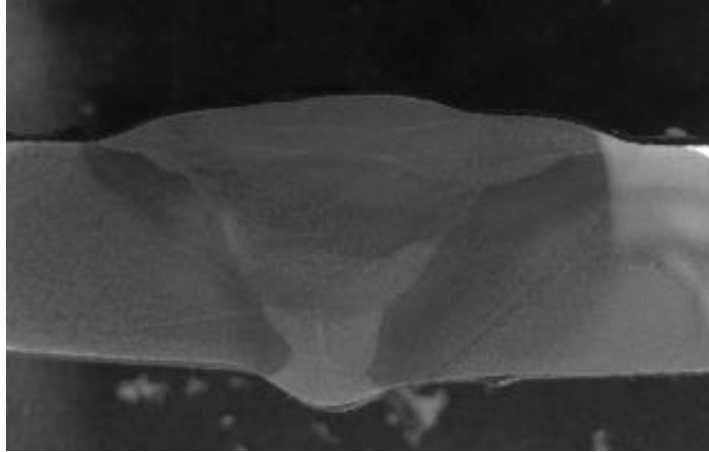


Figure IV.3 Photographie de la soudure attaquée au Nital.

De la figure IV.2 on remarque à première vue qu'il n'y a pas de défaut apparent sur la surface, néanmoins cela n'exclut pas la possibilité d'avoir des défauts internes vu les résultats de l'essai de dureté où on a pu constater des chutes de dureté sur quelques points de la zone fondue, car ces chutes sont essentiellement dû au défaut présent dans la soudure.

Conclusion générale :

L'acier au carbone ASTM A333 grade 6 est utilisé pour les pipelines dans des installations à haute pression.

Dans le cadre du projet TOUAT GAZ proposé par l'EN-GTP, nous avons procédé à la caractérisation mécanique de la soudure de l'acier.

Pour accomplir ce travail j'ai réalisé les travaux suivant :

- Caractérisation mécanique du matériau soudé non traité thermiquement consistant en plusieurs essais mécaniques : essais de traction, essais de pliage, des essais de résilience, de dureté et une observation macroscopique.

A l'issue des travaux réalisés j'ai pu tirer les conclusions suivantes :

- Le soudage de l'acier au carbone ASTM A333 grade 6 au procédé GTAW donne d'assez bonnes propriétés mécaniques et améliore la résistance à la traction de l'assemblage.
- Les essais de résilience ont montré que le matériau à une bonne résilience à basse température.
- La zone affectée thermiquement est beaucoup plus résiliente que la zone fondue.
- L'essai de pliage n'a montré aucune fissuration sur la soudure.
- La zone fondue présente une dureté élevée par rapport aux autres zone cela est dû à sa microstructure qui est fine.
- Il existe des chutes de dureté sur quelques points de la zone dû à des défauts de soudure, ces derniers ne sont pas important et donc négligeable.
- La macrographie ne montre pas de défaut sur la surface, mais cela n'exclut pas la possibilité d'avoir des défauts internes.
- Vu le caractère résilient que présente de notre soudure qui est très important pour les aciers ASTM A333 de grade 6, et les résultats des autres essais la soudure a été acceptée.

Bibliographie :

- [1] F.DELATTRE, Le soudage des aciers inoxydables, Paris: DUNOD, 1965.
- [2] W. Klas, Aide-mémoire procédé de soudage, Paris: Dunod, 2005.
- [3] V. R, Soudage: éléments de conception et de réalisation, Paris: Dunod, 1982.
- [4] R. Cazes, Procédés de soudages: principe généraux et critères de choix, Technique de l'ingénieur B7700, 2006.
- [5] L. Mendel, Manuel pratique de soudage à l'arc, Paris: Dunod, 1975.
- [6] M. C. e. coll, Matériaux Métallique, Paris: Dunod, 2008.
- [7] J. R. D. a. co, Metals Handbook, ASM International, 1998.
- [8] M. Durand-Charre, La microstructure des aciers et des fontes : Genèse et interprétation, Paris: EDP Science, 2012.
- [9] L. GUILLET, Précis de métallographie, Paris: MASSON ET Cie, 1958.
- [10] D. Michel, Aide-mémoire science des matériaux, Paris: DUNOD, 2013.
- [11] The professional's Advisor on: Welding of Stainless Steels, American Welding Society , 1999.
- [12] G. Murry, Aide-mémoire Métallurgie 2e édition, Paris, 2010.
- [13] P.JEONG, «Ultrasonic Characterization of Centrifugally Cast Stainless Steel,» Plac Alto: Electric Power Research Institute, California , 1987.
- [14] K.RAJASEKHAR, Microstructural evolution during solidification of austenitic stainless steel weld metals : a color metallographic and electron microprobe analysis study, 1997.
- [15] H.SASSOULAS, Techniques de l'ingénieur - Matériaux métalliques traités, traitements thermiques des aciers inoxydables, M1160., 2000.
- [16] P.-J. CUNAT, Technique de l'ingénieur - Aciers inoxydables, Fabrication. M4543, 2001.
- [17] D.LANDOLT, Traité des matériaux vol 12: Corrosion et chimies des surfaces des métaux, 1971.
- [18] P.LACOMBE, Les applications du concept électrochimique au remède contre la corrosion, introduction à l'étude de la corrosion métallique dans l'industrie pétrolière et chimique., 1952.
- [19] J. P. Jonathan Beddoes, Introduction to stainless steels, Les Etats Unis d'Amérique: ASM INTERNATIONAL, 2003.

[20] D. L. & R. MUDD, Steels Metallurgy & applications.