



Département de Génie Mécanique
MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Construction Mécanique

Présenté par :

Mahdid Noureddine & Ghoul Brahim

Thème:

**ETUDE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE ET
STRUCTURALE DES SOUDURES A L'ARC ELECTRIQUE
SUR DIFFERENTS ACIERS**

Présenté devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Qualité	Etablissement
MENASRI Noureddine	Pr	Président	Université de M'sila
ZAOUI Moussa	Pr	Encadreur	Université de M'sila
RAKBI FARES Mohamed Laid	Dr	Co-Encadreur	CRTI - Cheraga
BELHOCINE Abdelghani	Dr	Examineur	Université de M'sila

ملخص :

هذا العمل هو دراسة مقارنة لأنواع مختلفة من اللحام على أنواع مختلفة من المعادن الأساسية (فولاذ S235 , E308 , E7018) وتحديد خصائص هذه اللحامات ودراسة سلوكاتها الميكانيكية مثل قوة الجر ، يليها توصيف مجهري باستخدام مجهر بصري لتحديد الخصائص المجهرية , من أجل إجراء مقارنة كاملة بين مختلف أنواع اللحام لمختلف المعادن.

Résumé :

Ce travail présente une étude comparative des différents types de soudage sur différents types de métal de base (acier S235, E308 E7018), et en identifier les caractéristiques de ces soudures par différentes méthodes, en particulier d'étudier le comportement mécanique des joints de soudures tels que la traction, suivi d'une caractérisation microstructurale à l'aide d'un microscope optique dans le but de faire une comparaison entre ces différents types d'assemblages soudés.

Abstract :

This work presents a comparative study of different types of welding and applied on different types of base metal (S235 steel, E308, E7018), and identify the characteristics of these welds by different methods, in particular to study the mechanical behavior of weld joints such as traction, followed by microstructural characterization at using an optical microscope in order to make a comparison between these different types of welded joints.

Remerciements

Je remercie Dieu pour la santé et le courage qu'il m'a donnés pour entreprendre cet humble acte. Je suis très reconnaissant à mes chers parents qui m'ont causé tant de peine dans la vie pour ma réussite, et j'espère, si Dieu le veut, les protéger et leur donner santé et activité. Je tiens à remercier le Dr Zaoui Moussa, mon directeur de thèse et chargé de cours au Département de génie mécanique de m'avoir guidé dans mon travail et de m'avoir fait bénéficier de ses connaissances qui m'ont beaucoup aidé. En plus de tous les professeurs et du personnel de l'Université Mohamed Boudiaf M'sila, je voudrais également exprimer mes remerciements au Dr RakbiFares Mohamed Laid du Centre de Recherche pour m'avoir aidé à réussir et avoir accepté de lire, revoir et juger cette recherche. Un grand merci au personnel du laboratoire du CRTI pour leur gentillesse et leur aide.

Sommaire

SOMMAIRE	i
Liste des figures	v
Liste des tableaux	vii
Introduction générale	2

CHAPITRE I : Généralités et Classification des Aciers

Introduction	5
I.1 Définition de l'acier	5
I.2 Les composants des aciers	5
I.3 Propriétés générales de l'alliage fer-carbone	5
I.3.1 Fer	6
I.3.2 Carbone	7
I.4 Diagramme fer-carbone	7
I.4.1 Acier eutectoïde (0,77 %C)	9
I.4.2 Aciers hypoeutectoïdes (0,008 à 0,77 %C)	9
I.4.3 Aciers hypereutectoïdes (entre 0,77 et 2,11 %C)	10
I.5 Traitements thermiques des aciers	10
I.5.1 Trempe, ou durcissement par trempe	11
I.5.2 Revenu	12
I.5.3 Recuit	12
I.6 Effets des éléments d'addition	13
I.6.1 Manganèse (Mn)	13
I.6.2 Soufre (S)	13
I.6.3 Phosphore (P)	13
I.6.4 Cuivre (Cu)	14
I.6.5 Azote (N)	14
I.7 Classification des aciers	14
I.7.1 Aciers non alliés (« Aciers au carbone »)	14
I.7.1.1 Aciers non alliés d'usage général (S, E, et C.)	14
I.7.1.2 Aciers spéciaux, non alliés, de type C	16
I.7.2 Aciers faiblement alliés, pour haute résistance	17
I.7.2.1 Désignation normalisée	17
I.7.2.2 Aciers de cémentation (% C < 0,2 %)	18
I.7.2.3 Aciers pour trempe dans la masse	18
I.7.3 Aciers fortement alliés	18
I.7.3.1 Désignation	18

I.7.3.2 Aciers inoxydables.....	19
I.7.4 Fontes.....	21
I.7.4.1 Fontes à graphite lamellaire EN-GJL « FGL »	21
I.7.4.2 Fontes à graphite sphéroïdal EN-GJS « FGS »	21
I.7.4.3 Fontes malléables EN-GJMW et GJMB « FMB et FMN »	22
I.8 Autres familles des aciers et fontes	24

CHAPITRE II : Classification des procédés des soudage

Introduction	26
II.1 Classification des procédés de soudage	26
II.2 Soudage par fusion sans pression	26
II.2.1 Soudage aux gaz	27
II.2.2 Soudage à l'arc électrique.....	30
II.2.2.1 Soudage manuel à l'arc électrique avec électrode enrobée	31
II.2.2.3 Soudage semi-automatique: MIG, MAG.....	38
II.2.2.4 Soudage à l'arc électrique sous flux ou soudage à l'arc électrique submergé.....	42
II.2.3 Soudage par faisceau haute densité d'énergie.....	45
II.2.3.1 Soudage par faisceau d'électrons	45
II.2.3.2 Soudage laser	41
II.3 Soudage par pression et fusion	45
II.3.1 Soudage par point	45
II.4 Soudage par pression	46
II.4.1 Soudage par friction.....	47
Conclusion.....	49

CHAPITRE III : L'inspection destructive des soudures

III.1. Définition essais destructifs des soudures	51
III.2. L'essai de traction	51
III.2.1. Définition de l'essai de traction	51
III.2.2. Buts de l'essai de traction.....	52
III.2.3. Principe de l'essai de traction.....	53
III.2.4. Localisation des éprouvettes de traction dans un joint soudé.....	54
III.2.5. Résultats de l'essai de traction	55
III.2.5.1. Courbe de traction avec limite d'élasticité apparente.....	55
III.2.5.2 Récapitulatif des résultats d'essai.....	55
III.3. Résilience (essai de flexion par choc)	56
III.3.1. Principe de l'essai :	56
III.3.2. But de l'essai de flexion par choc	57
III.3.3. Conditions d'essai	58
III.3.4. Résultats d'essai	58

III.4. ESSAI DE DURETE.....	59
III.4.1. Domaines de la dureté :	59
III.4.2. Les essais par indentation :	60
III.4.2.1. Essai de dureté Brinell.....	61
III.4.2.2. Essai de dureté Rockwell :	61
III.4.2.3. L'essai de dureté Vickers	62
III.4.3. Intérêt et application des essais d'indentation	63
III.5. Les examens micrographiques	65
III.5.1. Présentation de la norme NF A 05-150 :	65
III.5.2. A quoi sert l'examen micrographique :	65
III.5.3. Préparation micrographique de l'échantillon :	65
III.5.3.1. Le pré-polissage :	65
III.5.3.2. Le polissage de finition	66
III.5.3.1. L'attaque macrographique :	67
III.5.4. Les réactifs utilisés pour les examens des structures	68
III.5.4.1. Réactifs d'attaque chimique	68
III.5.4.2. Réactifs d'attaque électrolytique	68
CHAPITRE IV : Techniques expérimentales	
Introduction	71
IV.1. Les matériaux utilisés	71
IV.2. Les métaux d'apport.....	72
IV.3. Procédure de soudage.....	74
IV.3.1. Préparation des échantillons :	74
IV.3.2 Découpage des éprouvettes :	76
IV.4. Les examens métallographiques	78
IV.4.1 Les opérations de préparation des surfaces	78
IV.4.2. Examen macrographique et microscopie :	79
IV.4.2.1. Examen macrographique.....	79
IV.4.2.2. Examen micrographique	80
IV.5. Caractérisations mécaniques :	81
IV.5.1. Essai de traction	81
IV.5.2. Essai de résilience (ou essai de flexion par choc)	83
IV.5.2.1. LemoutonCharpyetprincipedemesure:	83
IV.5.3. Essai de dureté :	85
IV.5.3.1. Eprouvettes :	86
IV.5.3.2. Exécution de l'essai :	86
CHAPITRE IV : Résultats et discussions	
Introduction	88

V.1. Résultats des caractérisations structurales :.....	88
V.1.1. Macrographie :	89
V.1.2. Micrographie	90
V.1.2.1.Examen au microscope optique.....	90
V.2. Résultats des caractérisations mécaniques	91
V.2.1. Essai de traction.....	91
V.2.2. Essai de résilience	95
V.2.3. Essai de dureté.....	95
Conclusion générale	98
Référence.....	100

Liste des figures

Figure I.1: Une structure cristalline cubique centrée	6
Figure I.2 : Structure cristalline cubique à face centrée	7
Figure I.3 : Diagramme fer-carbone [4]	8
Figure I.4 : Microstructures des aciers en fonction du pourcentage de carbone.	10
Figure I. 5 : Constituants des aciers suivant la vitesse de refroidissement cas de l'acier eutectoïde à 0,77 % C.....	11
Figure I. 6 : Laminés marchands.....	15
Figure I.7: Désignations des aciers au carbone.....	15
Figure I. 8. Désignation des aciers faiblement alliés.....	18
Figure I. 9. Désignation des aciers fortement alliés.	19
Figure I. 10. Microstructures des fontes usuelles.....	22
FigureII.1:Classificationdesprocédésde soudage[5].....	27
Figure II.2 :Installationdesoudageau gaz [6]	28
Figure II.3:Laflammedesoudageoxyacéthylique [6].....	29
Figure II.4 Représentelaclassificationdesprocédésdesoudageà l'arc[7]	30
Figure II.5: Fichepratique desécurité, Lesoudagemanuelà l'arcavecélectrodesenrobées[9]	32
FigureII.6:Principedesoudage à l'arcavecélectrodesenrobées [10]	32
Figure II.7:Principe procédée de soudageTIG[12].....	37
Figure II.8:ProcédésdesoudageMIG/MAG[13].....	38
Figure II.9 :Principe deprocédéedeSoudage à l'arcSubmergé [13].....	خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة.
Figure II.10: InstallationdeSAFP [13].....	خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة.
Figure II.11: Schémadesoudagepar fuseauélectrons[15].....	خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة.
Figure II.12 :Soudureparfaisceau électron[15].....	خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة.
Figure II.13:PrincipedeprocédéedeSoudagelaser[16].....	42
Figure II.14: Présentation modes soudure laser [17].....	43
Figure II.15: Configurationdejointssoudéslaser [17].....	44
FigureII.16:PrincipedeprocédéedeSoudageparpoint[17].....	46
FigureII.17:Principedusoudageparfriction[18].....	47
Figure II.18:LapartienrotationestfreinéeetlaforcedeforgeageF2estexercée[18].....	48
FigureII.19:Arbresdetransmissionsoudéspar friction[18]	48
Figure II.20:Engrenagesoudépar friction[18]	49
FigureI.21:Assemblagealuminium-acier[18]	49
Figure III.1. Une éprouvette de section prismatique	54
Figure III.2. Courbe de traction avec limite d 'élasticité apparente	55
Figure III.3. Le test de résilience et flexion	57
Figure III.4. Définitions des différents domaines de dureté [34].	60

Figure III.6. Principe de mesure de la dureté Rockwell : a) échelle HRC, b) échelle HRB.....	62
Figure III.7. Principe de dureté Vickers.....	63
Figure IV.1. Métal d'apport E308.....	73
Figure IV.2. Métal d'apport E7018.....	74
Figure IV.3. Paramètres de soudage.....	74
Figure IV.4. Une tronçonneuse (Struers Discotom) au niveau de CRTI.....	76
Figure IV.5. Eprouvettes de résilience.....	77
Figure IV.7. Eprouvettes de traction.....	77
Figure IV.8. Polissages.....	78
Figure IV.9. L'examen macrographique pour échantillons.....	80
Figure IV.10. L'examen micrographique pour échantillons.....	80
Figure IV.11. Machine de traction au niveau de CRTI.....	81
Figure IV.12. Eprouvettes de traction.....	82
Figure IV.13. Courbe de traction.....	83
Figure IV.14. Machine d'essais de résilience au niveau de CRTI.....	84
Figure IV.15 : Eprouvettes de résilience.....	84
Figure IV.16. Appareils de mesure de dureté au niveau de CRTI.....	86
Figure V.1: Macrographie du profil du joint soudé.....	89
Figure V.2: Microstructure du métal de base S235JR.....	90
Figure V.3. Micrographie de la ZF et de la ZAT.....	91
Figure V.4. Courbe de traction.....	94
Figure V.5. L'histogramme des résultats de l'essai de résilience.....	95
Figure V.6. Schématisation des points de dureté.....	96
Figure V.7. Les courbes de dureté.....	97

Liste des tableaux

Tableau I.1. Principaux aciers non alliés.....	16
Tableau I.2. Aciers inoxydables - extrait NF EN 10088.....	20
Tableau I.3. Principales fontes.....	23
Tableau III.1. Comparaison entre les méthodes par pénétration.....	64
Tableau IV.1. Composition chimique de l'acier de construction S235JR.....	72
Tableau IV.2. Composition chimique du métal d'apport E308.....	73
Tableau IV.3. Composition chimique du métal d'apport E7018.....	73
Tableau IV.4. Paramètre de soudage des soudures réalisées par le métal d'apport E308.....	75
Tableau IV.5. Paramètre de soudage des soudures réalisées par le métal d'apport E7018.....	75
Tableau IV.6. Les réactifs d'attaque chimique utilisés.....	79
Tableau V.1: Résultats de l'essai de résilience.....	95
Tableau V.2. Valeurs de dureté dans les différentes zones.....	96

Introduction générale

Introduction générale

Le soudage est un procédé d'assemblage permanent qui consiste à créer une liaison métallurgique entre deux pièces par fusion local. Il existe différents types de soudage selon la source d'énergie utilisé pour produire la chaleur nécessaire à la fusion : soudage l'arc électrique, soudage au gaz, soudage par laser, et ce.

Le soudage à l'arc électrique est le procédé le plus répandu dans l'industrie métallurgique. Il utilise un courant électrique pour créer un arc entre un électrode et les pièce souder. L'électrode peut être consommable ou non consommable selon qu'il participe ou non à l'apport de métal fondu.

Le soudage électrique avec électrode enrobée est un type de soudage à l'arc électrique qui utilise une électrode.

Consommable recouverte d'un matériau qui produit un gaz protecteur lors de la fusion. Ce gaz protéger le bain de fusion des réactions chimique avec l'air ambiant et favorise la stabilité de l'arc.

Le soudage électrique avec électrode enrobée est utilisé pour souder différent types de métaux comme l'acier au carbone, l'acier inoxydable ou le cuivre. Il présente des avantages comme la simplicité du matériel, la facilité d'utilisation, la polyvalence des positions de soudage et la résistance des joints soudée.

Cependant, le soudage électrique avec électrode enrobée peut aussi entraîner des modifications de la microstructure et du comportement mécaniques des assemblages des acier ordinaires. Ces modifications peuvent affecter la qualité et la durabilité des joints soudés.

La microstructure d'un joint soudé est constitué de différents zones qui on subi des transformation métallurgique lors de cycle thermique du soudage : le métal fondu (MF), la zone affecté thermiquement (ZAT) et le métal de base (MB). Le comportement mécaniques d'un joint soudé dépend des propriétés de ces zones, comme la résistance à la traction, la dureté ou la ténacité.

Les paramètres de soudage électrique avec électrode enrobée peuvent avoir une influence sur les propriétés des joints soudés, comme la largeur du cordon, la profondeur de

pénétration, la composition chimique du métal fondu, la formation de composés intermétallique ou de phase fragile, ou encore la présence de défauts comme la porosité ou les fissures.

L'étude de ces paramètres peut permettre d'optimiser le procédé de soudage électrique avec électrode enrobée et d'améliorer les performances des assemblages des aciers ordinaires.

La problématique qui guide notre recherche est donc les suivantes : Quelle est l'influence des paramètres de soudage électrique avec électrode enrobée sur la microstructure et le comportement mécaniques des assemblages des acier ordinaires ?

Pour répondre à cette problématique, nous avons adopté une démarche expérimental basée sur la réalisation d'éprouvettes soudée avec différentes conditions opératoires.

Nous avons utilisé deux types d'électrodes enrobées (E308)et (E7018)et deux intensités de courant (90A100A). Nous avant ensuite caractérisé les éprouvettes soudées par des essais mécanique (traction, dureté et résilience) et par let analyses microstructurales (microscopie optique et électronique).

Notre objectif principal est donc d'établir une relation entre les paramètres de soudage électrique avec électrode enrobée et les propriétés des joints soudés des aciers ordinaires.

CHAPITRE I :

Généralités et Classification des Aciers

Introduction

Les aciers jouent un rôle important dans presque tous les domaines. Ils ont été à l'origine de nombreuses révolutions scientifiques et industrielles grâce à leurs propriétés mécaniques polyvalentes qui peuvent être modifiées par l'ajout d'éléments d'alliage et par des différences de température, de pression et de composition chimique. [1].

I.1 Définition de l'acier

L'acier est l'autre alliage principal du fer. Il intègre lui aussi une part de carbone : entre 0,02 % et 2 % de la masse totale du morceau d'acier. Une fois trempé, l'acier devient encore plus dur que le fer. Il tient l'essentiel de ses propriétés de sa teneur en carbone. Lorsque celle-ci augmente, la dureté de l'alliage s'améliore et son allongement à la rupture diminue. L'ajout d'autres éléments, tels le chrome ou le nickel, permet aussi de modifier les propriétés physiques de l'acier [2].

I.2 Les composants des aciers

Les constituants les plus importants sont le Fer et le Carbone, et les éléments chimiques présents dans l'acier peuvent être classés en trois (03) catégories :

a) **Les impuretés** : Originellement présentes dans les ingrédients du haut fourneau qui serviront à produire la fonte qui servira à fabriquer l'acier. Il s'agit notamment du soufre (S) et du phosphore (P), ainsi que du plomb (Pb) et de l'étain (Sn). En outre, il peut y avoir un certain nombre d'autres éléments à bas point de fusion tels que les éléments arsenicaux comme l'arsenic (As), l'antimoine (Sb).

b) **Les éléments d'additions** : Des éléments chimiques peuvent être ajoutés à un matériau afin de mieux résister aux facteurs de stress, tels que les forces mécaniques ou chimiques. Les ajouts les plus courants sont le manganèse (Mn), le chrome (Cr), le nickel (Ni) et le molybdène (Mo).

c) **Les éléments d'accompagnements** : que le sidérurgiste met en œuvre pour réguler les différentes réactions physico-chimiques nécessaires à l'élaboration à terme d'un acier conforme au cahier des charges. Des éléments comme le calcium, le silicium et l'aluminium entrent dans cette catégorie [3].

I.3 Propriétés générales de l'alliage fer-carbone

Le fer et le carbone sont associés à des éléments éventuellement complémentaires (aciers alliés) pour former des aciers et des fontes. Ils sont facilement recyclables et abordables (le fer est le métal de base le moins cher et se trouve en grande abondance sur Terre) [4].

I.3.1 Fer

Au-dessus du point de Curie, qui est de 768 °C, le fer perd ses propriétés magnétiques et prend des formes diverses (densité 7,88) (figure I.3):

- **Fer α (alpha)** : il existe jusqu'à 912 °C. De structure cristalline à maille cubique centrée (figure I-1), il ne dissout pratiquement pas le carbone (0,022 %C à 727 °C, 0,008 %C à température ambiante). La solution fer α s'appelle la ferrite.

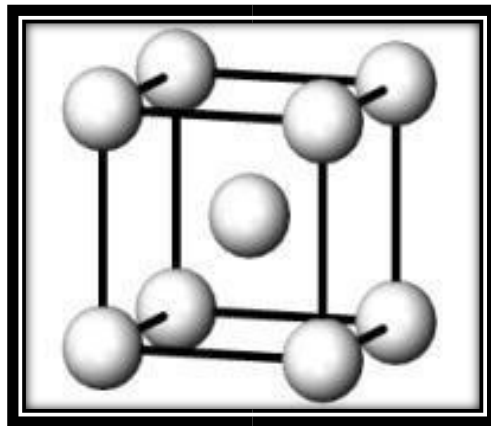


Figure I.1: Une structure cristalline cubique centrée

- **Fer γ (gamma)** : il est stable entre 912 °C et 1394 °C de maille cubique à faces centrées (figure I-2), il peut absorber, ou « dissoudre », beaucoup plus d'atomes de carbone que le fer α car les interstices sont plus nombreux entre les atomes. La proportion maximale est de 2,11 % à 1148 °C. La solution fer γ s'appelle l'austénite.

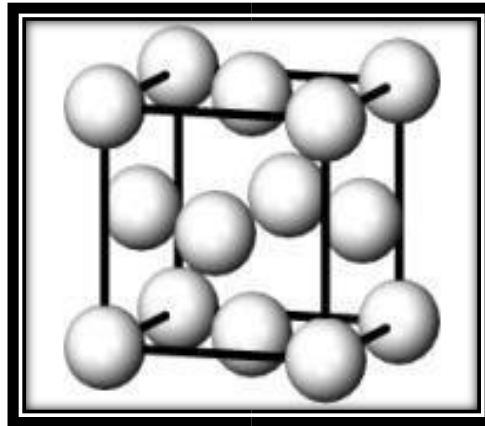


Figure I.2 : Structure cristalline cubique à face centrée

- **Fer δ (delta)** : il est stable entre 1394 °C et 1538 °C ; de maille cubique centrée (figure I-1), il a peu d'importance sur le plan industriel.

I.3.2 Carbone

Il fond à 3500°C et dispose de trois options de cristallisation : graphite, diamant et noir de carbone. C'est un composant crucial dans le durcissement de l'acier. La région des aciers à outils, caractérisée par des niveaux de dureté élevés, se situe au-dessus de 0 point 6 % de carbone. Les gammes de température correspondant au traitement thermique et à la transformation à chaud sont progressivement abaissées au fur et à mesure que la teneur en carbone augmente.

I.4 Diagramme fer-carbone

Les propriétés mécaniques des aciers sont influencées de manière significative (et assez complexe) par le carbone : en dessous de 0 point 008 %, l'alliage est malléable et est presque entièrement constitué de fer ; au-dessus de 2 virgule 11 %, les inclusions de carbone sous forme de graphite fragilisent la microstructure et on parle de fonte. La résistance mécanique de l'alliage devient généralement plus forte à mesure que la teneur en carbone augmente.

carbone, la limite à droite et l'expose. les deux grandes familles de métaux ferreux les aciers (entre 0,008 et 2,1 %C) et les fontes (de 2,1 % à 6,67 %C).

Ligne A₁ (727 °C) : elle marque la fin de la transformation de la perlite, mixture de fer contenant 0,77 %C, en austénite ; au-dessus de 727 °C la perlite n'existe plus.

Ligne A₃ : elle précise la fin de la transformation de la ferrite en austénite la ferrite n'existe plus au-dessus de cette ligne.

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

Symboles A, r, et c : ils sont normalisés, aux normes internationales. Le symbole A est utilisé pour arrêt, r pour refroidissement et c pour chauffage.

Exemples : A_{r1} signifie passage de la ligne A₁ lors d'un refroidissement ; A_{c3} passage de A₃ lors d'un chauffage ; passage de A_{cm} lors d'un chauffage.

Lorsque le refroidissement se déroule assez lentement, l'austénite se transforme d'abord en ferrite, qui ne peut pas absorber complètement les atomes de carbone libérés en raison des interstices plus petits de sa maille. Cela provoque la combinaison d'une partie du carbone libéré avec les atomes de fer à mesure que la température baisse, ce qui donne de la cémentite.

La perlite est créée lorsque cette cémentite s'agrège avec la ferrite antérieure. Trois caisses d'aciers sont disponibles après refroidissement.

I.4.1 Acier eutectoïde (0,77 %C)

Toute l'austénite initiale est précipitée en perlite : un seul constituant de base contenant 0,77 %C.

I.4.2 Aciers hypoeutectoïdes (0,008 à 0,77 %C)

Ceux-ci ont la ferrite et la perlite comme leurs deux composants principaux, ce qui en fait les plus couramment utilisés dans l'industrie. Il reste toujours une certaine quantité de ferrite après la transformation de l'austénite en perlite lors du refroidissement car il n'y a pas assez d'atomes de carbone pour ne produire que de la perlite. La quantité de ferrite dépend de la teneur initiale en carbone.

I.4.3 Aciers hypereutectoïdes (entre 0,77 et 2,11 %C)

La perlite et la cémentite sont leurs deux principaux ingrédients. Étant donné qu'une partie du carbone initial ne peut pas être dissoute et consommée par la perlite, les atomes de carbone restants se combinent avec le fer pour former de la cémentite dans des proportions qui dépendent de la teneur initiale en carbone.

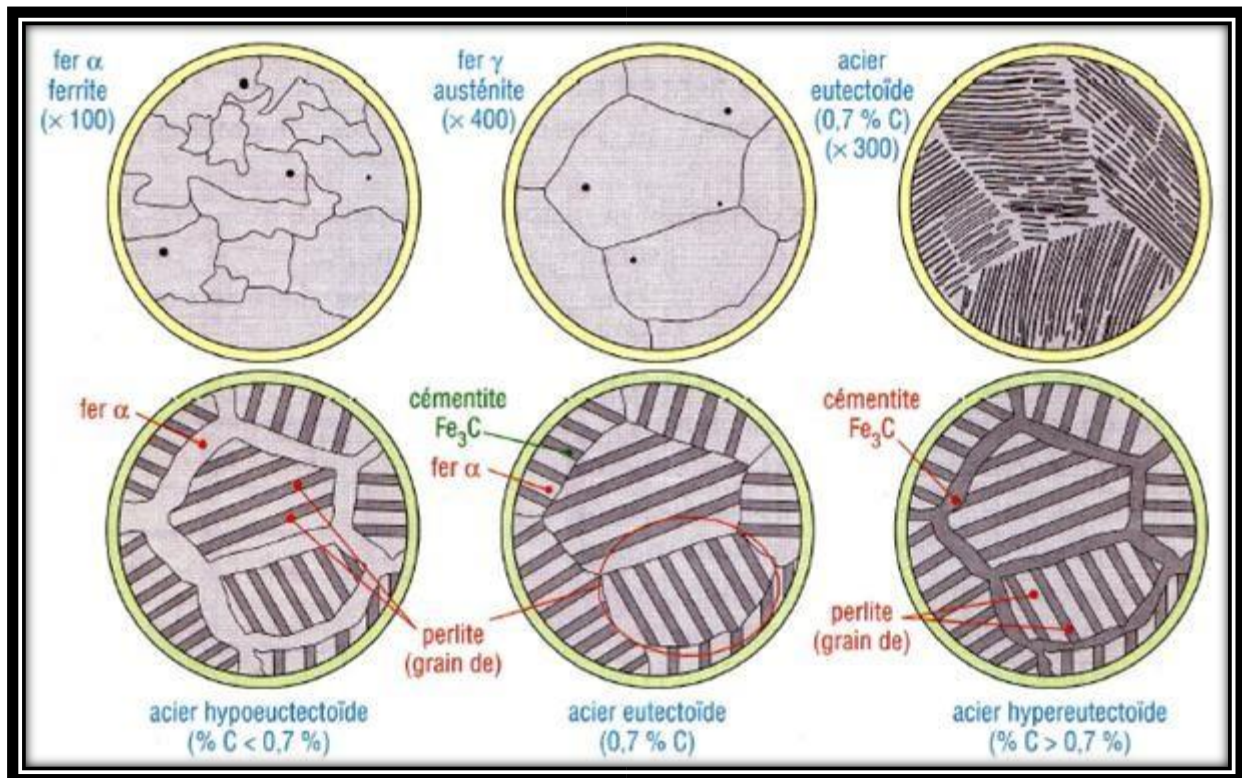


Figure I.4 : Microstructures des aciers en fonction du pourcentage de carbone.

I.5 Traitements thermiques des aciers

Les aciers peuvent voir leur structure et leurs caractéristiques mécaniques (R_r , R_e , H , A pour cent et K) modifiées par un chauffage suivi d'un refroidissement contrôlé. La masse qui a été trempée, revenue et recuite a subi ces traitements thermiques. Les lignes A_1 , A_3 et A_{cm} du diagramme fer-carbone sont proches de l'endroit où les transformations ont lieu [4].

I.5.1 Trempe, ou durcissement par trempe

Les atomes de carbone n'ont plus le temps de diffuser, et les changements mentionnés dans les paragraphes précédents n'ont plus le temps de se produire, lorsque la vitesse de refroidissement est suffisamment rapide.

L'austénite ne peut devenir ni ferrite ni perlite car elle a manqué de temps pour perdre son carbone. La solution de fer résultante qui est sursaturée en carbone est connue sous le nom de martensite ; il est extrêmement dur ($HB = 750$) et très cassant. C'est l'élément fondamental des aciers trempé

Procédé : La pièce est chauffée jusqu'à atteindre la température d'austénitisation, puis elle est maintenue à cette température pour homogénéiser la structure avant d'être refroidie rapidement (avec de l'eau, de l'huile...).).

Ce n'est que si la vitesse de refroidissement est suffisamment rapide que toute l'austénite se transformera en martensite. D'autres composants plus mous, tels que la bainite, la perlite, etc., se forment en variante.

Propriétés : Tout en diminuant K et A pour cent, il augmente Rr, Re et H. De plus, il provoque la manifestation de tensions internes, ce qui provoque des fissures et des déformations.

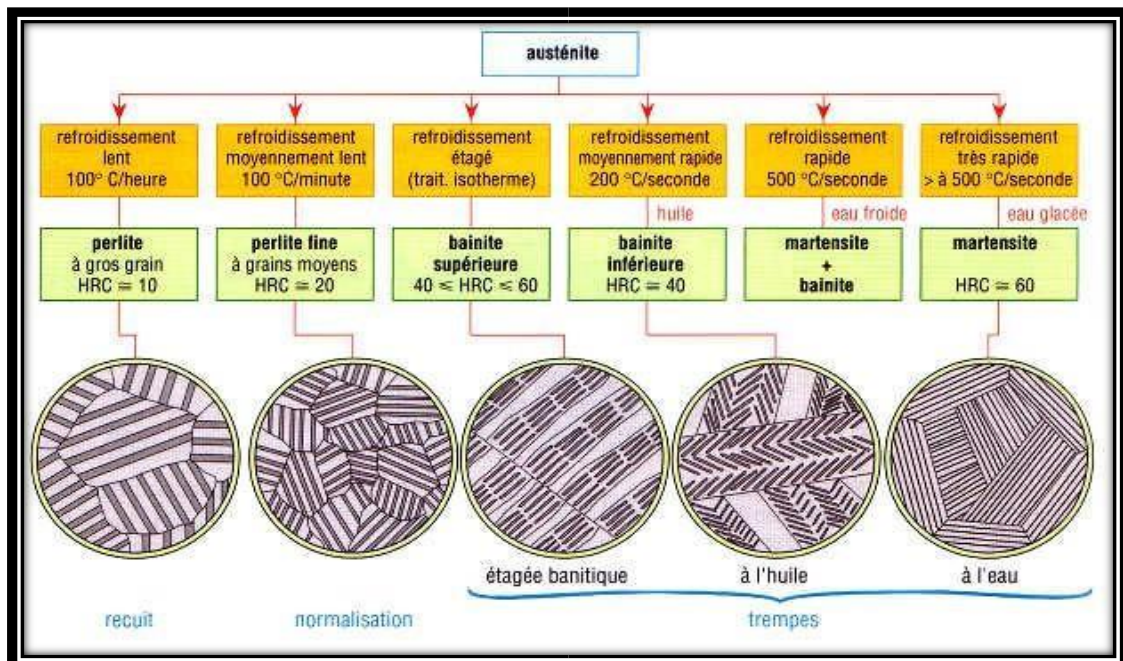


Figure I. 5 : Constituants des aciers suivant la vitesse de refroidissement cas de l'acier eutectoïde à 0,77 % C.

I.5.2 Revenu

La martensite, un matériau extrêmement cassant et dur, qui a été trempé, est dans cet état pratiquement inutile. La trempe est utilisée pour inverser les effets de la fragilisation tout en préservant un ensemble souhaitable de propriétés (Rr, Re et H).

Procédé : Il s'agit de chauffer à une température inférieure à 700 °C, de maintenir la température pour homogénéiser la structure

, puis de refroidir lentement et soigneusement. Il est utilisé pour les pièces trempées. Le processus élève les propriétés mécaniques au niveau souhaité.

Propriétés : une augmentation des pourcentages de K et A ; une réduction des contraintes internes. H, Rr et Re réduits sont des inconvénients. Les résultats dépendent largement de la température de réchauffage. Principaux revenus

Les contraintes internes peuvent être supprimées et la dureté n'est pratiquement pas affectée par le réchauffage à 220°C. Le métal deviendra de plus en plus mou, aura une dureté plus faible et un degré de ductilité plus élevé à mesure que la température augmentera. Les températures comprises entre 500 et 675 °C sont le plus souvent utilisées pour la trempe.

I.5.3 Recuit

À l'opposé de la trempe, il a l'effet inverse. A pour cent et K maximum, Rr et H minimum, le métal est amené au summum de ses propriétés de ductilité. La structure résultante, composée de ferrite et de perlite, est plus usinable.

Procédé : Afin d'homogénéiser la structure, la température est maintenue au-dessus de la température d'austénitisation pendant un certain temps, suivi d'un refroidissement lent.

Différents recuits

- Recuit d'homogénéisation : Ce procédé rend les aciers bruts de coulée chimiquement hétérogènes.
- Le grain du métal est standardisé et affiné lors du recuit de régénération.
- Après soudage ou moulage, les contraintes internes sont supprimées par recuit pour la détente.
- Le recuit de recristallisation est utilisé avec des aciers forgés ou trempés.

- Recuit complet : En supprimant les composants les plus durs, il facilite l'usinage et la déformation à froid.

Une même opération de recuit peut englober les traits des cinq cas antérieurs à l'échelle industrielle.

I.6 Effets des éléments d'addition

Selon la classification traditionnelle, il existe quatre types d'aciers ordinaires qui ne contiennent pas d'éléments d'alliage : doux, mi-doux, dur et extra-dur. En ajoutant les éléments d'addition et en appliquant les traitements thermiques appropriés, on peut produire des aciers avec une large gamme de propriétés. Les propriétés mécaniques (R_r , R_e , H , A pour cent, K), la résistance à la corrosion, la soudabilité, la fluidité, la forgeabilité, l'usinabilité et le magnétisme sont toutes affectées par l'ajout de quantités suffisantes d'éléments d'addition.

I.6.1 Manganèse (Mn)

Comme le nickel, le manganèse a un impact sur le comportement des aciers à outils. Il existe généralement sous forme d'élément résiduel à des concentrations comprises entre 0 et 0 %. Le manganèse peut être trouvé dans certains aciers à outils en quantités aussi élevées que 2% pour des problèmes de trempabilité et aussi faibles que 1% après resulfuration.

I.6.2 Soufre (S)

Une impureté, en général. L'usinabilité et l'état de surface des outils sont améliorés lorsque du soufre est ajouté aux aciers à outils jusqu'à des niveaux proches de 0 %. L'augmentation de la teneur en carbone et en éléments carbogéniques de l'acier rend cette amélioration encore plus significative. Comme les inclusions de sulfure sont typiquement liées aux carbures, la diminution de la ductilité provoquée par les ajouts de soufre n'est pas particulièrement significative dans le contexte des aciers à outils. Les propriétés de résistance à l'usure de l'acier sont fortement impactées par des teneurs en soufre supérieures à 1 %.

I.6.3 Phosphore (P)

Numéro atomique 15, masse 30,97, élément non métallique. Le phosphore noir, le phosphore rouge ou amorphe, non toxique, et le phosphore blanc ou ordinaire, de consistance cireuse, hautement inflammable et extrêmement toxique, sont les trois formes allotropiques disponibles. La résistance des aciers bas carbone est renforcée.

I.6.4 Cuivre (Cu)

Le cuivre, en petite proportion, améliore la résistance de l'acier à l'oxydation par l'air.

I.6.5 Azote (N)

À l'état liquide, l'azote est très peu soluble (0,014%) dans l'acier. Il est possible de maintenir des teneurs comprises entre 0,10 et 0,13 % après solidification de certains aciers à forte teneur en chrome et vanadium (aciers rapides par exemple). La solubilité de certains éléments, tels que le chrome, le manganèse, le molybdène et le vanadium, augmente lorsque ces éléments sont ajoutés. L'azote, lorsqu'il est ajouté en tant que substitut partiel du carbone, augmente les propriétés mécaniques à chaud et la résistance à la corrosion des aciers à outils qui ont des ajouts importants de chrome, mais il réduit également leur ductilité, leur soudabilité et leur capacité à usiner à l'aide de certains procédés non conventionnels, comme l'électroérosion.

I.7 Classification des aciers

Les aciers sont disponibles dans une vaste gamme de nuances en raison des nombreux éléments ajoutés au fer et de la variété de ces éléments. Les différents types d'alliages à base de fer peuvent être divisés en groupes en fonction de leur composition chimique ou des applications pour lesquelles ils sont utilisés.

L'adoption de cette dernière nous permet de recenser quatre familles d'acier :

- Les aciers non alliés (« Aciers au carbone »),
- Les aciers faiblement alliés, pour haute résistance,
- Les aciers fortement alliés, Les fontes.

I.7.1 Aciers non alliés (« Aciers au carbone »)

I.7.1.1 Aciers non alliés d'usage général (S, E, et C.)

Caractérisés par une faible teneur en carbone, ce sont les plus utilisés. Ils existent dans des qualités diverses et des variantes réservées à des usages particuliers (moulage, soudage...).

Propriétés spécifiées : ténacité, formabilité, grosseur de grain...

La plupart sont disponibles sous forme de laminés marchands (profilés, poutrelles, barres, tôles...) aux dimensions normalisées. Certains sont proposés en semi-fini : galvanisés, nervurés, ondulés, etc. Normes : NF EN 10027 A02-005-3.

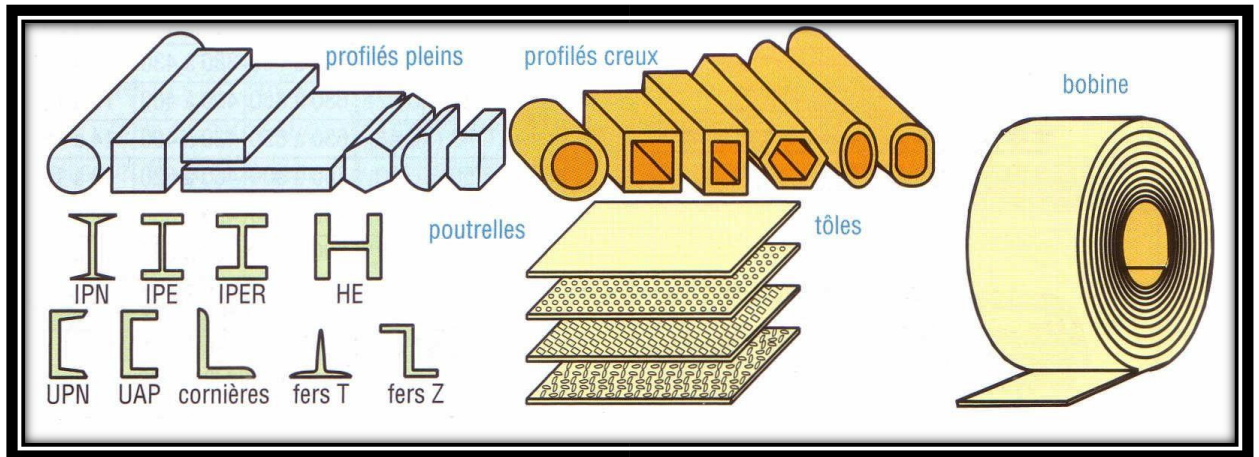


Figure I. 6 : Laminés marchands.

Applications (construction soudée, formage à froid ou à chaud, emboutissage, étirage, laminage, pliage...): carrosseries, fers et profilés pour le bâtiment, construction navale, plateforme pétrolière, trains, chaudronnerie, ameublement, électroménager, biens de consommation...

a) Désignation normalisée

Lettre (S, E, etc.) suivie de la limite élastique à la traction R_e en Mpa ou N/mm^2 . S'il s'agit d'un acier moulé la désignation est précédée de la lettre G. Exemple : GE 335, GS 235, etc.....

b) Principales nuances normalisées

Remarques : les valeurs de R_r , R_e , A % et KV indiquées dans le tableau ci-dessous varient d'une qualité à l'autre, dépendent des procédés de fabrication, des traitements, des épaisseurs d'un produit à l'autre.

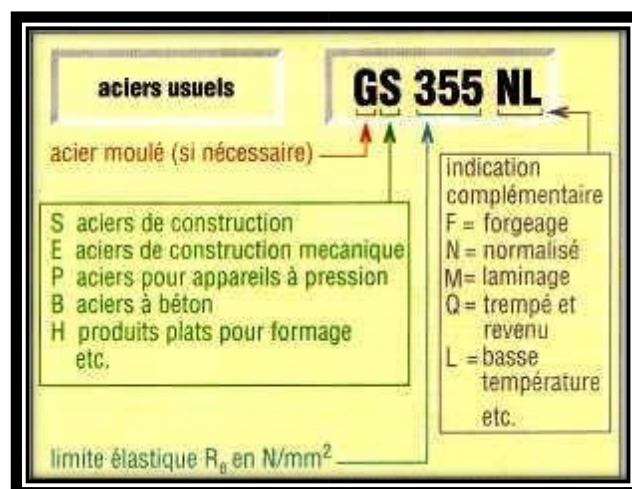


Figure I.7: Désignations des aciers au carbone.

Tableau I.1. Principaux aciers non alliés

Principaux aciers non alliés (1Mpa = 1 N/mm ²)				
Nuances normalisées	R _r Mpa	Re Mpa	A%	KV (j) mini
Aciers de construction				
S 185 (A 33)	290 à 540	175 à 185	8 à 18	
S 235 (E 24)	320 à 510	175 à 235	15 à 26	23 à 27
S 275 (E 28)	380 à 580	205 à 275	12 à 22	23 à 27
S 355 (E 36)	450 à 680	270 à 335	12 à 22	23 à 40
Aciers de construction mécanique				
E 295 (A 50)	440 à 660	225 à 295	10 à 20	27 à 39
E 335 (A 60)	540 à 770	255 à 335	6 à 16	27 à 39
E 360 (A 70)	640 à 900	285 à 360	3 à 11	27 à 39
Pour cémentation				
C 20C (XC 18)	470 à 650	290 à 340	20 à 22	50
Pour trempé + revenu et pour forgeage				
C 25 (XC 25)	500 à 700	320 à 370	19 à 21	45
C 30 (XC 30)	550 à 750	350 à 400	18 à 20	40
C 35 (XC 38)	600 à 780	380 à 430	17 à 19	35
C 40 (XC 42)	630 à 800	400 à 460	16 à 18	30
C 45 (XC 48)	650 à 850	430 à 490	14 à 16	25
C 50 (XC 50)	700 à 900	460 à 520	13 à 15	-
C 55 (XC 55)	750 à 950	490 à 550	12 à 14	-
C 60 (XC 60)	800 à 990	520 à 580	11 à 13	-
Pour trempé superficielle				
C 40 (XC 42 TS)	Dureté de la couche trempée = 55 HR _c			

I.7.1.2 Aciers spéciaux, non alliés, de type C

Destinés aux traitements thermiques (trempé, cémentation) des pièces petites ou moyennes, ils sont caractérisés par un ajustement précis de leur composition, une plus grande pureté et des éléments d'addition en très faible quantité (Mn < 1 % ; Cr + Ni + Mo < 0,63 %). **a) Désignation**

Lettre C suivie du pourcentage de carbone multiplié par 100 plus au besoin des indications Complémentaires (E = teneur en soufre, C = formage à froid, S = ressort, D = tréfilage...).

b) Principales nuances normalisées

Les caractéristiques mécaniques varient selon les traitements et les dimensions.

- **Aciers à faible teneur en carbone (< 0,3 %)** : ils sont réservés à la cémentation et aux traitements de surface (catégorie des aciers "doux").

- **Aciers à teneur moyenne en carbone (0,3 à 0,5 %)** : ils sont utilisés pour les trempes et les revenus, dans le cas d'applications exigeant une plus grande résistance et une certaine tenue à l'usure (catégorie des aciers "mi-dur").

Applications : pièces moulées et forgées, arbres, axes, engrenages, visserie...

- **Aciers à haute teneur en carbone (> 0,5 %)** : Ils sont utilisés dans des applications nécessitant une dureté élevée, une résistance élevée et une résistance à l'usure. Après trempe, ils se déforment souvent et se déforment. Lorsque les températures augmentent, ils perdent leurs caractéristiques. Ils sont principalement utilisés pour des pièces fines ou "petites" en volume car ils ne durcissent pas en profondeur.

I.7.2 Aciers faiblement alliés, pour haute résistance

Aucun élément additionnel utilisé dans ces aciers ne dépasse 5% masse (Mn 1%).

Lorsqu'une résistance élevée est requise, ils sont sélectionnés.

I.7.2.1 Désignation normalisée

Un pourcentage de carbone multiplié par 100, suivi d'une liste des principaux éléments d'addition, classés par ordre décroissant de la taille des symboles chimiques. Les pourcentages de ces mêmes éléments ont ensuite été multipliés par 4, 10, 100 ou 1000 dans le même ordre (voir détails dans la figure I.8) et, si nécessaire, plus de détails.

Exemple : G 35 Ni Cr Mo 16 (0,35 % de carbone ; 4 % de nickel et des traces < 1% de chrome et de molybdène, G acier moulé).

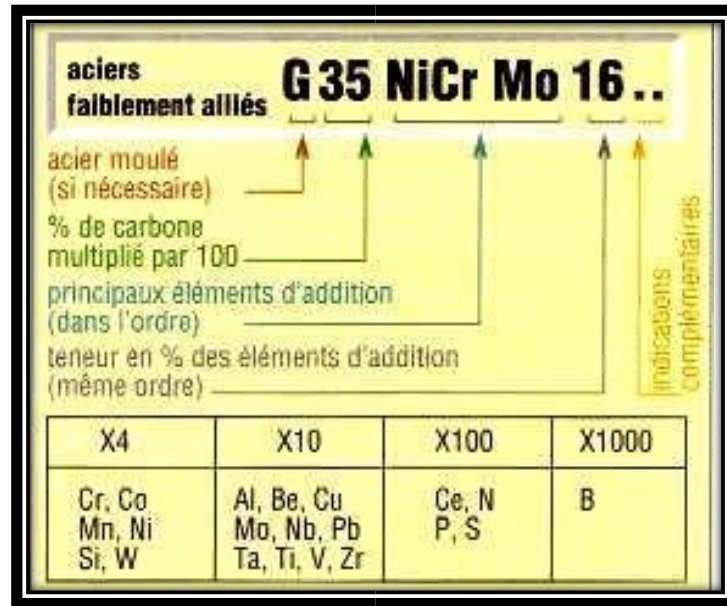


Figure I. 8. Désignation des aciers faiblement alliés.

I.7.2.2 Aciers de cémentation (% C < 0,2 %)

En plus de la cémentation, ils peuvent recevoir une trempe dans la masse : trempabilité fonction de la composition.

I.7.2.3 Aciers pour trempe dans la masse

Ils permettent la trempe en profondeur des pièces massives, et sont beaucoup plus performants que les aciers C.

I.7.3 Aciers fortement alliés

Ils sont destinés à des usages particuliers (inoxydable...). Pour ces aciers au moins un élément d'addition dépasse la teneur de 5 % en masse.

I.7.3.1 Désignation

La lettre X symbolisant la famille est suivie des mêmes instructions pour les aciers faiblement alliés. La seule distinction est que ni 10 ni 4 ne servent de coefficient multiplicateur pour le pourcentage des composants de l'addition.

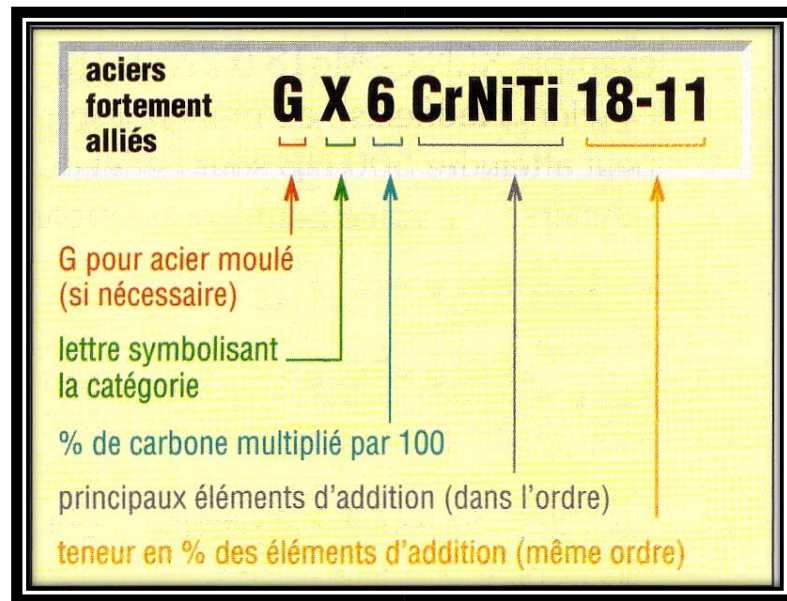


Figure I. 9. Désignation des aciers fortement alliés.

I.7.3.2 Aciers inoxydables

Famille très importante, caractérisée par une grande résistance à la corrosion, à l'oxydation à chaud, au fluage et subdivisée suivant la teneur en nickel (2,5 %).

□ Aciers inoxydables austénitiques

Ces aciers (Ni 7%) sont les plus populaires et ont la meilleure résistance à la corrosion. Ils résistent aux températures élevées et à l'écaillage, ont une ductilité élevée (A%), sont résilients, sont simples à forger et à souder, mais sont difficiles à usiner. L'écrouissage est la seule méthode qui puisse les durcir ; la trempe n'est pas une option. En raison de leur faible conductivité thermique et de leur haut degré de dilatation. plusieurs nuances.

Applications (chimie, alimentaire, transports, nucléaire...) : pièces embouties, chaudronnées, cuves, réservoirs, armatures, conduites, vannes, visserie,...

Tableau I.2. Aciers inoxydables - extrait NF EN 10088

Aciers inoxydables – extrait NF EN 10088				
Nuances	Re0.2 (daN /mm ²)	R _r (daN /mm ²)	A%	KV (J)
(état adouci)	Ferritiques			
X2CrNi12	25-28	45-60	20	-
X6Cr17	22-24	40-63	20	-
X6Cr17	24-26	40-63	20	-
X6CrMo17-1	26-28	45-66	18	-
(état adouci)	austénitique			
X2CrNi19-11	18-22	46-68	45	90
X5CrNi18-10	19-23	50-75	45	90
X6CrNiTi18-10	19-22	50-72	40	90
X5CrNiMo17-12-2	20-24	50-70	40	90
X5CrNiMoTi17-12-2	20-24	50-70	40	90
X2CrNiMoN17-13-5	27-29	58-80	35	90
(état traité)	martensitiques			
X12Cr13	40-45	55-85	15	25
X20Cr13	45-60	65-95	12	20
X30Cr13	60-65	80-100	10	20
X3CrNiMoN13-4	65-80	78-110	12	50
(état traité)	Durcis par précipitations			
X5CrNiCuNb16-4	79	96-116	12	40
X5CrNiMoCuNb14-5	86	99-120	10	40

□ **Aciers inoxydables ferritiques**

Ils sont toujours ductiles ($C < 0,08 \%$), ne durcissent ni par trempe ni par écrouissage : ils sont faciles à étirer, former, plier, forger, rouler ($Ni < 1 \%$).

Propriétés : le plus rentable, avec une usinabilité et une soudabilité moyennes, ainsi qu'une faible résilience et résistance à la traction (R_r) à haute température.

Applications : équipements ménagers, décoration intérieure, automobiles, mobiliers...

□ Aciers inoxydables martensitiques ($0,08 \leq C \leq 1 \%$)

Résistant aux chocs, trempé par trempe, thermosoudable, forgeable et ayant une bonne usinabilité et des propriétés mécaniques à haute température ($Ni < 7\%$), et résistent moins à la corrosion que les précédents.

Applications : composants divers (toutes industries), couteaux, ressorts...

□ Aciers inoxydables à durcissement par précipitation

Comme les martensitiques en plus résistants à la corrosion.

I.7.4 Fontes

Leur excellente fluidité permet de produire des pièces moulées aux formes complexes. Ils sont typiquement assez fragiles, peu ductiles (inaptes à la déformation à froid : forgeage, laminage, etc.), et ont une forte teneur en carbone comprise entre 2 et 4 %. et difficilement soudables.

I.7.4.1 Fontes à graphite lamellaire EN-GJL « FGL »

Les plus économiques, les plus utilisées, ce sont les fontes de moulage par excellence. Le carbone se présente sous forme de fines lamelles de graphite qui lui donne une couleur « grise ».

Propriétés : bonne coulabilité ; bonne usinabilité grande résistance en compression et grandes capacités d'amortissement des vibrations. Norme NF EN 1561.

Applications : bâtis de machine, supports, carters, blocs-moteur...

I.7.4.2 Fontes à graphite sphéroïdal EN-GJS « FGS »

Le graphite s'agglomère au cours du traitement sous forme de modules ou de sphères, ce qui en fait le plus utilisé après les fontes à graphite lamellaire. Le graphite lamellaire est produit en ajoutant de petites quantités de magnésium juste avant la coulée. Norme NF EN 1563.

Propriétés : ductilité, résilience et usinabilité.

Applications : vilebrequins, arbres de transmission, pièces de voirie, tuyauteries...

I.7.4.3 Fontes malléables EN-GJMW et GJMB « FMB et FMN »

Ils sont fabriqués par recuit de fonte blanche jusqu'à un état malléable et ont des propriétés mécaniques comparables à celles de l'acier. De petites épaisseurs peuvent y être moulées et elles sont simples à usiner.

Applications : carters, boîtiers... NF EN 1562.



Figure I. 10. Microstructures des fontes usuelles.

Tableau I.3. Principales fontes

Principales fontes					
Désignation normalisée	Re (daN/mm ²)	R _r (daN/mm ²)	E (GPa)	HB dureté	A%
Fontes à graphite lamellaire					
EN-GJL 150	10 15	80 160			0.8 à
EN-GJL 120	13 20	100 190			0.3
EN-GJL 250	17 25	110 210			
EN-GJL 300	20 30	120 230			
EN-GJL 350	23 35	130 260			
EN-GJL 400	26 40	140 290			
Fontes à graphite sphéroïdal					
EN-GJS 400-15	25	40	165 à	170	15
EN-GJS 500-7	32	50	170	210	7
EN-GJS 600-3	37	60		230	3
EN-GJS 700-2	42	70		260	2
EN-GJS 800-2	48	80		300	2
EN-GJS 900-2	60	90		330	2
Fontes malléables					
Cœur blanc EN-					
GJMW 360-12	19	38		200	12
GJMW 400-12	22	40		220	5
GJMW 450-12	26	45		220	7
Cœur noir EN-					
GJMB 350-10	20	35	170	150	10
GJMB 380-18	25	38		150	18
GJMB 450-6	27	45		180	6
GJMB 550-4	34	55		210	4
GJMB 650-2	43	65		240	2

I.8 Autres familles des aciers et fontes

- Aciers à outils : aciers rapides ; exemples : X160CrMoV12 (Z160CDV12).
- Aciers réfractaires : pour hautes températures ; exemples : X12NiCrSi35–16, X8CrNi25–11(austénitiques) ; X10CrAlSi13, X18CrN28 (ferritiques)...
- Aciers Maraging : très hautes résistances pour l'aéronautique, R_r proche de 200 daN/mm² ;
- Aciers Hadfields : au manganèse ; très grande résistance à l'usure la dureté superficielle peut atteindre 500 HB sous l'effet des chocs ; exemple X120Mn12 (Z120M12).
- Aciers pour roulements, pour appareils à pression...
- Fontes blanches (FB) : à base de perlite et de cémentite (carbures Fe₃C), elles sont très dures, fragiles, résistantes aux frottements, à l'abrasion et aux températures élevées. Difficiles à usiner, les applications sont limitées.
- Fontes alliées : elles peuvent être à graphite lamellaire, sphéroïdal ou blanches (EN–GJN) et sont destinées à des usages particuliers. Principaux éléments d'addition : nickel, cuivre, chrome, molybdène et vanadium. Ces éléments contrôlent plus ou moins la formation du graphite et développent des propriétés particulières [4].

CHAPITRE II :

Classification des procédés des soudage

Introduction

Le soudage signifie de manière générale, l'action d'assembler des pièces mécaniques et métalliques, sous l'action d'une énergie calorifique générée par divers procédés, le soudage compte parmi les modes d'assemblage les plus répandus dans l'industrie du fait de son efficacité et de sa fiabilité pour réaliser des assemblages par liaisons permanentes, notamment dans l'univers de la construction mécanique.

Ce chapitre présente de nombreux procédés de soudage répondant à la très grande variété d'assemblages à réaliser et aux caractéristiques des métaux utilisés.

II.1 Classification des procédés de soudage

Plusieurs critères peuvent être retenus pour classer les procédés de soudage:

La nature de l'énergie utilisée, le type de protection du bain métallique, l'origine de la formation de la continuité métallique (phase liquide ou phase solide), la performance du procédé... Figure II.1.

II.2 Soudage par fusion sans pression

La technique de soudage par fusion, la plus courante, consiste à fondre les bords des pièces à assembler, sans application de pression volontaire, à l'aide d'une source d'énergie produite par une flamme, un arc électrique ou un faisceau de particules. Le métal des deux pièces se mélange alors à l'état liquide, et constitue après solidification la soudure. Cette famille comprend un grand nombre de procédés, parmi lesquels les procédés de soudage à l'arc, qui sont les plus utilisés.[5]

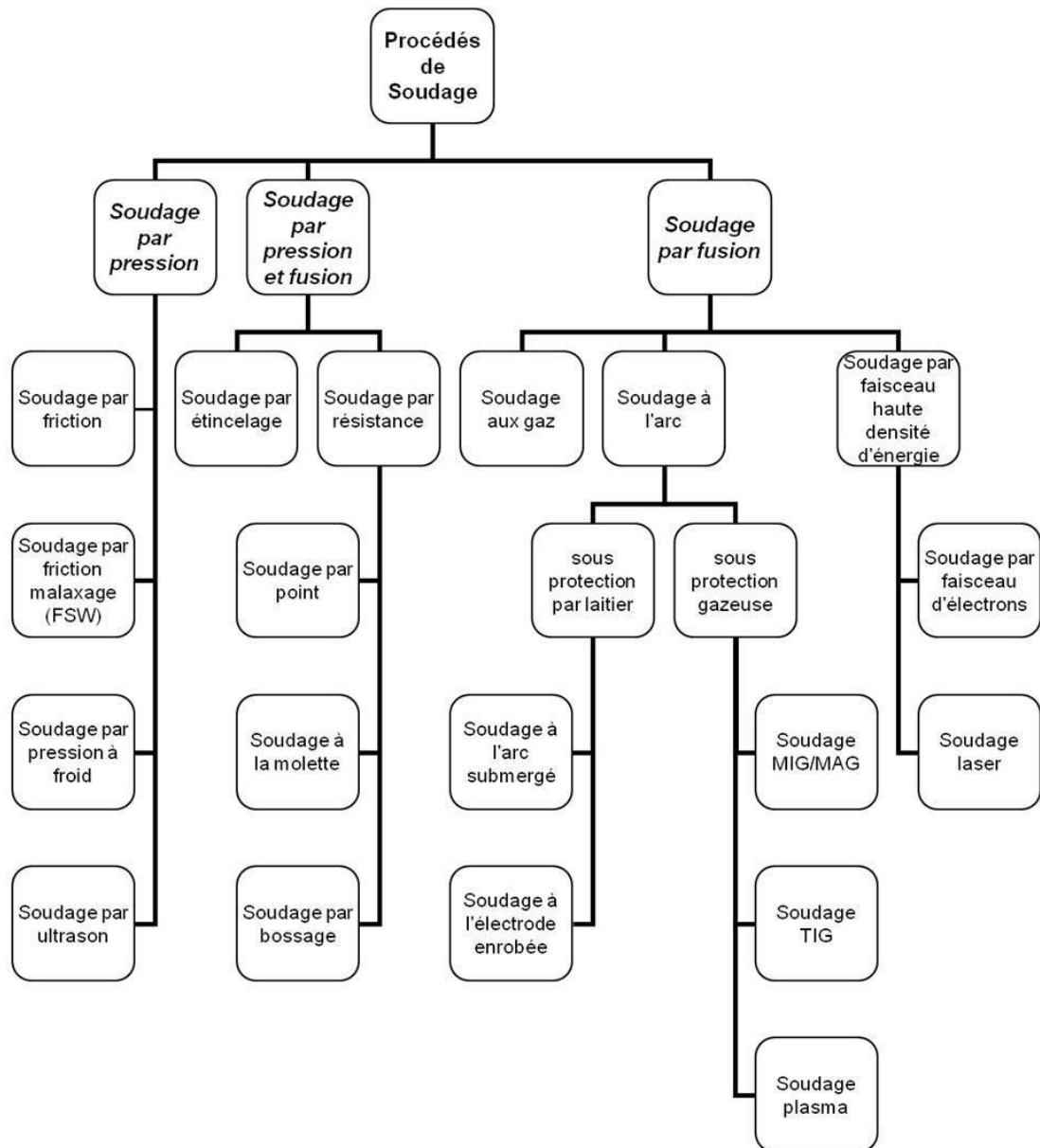
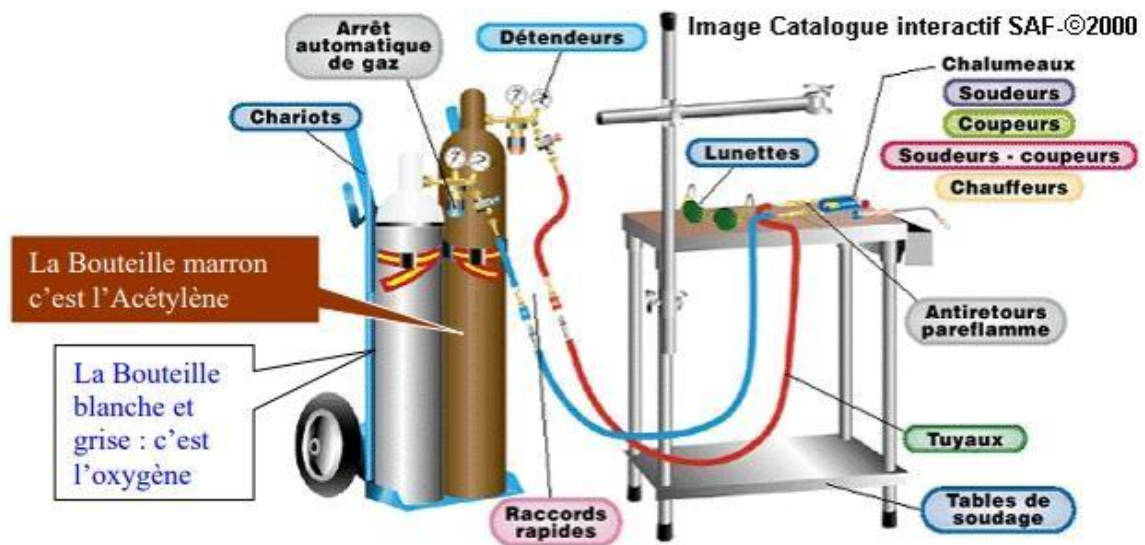


Figure II.1: Classification des procédés de soudage[5]

II.2.1 Soudage aux gaz

➤ Principes

Le chalumeau de soudage est relié par des tuyaux (boyaux) de gaz à la bouteille de gaz combustible d'acétylène (pression de service 0,25 bar) et à la bouteille de gaz comburant d'oxygène (pression de service 3,5 bar) un manodétendeur placé sur chaque bouteille avec un dispositif de sécurité d'anti-retour régule la pression et l'arrivée des gaz. Figure II.2[6]



FigureII.2 : Installation de soudage au gaz [6]

➤ Détail du matériel de soudage

1. Un chalumeau haut ou basse pression
2. Un dispositif de sécurité anti-retour de l'oxygène vers l'acétylène
3. Un mano détendeur d'oxygène avec tuyau ou boyau d'alimentation couleur bleu
4. Une bouteille d'oxygène
5. Un mano détendeur d'acétylène avec boyau d'alimentation rouge (Normes)
6. Une bouteille d'acétylène
7. Un jeu de buses calibrées
8. Une paire de lunettes teintées Un allume-gaz

➤ Les différents chalumeaux

1. Haute pression (les deux gaz sont à des pressions supérieures à 0,15 bar)
2. Basse pression (l'acétylène est à une pression comprise entre 0,010 à 0,1bar et l'oxygène est à une pression comprise entre 1et3bar.)

➤ La mise en œuvre du procédé

1. Le soudeur ouvre les robinets des bouteilles de gaz
2. Puis il règle ou vérifie les pressions d'utilisation sur les manomètres

3. Il est recommandé d'ouvrir légèrement en premier le robinet d'oxygène* du chalumeau, puis légèrement le robinet l'acétylène et d'enflammer le gaz.
4. Il augmente le débit d'oxygène jusqu'à l'obtention d'une flamme neutre pour éviter les fumées noires. Les soudeurs professionnels font l'inverse généralement pour l'arrêt momentané: on peut poser le chalumeau sur l'économiseur, il y en a un. Le chalumeau sera toujours réglé et donc prêt à fonctionner.
5. Pour l'arrêt définitif : fermer les robinets sur les bouteilles et laisser la flamme s'éteindre d'elle-même de façon à vider les tuyaux (les aiguilles des manos doivent retomber à zéro).

➤ La flamme neutre du chalumeau

On peut avoir trois types de flammes pour le soudage oxyacétylénique:

- **Flamme neutre ou normale:** c'est la flamme normalement utilisée pour le soudage. Le dard est de couleur blanc brillant et de forme très nette en sortie de buse.
- **Flamme oxydante:** c'est une flamme avec un excès d'oxygène. Le panache et le dard sont raccourcis. La flamme émet un sifflement. Le panache est plus lumineux.
- **Flamme carburante:** c'est une flamme avec un excès d'acétylène. Le panache et le dard sont augmentés avec des formes irrégulières. Figure II.3[6]

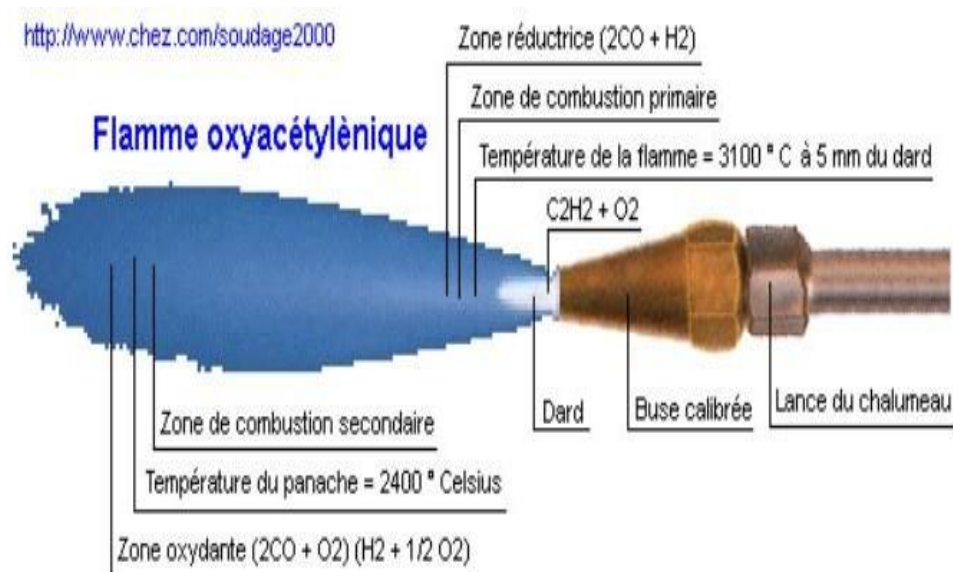


Figure II.3: La flamme de soudage oxyacétylénique [6]

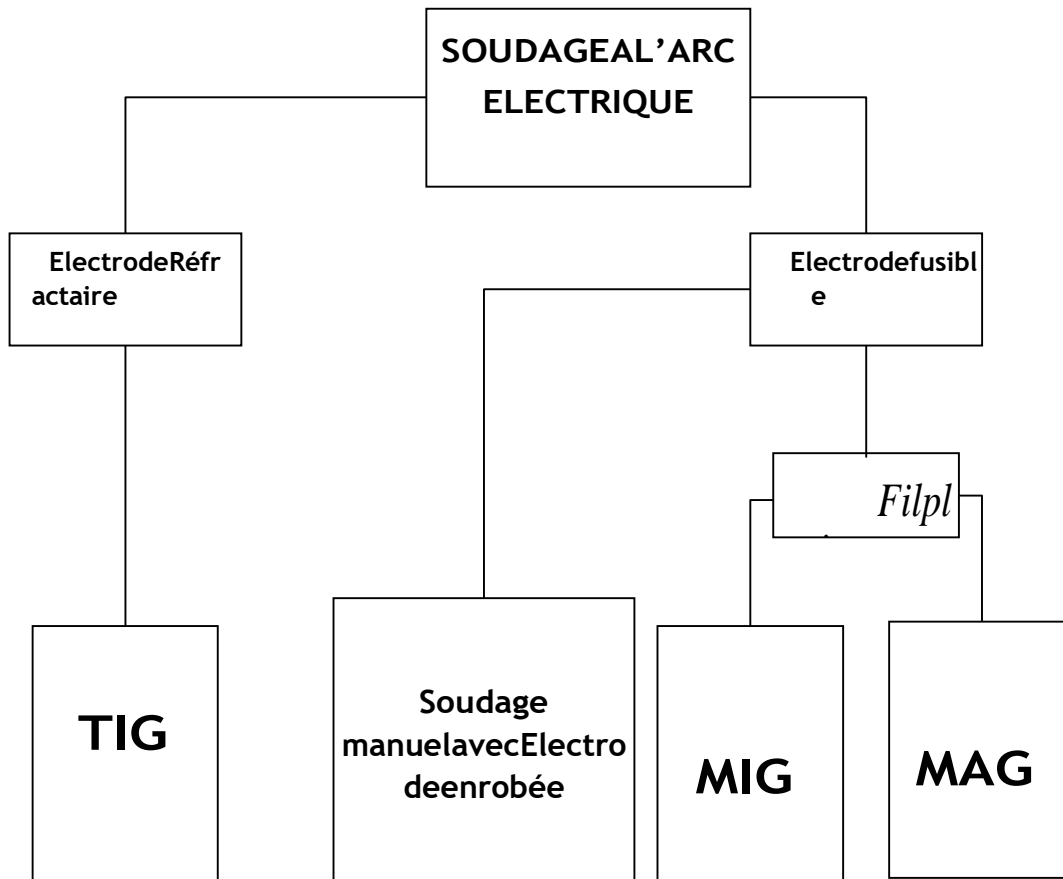


Figure II.4 Représente la classification des procédés de soudage à l'arc [7]

II.2.2 Soudage à l'arc électrique

Les différentes techniques de soudage à l'arc utilisent l'énergie calorifique d'un arc électrique entre tenu entre une électrode et le métal à assembler. Le métal d'apport est apporté par une baguette. Et la protection de la soudure se fait soit par un gaz ou par l'enrobage de la baguette.[8]

L'échauffement local produit un bain de fusion qui, en se refroidissant, constitue le cordon de soudure.

Les phénomènes métallurgiques qui se produisent pendant l'opération de soudage sont complexes en raison de:

- ✓ La nature du métal de base
- ✓ Les gradients de température influant sur sa structure granulaire et sur sa composition chimique
- ✓ L'oxydation provoquée par l'atmosphère entourant le bain de fusion

Le courant électrique continu ou alternatif est fourni par un générateur dont la tension à vide doit être supérieure à la tension d'amorçage. Figure II.4

L'intensité du courant est réglée en fonction de différents paramètres comme le diamètre de l'électrode, la nature de l'enrobage éventuel, la position de soudage, le type d'assemblage, la dimension et la nuance des pièces à assembler. Les autres paramètres à régler sont la distance de l'électrode par rapport au métal de base et sa vitesse d'avance.

II.2.2.1 Soudage manuel à l'arc électrique avec électrode enrobée

➤ **Principe**

Le soudage manuel à l'arc avec électrodes enrobées permet d'assembler ou de recharger des éléments ou des pièces métalliques au moyen de cordons de soudure.

Il s'agit du type de soudage le plus répandu.

L'énergie nécessaire à la fusion du métal est fournie par un arc électrique jaillissant entre les pièces à souder et une électrode fusible fournissant le métal d'apport.

La soudure à l'arc électrique est une soudure de type autogène, pour l'assemblage de pièces en acier. Les assemblages ainsi obtenus sont très résistants puisque l'acier est mis en fusion et les deux éléments soudés ne forment plus qu'une seule masse en acier après soudage.

Les applications de ce procédé sont particulièrement nombreuses. La mobilité des appareils et la grande diversité des types d'électrodes permettent d'effectuer des travaux sur un certain nombre de métaux et de leurs alliages comme les aciers non alliés ou faiblement alliés, les aciers inoxydables, les fontes et dans certaines conditions, l'aluminium, le cuivre et le nickel. Tous les types d'assemblage (bord à bord, d'angle...) et toutes les positions de soudage (à plat, en corniche...) sont possibles.

Il y a mise en fusion des pièces à souder et du métal d'apport, pour obtenir cette fusion il faut une température très élevée supérieure à 3000°C. Celle-ci est obtenue par court-circuit entre deux électrodes (la pièce à souder et l'électrode constituée de métal d'apport) en créant un «arc électrique» qui est une sorte d'étincelle continue de très forte puissance qui dégage à la fois de la lumière et une chaleur intenses.[9]

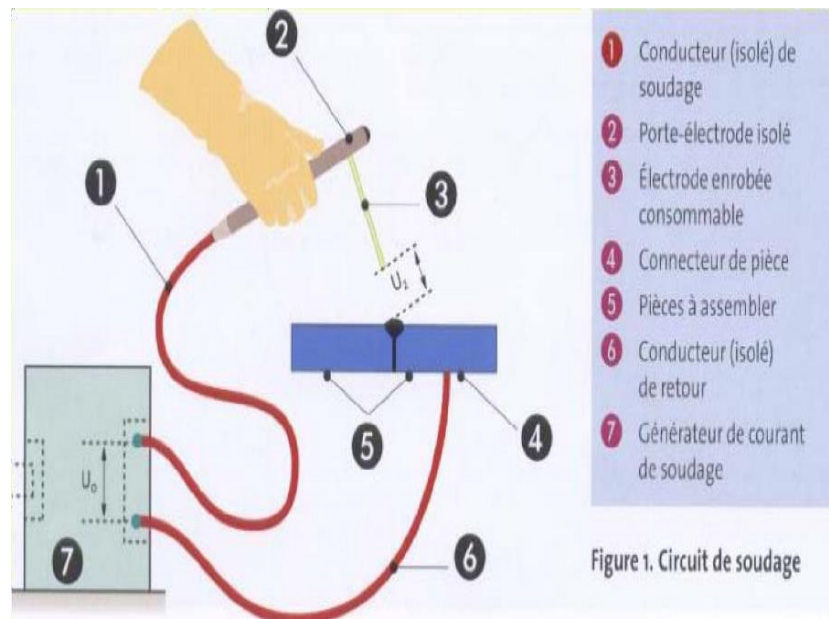


Figure II.5: Fiche pratique de sécurité, Le soudage manuel à l'arc avec électrodes enrobées[9]

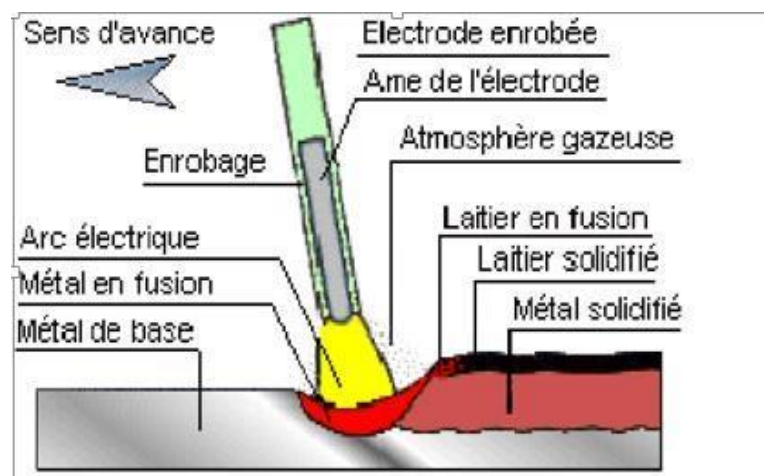


Figure II.6: Principe de soudage à l'arc avec électrodes enrobées [10]

➤ Le poste à souder

L'arc électrique permet d'amorcer le soudage en apportant la chaleur nécessaire à la fusion du métal d'apport, mais il ne fait pas le soudage. [Figure II.5; Figure II.6]

Il est produit à l'aide d'une génératrice haute fréquence qui a pour fonction de :

- Faire fondre l'électrode. Le poste à souder transforme le courant d'alimentation du secteur, afin de fournir à la sortie du poste, des intensités suffisamment élevées pour permettre la fusion de l'électrode de soudage.
- Stabiliser l'arc électrique. La continuité de l'arc électrique permet un soudage régulier. L'onduleur qui remplace les anciens transformateurs et redresseurs, corrige les variations du courant électrique et apporte une puissance et une tension électrique constante.

Une intensité élevée permet le soudage de pièces épaisses, si l'intensité est trop faible, la fusion du métal d'apport n'est pas bonne et la soudure sera moins résistante. La tension à 50 Volt minimum permet d'amorcer plus facilement le soudage, en évitant les effets de «colle» de l'électrode.

En fondant, l'enrobage de l'électrode remplit différents rôles:

- **Rôle électrique:** l'enrobage permet une bonne circulation du courant électrique, il favorise l'amorçage et la stabilisation de l'arc par ionisation de l'air
- **Rôle physique :** l'électrode est de même nature que le métal de base, la soudure est autogène. L'enrobage confère une protection vis à vis de l'air ambiant, permettant le soudage et l'unification de l'arc électrique. Il concentre l'arc par la formation d'un cratère à son extrémité, il permet le soudage dans différentes positions et influence la forme et l'aspect du cordon, l'enlèvement des dépôts de laitier.
- **Rôle mécanique:** l'apport de matière confère une solidité à l'assemblage
- **Rôle métallurgique :** il protège le bain de fusion de l'action de l'air par formation d'une pellicule de laitier liquide et d'une veine gazeuse. Il ralentit le refroidissement et ajoute, dans certains cas, des éléments nécessaires à l'obtention des caractéristiques mécaniques du joint de soudure. Par ailleurs, l'adhérence du laitier solidifié au cordon de soudure dépend essentiellement du type d'enrobage de l'électrode (acide, basique, cellulosique ou rutile: oxyde de titane TiO_2).

•

➤ **Composition de l'électrode:**

- La soudure est de type autogène, le métal d'apport, constitué par l'âme métallique de l'électrode peut être en fonction du métal à souder, de l'acier, du cuivre, de l'inox...
- L'enrobage de l'électrode est variable, différents composants dont le fer, qui est un adjuvant pour le soudage, du cuivre, du manganèse, du silicium, du nickel, du molybdène, de l'acier...et toujours de la poudre de fer.

Le choix du type d'électrode et d'enrobage se fera en fonction de l'application : type d'assemblage (angle, à plat, sur tube...), de l'épaisseur à souder, des qualités requises : dureté, ductilité..., du type d'acier.

On choisira aussi le diamètre de l'électrode en fonction de l'épaisseur du métal à souder.

On distingue cinq grands types d'enrobage:[11]

- Type O(oxydant) : à base d'oxyde de fer
- Type A(acide) : à base d'oxyde de fer, d'oxyde de ferro manganèse, de silice, de silicate ou de ferroalliage désoxydant
- Type B(basique): carbonate de calcium, spath fluor ou ferroalliage
- Type C: cellulosique, composé de cellulose et de matières organique
- Type R: rutile, comprenant 95% d'oxyde de titane ou comprenant 50% d'oxyde de titane et 50% d'oxyde de fer.

Les enrobages les plus utilisés aujourd'hui sont ceux de type B et R.

Dans le soudage à l'arc électrique et électrode enrobée, il convient de distinguer deux techniques:

- La technique montante : la soudure est démarrée en bas et s'effectue du bas vers le haut, pour chaque moitié du diamètre du tuyau. C'est une technique plus lente, l'énergie en jeu est moyenne, l'éblouissement est aussi limité, elle est plus sécurisante. La soudure formée est de meilleure qualité, en sa défaveur, c'est une technique plus lente.
- La technique descendante : à l'inverse on démarre en haut pour aller vers le bas. C'est une technique qui développe plus d'énergie, l'éblouissement est important. Mais elle est souvent préférée car deux fois plus rapide.

➤ **Application:**

- ❖ Le soudage manuel à l'arc électrique et électrode enrobée concerne surtout les postes de tuyauteurs pour des tubulures de diamètre et d'épaisseur importante. Conférant une bonne résistance mécanique aux soudures.

- ❖ Il convient aux aciers doux (enrobage de l'électrode type O), aux aciers faiblement alliés, aux aciers inoxydables et réfractaires, à la fonte grise, aux métaux non ferreux : nickel (après décapage à l'acide et neutralisation), cuivre et cupro aluminium.
 - ❖ Il est préféré au procédé TIG pour les soudures sur tuyauterie transportant du gaz, car il supprime le risque gaz lié à la présence du gaz protecteur.
 - ❖ La rapidité de sa mise en œuvre est aussi appréciable ; sous arc électrique la température idéale de soudage qui est atteinte rapidement reste stable tout au long du soudage.
 - ❖ Sur le plan financier son intérêt réside aussi dans le coût minime et la simplicité du matériel mis en œuvre: onduleur porte électrode, électrode, meuleuse, brosse...
 - ❖ Néanmoins la technique de l'arc électrique n'est pas facile, elle nécessite une bonne maîtrise. Avec un appui constant de l'électrode enrobée. Ceci en maintenant une distance constante de 2mm avec la zone de fusion. Le métal d'apport est alternativement poussé puis tiré au niveau de la zone de soudure.
 - ❖ Ce type de procédé de soudage se pratique en général à l'extérieur, en effet il rend possible les soudages quelques soient les conditions météo, de température, de vent. C'est le procédé de soudage idéal par tous temps.
- Par contre, son utilisation en atelier ou en lieu clos nécessite une aspiration directe indispensable ainsi que le port d'EPI adaptées, car la production de fumées est importante, de même que la projection de particules métalliques. Ces fumées sont issues de la mise en fusion des différents métaux, base à souder, âme et enrobage de l'électrode.
- L'exposition aux risques des fumées de soudage (fièvre des métaux, irritation ORL avec enrouement dès la première journée) projections de particules métalliques, UV et coup d'arc est important dans ce type de procédé de soudage.

II.2.2.1 Soudage à l'arc électrique type TIG (Tungstène inert gaz)

➤ **Principe :**

Procédé de soudage mis au point aux Etats-Unis.

Il s'apparente au soudage à l'arc, mais en lui apportant des améliorations conséquentes en matière de facilité de mise en œuvre et de qualité de soudure. Après le soudage à l'arc électrique et électrode enrobée, c'est le procédé le plus répandu.

La chaleur nécessaire à créer la soudure est apportée par un arc électrique. Cet arc électrique est transmis au métal de base par une électrode en tungstène et le bain de soudure est protégé par un flux de gaz inerte.

L'arc électrique généré est stable, précis, capable de souder des métaux très réactifs comme l'Aluminium ou le Titane.

Par exemple le soudage de l'inox, avec le procédé TIG, permet d'éviter la formation d'oxydes de chrome. Formation qui entraînerait localement une baisse de la concentration en chrome et diminuerait sa résistance à la corrosion.

La soudure se fait sous protection de gaz inerte (ne présentant pas de danger, pas de risque explosif) Différents types de gaz sont utilisés:

- Argon pour l'acier
- Argon-Hélium (mélange binaire) pour l'aluminium
- Argon-Hélium-Oxygène

Une électrode en tungstène réfractaire, non fusible (c'est à dire qui ne fond pas) permet le passage de l'arc électrique (le tungstène est très bon conducteur) Au tungstène était parfois ajouté du Thorium, à présent interdit et remplacé par du Cérium, pour le soudage sur les aciers alliés.

Pour le soudage sur métaux non alliés, comme l'aluminium, l'électrode est en tungstène pur (FigureI.7).

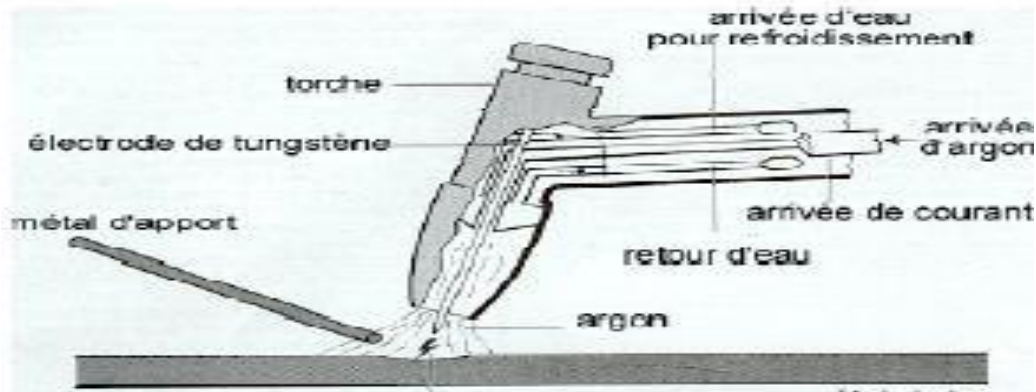


Figure II.7:Principe procédé de soudage TIG[12]

➤ Application

- Ce procédé de soudage apporte une grande qualité de régularité au cordon de soudure.
- Il est aussi apprécié pour la rapidité de sa mise en œuvre, en effet la température de fusion au niveau de la zone à souder est obtenue quasi immédiatement, de plus elle reste bien localisée, ne s'étendant que sur une zone de quelques millimètres.
- Le métal de base devient aussi métal d'apport. Du fait d'une bonne pénétration du métal d'apport et d'une continuité en profondeur dans la matière, la quantité de métal d'apport nécessaire est plus faible qu'avec le procédé au chalumeau. Les joints ainsi obtenus sont de grande qualité.
- Il n'y a pas les défauts d'inclusion du « laitier » comme avec l'électrode enrobée.
- Les défauts observés peuvent être des excès de soufflure par manque de gaz, ou un aspect vermiculaire (bulles de gaz) par excès de gaz.
- Ce procédé de soudage est appliqué pour les soudures de tôlerie fine, de tubes par les tuyauteurs.
- Il convient à la plupart des métaux, aciers divers, aluminium, manganèse cuivre, nickel, métaux et alliages réfractaires ainsi qu'aux métaux précieux ou délicats (titane-tantale ou zirconium)
- En raison du poids et de l'encombrement des installations nécessaires il est appliqué en atelier
- La mise en œuvre en endroits clos est possible car il n'y a pratiquement pas d'émission de fumées ni de particules métalliques. Sauf dans le cas de traitement de surface au niveau des métaux à souder. (attention aux charpentes métalliques pré

peintes avant soudage)

▪ Par contre sur chantier extérieur, il n'est pas toujours privilégié, car la protection gazeuse est sensible au vent, au taux d'humidité. Et en cas de perte de protection il y aura oxydation de la soudure.

II.2.2.3 Soudage semi-automatique: MIG,MAG

Aussi appelé « kilomètre soudé ». Il s'agit d'un procédé de production en grande quantité. Dans les ateliers, la métallerie. Il est rapide, nécessitant moins de formation pour la mise en œuvre que le procédé TIG. Sans production de laitier comme dans le soudage à l'arc avec électrode enrobée.

➤ Principe :

L'arc électrique est véhiculé par un fil électrode fusible (à la fois métal d'apport et électrode), ceci jusqu'à l'extrémité de la torche de soudage, qui est munie d'une gâchette.

Le fil est disposé sur le dévidoir d'une bobine. Ce dévidoir tourne pour faire avancer le fil à l'aide d'un moteur de 24 Volt. La vitesse du fil en m/min est réglée à l'aide d'un potentiomètre.

Les oudeurs appuie sur la gâchette pour débiter le gaz protecteur, alimenter l'arc électrique et dévider le fil électrode.[12]

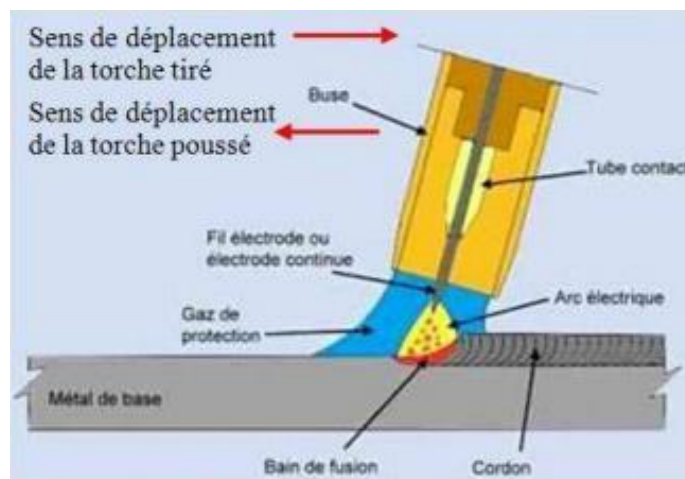


Figure II.8: Procédés de soudage MIG/MAG[13]

Protection gazeuse inerte (MIG : Metal Inert Gas) le gaz s'écoule de façon continue et protège le métal en fusion contre l'oxygène et l'azote de l'air. En général de l'Argon ou du mélange Argon-Hélium.

Protection gazeuse active (MAG : Métal Active Gas) le plus souvent par CO₂ ou mélange Argon-CO₂ ou Argon-CO₂-O₂. Le gaz protecteur participe activement au processus en réagissant, dans l'arc, avec les métaux d'apport et de base.

Caractéristiques du fil d'apport: fils pleins ou fils nus

➤ **Application:**

▪ Protection gazeuse inerte (MIG : Metal Inert Gas) : Ce procédé autogène (assemblage de pièces de métal de même nature) convient aux aciers alliés, inoxydables, à la fonte, à l'aluminium et aux alliages légers, au cuivre et aux cuproalliages, au manganèse, au nickel et aux métaux et aciers réfractaires.

▪ Protection gazeuse active (MAG : Métal Active Gas) : Ce procédé s'adapte aux aciers doux non alliés, galvanisés ou zingués et aux métaux ferreux.

On peut décrire 3 modes de fusion, ceci quel que soit la puissance, la nature ou l'origine de l'appareil à souder.

• Court-circuit:

✓ Vitesse et intensité faible, 1 et 2/6.

✓ Appliqué pour le soudage de tôles fines, les positions délicates, les soudures au plafond...

✓ Lorsque le fil touche le métal de base il y a court-circuit, l'extrémité du fil sous forme d'une boule, se trouve collée sur le métal de base. Il y a alors brisure du fil suivi de sa rétraction.

✓ La circulation du courant et l'avancée du fil reprennent et le même processus peut recommencer à côté.

✓ Le cordon de soudure est donc formé par la mise bout à bout de ces « boules ».

• Globulaire ou grosse goutte:

✓ Vitesse et intensité moyenne 3 et 4/6.

✓ Application pour le soudage en angle, à plat ou en position montante. La zone d'impact est plus grande, ainsi que la pénétration dans la matière.

✓ La « goutte » sera plus grosse et c'est pourquoi elle se détache spontanément avant

que le fil de soudure ne touche le métal de base; donc avant le court-circuit.

✓ Ce procédé de soudage offre une meilleure résistance mécanique à la soudure.

- pulvérisation axiale:

✓ Vitesse et intensité élevée, 5 et 6/6.

✓ Le fil ne touche pas le métal de base. Quand il arrive à proximité il y a pulvérisation dans l'espace du métal du fil de soudure.

✓ La pénétration du métal d'apport est importante et le cordon de soudure a une forte épaisseur.

Ce procédé est appliqué en production de masse, pour les soudures en angle et à plat. L'automatisation est possible, il n'y a pas de meulage, ni de reprise nécessaire.

Le soudage à l'arc électrique sous protection gazeuse avec fil plein présente de nombreux avantages ,mais aussi quelques inconvénients [13]

➤ **Avantages et inconvénients :**

1-Avantages

- Forte productivité.
- Grande vitesse de soudage (gain de temps). – Taux de dépôt de métal important.
- Limitation des déformations.
- Nombre de reprises de soudure limité.- Pas de laitier à enlever.
- Large gamme d'épaisseur.
- Bonnes qualités de joint et bonnes caractéristiques mécaniques.
- Soudage dans toutes les positions.
- Contrôle aisé de la pénétration en régime de court circuit.
- Aspect de cordon correct.
- Procédé automatisable.
- Fatigue moindre du soudeur

2- Inconvénients

- Entretien fréquent et minutieux.

- Difficile à utiliser dans les endroits exigus et peu pratique pour les applications qui exigent un grand déplacement de la torche entre deux soudures.
- Les économies de temps réalisées avec ces procédés peuvent être grandement réduites par une technique d'exécution inadéquate. En effet, la vitesse de soudage élevée exige des précautions additionnelles et demande au soudeur de réagir très vite. Ainsi, le fil peut demeurer figé dans le bain de fusion solidifié ou fondre dans le tube contact, ce qui entraîne une perte de temps considérable pour l'extraire avant de poursuivre le travail.

II.2.3.2 Soudage laser

➤ **Application**

Le coupage par faisceau laser (LBC) est un procédé très efficace qui permet une très grande précision de coupe. Ce procédé très polyvalent permet de couper divers matériaux allant du tissu au métal. Encore peu répandu dans l'industrie, le soudage par faisceau laser (LBW) sert dans l'industrie automobile pour souder des pièces de précision avec une soudure très étanche, par exemple des composantes d'engrenages de transmission. Le soudage au laser à arc pulse (YAG ou yttrium aluminium garnet) pourrait également remplacer le soudage par résistance par point pour certaines applications où les pièces soudées sont sensibles à la chaleur, par exemple les piles au lithium et les détonateurs pour coussins gonflables.

➤ **Principe**

Dans le procédé de coupage et de soudage par faisceau laser, la chaleur générée par un faisceau de lumière cohérente très intense sert à réchauffer, à fondre ou à vaporiser un solide. Dans le cas du soudage, le faisceau laser est convenablement focalisé sur le joint à souder. Pour le coupage, on utilise la chaleur fournie par le faisceau laser, avec ou sans application d'un jet de gaz, pour augmenter la quantité de matière enlevée.

Deux procédés sont couramment utilisés pour le coupage au laser, soit le coupage au CO₂ qui utilise un courant direct pouvant aller jusqu'à 10 000 volts et le coupage au YAG qui fonctionne avec un courant pulsé. La différence majeure entre ces deux procédés réside dans la façon de produire le rayon laser : pour le coupage au CO₂, c'est le gaz qui produit le rayon tandis que le coupage YAG utilise un cristal pour produire le rayon laser. On utilise également dans ces procédés un gaz de protection[16]

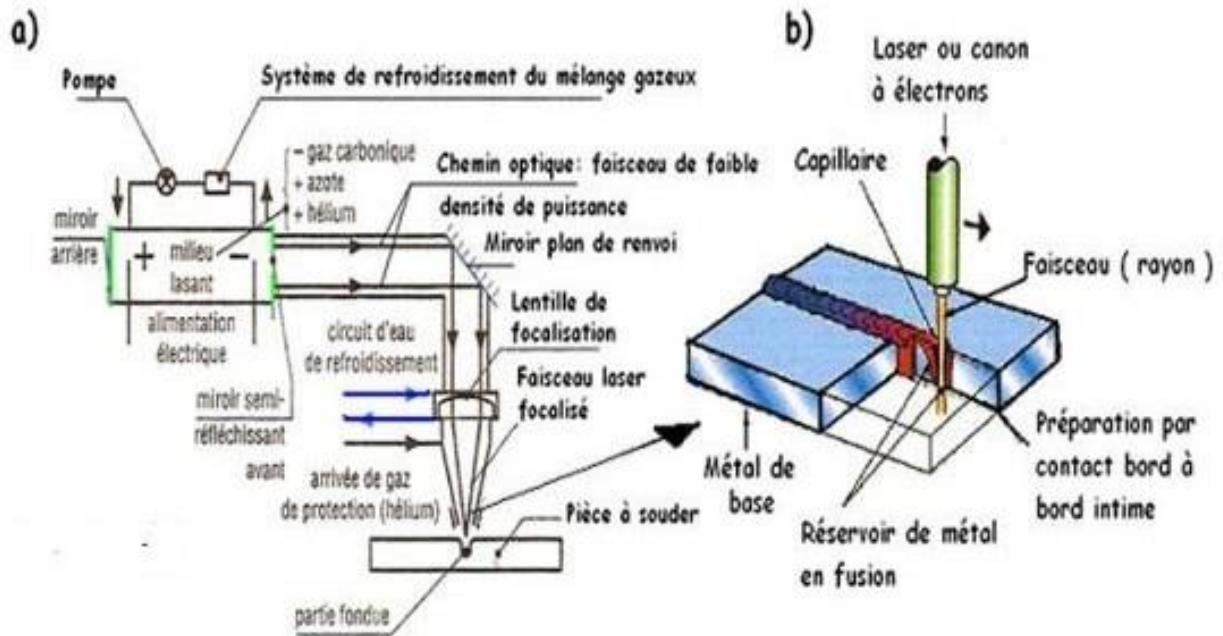


Figure II.13: Principe de procédé de Soudage laser[16]

❖ Principe de soudage

Durant l'opération de soudage à l'aide d'un procédé à haute densité d'énergie, la concentration énergétique sur la pièce est suffisamment intense pour vaporiser le métal se trouvant sous le faisceau sur lequel le faisceau va se concentrer grâce au système d'optique.

Après focalisation, son éclairement peut atteindre $108\text{W}/\text{cm}^2$ à $109\text{W}/\text{cm}^2$. Il suffit de quelques micro secondes pour obtenir la fusion et la vaporisation du matériau à souder.

Il est possible de souder au Laser selon deux modes : – Mode conduction (Figure II.13 b) ou en trou de serrure (Keyhole) Figure II.13 a. Le soudage par conduction s'effectue à l'état liquide. Le soudage par trou de serrure, quant à lui, implique la vaporisation du métal et demande donc une quantité d'énergie supérieure au mode par conduction (Figure II.14)

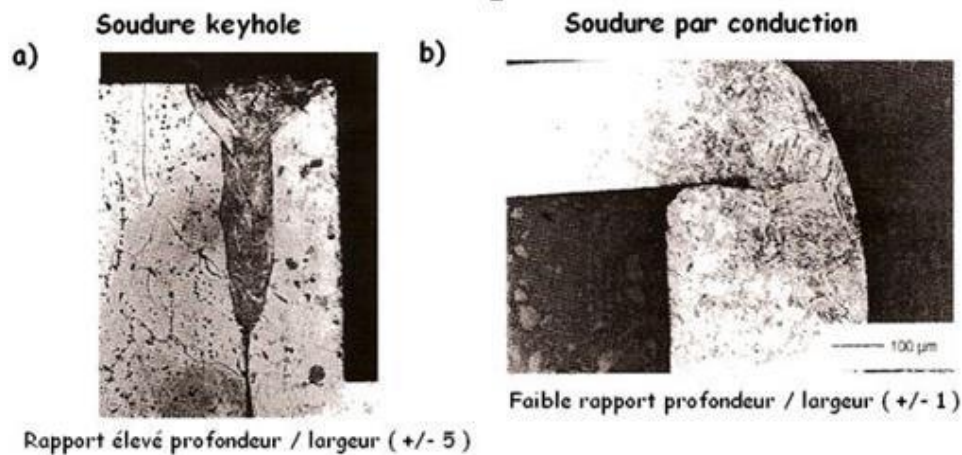


Figure II.14: Présentation modes soudure laser [17]

A l'heure actuelle, plusieurs sources Laser sont proposées par les fournisseurs. Les sources les plus courantes sont celles à diodes CO₂, Nd – YAG à barreau ou encore Laser hybride. Plus récemment les sources à fibres et YD – YAG à disques.

1. **Laser à CO₂** : Le milieu actif est généralement un mélange de gaz différents (CO₂, N₂, H₂, He).

Ces Laser peuvent fournir de fortes puissances (plusieurs centaines de kW et jusque 1 GW/cm² avec des systèmes amplificateurs. Ces Laser sont utilisés en soudure, découpe, en chirurgie. Les Laser CO₂ fournissent un rayon ayant une longueur d'onde de 10,6 μm (milieu infrarouge), le rayon n'est donc pas visible à l'œil nu et donc très dangereux. Le transport du faisceau est réalisé par miroirs. La masse d'un Laser à CO₂ peut atteindre plusieurs tonnes pour de fortes puissances.

2. **Le Laser Nd – YAG** : Le milieu actif est un solide, plus précisément (Neodymium-dopet Ythrium Aluminium Garnet). La source de pompage est généralement une lampe flash (stroboscope) contenant du Xénon ou du krypton. Les tubes flashes laissent actuellement leur place à des DEL de forte puissance fournissant des flashes lumineux puissants au milieu actif pour exciter les atomes. Le rayon obtenu se situe à 1065 nanomètres (infrarouge), donc invisible à l'œil nu (spectre visible est entre régime pulsé). Le gros avantage de ce Laser est que le rayon produit peut-être très facilement transportable par fibres optiques, à cause de sa longueur d'onde. Ils sont utilisés en ophtalmologie, en médecine et bien entendu en soudage, découpage, etc... La fréquence de l'onde lumineuse

peut être doublée pour fournir un rayon Laser dans le spectre visible de couleur verte (532 nanomètres). La masse d'un Laser Nd-YAG est de plusieurs centaines de kilogrammes.

3. **Laser hybride** : Il combine le soudage Laser avec la technique du soudage à l'arc (ex. MIG-MAG). Cette combinaison permet une grande souplesse de positionnement des pièces, car le soudage à l'arc apporte du métal en fusion pour remplir le joint et l'usage du Laser augmente la vitesse de travail par rapport à ce qu'il est possible avec le seul système à l'arc, les déformations induites sont faibles et la qualité de la soudure est ainsi améliorée. On réalise très souvent des soudures sans préparation de joints.

4. Gaz de protection : En soudage au Laser, on utilise des gaz pour trois raisons :

- La protection des composants optiques (par jet d'air propre)
- La suppression du plasma
- L'amélioration de la qualité des joints (contrôle de l'oxydation, des porosités, etc ...)

La nature du gaz de projection influe sur la formation du plasma et par conséquent sur les performances du procédé. L'interaction entre gaz de projection, les vapeurs métalliques et le faisceau Laser. En général, les gaz de protection utilisés sont des gaz inertes (Ar, He), l'argon étant le plus couramment utilisé, car moins cher que l'hélium. Dans certains cas, on utilise l'azote à cause de son prix très bas, le profil étroit du joint et un temps de solidification très court (une fraction de seconde) empêche le fer de réagir significativement avec l'azote. Pour de nombreuses applications, aucun gaz de protection n'est utilisé, la réaction entre le bain de soudure et l'air ambiant étant limitée à une petite surface pendant une fraction de seconde (Figure II.15) [17].

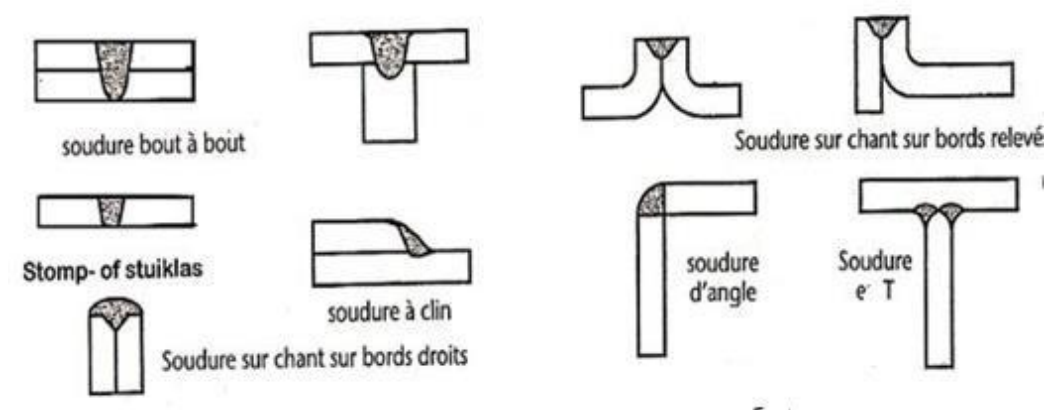


Figure II.15: Configuration de joints soudés laser [17]

❖ Avantages du soudage laser

1. Avantages

- Rapidité du procédé, absence de métal d'apport
- Précision et propreté
- Possibilité de joindre des matériaux différents
- Le peu d'espace requis pour l'accès du faisceau à la pièce
- L'excellent contrôle de projections
- Les déformations très limitées ,ZAT réduite
- La possibilité de souder par transparence
- La possibilité de réaliser des joints parfaitement étanches
- Bonne résistance mécanique du joint soudé

2. Inconvénients

- Coût d'acquisition et de maintenance très élevés
- Niveau important de formation des opérateurs
- Précision requises pour la préparation des joints
- Aspects liés à la sécurité (faisceau invisible et énergétique) avec port de

protection adaptée très coûteuses [17].

II.3 Soudage par pression et fusion

On retrouve dans cette catégorie le procédé de soudage par étincelage, qui consiste à fondre les surfaces à assembler à l'aide d'une décharge électrique avant d'appliquer une pression de Contact, et surtout les procédés de soudage par résistance, pour lesquels le contact électrique entre les pièces est assuré par l'application d'une pression à l'aide d'électrodes de géométries variables, qui permettent ensuite de faire passer un courant de forte intensité à l'endroit du contact entre les pièces, entraînant par effet joule leur fusion.

II.3.1 Soudage par point

On retrouve généralement deux types de procédés de soudage par résistance: le soudage par point(RSW) et le soudage à la molette (RSEW).

➤ **Principe**

Le procédé de soudage par résistance consiste à faire passer un courant électrique entre deux électrodes sans produire d'arc électrique. Les électrodes, places de chaque côté des deux

pièces minces à fusionner, laissent passer le courant, ce qui a pour effet d'élever la température et d'amorcer la fusion du métal. Les soudages se produisent sous l'effet de la chaleur, du temps et de la pression exercée par

Les électrodes. Le poste de soudage par résistance est un transformateur électrique qui fonctionne sur le courant alternatif (CA) ; il produit un courant de forte intensité de plusieurs milliers d'ampères à une faible tension d'environ 10 volts.

➤ Application

Le soudage par point est de loin le plus répandu des deux procédés. On le retrouve dans l'assemblage de tôles minces pour la fabrication de meubles en métal, de boîtiers métalliques, de casiers, d'étagères ainsi que pour l'assemblage de treillis à partir de tiges métalliques (paniers d'épicerie, grilles, présentoirs, etc.) L'industrie de l'automobile fait souvent appel à des robots pour le soudage par résistance par point (Figure II.16).[17]

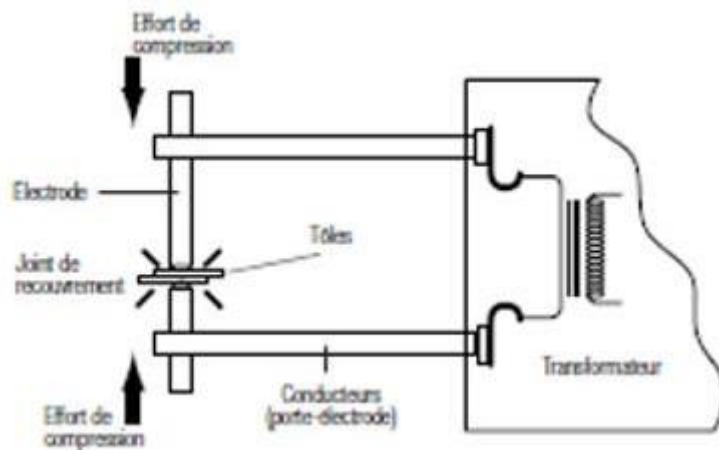


Figure II.16: Principe de procédé de Soudage par point[17]

II.4 Soudage par pression

Cette catégorie regroupe tous les procédés de soudage dans lesquels on obtient une soudure, En général sans métal d'apport, par l'application d'une pression ou d'une friction suivie d'une pression, suffisante pour provoquer une déformation plastique à froid ou à chaud, assurant la continuité atomique entre les bords de la soudure.

II.4.1 Soudage par friction

➤ Principe

Le soudage par friction est un procédé de soudage dans lequel l'assemblage est réalisé en frottant l'une contre l'autre les surfaces à assembler et ce, sous une pression contrôlée. Le frottement entre les pièces à assembler crée de la chaleur (figure II.17). La température dans la surface de contact augmente sans atteindre la température de fusion. Quand la température désirée est atteinte, le frottement est arrêté et les pièces devenues plastiques sont pressées l'une contre l'autre pour former l'assemblage. La friction fournit un chauffage de façon relativement simple et assure également que les surfaces de la soudure soient suffisamment nettoyées. Par le mouvement relatif, les impuretés ou les oxydes sont éliminés de la zone de la soudure. Les paramètres à contrôler pour tous les procédés basés sur le frottement sont la force de contact, la vitesse relative et la durée du frottement. (Température de forgeage). La pièce en rotation est ensuite détachée du mandrin, freinée jusqu'à l'arrêt total. Une force de forgeage axiale est exercée afin de réaliser une soudure entre les deux pièces. Durant la phase d'échauffement et la phase de soudage, une quantité de métal plastique est refoulée, sous l'action de la force de pression axiale de telle sorte que l'ébarbure caractéristique du soudage par friction se forme, voir (figure II.18).

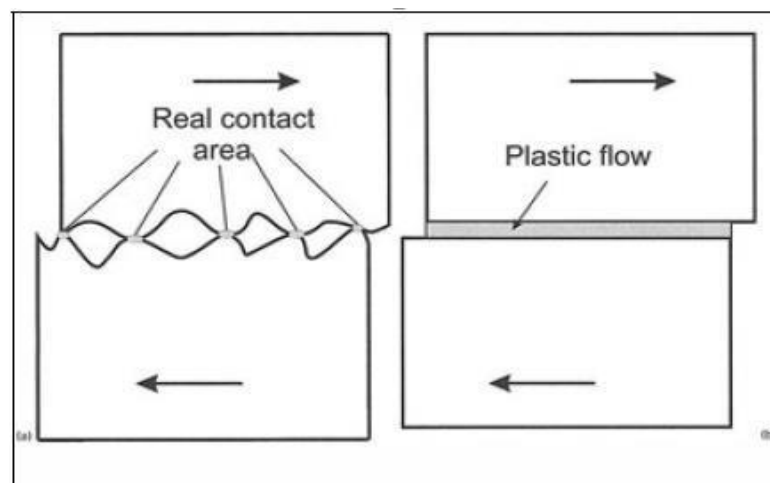


Figure II.17: Principe du soudage par friction [18]

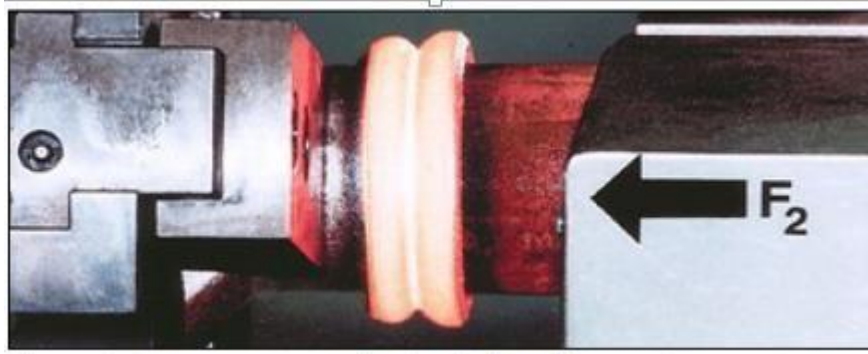


Figure II.18: La partie en rotation est freinée et la force de forgeage F_2 est exercée [18]

➤ Applications

En raison de ses larges possibilités d'applications, il n'est pas étonnant que le soudage par friction soit souvent utilisé dans des secteurs divergents. Les domaines d'application sont entre autres l'industrie aéronautique et la pétrochimie (soudage de brides ou de tubes de forage). Le soudage par friction est fortement utilisé lors de la production de pièces pour camions et engins agricoles (p.ex. des tiges à des yeux de tige (figure II.19). Une nette économie peut être réalisée en remplaçant des pièces complètement forgées par de plus petites pièces forgées soudées à des produits standard comme des barres ou des tubes. Le soudage par friction est également utilisé pour la production de pièces dans l'industrie automobile comme des stabilisateurs, des engrenages (figure II.20), des soupapes, des arbres de transmission, ... Le grand avantage de cette technique de soudage réside dans le fait que certaines combinaisons de matériaux peuvent être soudées, alors qu'elles ne le sont pas avec des techniques de soudage traditionnelles. Exemples : assemblage aluminium-acier (figure : II.21) ou titane-cuivre. Cette possibilité permet de faire des économies en ayant une conception judicieuse de telles pièces. Un exemple est la conception d'une soupape de moteur à combustion. La tête en matériau réfractaire est soudée à la tige en matériau résistant à l'usure. [18]

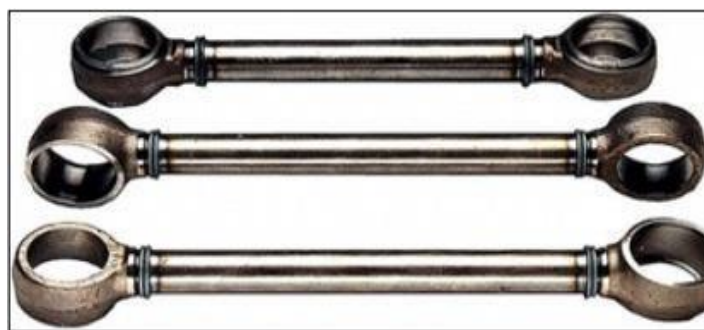


Figure II.19: Arbres de transmission soudés par friction [18]



FigureI1.20: Engrenage soudé par friction [18]



Figure I.21:Assemblage aluminium-acier [18]

Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les différents procédés de soudage. Chaque procédé a ses avantages et ses inconvénients selon l'application, selon que l'on soude en atelier, ou en extérieur, selon l'accessibilité de la pièce, selon les possibilités d'utiliser. Le choix du procédé le plus adapté dépend de très nombreux paramètres, à la fois techniques et économiques. Nous avons choisi d'étudier le procédé du soudage par point, compte tenu de ses nombreux avantages et facile à utiliser.

CHAPITRE III :

L'inspection destructive des soudures

III.1. Définition essais destructifs des soudures

Les essais destructifs des soudures dans les matériaux métalliques sont les essais effectués sur des échantillons soudés pour déterminer leur qualité et leur intégrité. Ces tests impliquent généralement la destruction de l'échantillon au cours du processus, d'où le terme "test destructif".

Les tests destructifs les plus couramment utilisés pour évaluer la qualité des soudures sont :

- Le test de traction : Ce test mesure la force nécessaire pour rompre l'échantillon dans la direction de la soudure. Il permet d'évaluer la résistance de la soudure et la qualité de la fusion entre les métaux.
- Le test de flexion : Ce test mesure la résistance de l'échantillon à la flexion et permet d'évaluer la qualité de la soudure.
- Le test de cisaillement : Ce test mesure la résistance de l'échantillon à la rupture en raison d'une force de cisaillement appliquée à la soude. Il permet d'évaluer la qualité de la fusion entre les métaux.
- Le test de dureté : Ce test mesure la dureté de l'échantillon et permet d'évaluer la qualité de la fusion entre les métaux.

Ces essais destructifs sont régis par des normes internationales pour garantir leur fiabilité et leur reproductibilité, telles que la norme ISO 17636-1:2013 pour les essais non destructifs des soudures sur matériaux métalliques [19].

III.2. L'essai de traction

III.2.1. Définition de l'essai de traction

L'essai de traction est une expérience physique qui fournit des informations sur le comportement élastique, le comportement plastique et le degré de résistance à la rupture d'un matériau lorsqu'il est soumis à une contrainte uni-axiale.

Certains objets manufacturés doivent avoir un minimum de solidité pour supporter des charges, du poids et bien d'autres efforts. Les essais de traction permettent de caractériser les matériaux indépendamment de la forme de l'objet soumis à la force ou des performances des composants mécaniques. Comme tout essai mécanique, l'essai traction Une sollicitation

simple est reproduite, loin d'être une sollicitation réelle, mais facile à contrôler et à reproduire [20].

Ce test ou expérience consiste à placer un petit morceau du matériau à étudier entre les mâchoires d'un tracteur, qui tire sur la tige jusqu'à ce qu'elle se casse. L'allongement et la force appliquée sont enregistrés puis convertis en déformation et contrainte. Une variante moderne des essais de traction utilise la force centrifuge sur un composant pour créer une contrainte de traction. Ces ruptures se produisent et la limite de rupture est enregistrée lorsque la valeur ultime de la résistance à la traction du composant ou de la liaison (exprimée en MPa ou N/mm²) est égale à la force centrifuge appliquée. L'avantage est que la batterie est testée sur plusieurs échantillons soumis exactement à la même contrainte pendant la période de test.

L'essai de traction donne plusieurs valeurs importantes :

- Le module de Young, E , ou module d'élasticité longitudinale, exprimé en mégapascals (MPa) ou en gigapascals (GPa) ;
- La limite d'élasticité (lorsqu'elle existe), R_e , σ_e , σ_y ou f_y (yield stress), qui sert à caractériser un domaine conventionnel de réversibilité ;
- La résistance à la traction R_m , σ_m ou f_u (limite ultime), qui définit la limite à la rupture ;

L'allongement à la rupture $A\%$, mesure de la capacité d'un matériau à s'allonger sous charge avant rupture, est une propriété intéressante dans certaines applications ;

Coefficient de Poisson ν , qui correspond au rapport entre la déformation transversale (réduction de section) et la déformation longitudinale (allongement relatif) de la pièce dans le domaine élastique [21].

III.2.2. Buts de l'essai de traction

L'essai de traction est un essai mécanique qui consiste à appliquer une force uni-axiale progressive à un échantillon de matériau pour mesurer sa résistance à la traction et son comportement en termes d'allongement et de déformation. Les principaux objectifs de l'essai de traction sont les suivants [22] :

- 1) Mesure de la résistance à la traction d'un matériau : Les essais de traction mesurent la force maximale qu'un matériau peut supporter avant de se rompre ou de subir une déformation permanente. Cette mesure peut être utilisée pour évaluer la résistance à la traction d'un matériau et déterminer son adéquation à une application particulière.

- 2) Déterminer comment le matériau réagit à la contrainte : le test de traction vous permet également d'évaluer la manière dont le matériau réagit à une contrainte de traction. Les informations recueillies peuvent nous dire à quel point le matériau est élastique, plastique, sujet aux fractures, ductile et cassant.
- 3) Comparer les propriétés de divers matériaux : les essais de traction peuvent être utilisés pour comparer les résistances à la traction et les caractéristiques de réponse aux contraintes de divers matériaux. Le matériau le mieux adapté à une utilisation particulière peut être déterminé à l'aide de cette comparaison.
- 4) Gérer la qualité des matériaux : les tests de traction sont fréquemment utilisés par les fabricants pour gérer la qualité des matériaux qu'ils produisent. Ils peuvent s'assurer que leurs marchandises répondent aux normes de qualité et de sécurité nécessaires en mesurant la résistance à la traction de chaque échantillon de matériau.

En conclusion, les tests de traction sont cruciaux pour évaluer la résistance à la traction et le comportement des matériaux sous stress. Cette mesure peut aider à déterminer si un matériel est approprié pour une application donnée et assurer sa qualité et sa sécurité. [23]

III.2.3. Principe de l'essai de traction

L'essai de traction est une méthode courante pour mesurer les propriétés mécaniques de matériaux tels que : Force et résilience. Le principe de l'essai de traction consiste à soumettre un échantillon de matériau à une force de traction uni axiale (c'est-à-dire une force agissant dans une seule direction). Ceci est accompli en utilisant un testeur de traction qui applique des forces de traction croissantes à l'éprouvette jusqu'à ce qu'elle se casse.[24]

L'essai de traction mesure la force appliquée lorsque l'éprouvette est allongée. Ces données sont utilisées pour calculer la contrainte (force par unité de surface) et la déformation (allongement par unité de longueur) subies par l'échantillon pendant l'essai. En créant des courbes contrainte-déformation, vous pouvez déterminer les propriétés mécaniques des matériaux telles que la résistance à la traction, la limite d'élasticité, le module de Young et le coefficient de Poisson.

Les essais de traction sont largement utilisés dans les industries de la fabrication et de la construction pour évaluer les performances des matériaux et s'assurer qu'ils répondent aux spécifications et aux normes de qualité [24].

III.2.4. Localisation des éprouvettes de traction dans un joint soudé

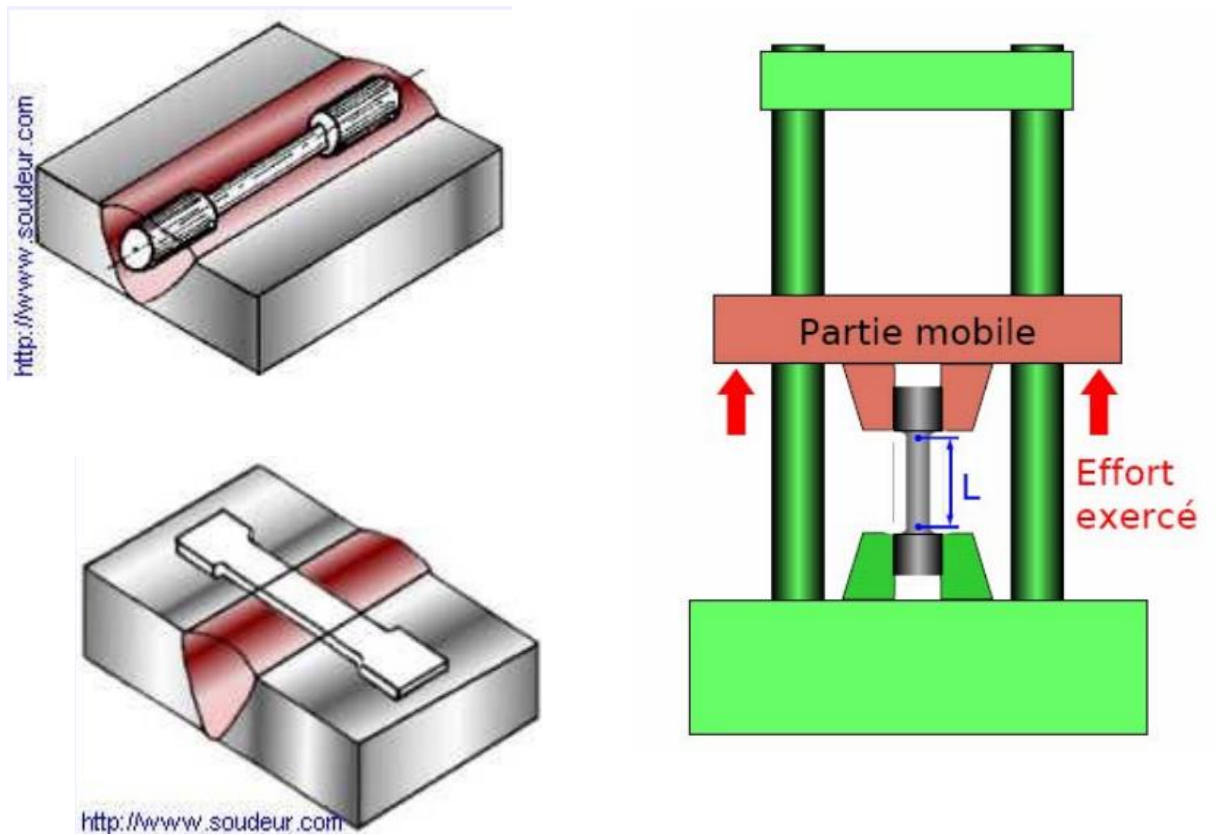


Figure III.1. Une éprouvette de section prismatique

III.2.5. Résultats de l'essai de traction

III.2.5.1. Courbe de traction avec limite d'élasticité apparente

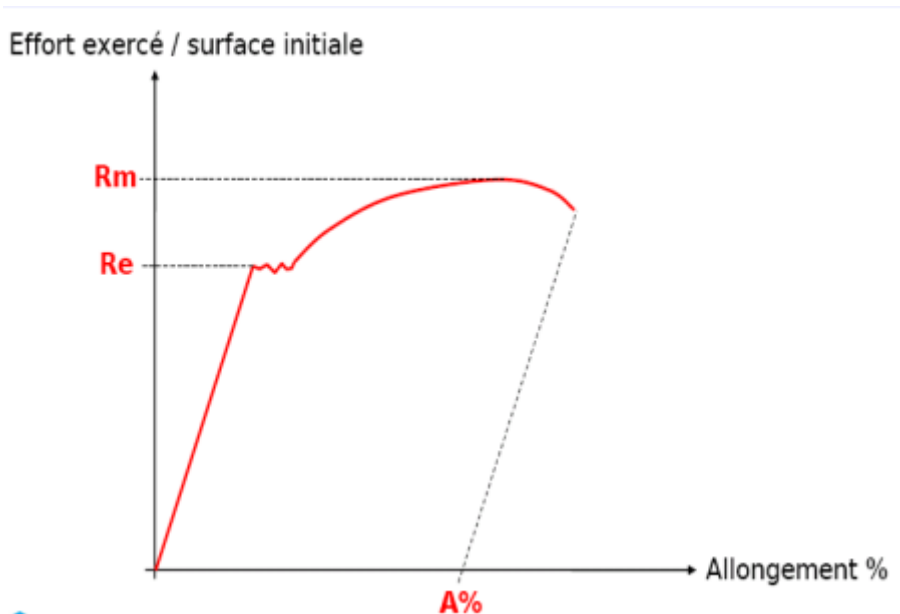


Figure III.2. Courbe de traction avec limite d'élasticité apparente

III.2.5.2 Récapitulatif des résultats d'essai

- **Re** limite d'élasticité apparente N/mm² ou Mpa
- **Rm** résistance à la traction (ou charge de rupture) N/mm² ou Mpa
- **A %** allongement % après rupture $A\% = (L_u - L_o) / L_o \times 100$

Avec

- **Lo** = longueur initiale entre repères
- **Lu** = longueur ultime entre repères (après rupture)
- **Z %** coefficient de striction $Z\% = (S_o - S_u) / S_o \times 100$

avec

- **So** = aire de la section initiale de la partie calibrée
- **Su** = aire minimale de la section après rupture [25]

III.3. Résilience (essai de flexion par choc)

III.3.1. Principe de l'essai :

Les tests de résilience sont une technique utilisée pour tester la capacité d'un système à résister aux interruptions et aux contraintes et à se rétablir rapidement en cas de pannes ou d'interruptions. Il est couramment utilisé dans l'ingénierie, la sécurité informatique et la gestion des risques pour évaluer la résilience des systèmes contre les attaques et les défaillances. [26].

Le principe des tests de résilience est d'exposer un système à des situations stressantes ou perturbatrices, telles que des pannes de courant ou des attaques informatiques, et d'évaluer sa capacité à maintenir les fonctionnalités de base et à récupérer rapidement en cas de panne. Cette évaluation peut être effectuée en observant les performances du système pendant et après une interruption et en examinant les mesures de sécurité et de redondance intégrées au système pour assurer une récupération rapide.

Le but des tests de résilience est d'identifier les limites du système et d'identifier les zones de risque ou de vulnérabilités potentielles afin qu'elles puissent être corrigées avant qu'une crise réelle ne se produise. Cela contribue également à renforcer la confiance dans la capacité du système à fonctionner de manière fiable dans des conditions extrêmes, ce qui est particulièrement important pour les systèmes critiques tels que les infrastructures de transport, les réseaux de communication et les systèmes de sécurité nationale.

Un test de flexion par impact (test élastique ou test de rupture fragile) est utilisé pour mesurer les pièces.

Nécessaire pour diviser une barre carrée de 1 cm² traitée avec un poids pendulaire Section, entaillé en son milieu par une encoche et reposant sur deux appuis

Cet essai mesure le degré de fragilité

Î résistance à la rupture fragile

(= condition de sécurité en service)[26]

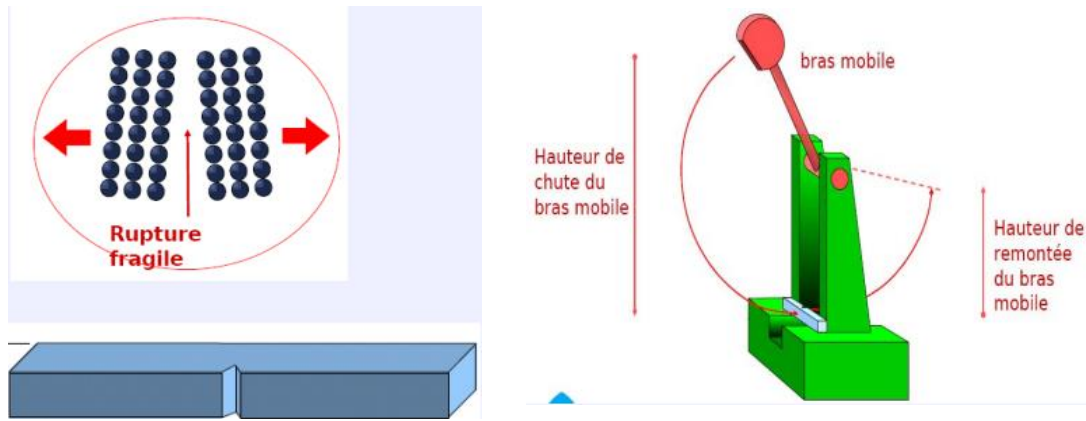


Figure III.3. Le test de résilience et flexion

III.3.2. But de l'essai de flexion par choc

Le but des essais d'impact en flexion, également appelés essais d'impact, est d'évaluer la résistance d'un matériau à la rupture lorsqu'il est soumis à des forces de flexion rapides. Ce test est couramment utilisé pour mesurer la ténacité des matériaux. H. Capacité d'absorber et de dissiper l'énergie avant de casser. [27]

Les essais d'impact utilisent généralement un spécimen de poutre ou de barre qui est serré à une extrémité et soumis à une force de flexion rapide à l'aide d'un marteau pendulaire à l'autre extrémité. Le marteau pendulaire est d'abord élevé à une certaine hauteur, puis relâché pour frapper l'échantillon. Lorsque le marteau frappe l'échantillon, il se déforme et se casse.

La quantité d'énergie absorbée lors de la rupture d'un échantillon est mesurée à l'aide d'un appareil appelé pendule Charpy ou pendule Izod. Cet appareil mesure la hauteur à laquelle un marteau rebondit après avoir heurté un échantillon. Cette mesure est utilisée pour calculer l'élasticité du matériau. C'est une mesure de la capacité à résister à une rupture lorsqu'il est soumis à des forces de flexion rapides. Les essais d'impact sont largement utilisés dans l'industrie pour évaluer la résistance des matériaux utilisés dans la construction, les structures métalliques, la plomberie, les pièces automobiles, etc. Les résultats de ce test aident à garantir la sécurité et la fiabilité des matériaux utilisés dans une variété d'applications. [28]

III.3.3. Conditions d'essai

Les essais d'impact, également appelés essais d'impact, sont une méthode d'essai utilisée pour mesurer la résistance d'un matériau à la rupture par flexion lorsqu'il est soumis à un impact. Les conditions générales d'essai pour les essais d'impact sont les suivantes. [29]

- 1) Échantillon : L'échantillon doit être un échantillon de forme rectangulaire ou en V avec des dimensions spécifiées selon la norme applicable pour le matériau. La longueur de l'échantillon doit être d'au moins 5 fois l'épaisseur pour minimiser les effets de bord.
- 2) Vitesse d'impact : La vitesse d'impact doit être spécifiée selon la norme applicable pour le matériau. La vitesse d'impact peut être contrôlée à l'aide d'un système d'impact pneumatique ou d'un pendule.
- 3) Énergie d'impact : L'énergie d'impact doit être spécifiée selon la norme applicable pour le matériau. L'énergie d'impact est généralement contrôlée par la hauteur de chute d'un pendule ou par la pression d'air d'un système d'impact pneumatique.
- 4) Température d'essai : La température d'essai doit être spécifiée selon la norme applicable pour le matériau. La température d'essai peut avoir un impact significatif sur les propriétés du matériau, donc il est important de la contrôler avec précision.
- 5) Méthode de mesure : La méthode de mesure pour déterminer la résilience doit être spécifiée selon la norme applicable pour le matériau. Les méthodes de mesure courantes incluent l'utilisation d'un pendule pour mesurer la hauteur de rebond après l'impact ou l'utilisation d'un capteur de force pour mesurer la force appliquée pendant l'impact.

Il est important de noter que les conditions de test peuvent varier en fonction du matériau testé et de la norme appliquée. Il est donc important de se conformer aux normes applicables pour garantir des résultats précis et comparables. [30]

III.3.4. Résultats d'essai

- ✓ KV ou KU = énergie de rupture mesurée en joules à une température donnée

(V ou U = type d'entaille).

- ✓ KCV ou KCU = résilience = énergie de rupture / section rompue en joules/cm² à une

Température donnée

- ✓ Exemple de calcul de résilience [31]

$$KV = 95 \text{ J}$$

Soit $KCV = 95 \text{ J} / 0,8 \text{ cm}^2 = 118,75 \text{ J/cm}^2$

III.4. ESSAI DE DURETE

Le test de dureté est un test destructif couramment utilisé pour mesurer la résistance d'un matériau à la déformation permanente. Utilisé pour déterminer la dureté relative d'un matériau en le comparant à un matériau de référence ou en utilisant une échelle de dureté spécifique.

Il existe différentes méthodes d'essai de dureté, chacune avec ses propres avantages et limites. Voici quelques-unes des méthodes de test de dureté les plus courantes: [32]

- Essai de dureté Brinell
- Essai de dureté Vickers
- Essai de dureté Rockwell
- Essai de dureté Shore

III.4.1. Domaines de la dureté :

Déterminer les propriétés mécaniques des couches minces et des surfaces des matériaux est souvent difficile. La principale raison en est l'hétérogénéité du problème.

Les essais de dureté mesurent l'effet du contact entre une géométrie définie de matériau (pénétrateur) et la surface d'un échantillon sous une certaine pression.

La nouvelle technologie a élargi la gamme des essais de dureté. Les fabricants proposent désormais des instruments qui mesurent des propriétés supplémentaires à partir de l'enregistrement de courbes force-déplacement, telles que le module de Young, le module de Coulomb, le coefficient de Poisson, la viscosité, la force d'adhérence (entre la puce et le substrat), ainsi que la ténacité et l'énergie de rupture. [33]

Plusieurs domaines de dureté peuvent être définis en fonction de la charge appliquée (fig. III.4) : Bückle [34] a introduit en 1965 la notion de la macrodureté pour des charges supérieures à 3÷5 kgf et celle de microdureté pour des charges inférieures à 100÷200 gf. Le domaine intermédiaire étant celui de la dureté sous charge réduite. Dans les années 80, est apparu le domaine de nanodureté qui correspond à des charges appliquées inférieures à 1gf.

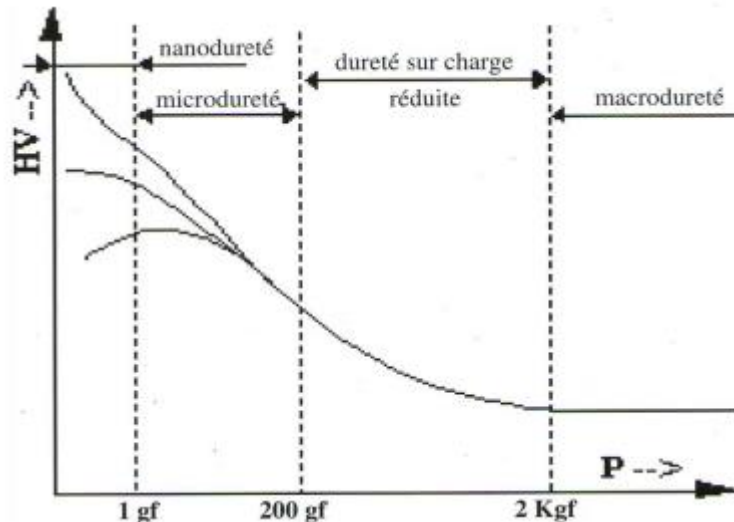


Figure III.4. Définitions des différents domaines de dureté [34].

III.4.2. Les essais par indentation :

Ce sont les tests les plus couramment pratiqués. Les principes sont toujours les mêmes.

Le pénétrateur indéformable avec une géométrie précise pénètre le métal sous-jacent

Une charge constante laisse une empreinte sur le matériau testé.

Nous mesurer les dimensions de l'indentation et en déduire la dureté.

La première approche vous permet de lier des limites de manière très simple.

Élasticité de la surface d'indentation R_e :

Plus un objet intrusif s'enfonce, plus il y a

Lorsque la zone de pression S augmente, la force F devient plus constante à mesure que la contrainte augmente.

Diminuer, Lorsque la contrainte est insuffisante pour déformer plastiquement un solide.

Lors du test, l'objet pénétrant est arrêté et la dureté est calculée à partir du rapport de force.

Appliquer sur une surface concave (relation I.5) [35].

$$Re = F / S$$

III.4.2.1. Essai de dureté Brinell

Ce test a été publié en 1924. Elle consiste à percer le métal à l'essai avec une bille sphérique polie en acier trempé ou en carbure de tungstène (Fig. I.5). Les diamètres D utilisés sont 1 mm, 2,5 mm, 0,5 mm et 10 mm. Charge appliquée

Selon le solide, le métal restera pendant 15 à 30 secondes. Lorsque la charge est retirée, la bille laisse une empreinte circulaire permanente sur le métal et son diamètre est mesuré [36].

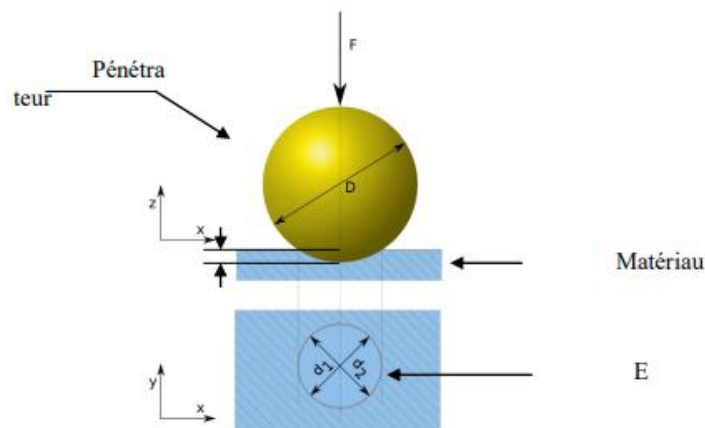


Figure III.5. Principe de dureté brinell.

La force F étant exprimée en kgf, le diamètre de l'empreinte d en mm et la dureté Brinell HB est exprimée en kgf /mm² selon la relation suivante (I.6).

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Avec :

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

III.4.2.2. Essai de dureté Rockwell :

Le test consiste à mesurer la profondeur restante de l'empreinte. Le pénétrateur géométrique conique standard HRC (Figure I.24a) ou le pénétrateur géométrique sphérique

standard *HRB* (Figure I.24b) est légèrement chargé sur la surface à tester et transporté dans des conditions très spécifiques. Le pénétrateur conique est constitué d'un diamant sphérique à pointe arrondie avec une section transversale circulaire, un angle de pointe de 120° et un rayon de 0,2 mm. Un pénétrateur sphérique est une bille d'acier rectifiée et trempée d'un diamètre de 1,588 mm ou 3,175 mm [33]. Ce processus se déroule en trois phases.

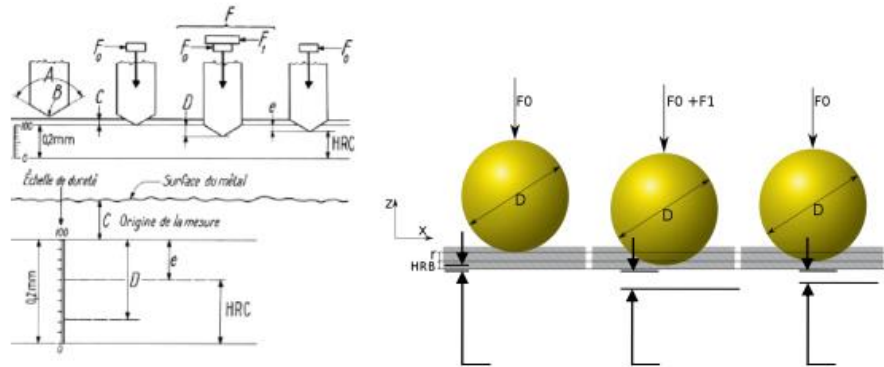


Figure III.6. Principe de mesure de la dureté Rockwell : a) échelle HRC, b) échelle HRB.

- 1) Une phase I de pénétration initiale avant charge additionnelle : après application d'une charge initiale $F_0 = 98\text{N}$ (10 kgf). La profondeur de pénétration étant l'origine qui sera utilisée pour la mesure de la dureté.
- 2) Une phase P de pénétration avec charge additionnelle : Sous la charge supplémentaire F_1 , le pénétrateur s'enfonce d'une profondeur P
- 3) Une phase R de pénétration rémanente sans la charge additionnelle : La force F_1 est relaxée et on lit les indications de l'enfoncement.

III.4.2.3. L'essai de dureté Vickers

Tout en appliquant une force connue, un pénétrateur en forme de losange en forme de pyramide géométrique avec une base carrée et un angle au sommet de 136° entre deux surfaces opposées est utilisé pour indenter le métal sous test et créer une empreinte. La diagonale de l'indentation carrée laissée par le pénétrateur est mesurée (Fig. I.7).

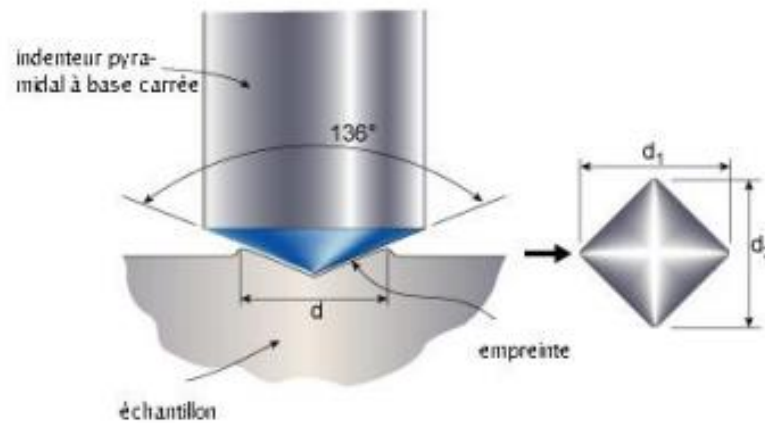


Figure III.7. Principe de dureté Vickers.

En général, la plage de force disponible (5-100 kgf) permet d'utiliser cette méthode pour toutes les tailles d'échantillons. Pour augmenter la fiabilité de l'essai, on choisit une force qui donne l'impression que la diagonale moyenne est inférieure aux deux tiers de l'épaisseur. D'autres sources recommandent que la profondeur de pénétration ne dépasse pas un huitième de l'épaisseur de la pièce à inspecter [33]. La force F s'exprime en kgf, le diamètre d'empreinte en mm et la dureté Vickers en kgf/mm² selon la relation suivante :

$$HV = \frac{1,8454P}{d^2}$$

avec:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

L'essai de Vickers celui qui fournit la plus grande diversité de renseignement. Il possède deux avantages principaux : être souvent non destructifs et pouvoir être répété un grand nombre de fois ; c'est-à-dire se prêter à une interprétation statistique (dislocation des diagonales d'empreinte suivant une loi gaussienne)

III.4.3. Intérêt et application des essais d'indentation

Le tableau II.1 regroupe les principales directives pour une bonne réalisation d'un essai de dureté par indentation, [37].

Tableau III.1. Comparaison entre les méthodes par pénétration.

Type d'essai	Pénétration de la pièce	Utilisation principale	Commentaire
Brinell	La surface de la pièce ne nécessite pas une préparation extrêmement soignée (tournage ou meulage).	En atelier	La méthode ayant la mise en œuvre la plus facile des trois méthodes
Rockwell	Bonne préparation de surface (au papier de verre OO par exemple). la présence de rayures donne des valeurs sous estimée.	En atelier	L'essai est simple et rapide Convient pour des duretés plus élevées (supérieures à parfaitement stable). La dureté Rockwell présente l'inconvénient d'avoir une dispersion relativement importante
Vickers	Etat de surface très soignée (on obtient de petites empreintes, les présences d'irrégularité gêne le lecteur)	En laboratoire	C'est un essai assez polyvalent qui convient aux matériaux tendres ou très durs. Il est utilisé généralement pour des pièces des petites dimensions. La lecture de longueur de diagonale est généralement lente

A travers différents essais avec pénétrateurs, il a été possible de déterminer une relation empirique [38,39] à partir de la relation entre la dureté Vickers HV , la dureté Brinell HB et la résistance à la rupture Rm de différents aciers (relation I. 8 et I.9) .

$$Rm = 77,14 + 2,6396 HV + 0,0010 HV^2 \quad (I. 8)$$

$$Rm = 164,71 + 2,222 HB + 0,002 HV^2 \quad (I. 9)$$

Ces deux relations permettent un lien direct entre la dureté Vickers et la dureté Brinell. Diverses autres relations liant dureté des matériaux et propriétés mécaniques ont été proposées dans la littérature [40]. Cependant, ces relations sont empiriques et doivent être utilisées avec prudence.

III.5. Les examens micrographiques

III.5.1. Présentation de la norme NF A 05-150 :

Cette norme décrit divers processus impliqués dans la préparation des échantillons pour la microscopie. Cela inclut les réactifs utilisés pour l'échantillonnage, la préparation des surfaces de recherche et les études structurales afin de mener les recherches dans les meilleures conditions possibles

III.5.2.A quoi sert l'examen micrographique :

L'objectif principal de la microscopie est de mettre en évidence la structure et les inclusions non métalliques de l'échantillon par observation au microscope optique.

III.5.3. Préparation micrographique de l'échantillon :

Les emplacements d'échantillonnage sont spécifiés dans la norme EN 15614-1, mais peuvent également être spécifiés par accord entre les parties (client et testeur). Lors du prélèvement d'échantillons, il est important de s'assurer que la structure n'a pas changé (échauffée, durcie, etc.). Par exemple, si l'échantillonnage est effectué par oxycoupage, il faut s'assurer que le processus d'échantillonnage n'affecte pas la zone affectée thermiquement par rapport à la zone testée.

La surface d'essai peut être une coupe grossière, une pièce polie sur une bande de polissage ou une surface polie. Veillez à limiter l'échauffement de l'échantillon lorsque vous travaillez avec des lubrifiants. Un pré-polissage et un polissage final sont nécessaires pour obtenir une surface d'inspection précise pour la photomicrographie.

III.5.3.1. Le pré-polissage :

Le pré-polissage se fait par frottement avec des papiers abrasifs de plus en plus fins. Le pré-polissage se fait souvent avec un disque tournant à 150 ou 300 tr/min. La meule est aspergée d'eau pour éviter la surchauffe. Le pré-polissage a pour but d'éliminer les traces de polissage précédent. Par exemple, le premier ponçage au grain P120 consiste à enlever les marques de scie. Polissez ensuite avec une pierre P180 pour éliminer toute trace de rayures de polissage P120. Les échantillons doivent être nettoyés et séchés après chaque changement d'abrasif.

On encourage les opérateurs à faire une rotation de 90° entre chaque passe.

Pour le pré-polissage on peut utiliser le mode opératoire suivant dans la majorité des cas:

- 1) La durée de polissage varie de 2 à 3 min par granulométrie
- 2) Les vitesses de rotation sont de 150 à 300 tr/min
- 3) Les granulométries utilisées sont :
 - a) Pour les échantillons tronçonnés : P120 E 75-101, P180 E 75-101, P320 E 75-102, P400 E 75-102 et P600 E 75-102 (on peut utiliser des granulométries plus grosses pour la première passe si les surfaces sont trop rugueuses.
 - b) Pour les échantillons passés à la bande abrasive : P180 E 75-101, P320 E 75-102, P400 E 75-102 et P600 E 75-102
 - c) Pour les échantillons rectifiés : P320 E 75-102, P400 E 75-102 et P600 E 75-102

III.5.3.2. Le polissage de finition

Pour obtenir une surface uniforme et éviter d'arrondir les bords, l'échantillon peut être placé sur un ensemble mécanique ou sur de l'asphalte.

Trois types de polish sont couramment utilisés pour la finition :

Finition par polissage électrolytique

Finition par polissage à l'alumine

Finition par polissage à la pâte diamantée

A. Le polissage électrolytique :

Basé sur le principe de la fusion anodique. L'échantillon agit comme l'anode de la cellule électrolytique. L'électrolyte, la tension, l'intensité et le temps de polissage appropriés sont sélectionnés en fonction de la nature de l'échantillon à polir. Un électropolissage prolongé donne généralement de mauvais résultats.

B. Le polissage à l'alumine :

Ce type de polissage consiste à frotter l'échantillon sur un disque de feutre ou de tissu imbibé

d'une suspension d'alumine. Selon cette norme, la granulométrie est caractérisée par le temps nécessaire à l'alumine en suspension pour se séparer après agitation. Plus l'oxyde d'aluminium est fin, plus il dure longtemps. C'est comme mettre du gravier dans un récipient et du sable fin dans un autre récipient similaire. L'eau dans un récipient avec du sable fin prend plus de temps à s'évacuer qu'un récipient avec du gravier grossier. Écrivez différentes tailles de particules, telles que l'oxyde d'aluminium 1h, l'oxyde d'aluminium 12h.

Deux tailles de grain sont nécessaires, 1 heure d'alumine et 24 heures d'alumine, et le temps de polissage est de 2 à 5 minutes par taille de grain. La vitesse du disque est de 150 tr/min à 750 tr/min.

Rincer l'échantillon à l'eau entre chaque granulométrie et à la fin du polissage et sécher à l'air chaud.

C. Le polissage à la pâte diamantée :

Ce polissage se fait de la même manière que la dernière fois, mais l'abrasif est de la pâte de diamant, qui s'étale à l'aide de diluant. La granulométrie utilisée varie de 1/4 de micron à 14 microns.

L'échantillon est lavé avec un solvant adapté entre chaque changement de granulométrie et à la fin du polissage. Les échantillons sont ensuite séchés à l'air chaud. Par exemple, le polissage peut être effectué avec des grains de 6 microns et 1 micron à une vitesse de rotation de 150 à 300 tr/min pendant une durée de 2 à 3 minutes par taille de grain.

III.5.3.1. L'attaque macrographique :

Les échantillons polis peuvent être visualisés directement sans macrophotographie lors de l'inspection des inclusions non métalliques, des fissures, de la porosité, etc.

La gravure macrographique permet d'obtenir des différences de relief et de couleur entre différents constituants de la soudure ou entre des cristaux orientés différemment au sein d'une même phase. Cela peut révéler des inégalités structurelles.

Le processus de polissage garantit de bons résultats pour les attaques de prise de vue macro. Être prudent et propre pendant ce processus augmente les chances de succès d'une attaque.

L'attaque peut être interrompue par un écrouissage superficiel. En général, un nouveau ponçage après la première couche améliorera grandement les résultats.

III.5.4. Les réactifs utilisés pour les examens des structures

On classe les réactifs en deux groupes :

- les réactifs d'attaque chimique
- les réactifs d'attaque électrolytique.[41]

III.5.4.1. Réactifs d'attaque chimique

- C1 : Solution alcoolique d'acide nitrique,
- C2 : Solution alcoolique d'acide picrique,
- C3 : Réactif au ferricyanure de potassium alcalin,
- C4 : Eau régale glycinée,
- C5 : Solution alcoolique d'acide nitro-fluorhydrique,
- C6 : Réactif au persulfate d'ammonium,
- C7 : Réactif au chlorure ferrique et à l'acide chlorhydrique en solution aqueuse,
- C8 : Solution aqueuse saturée d'acide picrique,
- C9 : Solution d'acide picrique et d'acide chlorhydrique,
- C10 : Solution alcoolique d'acide chlorhydrique,
- C11 : Réactif au permanganate de potassium alcalin,
- C12 : Solution alcaline de picrate de sodium,
- C13 : Réactif au sulfate de cuivre acide.[42]

III.5.4.2. Réactifs d'attaque électrolytique

- E1 : Solution aqueuse d'acide oxalique,
- E2 : Acide nitrique dilué (1 + 9) (c'est-à-dire à 10 %),
- E3 : Solution aqueuse d'acide chromique,
- E4 : Solution de soude caustique 0,1 N,

E5 : Solution de soude caustique 10 N,

E6 : Solution aqueuse saturée de nitrate d'ammonium.[43]

CHAPITRE IV :

Techniques expérimentales

Introduction

Ce chapitre présente les méthodes et les conditions expérimentales utilisées pour caractériser les joints de soudure SHW à électrode enrobée (EE). La deuxième partie présente les différentes méthodes expérimentales utilisées pour la caractérisation mécanique et métallurgique des soudures.

Les méthodes suivantes sont utilisées pour effectuer la caractérisation métallurgique :

Analyse morphologique des composants : largeur des liaisons et dimensions de la zone de fusion et de la zone affectée thermiquement. Cette analyse peut également mettre en évidence la présence de défauts ;

Etudes microstructurales des cordons de soudure (ZAT, ZF)

La composition chimique des différentes régions a été déterminée par des méthodes spectroscopiques.

Dans une seconde étape, la caractérisation mécanique des assemblages est obtenue à différentes échelles :

- Les propriétés mécaniques locales (couches de réaction ZAT, ZF) sont obtenues par micro-duretés, par les essais de traction et par des essais de résilience.
- Enfin la rupture des assemblages est analysée par l'observation des faciès de rupture.

IV.1. Les matériaux utilisés

- Le métal de base est le S235 qui est un acier doux étiré à froid.

S: Acier de construction

235: Limite élastique de l'acier en N/mm² ou Mpa

JR: Limite de l'énergie de rupture de 27J à une température d'essai de 20°C

Conçu comme un acier de construction non allié d'usage général, l'acier S 235 JR est non destiné aux traitements thermiques. C'est aussi un acier doux, bas carbone et sans plomb. Il ne garantit aucune caractéristique mécanique. C'est ainsi qu'il est utilisé pour les pièces mécaniques peu sollicitées qui ne nécessitent pas de ténacité.

- Usinabilité: Assez bonne
- Soudabilité: Très bonne
- Résistance à la corrosion: Très mauvaise
- Aptitude au traitement thermique: Non apte

Dans cette étude pour préparer des joints soudés. Ce produit est fourni sous la forme d'une plaque de 15 Cm de large, 3,2mm d'épaisseur et 20 cm de long.

Table IV.1.1- Composition chimique de l'acier de construction S235JR

Élément	C	Mn	P	S	N
S235jR	0.22	1.6	0.05	0.05	0.05

Table IV.1.2 - Caractéristiques mécaniques typiques de l'acier S235JR :

Rm (MPa)	Re (MPa)	A (%)	KV (J)	Dureté Brinell HB
360-510	225-390	26%	27	104-154

IV.2. Les métaux d'apport

Les différentes soudures (homogènes et hétérogènes) sont réalisées par le procédé soudage arc électrique manuel avec électrode enrobée (EE) en deux (02) passes en utilisant différents métaux d'apport.

- Métal d'apport E7018: est utilisé pour la réalisation de la soudure homogène .
- Métal d'apport E308 : utilisé pour la réalisation des soudures hétérogène .

L'analyse de la composition chimique de ces deux métaux par spectromètre d'émission optique a permis d'obtenir les pourcentages massiques des différents éléments d'alliage les constituant (Tableau IV.2).

En comparant les deux compositions à celle des métaux de base on remarquera que nous avons choisis un métal d'apport à plus faible teneur en carbone que le métal de base pour minimiser le risque de précipitation des carbures de Chrome. Le taux de Nickel y est par contre plus élevé (dans le cas de la soudure hétérogène et inox/inox) pour stabiliser l'austénite

dans la zone fondue ; aussi la légère différence en Chrome à l'avantage du métal d'apport permettra de compenser les éventuelles pertes causées par évaporation. On remarque enfin que les teneurs de tous les éléments sont dans les limites recommandées pour les aciers inoxydables et au carbone.

Tableau IV.2. Composition chimique du métal d'apport E308.

Élément	C	Si	Mn	Ni	N	Cr	Ferrite Fn
W%	0.03	0.9	0.7	10.0	0.09	19.3	5



Le E308 est un acier inoxydable austénitique, est composé d'au moins 19% de Chrome et au moins 10% de nickel. Sa spécificité est bien de contenir du molybdène qui augmente sa tenue à la corrosion (notamment au chlore et à l'eau de mer). C'est une nuance également utilisée en pétrochimie.

Figure IV.1. Métal d'apport E308

Tableau IV.3. Composition chimique du métal d'apport E7018.

Élément	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	S	P	Fe
E7018	0.07	0.45	1.45	0.15	0.10	0.15	.02	.02	Res

Les électrodes à faible teneur en hydrogène ESAB OK 48.60 E7018 sont des baguettes de soudage à l'arc à usage général pour les aciers doux et faiblement alliés. L'électrode OK 48.00 fonctionne sur DC + polarité positive et a de très bonnes caractéristiques de fonctionnement.



Figure IV.2. Métal d'apport E7018

IV.3. Procédure de soudage

IV.3.1. Préparation des échantillons :

Avant l'opération de soudage, les éprouvettes doivent être nettoyées de tout oxyde, huile, graisse, impureté ou autre matière déposée dessus car pouvant provoquer des défauts lors de la solidification du métal fondu. Un nettoyage manuel avec une brosse en acier inoxydable ou un solvant chimique est acceptable.

Après nettoyage de l'échantillon, un chanfrein doit être préparé pour remplir le métal déposé. La forme et la taille de ce chanfrein dépendent de la géométrie de l'éprouvette à souder. Dans notre exemple, un chanfrein en forme de V a été usiné. Les caractéristiques géométriques de ce chanfrein sont représentées sur la Figure IV.3.

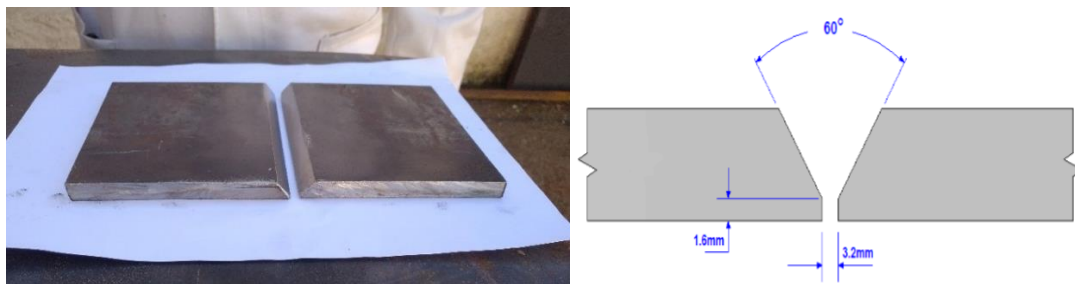


Figure IV.3. Paramètres de soudage

Tableau IV.4. Paramètre de soudage des soudures réalisées par le métal d'apport E308.

Procédé de soudage	EE
Position de soudage	1G
Courant& Polarité	DC(+)
Electrode (mm)	WT 2.5
Gamme d'intensités (A)	70-76
Gamme de tension(V)	19-22
T-I interpasse	300°C Max

Tableau IV.5. Paramètre de soudage des soudures réalisées par le métal d'apport E7018.

Procédé de soudage	EE
Position de soudage	1G
Courant& Polarité	DC(+)
Electrode (mm)	WT 3.2
Gamme d'intensités (A)	70-76
Gamme de tension(V)	19-22
T-I interpasse	300°C Max

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

IV.3.2 Découpage des éprouvettes :

La méthode de prélèvement des échantillons pour les essais de traction et résilience est définie par différentes normes et spécifications. Dans notre cas, nous avons pris en compte les

Recommandations de la spécification ASME. Le prélèvement a été effectué au niveau des ateliers d'usinage de CRTI, et l'usinage des éprouvettes d'essais (traction et résilience) s'est déroulé au niveau de l'atelier d'usinage du Centre de recherche en technologies industrielles



Figure IV.4. Une tronçonneuse (Struers Discotom) au niveau de CRTI



Figure IV.5. Eprouvettes de résilience



Figure IV.6. Eprouvettes de microstructure

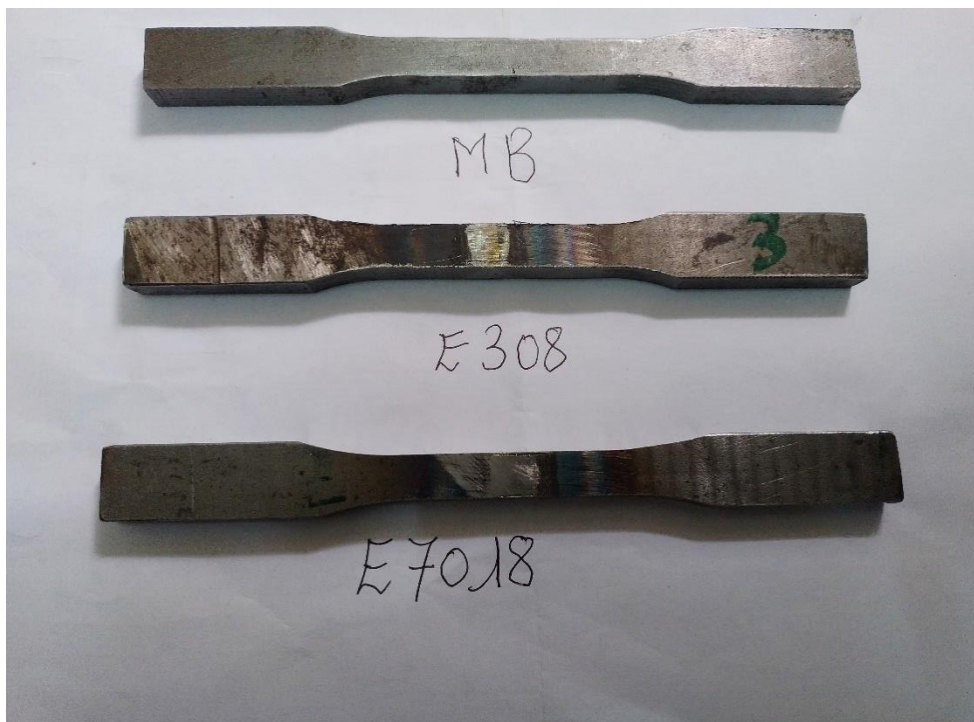


Figure IV.7. Eprouvettes de traction

IV.4. Les examens métallographiques

IV.4.1 Les opérations de préparation des surfaces

Les échantillons pour l'étude microstructurale ont été découpés à l'aide d'une micro-tronçonneuse, sous forme rectangulaire de dimensions 25×3.3mm. Les échantillons une fois découpés sont nettoyés et dégraissés, puis enrobés à chaud sous pression (Figure IV.7). Un polissage mécanique est alors réalisé avec une polisseuse tournant à une vitesse de 150 à 300 tours/min et sur laquelle est collé du papier abrasif. le polissage est réalisé en deux étapes :

➤ **Etape de polissage :**

Fait manuellement avec du papier abrasif en SiC de granulométrie de plus en plus fine, jusqu'à une taille de grain de 4000, Le polissage est réalisé sous une refroidissement continue pour éliminer tout risque d'échauffement de l'échantillon. Les papiers sont utilisés successivement dans l'ordre décroissant de la granulométrie en prenant soin de tourner l'échantillon de 90° afin d'éliminer les rayures laissées par le polissage précédent. Sur chaque papier, on maintient en contact l'échantillon pendant 5 minutes.



Figure IV.8. Polissages

➤ Etape d'Attaque chimique

Pour révéler la microstructure des différents échantillons, nous avons procédé à l'attaque de la surface polie. On a utilisé l'attaque chimique (Tableau IV.8) :

Attaque chimique des soudures homogènes des aciers inoxydables austénitiques (E7018) la solution chimique est le kaling avec un temps d'attaque 10mn.

Attaque chimique des soudures hétérogènes des aciers inoxydables austénitiques et duplex (E308) la solution chimique est le kaling avec un temps d'attaque 8mn.

Tableau IV.6. Les réactifs d'attaque chimique utilisés.

Matériau	Réactif d'attaque pour MB	Réactif d'attaque pour ZAT et ZF
Acier inoxydable E308	Nital 4% 100ml E'thanol 4ml HNO ₃	Orégal 50ml eau 50ml Hcl 5ml HNO ₃
Aciers E7018	Nital 4% 100ml E'thanol 4ml HNO ₃	Nital 4% 100ml E'thanol 4ml HNO ₃

IV.4.2. Examen macrographique et microscopie :

IV.4.2.1. Examen macrographique

L'examen macrographique est un examen d'ensemble ; il met en évidence les hétérogénéités qui existent dans la soudure. Cet examen permettra de rendre compte de la répartition thermique, c'est-à-dire qu'il localise et délimite les différentes zones où se sont produits des phénomènes particuliers : la fusion, les différentes passes, les évolutions des zones du cordon portées à des températures plus ou moins élevées. Les analyses macrographiques se font sur des échantillons à surfaces polies attaquées chimiquement.



Figure IV.9.L'examen macrographique pour échantillons

IV.4.2.2. Examen micrographique

L'examen micrographique a pour but la mise en évidence de la structure à l'échelle du grain (microstructure des différentes zones de soudure ZF, ZAT, ZL... etc) L'obtention de surfaces polies et optiquement planes est nécessaire. Ceci implique une suite d'opérations d'enrobage, suivis d'un pré-polissage, polissage de finition et finalement une attaque chimique adéquate.

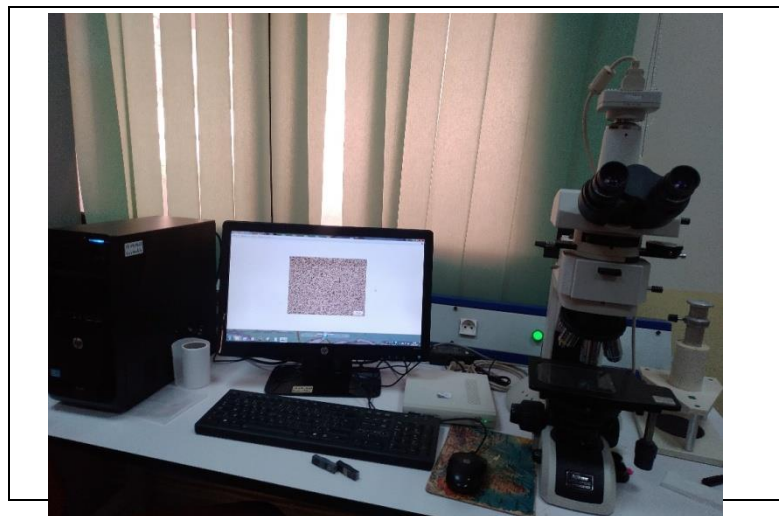


Figure IV.10.L'examen micrographique pour échantillons

IV.5. Caractérisations mécaniques :

Le but de ces essais est de contribuer à l'évaluation de la qualité d'un assemblage, de caractériser l'interaction entre un matériau et un procédé de soudage, et de fournir des données quantitatives sur le comportement des assemblages soudés.

IV.5.1. Essai de traction

L'essai de traction est le moyen le plus couramment employé pour caractériser le comportement mécanique d'un matériau sous une sollicitation progressive à vitesse de chargement faible ou modérée. L'essai permet, en outre, l'étude et l'identification des mécanismes physiques de déformation plastique. Cette dernière, gouverne le processus majeur de mise en forme, par ou sans enlèvement de matière, des matériaux dans la plus part des procédés de fabrication utilisés dans l'industrie mécanique.



Figure IV.11. Machine de traction au niveau de CRTI

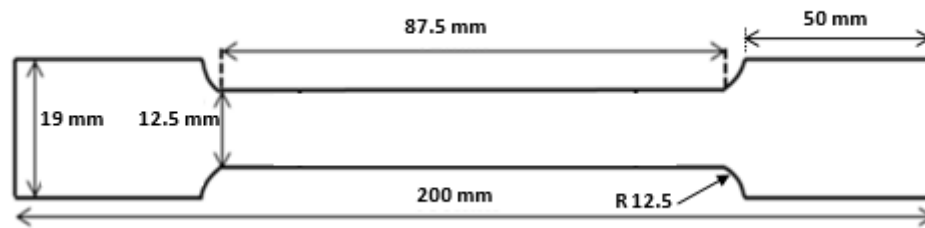


Figure IV.12.Eprouvettes de traction

➤ **Courbe de traction :**

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

L'examen du diagramme effort-déformation (ou courbe de déformation, Figure.IV.12) fait apparaître deux zones distinctes : le domaine élastique, puis, le domaine plastique.

Le domaine élastique correspond à la zone où les déformations de l'échantillon sont réversibles. A contrario, dans le domaine plastique, les déformations sont irréversibles. En outre, la courbe de traction permet de mesurer plusieurs valeurs intéressantes qui caractérisent le matériau.

Tout d'abord, le coefficient directeur de la courbe (modélisable par une droite) en zone élastique est appelé module de Young (E). Le plus souvent exprimé en méga pascals, il définit la rigidité du matériau. En effet, plus E sera élevé, plus le matériau sera rigide. Pour les aciers, il est en théorie de l'ordre de 200 GPa.

Ensuite, la limite entre la zone élastique et la zone plastique est appelé la limite élastique. C'est la force limite à partir de laquelle l'allongement de l'échantillon n'est plus réversible.

Pour finir, la force qui correspond au point de rupture de l'échantillon sur la courbe est appelé limite à la rupture. C'est la force maximale que peut supporter l'échantillon.

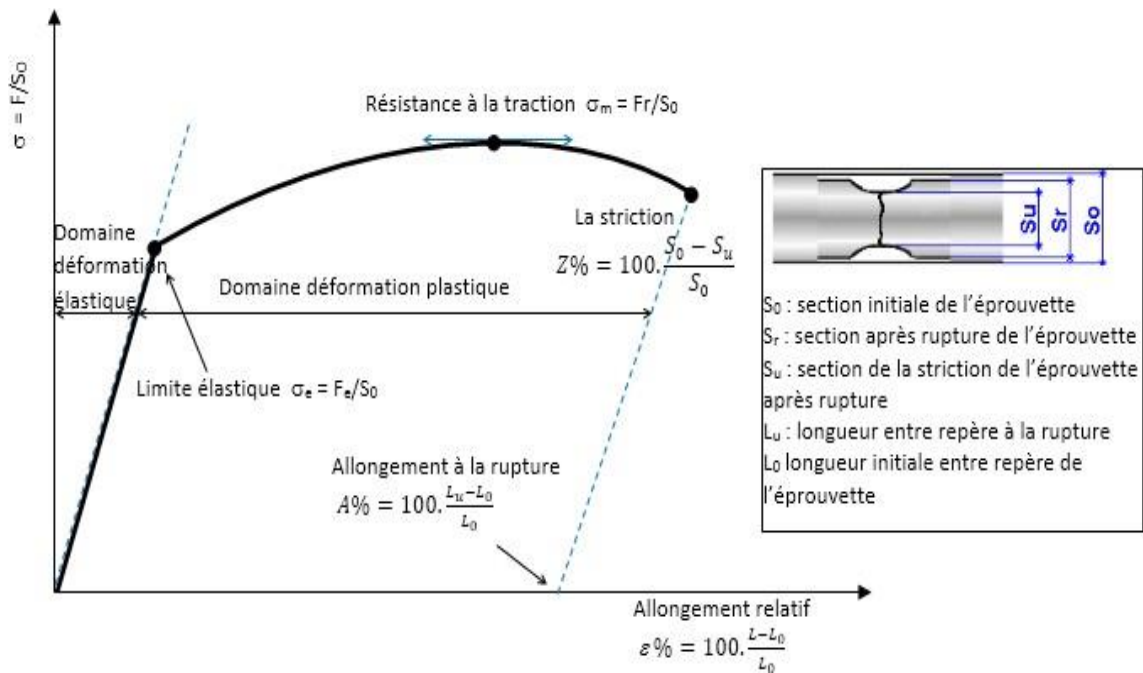


Figure IV.13- Courbe rationnelle de traction.

IV.5.2. Essai de résilience (ou essai de flexion par choc)

L'essai de résilience est un moyen rapide et simple pour évaluer la ténacité d'un matériau. Il consiste à mesurer l'énergie de rupture à grande vitesse de déformation. Pour cela, on introduit des facteurs fragilisant qui sont :

- L'entaille mécanique sur l'éprouvette qui crée un état de contraintes localisés triaxiales important au fond de celle-ci. Elle sert par exemple à reconstituer le système de contraintes existant localement dans les zones critiques de constructions soudées,
- La vitesse d'application de la charge traduite par la vitesse de déplacement du couteau au moment de l'impact (la vitesse du pendule utilisé était de 5.23m/s),
- La température d'essai que l'on fait varier.

IV.5.2.1. Le mouton Charpy et principe de mesure:

Dans sa configuration la plus répandue, le mouton de Charpy consiste en un marteau de masse m qui est fixé à l'extrémité d'un pendule (Figure IV.11). Ce pendule peut tourner dans le plan vertical autour d'un axe horizontal. L'éprouvette repose sur un support et se trouve au point le plus bas sur la trajectoire du marteau. Pour effectuer un essai, on écarte le bras jusqu'à ce que

le marteau atteint sa position initiale à la hauteur H et on le lâche. Quand le pendule vient frapper l'éprouvette, il a une énergie cinétique qui est égale à l'énergie potentielle qu'il avait à sa position de départ mgH , H étant la hauteur du marteau par rapport à sa position d'équilibre. Après la rupture, le marteau remonte. Dans son point culminant (hauteur h), l'énergie cinétique résiduelle s'est de nouveau transformée en énergie potentielle mgh .



Figure IV.14. Machine d'essais de résilience au niveau de CRTI



Figure IV.15 : Echantillons de résilience

L'énergie K dépensée pour rompre l'éprouvette vaut alors

$$K = mg(H-h)$$

Les éprouvettes les plus fréquemment utilisées aujourd'hui sont les types ISO-V et ISO-U. Ils ont une entaille en forme de V ou U pour fixer l'endroit de la fissure. L'énergie de rupture est finalement indiquée en J (Joule/cm²), précédée par les lettres **KV** ou **KU** pour désigner qu'il s'agit d'une énergie de rupture mesurée avec une éprouvette ayant une entaille en forme de **V** ou **U**

$$KV \text{ (ou } KU) = \frac{\text{énergie absorbée par la rupture}}{\text{surface sous entaille (Cm}^2\text{)}} = \frac{mg(H-h)}{S}$$

La machine d'essai utilisée de capacité de 300 J (Figure III.12b) est celle de la société pétrolière GTP. L'énergie de rupture en Joule, de l'éprouvette testée est lue directement sur le cadran de la machine. Les essais sont effectués sur des éprouvettes Charpy V normalisées.

Afin d'évaluer la transition ductile-fragile dans les soudures, les tests sont conduits à différentes températures. Sachant que cette transition dans les aciers est presque toujours en dessous de la température ambiante. Il est donc nécessaire de refroidir l'échantillon à des températures en dessous de 0 °C. Comme nous n'avons pas besoin de faire varier la température de façon continue nous pouvons nous contenter d'un milieu de refroidissement classique. Les éprouvettes sont immergées dans récipient contenant un liquide organique refroidi par la neige carbonique (températures entre -60 et +20 °C). Le récipient est muni d'un appareil de mesure de la température.

IV.5.3. Essai de micro dureté :

L'essai de dureté est une technique idéale pour caractériser les cinétiques de durcissement structural car elle est à la fois rapide et peu coûteuse en matériau.

Les essais de dureté consistent à imprimer dans la pièce à tester un pénétrateur en forme de pyramide (Vickers) et à mesurer la diagonale d de l'empreinte laissée considérée comme une pyramide droite et on relie cette information à la charge appliquée par la formule :

$$H_v = 0.189 F/d^2$$

F : Niveau de la charge appliquée.

d : Diamètre de l'empreinte

IV.5.3.1. Préparation des éprouvettes :

La surface de l'éprouvette doit être propre, plane et lisse soigneusement préparée. Plus des dimensions du pénétrateur sont petites, plus l'état de la surface doit être lisse. Une application du polissage en mode automatique est parfois obligatoire. La préparation de l'éprouvette doit être faite sans provoquer des altérations des propriétés du matériau dues, par exemple, au chauffage ou à, l'écroutissage. L'épaisseur de l'éprouvette doit être suffisante pour qu'aucune trace d'une déformation ne soit visible sur la surface opposée à celle de l'application de la – è charge. D'après une règle générale, l'épaisseur minimale est au moins dix fois supérieure à la profondeur de l'empreinte.

IV.5.3.2. Exécution de l'essai :

On emploie pour l'exécution de l'essai un dispositif qui est suffisamment rigide et stable. L'essai doit être fait sans choc et sans vibrations, autrement les résultats sont erronés.

L'éprouvette doit être installée sur un support rigide du dispositif pendant l'action de la charge. Les essais les plus courants se font par pénétration, les essais les plus classiques sont les essais Brinell, Vickers et Rockwell. et Rockwell.



Figure IV.16. Appareils de mesure de dureté au niveau de CRTI

CHAPITRE V :

Résultats et discussions

Introduction

L'étude de la structure métallurgique des soudures des aciers inoxydables duplex est d'une importance primordiale dans la maîtrise des propriétés de tels assemblages. Dans le cas du soudage multi-passes, la succession des cycles thermiques conduit à la transformation ferrite (δ) \leftrightarrow austénite (γ) à différents taux d'achèvement et influe sur l'équilibre δ/γ au niveau de la soudure.

Le contrôle de cet équilibre δ/γ dans les soudures d'aciers inoxydables duplex n'est pas aussi simple que dans le métal de base. Les analyses de la microstructure des joints soudés montrent que la proportion de chaque phase est fonction de la composition chimique, de la température maximale atteinte lors de l'opération de soudage, et de la vitesse de refroidissement depuis cette température. Dans la zone fondue, la microstructure peut être contrôlée en équilibrant les effets de la composition du métal d'apport et de la vitesse de refroidissement du joint soudé. Dans la zone adjacente (zone affectée thermiquement ZAT), l'équilibre δ/γ est commandé principalement par la vitesse de refroidissement.

Par conséquent, la microstructure des joints soudés de l'acier inoxydable duplex peut changer de manière significative par rapport à celle du métal de base. La maîtrise des microstructures de la ZAT des aciers inoxydables duplex dépend d'une meilleure compréhension des transformations de phase. Dans ce chapitre nous présentons les résultats des expériences menées au cours de ce travail et leurs interprétations.

V.1.Résultats des caractérisations structurales :

L'objectif de cette étude est de révéler, observer et interpréter la macrographie et surtout la microstructure du matériau étudié en utilisant le microscope optique et le microscope électronique à balayage. En effet, les relations entre les propriétés d'emploi et les structures sont primordiales dans le cas des matériaux rendant ainsi essentiel l'observation des structures aux échelles appropriés.

Dans ce qui suit, nous allons faire une caractérisation de la qualité de soudage à l'aide d'un microscope optique. Notre travail a été effectué sur un échantillon à son état de réception n'ayant subi aucun traitement thermique.

V.1.1. Macrographie :

L'examen macrographique permet de révéler la structure métallographique homogène ou hétérogène d'une coupe transversale d'une éprouvette soudée. Son exploitation est indispensable pour localiser les examens micrographiques.

Le réactif chimique appliqué sur la surface polie de l'éprouvette révèle, par dissolution à vitesse inégale, les hétérogénéités physiques et chimiques de la surface métallique examinée. La macrographie permet de vérifier la compacité de la coupe de la soudure et la géométrie des cordons. On note aussi l'absence de défauts qui peuvent engendrer la rupture ou la fissuration du cordon de soudure. Toutefois, il montre l'hétérogénéité entre le métal de base et le cordon de soudure comme présenté sur la figure ci-dessous.

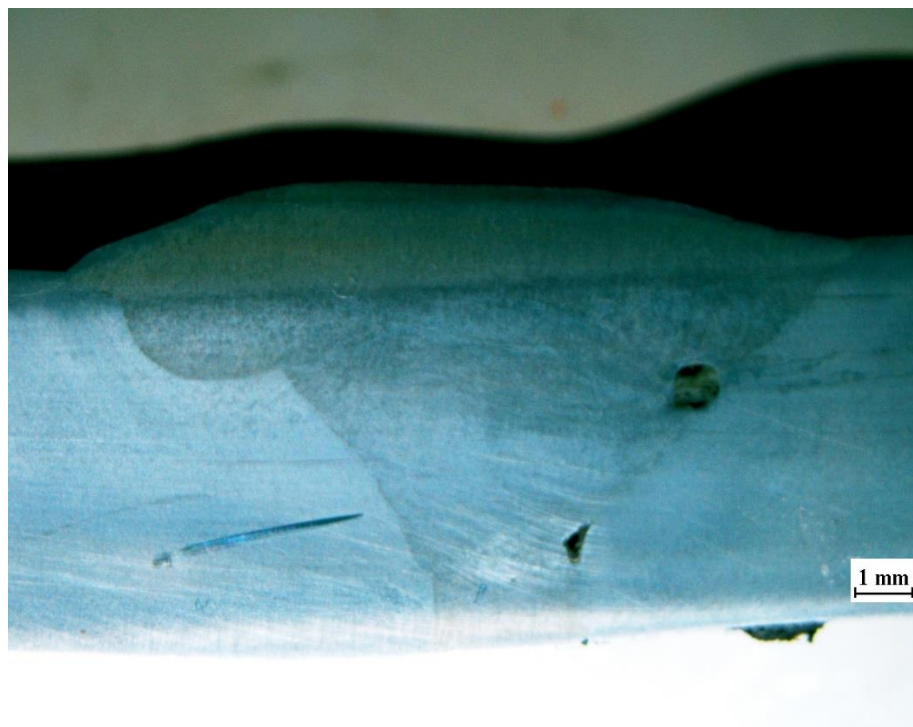


Figure V.1: Macrographie du profil du joint soudé.

V.1.2. Micrographie

V.1.2.1. Examen au microscope optique

La micrographie du métal de base représentée dans la figure V.2, montre une structure ferrito-perlitique à grains fins et coaxiale.

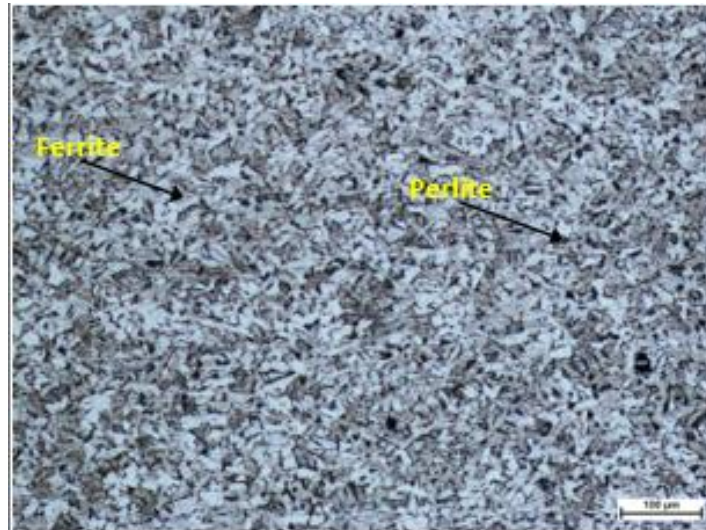
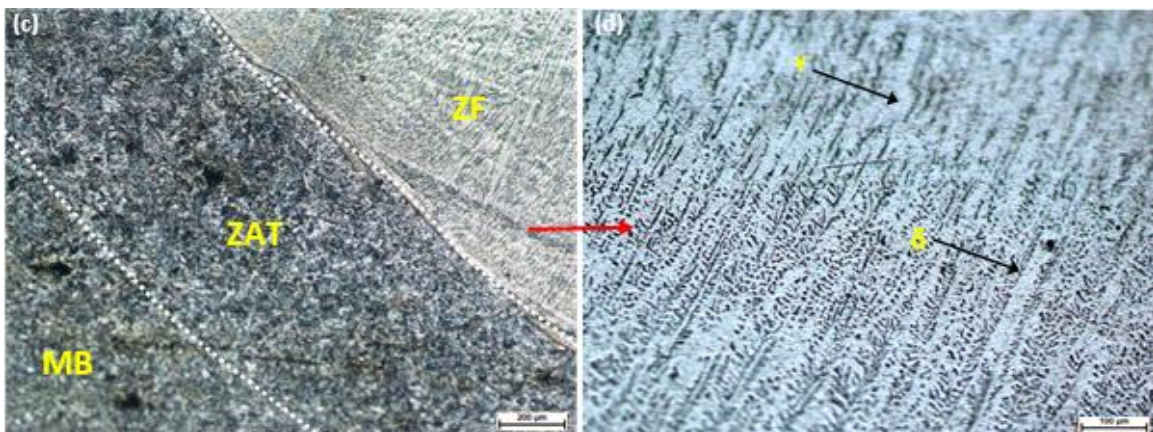


Figure V.2: Microstructure du métal de base S235JR.

E308



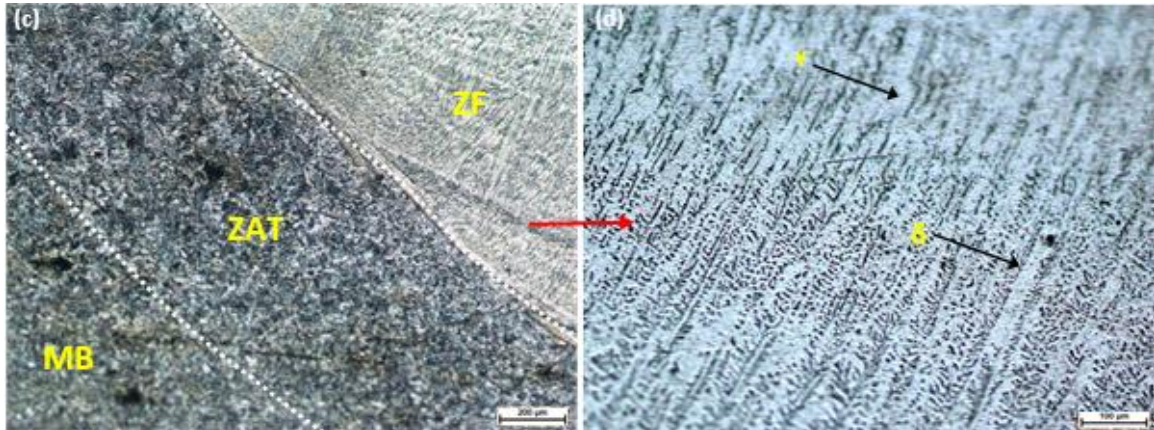
E7018

Figure V.3.Micrographie de la ZF et de la ZAT

Les microstructures de la zone fondue des deux soudures sont illustrées à la Fig V.3. La zone fondue E7018 est constituée de la perlite plus des différentes morphologies de ferrite, notamment la ferrite polygonale α_P (pro eutectoid), la ferrite aciculaire α_A , la ferrite Widmanstätten α_W et la ferrite inter granulaire α_I .

La zone fondue E308 est constituée d'une structure biphasée, tel que des lames de ferrite delta δ baignent dans la matrice austénitique γ .

V.2. Résultats des caractérisations mécaniques

L'étude microstructurale n'est pas suffisante pour décider de la qualité du joint soudé, pour la compléter, une caractérisation mécanique est nécessaire. Cette caractérisation consiste à la réalisation de plusieurs essais mécaniques (dureté, traction, et résilience).

V.2.1. Essai de traction

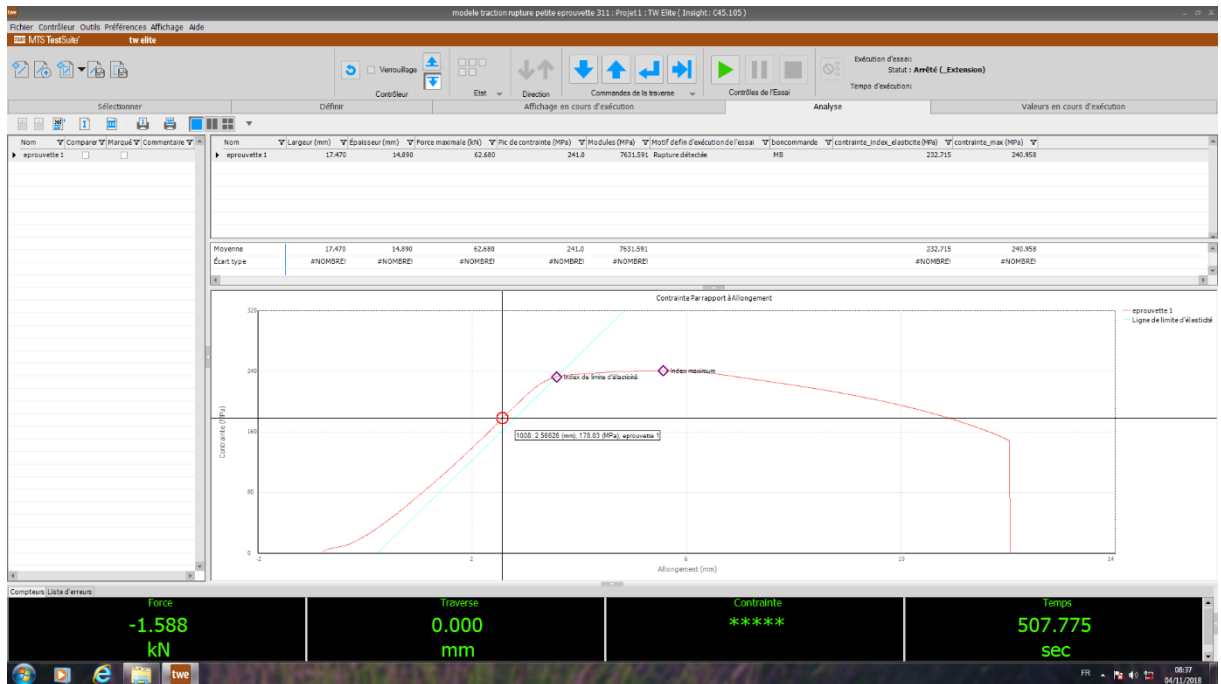
La résistance à la traction R_m (N/mm² ou MPa) correspondant au point maximum d'une courbe de traction simple conventionnelle est calculée comme suit :

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad \text{avec : - } R_m \text{ : résistance mécanique.}$$

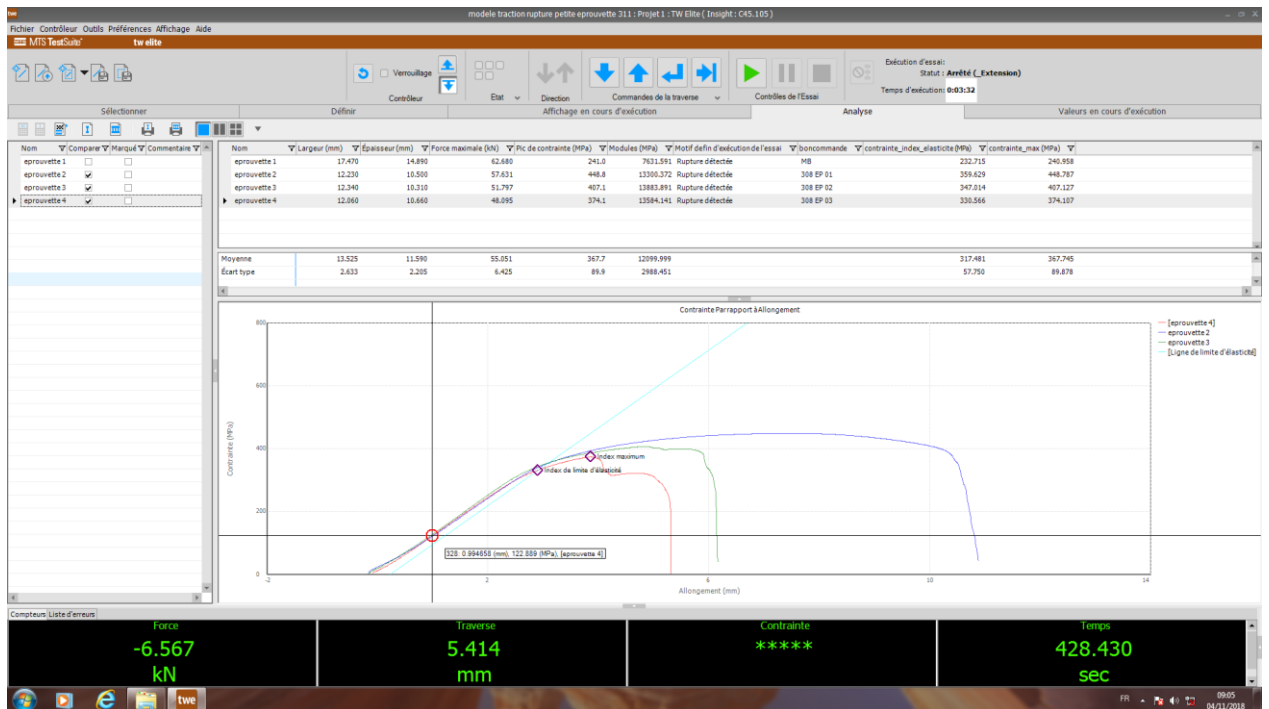
- F_m : force mécanique appliquée.

- S_0 : tronçon échantillon.

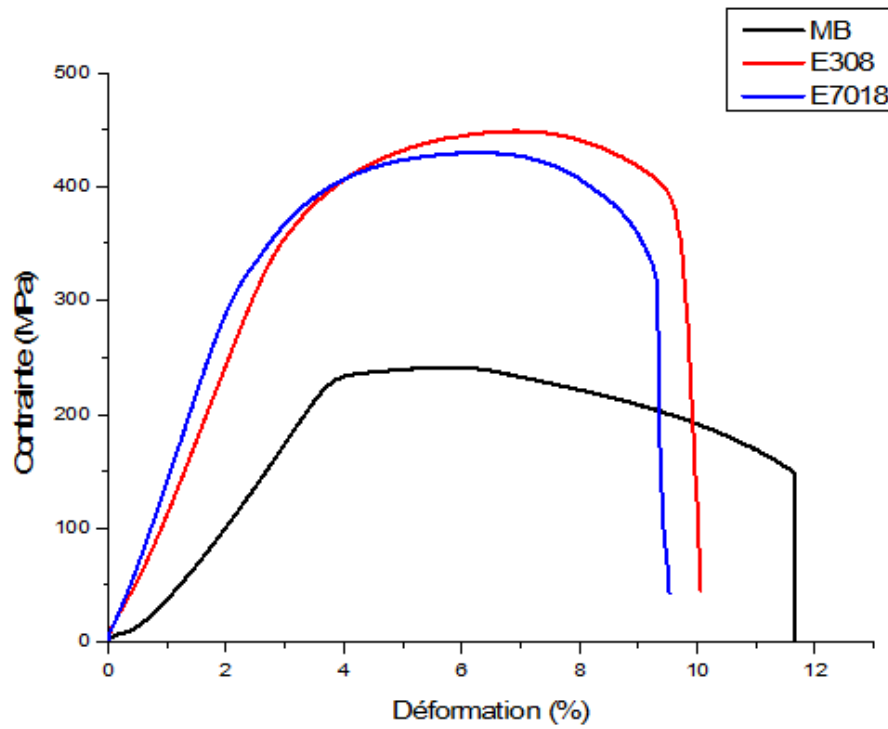
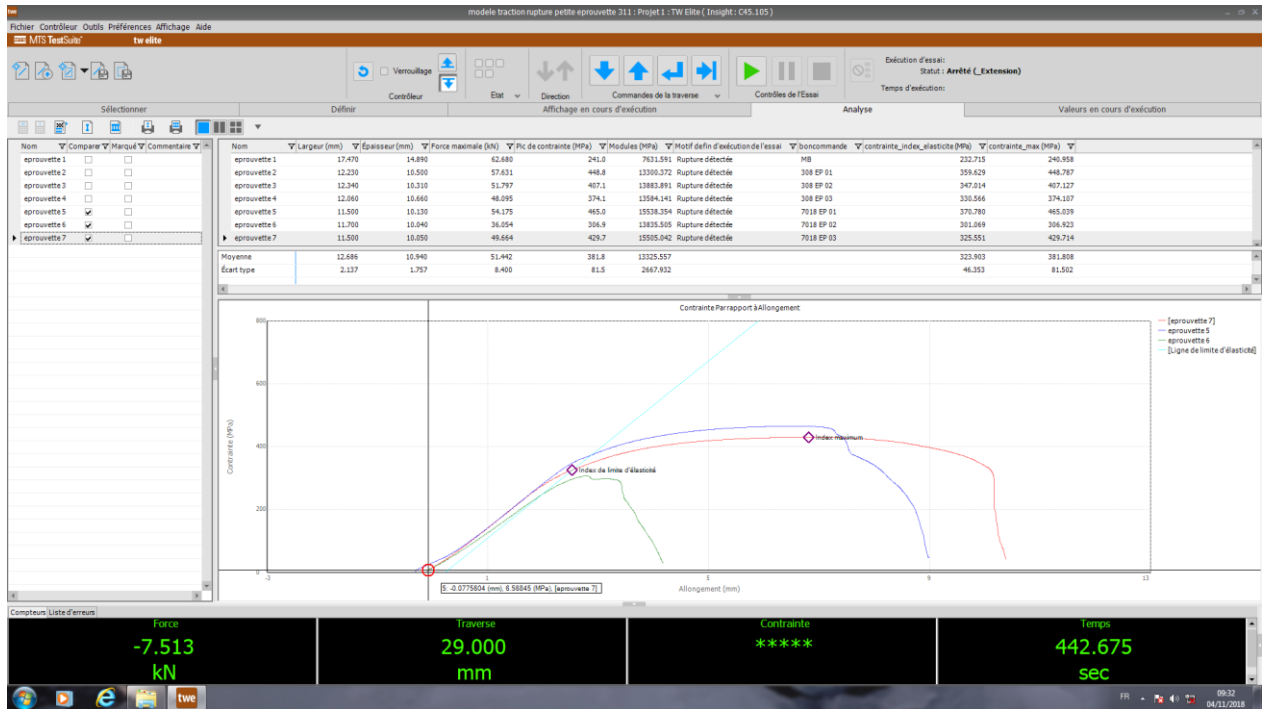
Les tests sont réalisés à température ambiante (20°C). La courbe ci-dessous représente les résultats des essais de traction pour les deux échantillons utilisés.



E308



E7018



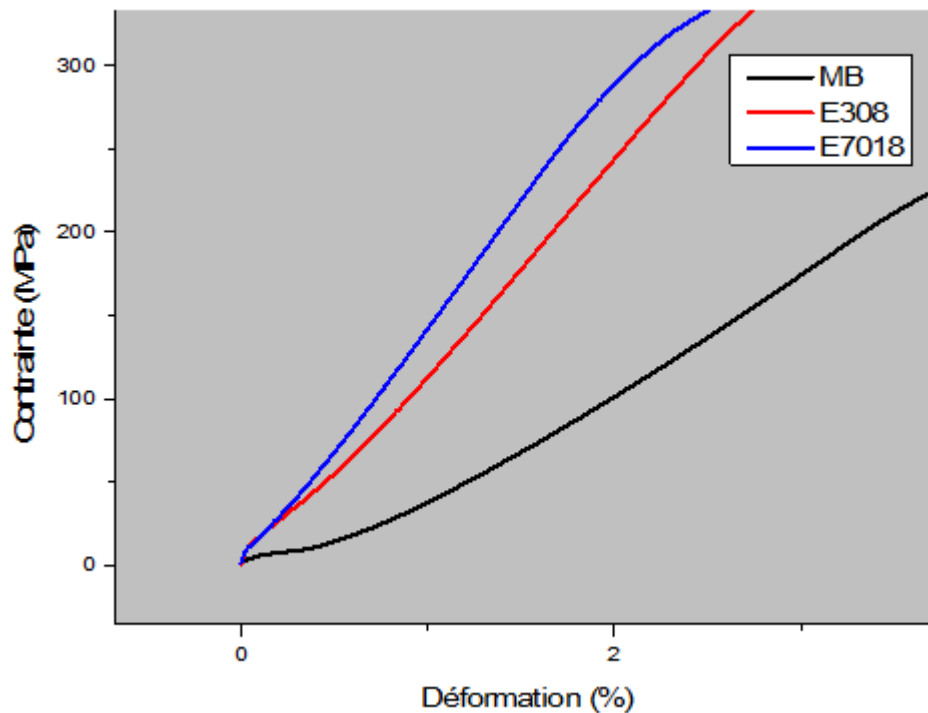


Figure V.4. Courbe de traction

Les figures de traction montrent bien que les courbes des éprouvettes comportent trois parties :

- Une phase initiale linéaire qui reflète le comportement élastique du matériau.
- Puis une partie non linéaire de pente plus faible qui traduit la phase plastique homogène,
- Enfin une décroissance de l'effort au-delà du maximum, qui résulte l'instabilité plastique où la striction apparaît et la rupture de l'éprouvette se produit.

Les résultats illustrés par les courbes montrent bien que l'opération de soudage et le choix du métal d'apport ont été favorables, puisqu'on remarque que les valeurs de la charge à la rupture n'ont pas connu de grandes différences.

Pour les éprouvettes du métal de base la norme utilisée par l'entreprise n'exige que la limite élastique conventionnelle soit $Re0.2$.

De ce fait on peut déjà dire que nos essais sur le métal de base sont conformes aux normes et aux données du fournisseur et que le métal de base est fiable techniquement et industriellement.

Au niveau des éprouvettes soudées, on remarque que la rupture se fait sur le métal de base ce qui confirme la rigidité du cordon de soudure.

La forme de la courbe de traction sur l'éprouvette soudée, est due aux hétérogénéités que représentent le MB, la ZAT et le ZF.

D'après les résultats, la limite élastique de l'acier S235 est relativement acceptable,

la résistance à la rupture est présente des valeurs proches pour les deux types de métal d'apport, l'allongement maximal est considérable, ce qui nous permet de dire que cet acier est rigide et résistant à la rupture.

V.2.2. Essai de résilience

Le tableau ci-dessous représente les résultats de l'essai de résilience, alors que la figure 4.18 illustre ces résultats sous forme d'histogramme

Tableau V.1: Résultats de l'essai de résilience

S235JR	E308	E7018
14.4 (J)	123.3 (J)	186.3 (J)

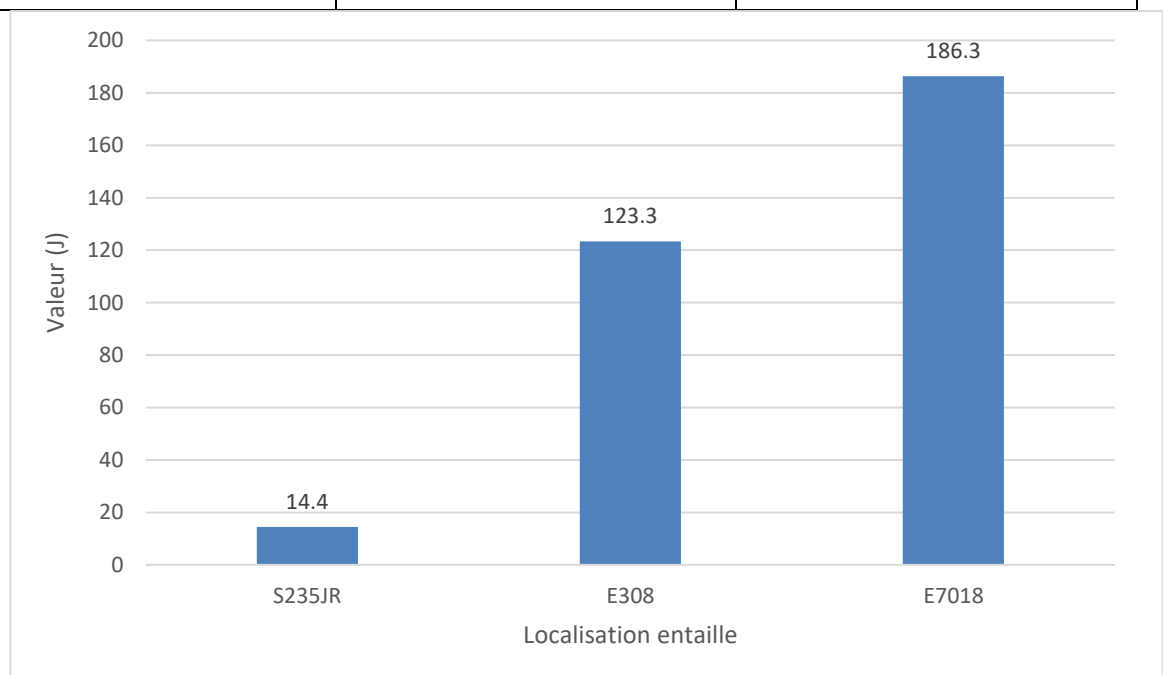


Figure V.5. L'histogramme des résultats de l'essai de résilience

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).

Les résultats de l'essai de résilience, effectué sur des éprouvettes entaillées en V au milieu du joint soudée avec E308, montrent une moyenne de KCV $\square\square$ 123,3 j/cm² largement supérieur à celle soudée avec E 7018 (KCV $\square\square$ 186.3 j/cm²). Nous pouvons dire que le joint soudé avec E7018 demande beaucoup plus d'énergie pour la rupture de l'éprouvette. Cette différence au niveau de la résilience est due probablement à la microstructure à grains très fins du joint de soudure avec E7018 .

Par contre la microstructure du joint de soudure à l'électrode E 308, présente une microstructure à forte porosités qui fragilise la liaison métallique. Sachant que le silicium qui rentre dans la composition chimique des électrodes E308 et E 7018 est de 0,9% et 0,45%

respectivement, est un élément qui diminue la résistance à la fissuration du joint de soudure.

Nous remarquons que le joint soudé avec E 308 présente une résilience faible, cela signifie que cette dernière engendre une dureté élevée par rapport au joint soudé avec E7018.

V.2.3. Essai de micro dureté

La figure V.6.représente les points où la dureté a été mesurée.

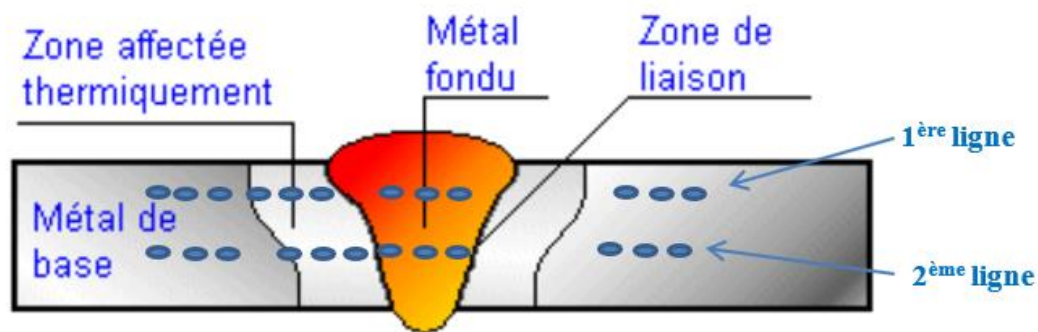


Figure V.6.Schématique des points de dureté.

Tableau V.2.Valeurs de dureté dans les différentes zones

E308	MB	MB	MB	ZF	ZF	ZF	ZAT	ZAT	ZAT	MB	MB	MB
1ème	173.7	174.4	178.7	134.4	133.7	134.5	160.3	167.3	168.1	174.4	179.7	182.8
2eme	175.1	177	174.9	135.4	128.4	134.2	193.2	198.6	209.6	176.3	189.6	187.5
7018	MB	MB	MB	ZAT	ZAT	ZAT	ZF	ZF	ZF	MB	MB	MB
1ème	186.4	182.7	181	141.9	132	138	180.1	185.1	187.3	186.1	185.5	181.6
2eme	173.2	178.2	163.1	129.3	123.6	121.3	160	160	157.1	178	168.4	164.5

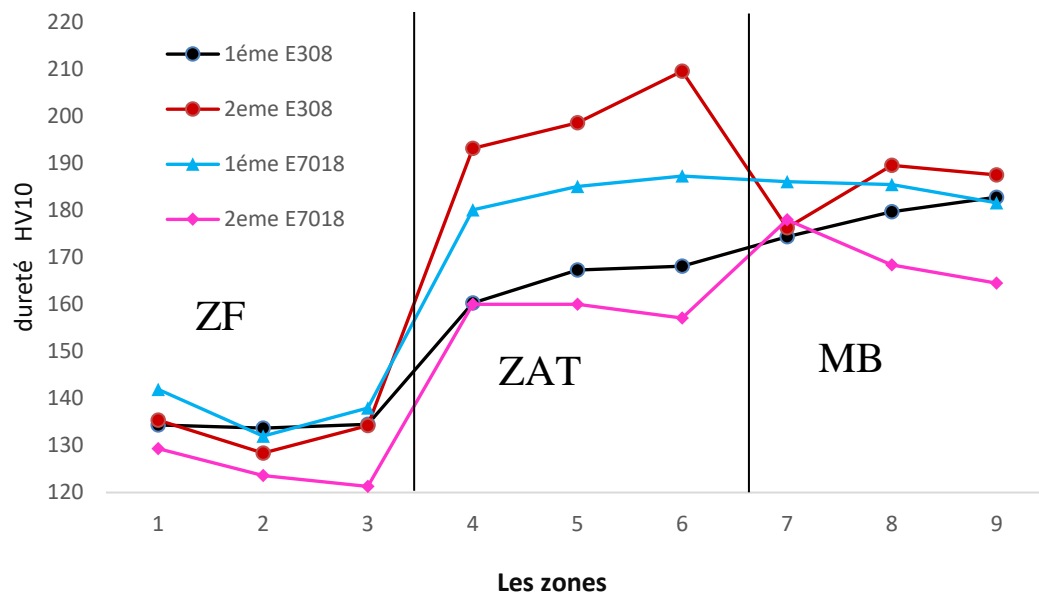


Figure V.7. Les courbes de dureté

On remarque que la dureté mesurée dans la ZAT est plus élevée que dans la zone fondue et dans le métal de base. Cette différence de la dureté entre les zones est proportionnelle au taux de précipitation des différentes phases intermétalliques dures et fragiles (en particulier la phase sigma). Le taux de la phase sigma étant beaucoup plus élevé dans la zone affectée thermiquement à cause des cycles thermiques appliqués dans cette zone. Le cycle thermique de chacune des sept passes affecte thermiquement le métal déposé de la passe elle-même et partiellement le métal déjà déposé lors des passes précédentes provoquant des transformations thermiques qui vont adoucir les différentes structures existantes dans la zone fondue. Les valeurs du 1^{er} profil sont plus élevées que celles du 2^{ème} profil à cause des cycles thermiques provoqués par le transfert de chaleur de la ZF vers la ZAT, ce dernier va minimiser la formation des phases intermétalliques. La différence de dureté entre la ZAT du profil 1 et celle du profil 2 peut être expliquée par le fait que la taille des grains dans la partie supérieure de la soudure est moins importante et donc on a une chute de dureté. La phase sigma est moyenne dans le métal de base car cette zone n'est pas affectée par les cycles thermiques des différentes passes de ce fait la dureté du métal est moyenne.

Conclusion générale

Le travail présenté dans cette mémoire traite, sous différents aspects, les microstructures existantes dans les différentes zones de la soudure de l'acier S235JR, soudé avec deux types de métal d'apport E7018 et E308.

Dans ce cadre, deux techniques de caractérisations ont été effectuées au cordon de soudure pour atteindre les objectifs visés :

l'un c'est la caractérisation structurale et l'autre est la caractérisation mécanique. L'analyse des résultats expérimentaux permet de faire certains commentaires dont les principaux sont énoncés ci-après.

La caractérisation structurale nous a permis de mener à bien l'étude de cette soudure. On a pu grâce à l'examen macrographique observer l'hétérogénéité dans le joint soudé et mettre ainsi en évidence les différentes zones qui le constituent. L'examen micrographique nous a dévoilé la structure métallurgique de la zone fondue, la zone affectée thermiquement et le matériau de base, ce qui nous a permis d'observer les phases présentes et d'apprécier la taille des grains. Les images prises par microscope électronique nous ont confirmé ces résultats.

La caractérisation mécanique nous a permis de connaître un peu mieux la qualité du joint de soudure en effectuant des essais mécaniques non destructif sur ce joint (dureté, résilience, et traction).

Ces différentes caractérisations nous ont permis de mettre en évidence différents points :

- Les cycles thermiques issus des différentes passes de soudure affectent les microstructures des différentes zones du matériau et provoquent la précipitation des phases intermétalliques.

- L'effet thermique de chaque passe de soudure influe sur la microstructure de chaque zone en fonction de la situation de cette zone par rapport à ce cordon de soudure, les effets qui ont été remarqué lors de notre étude sont :

Grossissement des grains ferrite au niveau de la zone affectée thermiquement et augmentation du taux de ferrite.

L'augmentation de la température qui mène à un domaine de précipitation de la phase intermétallique sigma dans la zone affectée thermiquement et la zone fondue.

- La précipitation de la phase sigma dans la zone affectée thermiquement provoque une augmentation de la dureté ainsi que la micro-dureté par rapport à la zone fondue et au métal de base.

La qualité d'une soudure dépend certainement du bon déroulement de l'opération de soudage, mais on n'aura aucune certitude sur l'état de la soudure si celle-ci n'est pas certifiée par un contrôle fiable et sûr. Les défauts de soudage probables sont nombreux, mais aussi les procédés de contrôle sont multiples, et avec des techniques différentes. Mais le plus difficile est la détection des fissures dans une soudure.

La fiabilité d'une structure soudée dépend de plusieurs facteurs :

- Le choix d'un métal de base avec des caractéristiques répondant aux exigences d'une telle construction, une limite élastique élevée et une bonne résistance à la rupture fragile.

- Un choix convenable de tous les paramètres de soudage.

- Une préparation judicieuse des pièces à assembler.

- Le choix d'un métal d'apport qui permet de donner au cordon la composition désirée, avec d'excellentes qualités mécaniques de résistance au choc et aux déformations.

Référence

- [1] Marouf, H. (2012). Caractérisation structurale et mécanique du joint soudé de la liaison bimétallique Acier Ordinaire E36/Acier anti-usure NAXTRA70 utilisé par l'Unité Grue de Bejaïa dans l'assemblage de la pelle chargeuse et godet d'excavation (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [2] Quelle différence entre le fer, la fonte et l'acier ? (<https://www.futura-sciences.com/sciences/questions-reponses/physique-difference-fer-fonte-acier-6983/>)
- [3] ACHOURI, A. Caractérisations mécaniques et structurelles d'un acier de construction des pipelines (API 5L X60).
- [4] Matériaux et traitements (partie 1) document élaboré par : NicaDorina, Royaume du Maroc.
- [5] Bachir MEZRAG, Etude de l'influence des paramètres de soudage sur la microstructure et le comportement mécanique des assemblages acier-aluminium obtenus par soudage à l'arc MIG-CMT, Thèse de doctorat, 10 septembre 2015.
- [6] www.chez.com/soudage2000
- [7] Opérations de soudage à l'arc. Guide pratique de ventilation n° 7. Editions 1996
- [8] Soudage à l'arc, C.E.R. ENSAM Angers-Laboratoire Industriel de Déformation Plastique www.angers.ensam.fr.
- [9] Le soudage manuel à l'arc avec électrodes enrobées. Fiche pratique de sécurité ED 83. INRS, 1999.
- [10] Thaon I, Guillemain M, Gonzalez M, Cantineau A. Risques toxiques et pathologies professionnelles liés au soudage métallique. Encycl. Méd. Chir.
- [11] Druil M, Henni A, Heugel M, Martin C, Simon C. Les différents procédés manuels de soudage, leurs risques et leur prévention, 2003.
- [12] Le Guen, E. (2010). Etude du procédé de soudage hybride laser/MAG: Caractérisation de la géométrie et de l'hydrodynamique du bain de fusion et développement d'un modèle 3D thermique (Doctoral dissertation, Université de Bretagne Sud).
- [13] https://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/K356-2/SUBARC_WELDING-fr.pdf
- [14] <https://www.rocdacier.com/soudage-faisceau-delectrons/>
- [15] <https://www.rocdacier.com/le-soudage-laser/>
- [16] <http://www.sdservice.fr/Recapitulatif-procedes-soudage.pdf>

- [17] <https://multiprevention.org/wp-content/uploads/2018/11/guide-multipreventionsoudage-coupage.pdf>
- [18] https://www.bilibs.be/sites/default/files/publicaties/metallerie.fr/201104_special_soudage_148f09_le_soudage_par_friction_un_procede_de_soudage_multiple_et_innovateur.pdf
- [19] Hamouche, M. (2015). Etude de l'application des essais destructifs et non destructifs sur un acier destiné à la fabrication des pipelines en API 5L X60M (Doctoral dissertation).
- [20] Khiat, P. D., Zohra, E. D. Z. F., & Ramdane, E. P. Z. Modélisation par éléments finis des polymères HDPE.
- [21] BOUZIDI, M. A. D., HASNAOUI, A., & BELHADJ, A. (2017). Etude des propriétés mécaniques des aciers type: x2 CR Ni Mo 17-12-2 ET X5 Cr Ni 18-10.
- [22] Elouaer, A. (2011). Contribution à la compréhension et à la modélisation du comportement mécanique de matériaux composites à renfort en fibres végétales (Doctoral dissertation, Reims).
- [23] Erzar, B. (2010). Ecaillage, cratérisation et comportement en traction dynamique de bétons sous impact: approches expérimentales et modélisation (Doctoral dissertation, Université de Metz).
- [24] Fathi, E. R., & Boudjellal, H. (2020). Élaboration et caractérisation d'un matériau composite à base d'une résine thermodurcissables renforcé par la sciure de bois (Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA).
- [25] Laadjel, S. (2006). Caractérisation microstructurale et mécanique de la soudure hétérogène des aciers inoxydables: Duplex-Austenitique (Doctoral dissertation).
- [26] Zieba, S. (2009). Contribution à la résilience d'un système coopératif Homme-robot par une gestion de l'autonomie ajustable (Doctoral dissertation, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis).
- [27] KUETE, D. C., ANAGO, G. F., TOUKOUROU, A. C., QUENUM, A., & CHITOU, N. (2019). Conception et réalisation d'une machine d'essai de traction, compression et flexion semi-automatique.
- [28] DEBABI, A. (2018). Etude des caractéristiques mécaniques d'un joint de soudure après application d'un traitement thermique (Doctoral dissertation, Université Mohamed Boudiaf-M'sila).
- [29] ABDELDJALIL, S., & Nabil, R. (2013). Comportement au choc des stratifiées composites renforcées par des fibres naturelles (Fibre de Cactus) (Doctoral dissertation).

- [30] Haydon, B., Eng, P., & Groupe, C. S. A. (2013). Les nanomatériaux et leur utilisation dans les textiles, normes: normalisation interne pour les fabricants et les importateurs canadiens et développements internationaux en matière de normalisation. Industrie Canada.
- [31] Tavassoli, A. A. (1986). Effect of weak irradiation dose on resiliency characteristics of austenitic steels (No. CEA-DMECN-SRMA--86-1547). CEA Centre d'Etudes Nucleaires de Saclay.
- [32] Elouaer, A. (2011). Contribution à la compréhension et à la modélisation du comportement mécanique de matériaux composites à renfort en fibres végétales (Doctoral dissertation, Reims).
- [33] Mécanique de la rupture les essais et leurs significations, Ecole des mines, Nancy, Éditions 1988.
- [34] H. Bückle la machine outil française, 206,125-147,1965.
- [35] A.Iost, R. Bigot, L. Boudreau, matériaux et techniques, l'essai de dureté Vickers : applications et influence de la charge.77-79, 1995.
- [36] R. Abdelouahab, S. Azzedine. Mémoire de MASTER II. Université de Béjaia (2019).
- [37] [Http://Fr.Wikipedia.Org/wiki/Duret%C3%A9_mat%C3%A9rielle](http://Fr.Wikipedia.Org/wiki/Duret%C3%A9_mat%C3%A9rielle) 029, Catégories: Science des matériaux • Métallurgie • Essai mécanique.
- [38] M. GRUMBACH et al, Mitaux, Corrosion, Industrie, 58, 690, 69-74,1983.
- [39] M. GRUMBACH, "Les essais de dureté" dans Propriétés d'emploi des aciers. Etudes de bases. C. I. OTUA., 1977.
- [40] C.TOURNIER, Traitement Thermique, 246, 57-60, 1991.
- [41] Jacquet, M. A. (1945). Contribution à l'examen micrographique du cuivre-Mise en évidence des inclusions, de l'érouissage, de la recristallisation et des microfissures. Revue de Métallurgie, 42(5), 133-148.